



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARÍLIA NEVES MARINHO

**EXPERIMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO DA INFILTRAÇÃO DA ÁGUA PLUVIAL EM
UM PAVIMENTO PERMEÁVEL**

Recife

2018

MARÍLIA NEVES MARINHO

**EXPERIMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO DA INFILTRAÇÃO DA ÁGUA PLUVIAL EM
UM PAVIMENTO PERMEÁVEL**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Coorientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho.

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

- M338e Marinho, Marília Neves.
Experimentação e simulação da infiltração da água pluvial em um pavimento permeável / - 2018.
128 folhas, il., abr., sigl. e símb.
- Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.
Coorientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho.
- Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências.
1. Engenharia Civil. 2. Drenagem urbana. 3. Caracterização hidrodinâmica.
4. Método Beerkan. 5. Hydrus 1D. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira (Orientador).
II. Coutinho, Arthur Paiva (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-037

MARÍLIA NEVES MARINHO

**EXPERIMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO DA INFILTRAÇÃO DA ÁGUA PLUVIAL EM
UM PAVIMENTO PERMEÁVEL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Aprovada em: 30 de agosto de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco/PPGEC

Prof^o. Dr. Artur Paiva Coutinho (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco/PPGEC

Prof^o. Dr. Edevaldo Miguel Alves (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Paulo Frassinete de Araújo Filho (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Rodrigo Lustosa Peronico (Examinador Externo)
Instituto Federal de Alagoas

Prof.^a Dr. Tássia dos Anjos Tenório de Melo (Examinadora Externa)
Universidade Federal da Paraíba

Aos meus pais, Moacir e Conceição.
Aos meus avós (*in memoriam*), Leão e Estelita, Jordi e Ana.

AGRADECIMENTOS

Mesmo correndo o risco de esquecer alguns nomes, gostaria de externar os meus mais sinceros agradecimentos, pois a amizade, o apoio e a ajuda de muitas pessoas contribuíram para a realização deste trabalho.

Primeiramente e em tudo que me acontece, a Deus, por presentear-me diariamente com saúde, amor, força, fé, perseverança, realizações e alegrias... É Ele quem me conduz e ilumina!!

Aos meus pais, Moacir e Conceição, pela minha formação e valores. Por todo amor que recebo e porque são meus exemplos de coragem, superação, honestidade, integridade, generosidade e determinação. Vocês são meu orgulho, minha base forte, a quem devo todas as minhas conquistas!!

Aos meus irmãos (que tanto amo e admiro!), Magaly e Moacir, e sobrinha Marcela, pelo amor, apoio, compreensão e incentivos em todos os momentos de minha vida... As minhas tias, Bernadete (essencial no início da minha carreira profissional), Alba e Anamaria e aos meus primos queridos, sei o quanto torcem por mim.

Ao meu namorado, Plínio Menezes, pela admiração e paciência. Mesmo à distância, diante de tantas dificuldades enfrentadas, soube me acalmar e incentivar para seguir adiante.

Ao Prof. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro, orientador, pelo apoio e palavras de encorajamento e incentivo. Pela amizade e confiança desenvolvidas ao longo do Mestrado que se mantiveram durante o desenvolvimento deste Doutorado. Apesar de tantos percalços... Pelos momentos de descontração e atenção com que sempre me recebeu. Por ter estado continuamente ao meu lado!

Ao Prof. Artur Paiva Coutinho, coorientador, pela oportunidade quando tudo parecia estar perdido. Pela paciência e por ter “aberto o caminho” para que eu me desenvolvesse em uma nova área, um tema tão gratificante! Apesar de todas as dificuldades enfrentadas ao longo deste trabalho, em momento algum me arrependi desta escolha e de poder participar de um grupo tão acolhedor e disposto a ajudar. Pela amizade que nasceu no decorrer deste estudo.

A ambos por, apesar de saberem do curtíssimo tempo que eu dispunha e que estava trabalhando em outra cidade e não poderia dedicar-me exclusivamente ao Doutorado com a “doação” que um trabalho acadêmico deste nível requer, me acolherem de braços abertos. Por termos chegado juntos à conclusão desta pesquisa.

Aos Profs. da banca avaliadora, Edevaldo Miguel Alves (Campus Agreste/UFPE), Leidjane Maria Maciel de Oliveira (CTG /UFPE), Paulo Frassinete de Araújo Filho (CTG/UFPE), Tássia dos Anjos Tenório de Melo (Campus II – Areia/ IFPB) e Rodrigo Lustosa (IFAL/Palmeira dos Índios) pelas importantes observações e sugestões para a melhoria desta tese.

Ao amigo, Prof. Charlie Salvador (UFPB), pelos incontáveis conselhos e contribuições em diferentes e importantes momentos da minha vida acadêmica e profissional.

À Universidade Federal de Pernambuco, pela oportunidade de realização deste Doutorado. Sinto-me privilegiada num país onde o acesso à educação de qualidade infelizmente ainda é restrito a poucos.

À Silmara Melo (Superintendente de Infraestrutura/UFPE) e ao Prof. Ivan Melo, que me acolheram tão bem num momento de mudança no trabalho. Pela compreensão, paciência e apoio indispensáveis para a conclusão deste trabalho. Confirmando o compromisso da Instituição com a educação e formação continuada.

Às amigas, Cristina Lima, Suelene Ribeiro e Carmen Souza que sempre me apoiaram e torceram por mim. Pela paciência e acolhida, principalmente nos momentos mais difíceis...

Às secretárias do PPGEC/UFPE, Andréa Negromonte, Cacau Pereira e Cleide, pela amizade, ajudas, confiança e risadas compartilhadas, pelas palavras de apoio nos momentos de aflição.

Aos alunos, professores e técnicos do Campus Agreste/UFPE que sempre torceram por mim.

Aos alunos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear e em Engenharia Civil da UFPE, em especial a Severino Neto, Ana Emília e Paulo, que muito me ajudaram com a realização dos ensaios de campo e as dicas nos ensaios de laboratório. Às Larissas Fernandes e Ribas, Bruno Ursulino, Rosário, Victor Hugo, Guilherme Teotônio, Kevin Lucena, Venâncio, Thiago Campos, Hugo César, Rubens Correia, José Neto, Lucas Ravellys, todos são partes importantíssimas nessa conquista! A companhia de vocês disfarçou as dificuldades e proporcionou momentos de descontração e uma grata convivência.

Ao técnico Maurício Ferreira do Laboratório de Física dos Solos, Departamento de Engenharia Nuclear da UFPE, pelo inegável esforço e ajuda para a realização dos ensaios.

Ao Diretor do Centro de Ciências Jurídicas da UFPE, Prof. Dr. Francisco de Queiroz, por permitir a realização dos ensaios de campo.

Por fim, a todos aqueles que mesmo não tendo sido diretamente citados aqui, estando próximos ou distantes, me apoiaram e ficaram felizes por esta minha conquista.

RESUMO

Devido à ocupação desordenada e à deficiência de planejamento ambiental nos centros urbanos que causam a impermeabilização do solo e, também, à ausência de investimentos e manutenção nos sistemas de drenagem, os alagamentos decorrentes das precipitações pluviométricas tornam-se cada vez mais frequentes e trazem sérios transtornos à população. Em cidades densamente povoadas, urbanizadas e planas como é o caso de Recife – PE, os pavimentos permeáveis podem ser uma alternativa para a redução do volume de escoamento superficial, melhoria da qualidade da água e recarga dos aquíferos; integrando-se facilmente ao ambiente e a outras técnicas de drenagem urbana sustentável. Visando dar uma contribuição neste sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar a hidrodinâmica de um pavimento permeável (PP) de blocos vazados de concreto implantado em estacionamento da Faculdade de Direito da Universidade Federal de Pernambuco. A capacidade de infiltração foi analisada em escala real através do método Beerkan, utilizando o algoritmo BEST Slope e Intercept e a modelagem numérica com o Hydrus-1D, a fim de prever o cenário de funcionamento do dispositivo. Para isto, realizaram-se análises espaciais em doze pontos do PP com solos de três diferentes classes texturais (arenoso, franco arenoso e areia franca). Foram obtidos os parâmetros de forma, relacionados à textura do solo, e de normalização, que dependem da estrutura do solo. Com o conhecimento das curvas de retenção da água $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica do solo $K(\theta)$, foi possível simular a modelagem do movimento da água pelo PP e verificar a capacidade máxima de retenção do fluxo hidráulico. Os resultados obtidos para condutividade hidráulica saturada (K_s), através dos métodos BEST Slope e Intercept, classificam hidrologicamente o PP no Grupo A, caracterizado por baixo escoamento superficial e alta infiltração; médio grau de permeabilidade (GP). A caracterização hidrodinâmica pelos métodos Bagarello e Wu, confirmam a classificação hidrológica do PP. Com relação ao GP, pelo método Bagarello, apenas os pontos 3 e 10 possuem médio GP, os demais pontos avaliados possuem alto GP. Pelo método Wu, os pontos 3, 6 e 10 possuem médio GP, os demais são considerados com alto GP. O ponto 7 não se enquadrou dentro dos critérios de análise nem para os métodos BEST (Slope e Intercept) nem para os métodos Bagarello e Wu. O ponto 1 não apresentou convergência numérica com os métodos Bagarello e Wu. Os resultados obtidos neste estudo demonstram satisfatoriamente a eficiência hidrodinâmica do PP para o amortecimento da vazão afluente. Os métodos Beerkan, Bagarello e Wu, utilizados conjuntamente com a modelagem do Hydrus 1D, produziram de

forma rápida, precisa e a um baixo custo um conjunto importante de dados para caracterizar hidrodinamicamente o PP.

Palavras-chave: Drenagem urbana. Caracterização hidrodinâmica. Método Beerkan. Hydrus 1D.

ABSTRACT

Due the disordered occupation and the lack of environmental planning in urban areas that cause soil sealing, as well as the lack of investments and maintenance in drainage systems, floods due to rainfall become more often and bring serious disturbances to the population. In densely populated, urbanized and flat cities such as Recife - PE, permeable pavements can come as an alternative for the reduce of the surface runoff volume, the improvement of water quality and the aquifers recharging; which easily integrates to the environment and other sustainable urban drainage techniques. In order to give a contribution in this sense, the present study had the goal of evaluating the hydrodynamics of a permeable pavement (PP) of cast concrete blocks implanted at a parking lot of the Law School of the Federal University of Pernambuco. The infiltration capacity was analyzed in real scale through the Beerkan Method, using the BEST Slope and Intercept algorithm and a numerical modeling with Hydrus 1D, in order to predict the device operating scenario. For this, spatial analyzes were carried out with soils of three different textural classes (sandy, sandy loam and free sand) at twelve points of the PP. The shape parameters, which depend on the soil texture, related to soil texture and normalization were obtained. Knowing the water retention curves $\theta(h)$ and the hydraulic conductivity of the soil $K(\theta)$, it was possible to simulate the water movement modeling by the PP and verify the maximum hydraulic flow retention capacity. The results for saturated hydraulic conductivity (K_s), through the BEST Slope and Intercept methods, hydrologically classify PP in Group A, characterized by low surface runoff and high infiltration; medium degree of permeability (GP). The hydrodynamic characterization by the Bagarello and Wu methods confirms the hydrological classification of PP. Concerning to GP, by the Bagarello method, only points 3 and 10 have a mean GP, the other evaluated points have high GP. By the Wu method, points 3, 6 and 10 have medium GP, and the others are considered as high GP. Point 7 did not fit into the analysis criteria neither for the BEST methods (Slope and Intercept) either for the Bagarello and Wu methods. Point 1 did not show numerical convergence with the Bagarello and Wu methods. The results obtained in this study demonstrate satisfactorily the hydrodynamic efficiency of the PP for the affluent flow damping. The Beerkan, Bagarello and Wu methods, used in conjunction with the Hydrus 1D, quickly, accurately and inexpensively produced an important data set to characterize PP hydrodynamically.

Keywords: Urban drainage. Hydrodynamic characterization. Beerkan Method. Hydrus 1D.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

GRÁFICO 1 -	Volume escoado em função da urbanização.....	25
GRÁFICO 2 -	Coefficiente de Runnof x Porcentagem impermeável.....	27
QUADRO 1 -	Tipologia de técnicas compensatórias para manejo de águas pluviais.....	32
FIGURA 1 -	Classificação dos pavimentos permeáveis quanto à infiltração.....	37
FOTOGRAFIA 1 -	Tipos de revestimento para pavimento permeável: (a) concreto asfáltico poroso; (b) concreto poroso; (c) blocos vazados de concreto; (d) blocos intertravados de concreto; (e) blocos articulados de concreto.....	38
GRÁFICO 3 -	Comparativo entre o total de escoamento e infiltração em diferentes tipos de pavimento, baseado nos estudos do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.....	44
FIGURA 2 -	Triângulo de classificação de textura do solo.....	54
MAPA 1 -	Foto de satélite da microrregião de Recife onde foram realizados os ensaios de campo.....	62
GRÁFICO 4 -	Precipitação média mensal e total anual de Recife entre os anos de 2010 a 2017, Estação Várzea.....	63
FIGURA 3 -	Estrutura do pavimento estudado.....	64
MAPA 2 -	(a) Mapa e (b) croqui ilustrativo do local e dos 12 pontos avaliados no estudo.....	65
FOTOGRAFIA 2 -	(a) Anel de infiltração simples com diâmetro 100 cm; (b) locação dos anéis no pavimento permeável.....	67
FOTOGRAFIA 3 -	Vedação entre o infiltrômetro e o pavimento com betonita.....	68
FOTOGRAFIA 4 -	(a) e (b) Coleta de amostras indeformadas.....	68
FOTOGRAFIA 5 -	(a) Coleta de amostra deformada; (b) coleta de solo para determinação granulométrica.....	69
FOTOGRAFIA 6 -	Ensaio de infiltração.....	69
FOTOGRAFIA 7 -	Amostra deformada do solo úmido.....	70
FOTOGRAFIA 8 -	(a) Ensaio de peneiramento e (b) sedimentação.....	70

GRÁFICO 5 -	Curvas granulométricas.....	71
FOTOGRAFIA 9 -	Secagem das amostras em estufa.....	72
FLUXOGRAMA 1 -	Fluxograma simplificado da metodologia Beerkan.....	73
QUADRO 2 -	Método W2 e Bagarello.....	79
GRÁFICO 6 -	Lâmina Infiltrada acumulada (mm) em função do tempo (s) para 12 ensaios de infiltração num pavimento permeável.....	80
GRÁFICO 7 -	Taxa de infiltração real (mm/h) para o pavimento permeável..	83
FIGURA 4 -	Croqui da Área de Estudo.....	85
GRÁFICO 8 -	Curvas de infiltração x tempo com ajuste pelo método Bagarello <i>et al.</i> (2013).....	94
GRÁFICO 9 -	Curvas de infiltração x tempo ajustadas pelo método Wu 2 (1999).....	96
GRÁFICO 10 -	Box Plot relativo às condutividades hidráulicas saturadas obtidas dos métodos BEST Slope, BEST Intercept, Bagarello <i>et al.</i> (2013) e Wu <i>et al.</i> (1999).....	98
GRÁFICO 11 -	Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P1).....	99
GRÁFICO 12 -	Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P2).....	99
GRÁFICO 13 -	Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P3).....	100
GRÁFICO 14 -	Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P4).....	100
GRÁFICO 15 -	Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P5).....	100
GRÁFICO 16 -	Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P6).....	101
GRÁFICO 17 -	Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P8).....	101
GRÁFICO 18 -	Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P9).....	101
GRÁFICO 19 -	Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P10).....	102

GRÁFICO 20 -	Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P11).....	102
GRÁFICO 21 -	Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P12).....	102
GRÁFICO 22 -	Ajuste do Modelo de Distribuição dos Poros de Burdine para o Modelo de Distribuição dos Poros de Mualem.....	103
GRÁFICO 23 -	Análise de Sensibilidade da Malha: (a) Lâmina Escoadada Acumulada; (b) Lâmina Infiltrada Acumulada; (c) Lâmina Evaporada Acumulada; (d) Lâmina de Drenagem Acumulada; (e) Lâmina de Água Armazenada na Camada de Revestimento; (f) Fluxo de Drenagem na Camada Limite Espessa.....	105
GRÁFICO 24 -	Influência do parâmetro Θ_s para as variáveis analisadas: (a) Lâmina Escoadada Acumulada; (b) Lâmina Infiltrada Acumulada; (c) Lâmina Evaporada Acumulada; (d) Lâmina de Drenagem Acumulada; (e) Lâmina de Água Armazenada na Camada de Revestimento; (f) Fluxo de Drenagem na Camada Limite Espessa.....	106
GRÁFICO 25 -	Influência do parâmetro α no solo do PP para as variáveis analisadas: (a) Lâmina Escoadada Acumulada; (b) Lâmina Infiltrada Acumulada; (c) Lâmina Evaporada Acumulada; (d) Lâmina de Drenagem Acumulada; (e) Lâmina de Água Armazenada na Camada de Revestimento; (f) Fluxo de Drenagem na Camada Limite Espessa.....	107
GRÁFICO 26 -	Influência do parâmetro K_s no solo do PP para as variáveis analisadas: (a) Lâmina Escoadada Acumulada; (b) Lâmina Infiltrada Acumulada; (c) Lâmina Evaporada Acumulada; (d) Lâmina de Drenagem Acumulada; (e) Lâmina de Água Armazenada na Camada de Revestimento; (f) Fluxo de Drenagem na Camada Limite Espessa.....	108
GRÁFICO 27 -	Influência do parâmetro n no solo do PP para as variáveis analisadas: (a) Lâmina Escoadada Acumulada; (b) Lâmina Infiltrada Acumulada; (c) Lâmina Evaporada Acumulada; (d)	

	Lâmina de Drenagem Acumulada; (e) Lâmina de Água Armazenada na Camada de Revestimento; (f) Fluxo de Drenagem na Camada Limite Espessa.....	110
GRÁFICO 28 -	Simulação numérica dos processos de transferência de água no revestimento do pavimento permeável.....	112

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	Valores percentuais de impermeabilização do solo.....	27
TABELA 2 -	Faixas típicas de proporções de materiais em concreto permeável.....	41
TABELA 3 -	Valores acumulados de escoamento e infiltração de água em diferentes superfícies.....	44
TABELA 4 -	Levantamento da taxa de infiltração in situ em diferentes tipos de revestimentos permeáveis.....	45
TABELA 5 -	Classificação granulométrica, segundo a Sociedade Internacional de Ciência do Solo.....	54
TABELA 6 -	Classificação hidrológica do solo em função da condutividade hidráulica saturada.....	77
TABELA 7 -	Classificação dos solos quanto ao grau de permeabilidade.....	78
TABELA 8 -	Percentuais de Areia, Silte, Argila e Classificação Granulométrica do solo de preenchimento do pavimento permeável.....	81
TABELA 9 -	Percentuais de Areia, Silte, Argila e Classificação Granulométrica do solo de preenchimento do pavimento permeável.....	82
TABELA 10 -	Taxas de infiltração médias no pavimento permeável.....	84
TABELA 11 -	Parâmetros hidráulicos do PP: comparativo BEST Slope e BEST Intercept.....	89
TABELA 12 -	Condutividade hidráulica saturada obtida pelo método BEST Slope e BEST intercept, classificação hidrológica e grau de permeabilidade para camada de revestimento do pavimento permeável.....	91
TABELA 13 -	Condutividade hidráulica saturada, Classificação Hidrológica e Grau de Permeabilidade decorrentes da aplicação dos métodos propostos por Bagarello e Iovino (2003) e Wu <i>et al.</i> (1999).....	92
TABELA 14 -	Resumo estatístico das condutividades hidráulicas saturadas obtidas pelos métodos BEST Slope, BEST Intercept, Bagarello et al. (2013) e Wu <i>et al.</i> (1999).....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ACPA	Agência de Proteção Ambiental
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASTM	American Society of Testing and Materials
BEST	Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments
BMP	Best Management Practices
CCJ	Centro de Ciências Jurídicas da Universidade Federal de Pernambuco
CPA	Camada Porosa de Atrito
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco
DEN	Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco
EMLURB	Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana
EPA	The U.S. Environmental Protection Agency
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
GSA	Global Sensitivity Analysis - Análise de Sensibilidade Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISU	International Space University
LID	Low Impact Development
NBR	Norma Brasileira
NRCS	National Resources Conservation Service
NRMCA	National Ready Mixed Concrete Association
NSE	Nash–Sutcliffe Efficiency - Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
PA	Asfalto Poroso
PP	Pavimento permeável
PSO	Particle Swarm Optimization - Algoritmo metaheurístico de otimização por enxame de partículas

SIR	Surface Infiltration Rate
SUDs	Sustainable Urban Drainage Systems
SWMM	Storm Water Management Model - Modelo de Gerenciamento de Água de Tempestade
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USACE	U. S. Army Corps of Engineers
USDCM	Urban Storm Drainage Criteria Manual
WSUD	Water Sensitive Urban Design

LISTA DE SÍMBOLOS

AS	Coeficiente de Pearson
C(h)	Capacidade capilar
CMR	Coeficiente de massa residual
D	Diâmetro efetivo de uma partícula de solo
D(θ)	Difusividade
D _g	Parâmetro de escala do tamanho das partículas
d _g	Densidade global ou Densidade de um solo
d _p	Massa específica das partículas do solo ou Densidade das partículas do solo ou Densidade Real (g.cm ⁻³)
d _s	Massa específica do solo (g.cm ⁻³)
EM	Eficiência de modelagem
Fck	Resistência característica do concreto, aos 28 dias, aos esforços de compressão
F(D)	Distribuição do tamanho das partículas
GP	Grau de permeabilidade
GS	Grau de saturação (%)
H	Potencial matricial
h _g	Parâmetro de normalização (mm)
h(θ)	Curva de retenção da água no solo
I	Infiltração acumulada
I	Taxa de infiltração
i _f	Taxa de infiltração final
i _i	Taxa de infiltração inicial
K	Condutividade hidráulica do solo
K _s	Condutividade hidráulica saturada do solo
K	Permeabilidade intrínseca
K(θ)/K(h)	Condutividade hidráulica não saturada
M e N	Parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas
Md	Mediana
m _s	Massa da fração sólida do solo (g)
n e m	Parâmetros de forma da curva de retenção da água no solo h(θ)

(adimensional)

P	Parâmetro de tortuosidade
P	Precipitação pluviométrica (mm)
P_{atm}	Pressão atmosférica
R	Raio efetivo de um poro no solo
R^2	Coefficiente de determinação
RD	Razão de desvios
S	Desvio padrão
S	Sorvidade do solo
S_e	Saturação efetiva
V_a	Volume de armazenamento (m^3)
V_{esd}	Volume de escoamento superficial direto
V_g	Volume ocupado pelos gases (cm^3)
V_l	Volume ocupado pela água (cm^3)
V_p	Volume dos poros (cm^3)
V_s	Volume ocupado pelas partículas sólidas (cm^3)
V_t	Volume total da amostra ou Volume total do solo (cm^3)
W	Umidade gravimétrica
A	Parâmetros de retenção de água no solo
Φ	Porosidade total ou Porosidade de um solo (%)
Θ	Unidade volumétrica
θ_0	Unidade volumétrica inicial
θ_r	Umidade residual
θ_s	Umidade volumétrica na saturação
$\Delta\theta$	Variação de umidade volumétrica ($cm^3.cm^{-3}$)
H	Parâmetro de forma de $K(\theta)$ da equação de Brooks e Corey (porosidade total do solo)
P	Massa específica do solo
ρ_p	Massa específica das partículas do solo ou Densidade das partículas do solo ou Densidade Real
ρ_s	Massa específica do solo
M	Média

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	OBJETIVO GERAL.....	23
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1	IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO.....	24
2.2	GESTÃO DAS ÁGUAS PLUVIAIS.....	26
2.2.1	Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID).....	29
2.2.2	Aplicação do Modelo de Gerenciamento de Águas Pluviais (SWMM).....	30
2.2.3	Políticas e Incentivos Governamentais para Gerenciamento de Águas Pluviais.....	31
2.3	DISPOSITIVOS DE CONTROLE PLUVIAL NA FONTE.....	33
2.3.1	Pavimentos Permeáveis.....	33
2.3.1.1	Classificação dos Pavimentos Permeáveis quanto à Infiltração.....	36
2.3.1.2	Classificação de Pavimentos Permeáveis quanto ao Material.....	38
2.3.1.2.1	<i>Concreto Asfáltico Poroso.....</i>	<i>39</i>
2.3.1.2.2	<i>Concreto Poroso.....</i>	<i>40</i>
2.3.1.2.3	<i>Blocos de Concreto.....</i>	<i>42</i>
2.3.1.3	Taxas de Infiltração em Pavimentos Permeáveis.....	45
2.3.1.4	Avaliação do Comportamento Hidráulico de Pavimentos Permeáveis através do Modelo Hydrus.....	49
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	53
3.1	ESTUDO DO SOLO.....	53
3.1.1	Propriedades Hidrodinâmicas do Solo.....	56
3.1.1.1	Curva Característica ou Curva de Retenção $\theta(h)$	56
3.1.1.2	Curva de Condutividade Hidráulica $K(\theta)$	57
3.2	MÉTODO BEERKAN.....	59
3.3	MODELO HYDRUS.....	60
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
4.1	ÁREA DE ESTUDO: CARACTERIZAÇÃO DE RECIFE.....	62
4.1.1	Pavimento Permeável: Descrição.....	64
4.2	MÉTODO BEERKAN.....	66

4.2.1	Ensaio de Campo.....	67
4.2.2	Ensaio de Laboratório: Análise Granulométrica por Peneiramento e Sedimentação.....	70
4.2.3	BEST Slope e BEST Intercept.....	72
4.3	ANÁLISE QUALITATIVA DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO PP.....	77
4.3.1	Classificação Hidrológica do Pavimento Permeável.....	77
4.3.2	Grau de Permeabilidade (GP).....	78
4.4	HYDRUS 1D.....	78
4.4.1	Simulação Numérica no Hydrus 1D: Hipóteses e Considerações.....	78
4.4.2	Modelos de Infiltração para Caracterização Hidrodinâmica da Camada de Revestimento do PP.....	79
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	80
5.1	MÉTODO BEERKAN: CURVAS DE INFILTRAÇÃO.....	80
5.2	RESULTADOS DO BEST.....	86
5.2.1	Propriedades Hidrodinâmicas no Revestimento do Pavimento Permeável Oriundas da Aplicação do Algoritmo Best: Métodos Slope e Intercept.....	87
5.2.2	Classificação Quantitativa da Condutividade Hidráulica Saturada Usando os Métodos BEST (Slope e Intercept), os Métodos Bagarello e Wu.....	90
5.2.3	Curvas de Retenção e de Condutividade Hidráulica pelos Métodos Best Slope e Best Intercept.....	98
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	113
6.1	CONCLUSÕES.....	113
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	114
	REFERÊNCIAS.....	115

1 INTRODUÇÃO

O aumento da urbanização, decorrente do crescimento da população mundial, vem gerando alterações no uso e ocupação do solo. Os principais efeitos dessas ocupações são os danos às áreas de várzeas, supressão de áreas verdes, erosão do solo e aumento de superfícies impermeáveis, modificando as características do sistema natural de drenagem e do ciclo hidrológico local. Como resultado, há um aumento no volume e na velocidade de escoamento das águas pluviais e a antecipação dos tempos de pico dos hidrogramas (PINTO, 2011).

Segundo dados das Nações Unidas (2014), mais da metade da população mundial (54%) reside em áreas urbanas; embora exista uma variabilidade substancial nos níveis de urbanização entre os países. As próximas décadas trarão mudanças profundas no tamanho e na distribuição espacial dessa população. Com a continuação do crescimento global e da urbanização, espera-se que os moradores de centros urbanos aumente atingindo 66% até 2050. Segundo dados da PNAD (Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios) em 2015, 84,72% da população brasileira reside em áreas urbanas (IBGE, 2015). Este percentual indica que o país é o 26º com maior taxa de urbanização em um ranking de 192 países.

Devido à expansão das áreas construídas, geralmente desordenadas espacialmente, principalmente nas grandes regiões metropolitanas, as redes de drenagem não conseguem acompanhar a demanda. Como consequência da ineficiência e escassez dos atuais sistemas de drenagem urbana, a ocorrência de inundações tornou-se cada vez mais frequente, trazendo sérios problemas e prejuízos sociais, ambientais, patrimoniais e econômicos (TUCCI, 2007).

No Brasil, grande parte das cidades possui sistemas de drenagem caros e obsoletos, implantados no século XIX. Atualmente, as redes de drenagem recebem, durante os eventos de chuva, um volume de escoamento superficial maior que o previsto na época em que os projetos foram construídos (MARUYAMA; FRANCO, 2016). As cidades cresceram com grandes áreas impermeabilizadas, sem modernizarem e ampliarem os sistemas convencionais de drenagem urbana, que consistem em dispositivos de micro e macro drenagem como calhas, tubulações, bueiros e canais, que contribuem para a escassez, a contaminação e o baixo aproveitamento das águas pluviais.

No início do século XIX, Recife passou por um rápido crescimento econômico e populacional, com abertura de ruas e construção de pontes à custa do aterro de mangues e rios que uniram as diversas ilhas que constituem a cidade, onde estão os bairros do Recife Antigo, Santo Antônio, São José e Boa Vista (local do estudo), ao continente. No decorrer do seu desenvolvimento, a sua hidrogeologia passou por muitas modificações em suas áreas de

várzeas, manguezais, restingas, deltas e arrecifes. Além da hidrografia marcante, a cidade está inserida entre a praia e os morros, possui nível do lençol freático elevado, canais interditados ou assoreados, ocupações irregulares em áreas de risco, desmatamentos, avanço do mar e elevada densidade ocupacional do solo (CAVALCANTI; LYRA; AVELINO, 2008).

No decorrer do século XX, ocorreu uma evolução no tratamento das águas pluviais urbanas que pode ser dividida em três fases distintas. A princípio, a maior preocupação com relação ao saneamento básico resumia-se ao recebimento e direcionamento dos efluentes urbanos à jusante com a máxima rapidez possível, a fim de reduzir a propagação de doenças de veiculação hídrica. Nos anos 1960, as consequências negativas decorrentes dessa forma de implantação das redes de drenagem tornaram-se evidentes com os danos econômicos, sociais e ambientais (causados pelas inundações), aos corpos d'água receptores e às populações. Por conta dos prejuízos observados, em alguns países surgiram políticas de manejo e controle de águas pluviais e investimentos em estruturas de armazenamento e tratamento de esgoto (IBGE, 2015).

Com a necessidade de mudança na gestão da drenagem urbana, surgiram as técnicas compensatórias também conhecidas como *Best Management Practices (BMPs) for Stormwater*. Além de tentar resgatar as condições naturais, através de medidas baseadas nos princípios de infiltração, retenção e extensão dos caminhos de fluxo, essas técnicas objetivam aumentar o tempo de concentração da bacia urbanizada, propiciar a recarga dos lençóis freáticos, poupando as populações e o meio ambiente como um todo. São exemplos: pavimentos permeáveis, trincheiras drenantes, valas de infiltração, reservatórios de detenção, telhados verdes armazenadores, sistemas de biorretenção, dentre outros dispositivos, que viabilizem a atenuação dos impactos provocados pelas inundações e enchentes urbanas.

É fundamental para a implantação de técnicas compensatórias de drenagem urbana, em diferentes cenários, o desenvolvimento e/ou validação de modelos matemáticos que forneçam parâmetros confiáveis com relação à capacidade hidrodinâmica e ao desempenho ao longo do tempo. A falta de detalhamento dificulta a tomada de decisões pelos profissionais da área e gestores públicos.

Visando dar uma contribuição neste sentido e partindo da hipótese de que ensaios de infiltração na escala de campo permitem avaliar o desempenho hidrológico da camada de revestimento do pavimento permeável, este trabalho consiste numa avaliação e mensuração da capacidade de infiltração em um pavimento permeável do tipo blocos vazados de concreto (existente em uma área de estacionamento do Centro de Ciências Jurídicas da Universidade Federal de Pernambuco). Através da caracterização hidrodinâmica do pavimento pelos

ensaios de infiltração utilizando o método Beerkan, algoritmo BEST - *Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments* (Slope e Intercept) e simulação numérica dos processos de transferência da água (em cenários futuros e hipotéticos) com o uso do programa HYDRUS 1D.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a capacidade de infiltração de um pavimento permeável em escala real a partir da experimentação e simulação numérica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Efetuar a caracterização hidrodinâmica da camada de revestimento de um pavimento permeável utilizando o método Beerkan.
- Avaliar o uso de indicadores para qualificar a capacidade de infiltração de um pavimento.
- Realizar simulação numérica, com análise de sensibilidade, dos processos de transferência de água utilizando o modelo HYDRUS 1D.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

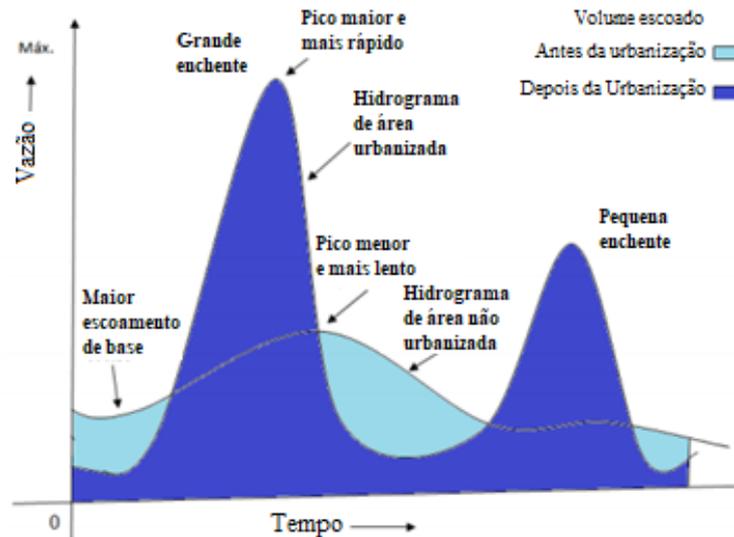
Neste capítulo são abordadas questões sobre impermeabilização do solo, gestão de águas pluviais, dispositivos de controle pluvial na fonte; com ênfase ao pavimento permeável.

2.1 IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO

O crescimento das superfícies impermeáveis e as mudanças climáticas em todo o mundo estão levando ao aumento das inundações urbanas (FRATINI *et al.*, 2012). O rápido crescimento na urbanização e as elevadas precipitações são fatores desafiadores para a infraestrutura de drenagem das cidades causando grandes impactos nas áreas urbanas, comunidades, meio ambiente e economia (FERGUSON, 2005).

A complexidade do contexto da urbanização requer que as inundações sejam gerenciadas através de políticas e práticas provenientes de pesquisas interdisciplinares e elaboração de um projeto integrado. Entre estas, o planejamento da infraestrutura verde é amplamente aceito nas políticas de gerenciamento de águas pluviais como uma estratégia emergente para uma organização espacial resiliente (SCOTT *et al.*, 2013), na qual alcançar a sustentabilidade do meio ambiente faz parte dos objetivos (FLETCHER *et al.*, 2014).

No Brasil, o acelerado processo de urbanização, sem planejamento nos municípios, trouxe grandes mudanças para o meio ambiente urbano, refletindo na drenagem urbana com impactos significativos. Yannopoulos *et al.* (2013) enfatizam que tal fato gera aumento e aceleração no escoamento superficial das águas pluviais, além de diminuir a capacidade de infiltração da água no solo, causando inundações (Gráfico 1).

GRÁFICO 1 - Volume escoado em função da urbanização.

Fonte: Adaptado de EMLURB (2017).

Segundo Silva Júnior (2015), esta situação é ainda mais grave, especialmente em regiões costeiras com baixas altitudes, como é o caso da cidade do Recife, onde o processo de ocupação urbana foi desordenado e o sistema de drenagem é altamente vulnerável às oscilações das marés e ao contexto de peculiaridades geográficas e urbanas em que a cidade foi concebida.

Por possuir áreas planas fortemente urbanizadas, ser uma região situada ao nível do mar, ter ocupação de morros e encostas, lençol freático elevado, deficiência em projetos, construção e manutenção de redes de drenagem, falta de educação ambiental por parte da população, Recife destaca-se como uma das cidades litorâneas brasileiras mais vulneráveis ao aumento do nível do mar (COUTINHO, 2011). Além de todos estes fatores, uma consequência inevitável das alterações climáticas que é a elevação do nível do mar devido ao derretimento das calotas polares.

Dados da EMLURB – Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana, vinculada à Secretaria de Serviços Públicos da Prefeitura do Recife (2013) indicaram 159 pontos críticos de inundações em diversos bairros do Recife, sendo: 32 ruas com problemas de alagamentos em Santo Amaro e São José; 42 ruas no Arruda; 18 na Cidade Universitária; 32 no Jardim São Paulo e Estância; e 35 em Boa Viagem, Ibura e Imbiribeira.

Diante de toda essa problemática observada em várias cidades ao redor do mundo, a inclusão do conceito de sustentabilidade na drenagem urbana revelou alternativas compensatórias visando ao equilíbrio sistemático dos efeitos da urbanização e a recuperação das funções hidrológicas naturais (MIGUÉZ; VERÓL; MASCARENHAS, 2014). O objetivo

da aplicação de tais medidas é ajustar o ciclo hidrológico através da infiltração e armazenamento do escoamento superficial, para aumentar o tempo de concentração da bacia e diminuir os picos de saída gerados por um evento de chuva (SILVA; CABRAL, 2014).

A eficiência do desenvolvimento de baixo impacto (LID) em relação às soluções de drenagem convencionais está, principalmente, em não transferir as inundações para jusante. Uma maneira de estimar o desempenho dessas medidas mitigadoras e compensatórias é, antes da sua implantação, usar dispositivos que possibilitem a simulação de eventos hidrológicos para avaliar as consequências da aplicação dessas medidas de controle (DECINA; BRANDÃO, 2016).

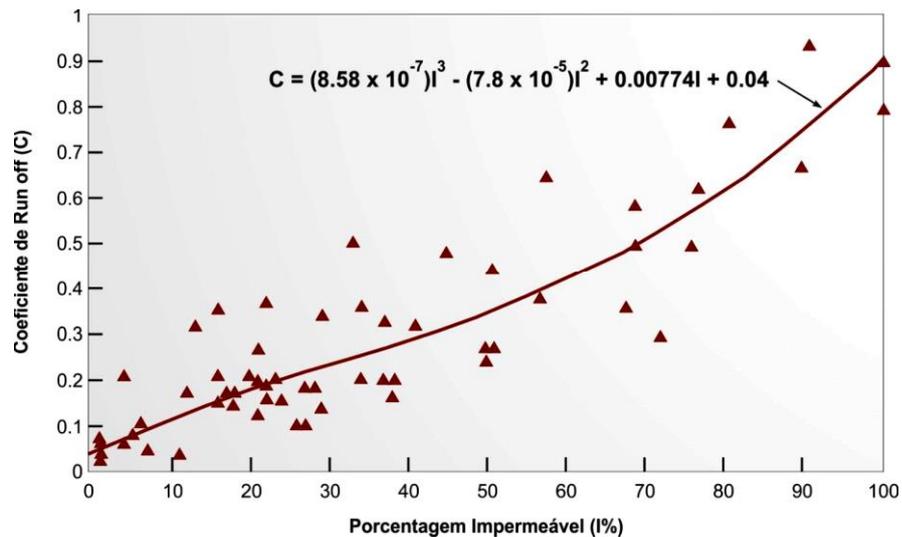
2.2 GESTÃO DAS ÁGUAS PLUVIAIS

Os sistemas de drenagem presentes na maioria das cidades brasileiras foram desenvolvidos no século XIX para capturar e conduzir as águas pluviais aos corpos d'água ou sistemas coletores à jusante, sem levar em conta a manutenção do ciclo hidrológico natural. Nessa época, a relação entre aglomerados urbanos e cursos d'água foi bastante modificada. Tal fato ocorreu com o aparecimento dos preceitos higienistas quando a Europa foi atingida por grandes epidemias de veiculação hídrica (PARRA, 2016).

Os sistemas convencionais de drenagem em forma de galerias, sarjetas, bocas de lobo e condutos preconizavam a canalização e o controle dos cursos d'água, com a eliminação rápida das águas pluviais e servidas para longe das cidades, a fim de evitar ou reduzir o risco de epidemias e doenças. Com o vertiginoso crescimento populacional nas áreas urbanas, a redução das áreas permeáveis e de armazenamento superficial e o consequente aumento da velocidade de escoamento, a elevação dos picos de cheia contribuiu para eventos de inundações e enchentes cada vez mais frequentes e severos. Para a realidade do século XXI, de modo geral, os sistemas tradicionais são caros e ineficazes (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012; PARRA, 2016).

O escoamento superficial aumenta com o acréscimo da porcentagem de impermeabilização, mas não pode ser considerado constante porque também varia proporcionalmente em função das diferentes intensidades de precipitação sobre a mesma bacia (Gráfico 2), conforme aponta o estudo realizado no Distrito de Denver, durante doze anos, pelo *Urban Drainage and Flood Control* (PINTO, 2011).

GRÁFICO 2 - Coeficiente de Runnof x Porcentagem impermeável.



Fonte: Pinto (2011).

Ao analisar uma bacia hidrográfica para fins de planejamento ou projeto, a porcentagem futura provável de áreas impermeáveis deve ser estimada. O *Urban Storm Drainage Criteria Manual - USDCM* (2016) indica a tabulação completa dos valores recomendados da porcentagem total de impermeabilização do solo a serem considerados (TABELA 1).

TABELA 1 – Valores percentuais de impermeabilização do solo.

(Continua)

Características do solo ou da superfície	Porcentagem de impermeabilização (%)
Atividade:	
Áreas do centro da cidade	95
Áreas suburbanas	75
Lotes residenciais (apenas área de lote):	
Unifamiliar	
2,5 hectares ou mais	12
0,75 a 2,5 hectares	20
0,25 a 0,75 hectares	30
0,25 hectares ou menos	45
Apartamentos	75
Industrial:	
Light areas	80
Heavy áreas	90
Parques, cemitérios	10
<i>Playgrounds</i>	25
Escolas	55
Áreas ferroviárias	50

Fonte: A Autora (2018).

Nota: Adaptado de Urban Storm Drainage Criteria Manual (2016).

TABELA 1 – Valores percentuais de impermeabilização do solo.

(Conclusão)

Características do solo ou da superfície	Porcentagem de impermeabilização (%)
Áreas não desenvolvidas:	
Análise do fluxo histórico	2
Cinturões verdes e áreas agrícolas	2
Quando o uso da terra não é definido	45
Ruas:	
Pavimentadas	100
Em blocos, paralelepípedo ou cascalho	40
Passeios e calçadas	90
Telhados	90
Gramados, solo arenoso	2
Gramados e solo argiloso	2

Fonte: Adaptado de Urban Storm Drainage Criteria Manual (2016).

Novas abordagens às questões de impermeabilização do solo e como evitar suas desastrosas consequências passaram a ser discutidas a partir da década de 1970 na Europa e na América do Norte. As chamadas “tecnologias alternativas” ou “compensatórias” de drenagem são voltadas à busca pela neutralização dos efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, a fim de gerar melhorias na qualidade de vida da população e preservação ambiental. De acordo com essa visão, os sistemas de drenagem não devem gerar impactos superiores aos naturais da bacia, nem à montante, nem à jusante. E devem anular ou atenuar os efeitos provocados pelo uso urbano do solo, controlando e gerenciando o escoamento de águas pluviais (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012).

Pelo conceito de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID - *Low Impact Development*), introduzido no final dos anos 90, conhecido no Brasil como “impacto zero e de vazão de restrição ou vazão de referência”, o foco principal é a sustentabilidade de maneira ampla, não apenas das bacias hidrográficas, mas também a integração do ambiente urbano com projetos que ajudem na formação de uma paisagem funcional do ponto de vista hidrológico (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012).

Em países mais desenvolvidos, alguns avanços foram observados com a implantação de sistemas denominados de: *Low Impact Development* – LID, nos Estados Unidos, *Water Sensitive Urban Design* – WSUD, na Austrália e *Sustainable Drainage Systems* – SuDS, no Reino Unido. Em conjunto com políticas de desenvolvimento urbano, de uso e ocupação do solo e de gestão sustentável das respectivas bacias hidrográficas, através de ações estruturais e não estruturais voltadas à prevenção, ao controle e à minimização dos prejuízos provocados por enchentes (PAGE *et al.*, 2015).

2.2.1 Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID)

O desenvolvimento de baixo impacto, LID (*Low Impact Development*), também conhecido como sistema de drenagem urbana sustentável, SUD (*stormwater drainage systems*), representa um avanço significativo em gerenciamento de águas pluviais. Essa abordagem concentra-se no controle na fonte, através da retenção e infiltração da água, e combina um projeto hidrológico funcional, com medidas de prevenção de poluição para compensar os impactos sobre a hidrologia e a qualidade da água. A filosofia por trás das medidas BMPs (*Stormwater Best Management Practice*) é restabelecer o equilíbrio do ciclo da água o mais próximo possível das condições de pré-desenvolvimento e preservar a biodiversidade nos corpos receptores de água (CASTRO *et al.*, 2013; MARCHIONI; BECCIU; SILVA, 2015).

Numa comparação global de LID, uma abordagem sólida para o gerenciamento de águas pluviais deve ser flexível, com base nas características locais e levar em consideração fatores temporais, espaciais, administrativos e legais, entre outras questões. O impacto final da LID para a gestão de águas pluviais pode ser dividido em aspectos políticos, econômicos, ambientais e sociais (CHANG *et al.*, 2018).

Do ponto de vista político, o cronograma de elaboração de políticas e legislação sobre o gerenciamento de águas reflete diferenças regionais e culturais. Nas comunidades ocidentais, usam-se palavras como “verde”, “sustentável” e “sensível” para descrever seus objetivos; enquanto as comunidades orientais costumam usar palavras como “belo”, “esponja” e “utilização” para orientar seus objetivos. Observa-se, ainda, que as comunidades orientais apresentaram uma resposta mais tardia ao gerenciamento inovador de águas pluviais; com exceção do Japão que já retinha a água de chuva e a utilizava há décadas (CHANG *et al.*, 2018).

Quanto aos aspectos sociais e estéticos, vários esquemas de LID foram propostos e implantados em diferentes graus em toda a Europa. A fim de criar um senso de comunidade, oferecendo espaços verdes para os cidadãos urbanos se envolverem em recreação com a natureza, como algo que traz benefícios psicológicos, como reduzir o estresse, restaurar a atenção, reduzir o comportamento criminal e antissocial. O uso de recursos LID pode recuperar o ciclo hidrológico nas áreas urbanas, promover a saúde do ecossistema e mitigar o efeito da ilha de calor urbano (EUROPEAN COMMISSION, 2013).

Sob o ponto de vista econômico, acredita-se que, ao longo do tempo, as iniciativas LID e análogas podem custar menos que os métodos tradicionais de gerenciamento de águas

pluviais devido à redução significativa do pico de escoamento e volume de águas, o que diminui a infraestrutura necessária à jusante. Um estudo detalhado, que compara o custo real de uso de técnicas LID com o custo estimado de drenagem com tecnologias convencionais para 17 projetos de desenvolvimento nos EUA, mostrou que LIDs podem gerar economias de custo significativas, variando de 15 a 80% (USEPA, 2015).

Quanto aos aspectos geográficos e ambientais, as diferentes condições físicas como clima e topografia podem afetar profundamente as políticas de gerenciamento de águas pluviais. Reconhecer essas diferenças é útil para projetar políticas LID. O projeto deve ter como objetivo minimizar o impacto das inundações, aumentar o controle de sólidos suspensos, priorizar a resolução de problemas de eutrofização em sistemas de águas superficiais e subterrâneas, cuidar mais da recarga de águas subterrâneas e evitar a erosão de canais, casos em que a LID pode ser adaptada como parte integrante das medidas práticas para a conservação solo-água (HOPTON *et al.*, 2015; CHAFFIN *et al.*, 2016).

2.2.2 Aplicação do Modelo de Gerenciamento de Águas Pluviais (SWMM)

O SWMM (*Storm Water Management Model*) tem sido amplamente utilizado para o planejamento e análise de projetos relacionados ao escoamento de águas pluviais em áreas urbanas, na simulação do desempenho hidrológico de diferentes LIDs. O SWMM contabiliza diversos processos hidrológicos que incluem precipitação, interceptação, infiltração, evapotranspiração, derretimento da neve, fluxo terrestre, fluxo intermédio entre águas subterrâneas e sistemas de drenagem, captura e retenção de precipitação (CHUI; LIU; ZHAN, 2016).

Palla e Gnecco (2015) investigaram a resposta hidrológica de uma pequena bacia urbana de 5,5 hectares (bacia Colle Ometti, na cidade de Gênova, Itália) em diferentes condições de uso do solo e cenários de conversão, incluindo a instalação de telhados verdes e de pavimentos permeáveis. A modelagem foi realizada usando o SWMM para três diferentes períodos de retorno ($T=2, 5$ e 10 anos). Os resultados confirmaram a eficiência das soluções LID mesmo para o evento de tempestade para período de projeto $T = 10$ anos. A performance hidrológica aumentou linearmente com a diminuição das áreas de impermeabilização, com redução de 36% correspondente a toda conversão de telhados e áreas de estacionamento em telhados verdes e pavimentos permeáveis.

2.2.3 Políticas e Incentivos Governamentais para Gerenciamento de Águas Pluviais

Chang *et al.* (2018) avaliaram, a partir de uma perspectiva global, os estudos de caso de LIDs e políticas governamentais relevantes que surgiram para facilitar a gestão quantitativa e qualitativa das águas pluviais em regiões urbanas. O estudo constatou que as regiões ocidentais e leste do mundo apresentam diferentes condições, esforços e atitudes com relação à implantação de LIDs. As regiões ocidentais, como Estados Unidos, estão mais atentas à restauração da qualidade da água; enquanto as regiões orientais, como o Japão e a China, priorizam a prevenção de inundações e o armazenamento da água de chuva. A gestão das águas pluviais na Europa é diferente em cada região e/ou país. No norte da Europa e na Alemanha, em particular, ao longo da década de 1990 surgiu um canteiro de inovações e aplicações de tecnologias LID, enquanto em países do sul da Europa, como a Grécia, a prioridade foi a melhoria no sistema de esgoto.

No Brasil, ainda há poucos conhecimentos sobre os conceitos e as metodologias de implantação e operação de técnicas LID. Do ponto de vista das políticas públicas de incentivo, a sua adoção é restrita a algumas cidades. Nas últimas décadas, cidades como Porto Alegre, São Paulo, Curitiba, Santo André e Rio de Janeiro começaram a introduzir algumas modificações no seu sistema de drenagem com a adoção de estruturas de armazenamento (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012; VASCONCELOS; MIGUEZ; VAZQUEZ, 2016).

O programa “Drenagem Urbana Sustentável” foi lançado pelo Ministério das Cidades em 2006 e o “Manual para apresentação de propostas” foi criado para dar suporte às iniciativas municipais para implantação de técnicas LID (BRASIL, 2006). Em 2012, o Ministério das Cidades lançou o “Manual para apresentação de propostas para sistemas de drenagem urbana sustentável e de manejo de águas pluviais - Programa 2040: Gestão de riscos e respostas a desastres”. O objetivo foi dotar os municípios (com mais de 50 mil habitantes ou municípios integrantes de regiões metropolitanas ou de regiões integradas de desenvolvimento urbano) de um programa de medidas de controle estruturais e não estruturais de técnicas compensatórias em drenagem urbana para controle de escoamento na fonte (Quadro 1) (BRASIL, 2012).

QUADRO 1 - Tipologia de técnicas compensatórias para manejo de águas pluviais.

Técnicas compensatórias não estruturais	Técnicas compensatórias estruturais		
<ul style="list-style-type: none"> • Regulação do uso do solo; • Criação de áreas verdes; • Recuperação de matas ciliares – parques lineares. 	Controle na fonte		Controle centralizado
<ul style="list-style-type: none"> • Não conexão ou desconexão de áreas impermeáveis; • Uso de revestimentos de elevada rugosidade em vias e em canais; • Manejo de fertilizantes, pesticidas e detergentes. 	Localizado	Linear	<ul style="list-style-type: none"> • Bacias de detenção ou retenção; • Bacias de infiltração; • Bacias de detenção e infiltração; • Áreas úmidas artificiais.
	<ul style="list-style-type: none"> • Telhado verde; • Microrreservatório; • Poço de infiltração; • Plano de infiltração. 	<ul style="list-style-type: none"> • Trincheira de infiltração; • Vala de detenção; • Pavimento reservatório; • Pavimento permeável; • Áreas úmidas lineares. 	

Fonte: Adaptado de Nascimento e Baptista (2009).

Segundo Souza, Cruz e Tucci (2012) é necessária a reformulação e participação das instituições e a capacitação de profissionais e usuários para que o programa seja efetivamente implantado e possa dar bons resultados.

No Recife, a Lei 18.112/2015 dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental através da obrigatoriedade de instalação de telhados verdes em edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não habitacionais com mais de 400 m² de área coberta. Para lotes com área superior a 500 m², construídos ou não, com área impermeabilizada superior a 25%, a lei determina a construção de reservatórios de acúmulo

ou de retardo. Essas exigências legais, têm a intenção de melhorar o paisagismo, minimizar as ilhas de calor, beneficiar o microclima e absorver parte do escoamento superficial.

2.3 DISPOSITIVOS DE CONTROLE PLUVIAL NA FONTE

Os dispositivos compensatórios de manejo de águas de chuva na fonte, denominados por Urbonas e Stahre (1993) *Best Management Practices* – BMPS ou *Sustainable Urban Drainage Systems* - SUDS, por Butler e Davies (2004), surgiram com o intuito de minimizar as alterações no ciclo hidrológico, o aumento do volume de escoamento superficial e de inundações e a diminuição da recarga subterrânea; que são consequências dos sistemas higienistas de drenagem urbana e do aumento das áreas impermeabilizadas nas cidades (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012).

As práticas de compensação estão fundamentadas em processos de infiltração, armazenamento, interceptação e evapotranspiração das águas pluviais (MELO *et al.*, 2014) e devem ser implantadas, sempre que possível, próximas às fontes geradoras (PINTO, 2011).

Dentre os dispositivos de controle pluvial na fonte estão: os pavimentos permeáveis, valas de infiltração, trincheiras de infiltração, poços de infiltração, micro reservatórios, bacias de retenção e telhados verdes (COUTINHO, 2011). Neste trabalho, serão detalhados os pavimentos permeáveis, foco do estudo.

2.3.1 Pavimentos Permeáveis

Dá-se o nome de permeável ao pavimento projetado com o intuito prioritário de diminuir o escoamento superficial das águas pluviais. Esta água poderá ou não ser transportada através de um sistema auxiliar de drenagem. Dessa forma, o pavimento permeável adquire a função hidráulica ao tornar-se uma ferramenta de drenagem (ASCE, 1992; GHODSI *et al.*, 2016).

Segundo Souza, Cruz e Tucci (2012), os pavimentos permeáveis começaram a ser estudados na França nos anos 1945-1950. Tendo sido preferencialmente aplicados em áreas de tráfego leve, estacionamentos e calçadas. Nos EUA, no entanto, há algumas aplicações tanto em concreto asfáltico poroso, quanto em concreto poroso em vias expressas. A aplicação de blocos vazados de concreto em áreas industriais com tráfego de veículos pesados também provou ser eficiente do ponto de vista estrutural.

Os primeiros estudos com pavimentos permeáveis datam dos anos 1970 e foram conduzidos principalmente em laboratório, normalmente usando a simulação de chuva (PRATT; POWELL, 1992). Os testes em grande escala começaram a ser realizados a partir dos anos 1980. Esses estudos avaliaram principalmente a eficiência dos pavimentos na redução do volume e remoção de poluentes, comprovando a sua eficácia como SUDS (BUTLER; DAVIES, 2004). Nas últimas décadas, o pavimento permeável vem sendo largamente utilizado em partes da Europa e dos Estados Unidos (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012).

No Brasil, diferentemente de países desenvolvidos, o uso de dispositivos compensatórios ainda é discreto, devido à carência de conhecimento e de capacitação técnica dos profissionais envolvidos nas etapas de projeto, execução e manutenção. Além disto, há ausência de normas técnicas específicas e de políticas públicas de incentivo (MELO, 2015).

Poucos autores brasileiros (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; ACIOLI, 2005; COUTINHO, 2011; PINTO, 2011; CASTRO *et al.*, 2013; COUTINHO *et al.*, 2016; RIBAS, 2017) avaliaram o uso de pavimentos permeáveis quanto ao aspecto quantitativo do escoamento superficial. Outra barreira é o pouco conhecimento sobre a evolução do comportamento da estrutura do pavimento permeável quanto ao escoamento superficial, no que diz respeito ao tempo de uso, à colmatção e à necessidade de manutenção (CASTRO *et al.*, 2013).

Segundo Marchioni, Becciu e Silva (2015), dentre os dispositivos de controle pluvial na fonte, os pavimentos permeáveis são altamente eficazes e facilmente aplicáveis, pois não precisam de espaço adicional para atuar na redução do volume de escoamento superficial e podem ser usados tanto para a infiltração direta de água no solo quanto para a retenção. Outra vantagem observada, diz respeito à qualidade da água, considerando que as águas pluviais estão relacionadas à poluição dos fluxos d'água. O pavimento permeável pode contribuir na qualidade desta água através de mecanismos de sedimentação, filtração, adsorção, biodegradação e volatilização, permitindo nutrientes, lamas, remoção de metais pesados e hidrocarbonetos. O beneficiamento da qualidade pode promover também a reutilização da água coletada pelo PP e, em combinação com cimento fotocatalítico, ajudar a reduzir os poluentes do ar, melhorando também a qualidade do ar.

Estudos mais recentes (CASTRO *et al.*, 2013; BAEK *et al.*, 2015; LIU; BRALTS; ENGEL, 2015; MARCHIONI; BECCIU; SILVA, 2015; PALLA; GNECCO, 2015; COUTINHO *et al.*, 2016; GHODSI *et al.*, 2016; HUANG *et al.*, 2016; KUMAR *et al.*, 2016; HARVEY *et al.*, 2017; ONO; BALBO; CARGNIN, 2017; RIBAS, 2017), demonstram que os

pavimentos permeáveis podem gerar benefícios como: redução e/ou controle dos excedentes pluviais; recarga dos aquíferos subterrâneos; remoção de poluentes; controle de calor e ruído; diminuição do acúmulo de água, do efeito spray e da aquaplanagem na superfície dos pavimentos.

Em relação a estes benefícios, os pavimentos permeáveis são analisados por diversos pontos de vista no meio técnico-científico.

Para a engenharia hidráulica, os pavimentos permeáveis são considerados como estruturas que possuem sua finalidade primordial na redução do escoamento superficial, atuando sobre o hidrograma da bacia na qual pertencem; diminuindo áreas impermeáveis diretamente conectadas (ASCE, 1992). Podem ainda ajudar na melhoria da qualidade da água, pela redução da poluição da água e do solo, e reabastecimento dos aquíferos (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016). É importante observar que alguns pesquisadores relatam um possível risco de contaminação do lençol freático, ainda que desprezível. Pois depende do tipo de contaminante e da sua proporção. Além disso, do nível do lençol freático (URBONAS; STAHERE, 1993; USEPA, 2016). A contaminação é uma consequência que deve ser levada em conta, a depender das condições de uso do solo, variando de acordo com o local e a profundidade do lençol freático (AGOSTINHO; POLETO, 2012).

Para a engenharia de transportes, os revestimentos permeáveis removem a água da superfície do pavimento pela rápida infiltração através dos vazios de sua estrutura e aumentam o atrito pneu-pavimento, melhorando a resistência à derrapagem, além de reduzir a aquaplanagem e o efeito “spray” em dias de chuva. Também possuem maior luminosidade e aumentam a refletividade. A cor mais clara do pavimento permeável, quando comparada aos materiais betuminosos, reduz a quantidade de iluminação necessária. Desta forma, contribuem para a segurança dos motoristas aumentando de forma eficaz a dirigibilidade e segurança rodoviária (ASCE, 1992; USEPA, 2008).

Para a engenharia ambiental, os pavimentos permeáveis minimizam o efeito das ilhas de calor e beneficiam o microclima do local (NRMCA, 2008). A temperatura do ar em áreas urbanas pavimentadas com materiais não permeáveis pode ser até 4°C mais elevada que em ambientes rurais (HENDERSON, 2012). Em locais com climas quentes, os materiais de pavimentação convencionais podem atingir entre 50 e 60°C e transmitir o excesso de calor para o ambiente e para as águas pluviais que atravessam o pavimento (RHEAD, 2012). O uso do pavimento permeável tem sido indicado como alternativa para diminuir o calor urbano, refrigerando inclusive comunidades circundantes e permitindo também que as águas infiltradas caiam diretamente no lençol freático, trazendo benefícios para o ecossistema

(MARCHIONI; SILVA, 2011). A água infiltrada através do revestimento poroso pode ser transferida para jardins e gramados circundantes, fornecendo umidade, diminuindo a despesa com irrigação e a demanda d'água (AGOSTINHO; POLETO, 2012).

Para a engenharia geotécnica, os pavimentos permeáveis ajudam a controlar a erosão do solo, além de promover a recarga do lençol freático e a filtragem da água, melhorando a sua qualidade (SCHUELER, 1987; AGOSTINHO; POLETO, 2012).

Para a engenharia acústica, comparativamente ao pavimento convencional, observa-se a diminuição dos ruídos de tráfego nos locais com pavimento permeável, ao permitir que o som penetre nos poros e vazios, minimizando a emissão de ondas sonoras, o que favorece o conforto sonoro das cidades (SUZUKI; AZEVEDO; KABBACH JÚNIOR, 2013).

Além dos benefícios citados, mais uma vantagem observada no caso específico de pavimentos permeáveis em blocos de concreto diz respeito a reparos em redes subterrâneas de água e esgoto. De forma rápida e simples e sem a necessidade de equipamentos especiais, os blocos de concreto são removidos e recolocados na área afetada, para que os danos sejam consertados. Praticamente todo o material retirado é reaproveitado (FIORITI; INO; AKASAKI, 2007).

Por estes fatores, os pavimentos permeáveis podem ser considerados um material de construção "verde" e ecologicamente eficiente.

2.3.1.1 Classificação dos Pavimentos Permeáveis quanto à Infiltração

Por definição, pavimentos permeáveis são aqueles que atendem simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento e em cuja estrutura há espaços livres que permitem a infiltração da água no solo. A porosidade do material permite a percolação e/ou acúmulo temporário de água (NBR 16416, 2015).

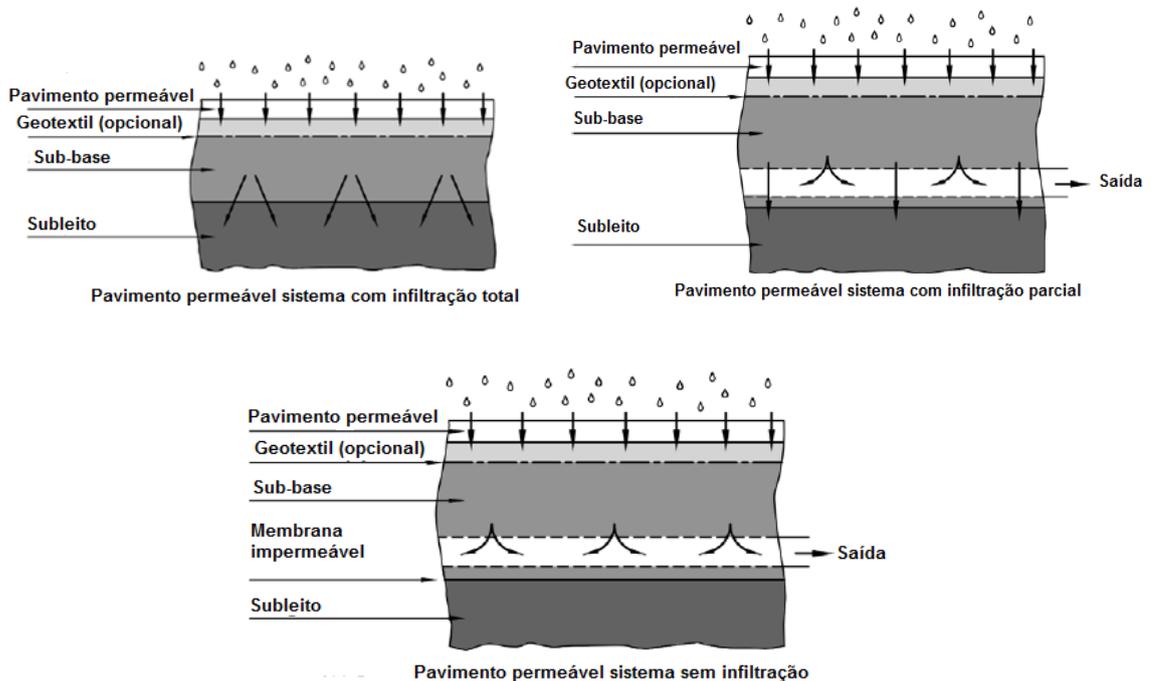
Nos pavimentos de concreto asfáltico poroso, concreto poroso e blocos de concreto poroso, a infiltração da água ocorre através dos poros do próprio material que constitui o revestimento. No caso dos blocos de concreto maciço com juntas alargadas, a água infiltra pelas juntas. Nos blocos vazados, a água penetra pelos vazios que são preenchidos com solo gramado, areia ou brita (PINTO, 2011; MARCHIONI; BECCIU; SILVA, 2015).

Ainda segundo Pinto (2011) e Marchioni, Becciu e Silva (2015), pela destinação da água, os pavimentos permeáveis classificam-se em: infiltrantes e armazenadores. Quando a água das chuvas penetra nas camadas do pavimento e no subleito, são os pavimentos permeáveis infiltrantes. Quando esta mesma água é captada e retida em um reservatório,

sendo direcionada por meio de condutos para micro drenagem, são os pavimentos permeáveis armazenadores.

Estes dois tipos, infiltrantes e armazenadores, subdividem-se ainda em três tipos (Figura 1). Pavimento com infiltração total: quando todo o volume precipitado sobre o pavimento infiltra no solo e este solo do subleito apresenta alta permeabilidade ou lençol freático com o nível suficientemente baixo. Pavimento sem infiltração: quando a água penetra através do pavimento, porém o solo do subleito possui baixa permeabilidade ou o nível do lençol freático é elevado. Dessa forma, todo o volume precipitado e infiltrado através do pavimento é coletado por sistema de drenagem com drenos perfurados e espaçados de 3 a 8 m, para que a água seja transportada à rede de drenagem. Pavimento com infiltração parcial: quando, apesar de precisar de um sistema de coleta por dreno, ou o solo do subleito não apresenta permeabilidade tão baixa, ou o lençol freático possui nível intermediário, portanto, acontece uma infiltração parcial (PINTO, 2011).

FIGURA 1 - Classificação dos pavimentos permeáveis quanto à infiltração.



Fonte: Adaptado de Ciria (2007).

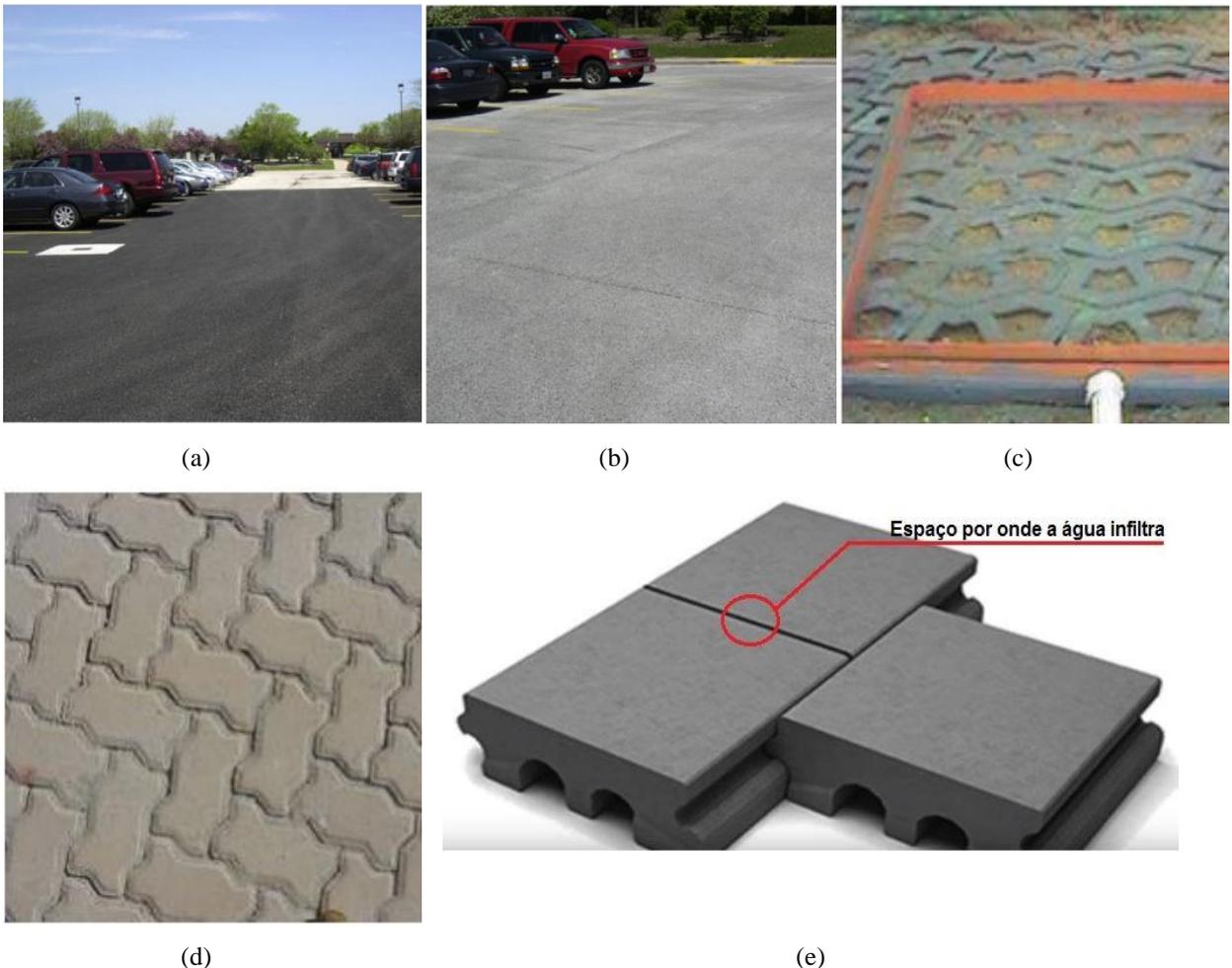
Conforme demonstrado na Figura 1, a camada de revestimento do pavimento permeável é assentada sobre uma camada de areia e normalmente é construída sobre uma camada de brita que atua como reservatório para armazenar e/ou filtrar a água durante a infiltração para a camada de solo subjacente. A espessura da camada de brita depende das

características deste solo; se o mesmo possui baixa taxa de percolação, torna-se necessária uma camada reservatório mais espessa (ABCP, 2014).

2.3.1.2 Classificação de Pavimentos Permeáveis quanto ao Material

Os pavimentos permeáveis podem ser executados em concreto asfáltico poroso (Fotografia 1a), concreto poroso (Fotografia 1b) (em placas ou moldado *in loco*) ou blocos de concreto (Fotografia 1c, 1d e 1e) (vazados, maciços com juntas alargadas, articulados e/ou porosos) (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; MARCHIONI; SILVA, 2011; ABNT NBR 16416/2015; ONO; BALBO; CARGNIN, 2017).

FOTOGRAFIA 1 - Tipos de revestimento para pavimento permeável: (a) concreto asfáltico poroso; (b) concreto poroso; (c) blocos vazados de concreto; (d) blocos intertravados de concreto; (e) blocos articulados de concreto.



Fonte: (a) Kumar *et al.* (2016); (b) Kumar *et al.* (2016); (c) Araújo, Tucci e Goldenfum (2000); (d) Pinto (2011); (e) Ono, Balbo e Cargnin (2017).

2.3.1.2.1 Concreto Asfáltico Poroso

Também conhecido como camada porosa de atrito (CPA), o concreto asfáltico poroso é o resultado de uma mistura asfáltica sem fração de areia (só com agregados graúdos), que apresenta graduação aberta, com 18% a 25% de vazios, o que favorece a rápida percolação da água. Além da permeabilidade, possui outras vantagens como a redução do ruído e o aumento da aderência pneu-pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo Suzuki, Azevedo e Kabbach Júnior (2013), o pavimento permeável de concreto asfáltico poroso foi utilizado pioneiramente nos anos 1945 a 1950 na França. No entanto, como não existiam estudos mais aprofundados sobre o uso dos ligantes asfálticos, pela baixa adesividade ligante-agregado e também em decorrência da baixa resistência, o material apresentava muitos problemas estruturais e rompia-se. Somente nos anos de 1970, o pavimento permeável de concreto asfáltico poroso voltou a ser utilizado na França. Países como Suécia, Japão, Estados Unidos e Austrália também passaram a se interessar pelo método e aplicá-lo em pequena escala.

O “*Ministère de l’Équipement*” da França lançou, em 1978, um programa de apoio à pesquisa e ao desenvolvimento de soluções que fossem capazes de minimizar ou evitar inundações e suas consequências. Dentre as alternativas apresentadas, o pavimento permeável figurou como uma das melhores, pela facilidade de integração com o meio ambiente urbano, podendo ser aproveitado como estrutura de retenção dos picos de cheia e reabastecimento do lençol freático. Na década de 1980, na França, os experimentos realizados com pavimentos permeáveis em concreto asfáltico poroso apresentaram resultados bastante satisfatórios, de forma que é possível encontrar este tipo de pavimento mesmo em vias de tráfego médio a alto, como nas que contornam a cidade de Bordeaux (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005; SUZUKI; AZEVEDO; KABBACH JÚNIOR, 2013).

Ainda segundo Suzuki, Azevedo e Kabbach Júnior (2013), seguindo a mesma linha, a Agência de Proteção Ambiental Americana (*The Environmental Protection Agency – EPA*) adotou uma política que recomenda o uso de pavimentos permeáveis como uma forma de mitigar o escoamento de água superficial decorrente das tempestades. Como benefício, foi observada uma diminuição na temperatura do ar sobre estacionamentos em concreto permeável, em comparação aos locais com asfalto convencional.

Com o uso e passar dos anos, alguns trechos construídos em concreto asfáltico poroso sofreram colmatção e conseqüente declínio da taxa de infiltração. Porém, nas últimas décadas, com a aplicação de novas tecnologias e materiais mais apropriados, estão sendo

desenvolvidos concretos asfálticos porosos com desempenho hidráulico, resistência e durabilidade superiores. Desde então, o pavimento permeável tornou-se objeto de pesquisas em diferentes áreas da engenharia hidráulica e de transportes para o desenvolvimento de técnicas de execução e formas de aplicação. Entre os anos 90 e início dos anos 2000, o pavimento permeável de concreto asfáltico foi usado em estradas de alta velocidade na Europa e no Japão (VIRGILIIS, 2009).

2.3.1.2.2 Concreto poroso

Os pavimentos em concreto poroso podem ser em placas ou moldados *in loco*. O concreto poroso, também conhecido como concreto permeável, é o resultado de uma mistura de concreto de cimento Portland com a retirada da fração de areia fina da mistura, restando apenas agregados graúdos (granulometria uniforme). Nesta graduação, o concreto apresenta de 15% a 25% de vazios, o que favorece a rápida percolação da água. Porém necessita de manutenção periódica a fim de evitar a colmatção (CRMCA, 2009).

Devido ao alto índice de vazios, há um decréscimo na resistência, sendo mais adequado para locais com tráfego leve, ruas residenciais, calçadas e estacionamento, parques, quadras de tênis, estufas (para manter o piso livre de poças d'água), bem como em tratamento de águas residuais (CRMCA, 2009; ACI COMMITTEE REPORT 522, 2010). O concreto permeável é bastante utilizado em grande parte dos Estados Unidos como pavimento para lotes de estacionamento e estradas de baixo volume de tráfego. Muitos estacionamentos na Flórida, desde os anos de 1970, são em pavimento de concreto poroso, por ser um estado onde frequentemente ocorrem pesadas tempestades que geram grandes volumes de águas pluviais (VIRGILIIS, 2009).

Os estacionamentos em concreto poroso também reduzem a acumulação de neve e gelo e são considerados não poluentes para o ambiente. No entanto, a aplicação em climas mais frios, dos Estados Unidos e do Canadá, ainda permanece limitada. As adições de ar nas misturas são utilizadas para aumentar a resistência ao congelamento e descongelamento. Nesses casos, as resistências à compressão são frequentemente inferiores à 14 MPa aos 28 dias (ACI COMMITTEE REPORT 522, 2010). No Brasil, a técnica ainda é pouco utilizada devido à falta de domínio técnico dos projetistas (ALENCAR, 2013).

As propriedades de resistência e drenagem do concreto permeável são primordialmente determinadas pela resistência da pasta, o tipo de agregado e o volume de vazios interconectados. As misturas de concreto para pavimento permeável contêm

tipicamente agregados de mesma faixa granulométrica (9,5 mm a 19 mm) e níveis otimizados de cimento e água a fim de proporcionar uma estrutura com 15% a 25% de vazios (EISENBERG; LINDOW; SMITH, 2015).

Segundo Emiko (2016), o volume de vazios do concreto permeável pode variar de 15% a 35% e os poros conectados variam de 2 a 8 mm, permitindo que a água infiltre facilmente. As resistências à compressão variam de 2,8 a 28 MPa, enquanto que a resistência à flexão está entre 0,6 a 4,8 MPa. Quando comparado ao concreto convencional, o concreto permeável é bem menos resistente, porém, significativamente mais drenante. A taxa de permeabilidade do pavimento de concreto permeável varia com o tamanho do agregado e a densidade da mistura e está tipicamente entre 1,4 mm/s a 12,2 mm/s. A quantidade de agregados finos é limitada e controlada para aumentar a resistência, mantendo-se a quantidade de vazios necessários para a drenagem.

Os intervalos típicos de proporções de materiais em concreto permeável, de acordo com o *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA, 2011) e o *American Concrete Institute* (ACI COMMITTEE 522, 2010) são demonstrados na TABELA . O teor de cimento típico está entre 267 a 415 kg/m³, o teor de agregados graúdos varia de 1.190 a 1.480 kg/m³ e o fator água/cimento entre 0,27 a 0,36.

TABELA 2 - Faixas típicas de proporções de materiais em concreto permeável.

	NRMCA (2011)	ACI Committee 522 (2010)
Materiais cimentícios (kg/m ³)	267 – 326	270 – 415
Agregados (kg/m ³)	1190 - 1480	1190 - 1480
Água/cimento (em massa)	0.27 - 0.36	0.27 - 0.34
Relação agregados /cimento (em massa)	–	4 - 4.5

Fonte: Adaptado de Emiko (2016).

O estudo de resistência à compressão, à flexão, porosidade e permeabilidade dos pavimentos em concreto poroso é importante, uma vez que se verificou serem propriedades físicas e mecânicas influenciadas pela proporção de cimento, agregados graúdos e fator água/cimento da mistura. À medida que aumenta o fator de cimento, ocorre o incremento das resistências à compressão e à flexão, no entanto a porosidade e a permeabilidade ficam comprometidas (EMIKO, 2016).

2.3.1.2.3 Blocos de concreto

Historicamente, blocos para fins de pavimentação são utilizados há muito tempo. A princípio, utilizavam-se os blocos de pedra ou prensados em barro. Com a reconstrução de algumas cidades da Europa no período pós 2ª Guerra Mundial, tal como existiam antes da guerra, algumas empresas passaram a produzir os blocos de concreto em substituição aos de pedra e barro que existiam originalmente na pavimentação das ruas. A tecnologia para produção dos blocos visava substituir a malha viária destruída durante a guerra, porém com economia e sem perder qualidades essenciais como resistência, baixa abrasividade, aderência, facilidade de execução e de transporte das peças (SMITH, 1999).

Na década de 1960, na Alemanha, ocorreu um grande crescimento na indústria dos blocos de concreto. Logo em seguida, a mesma tecnologia passou a ser usada por outros países como: Inglaterra, Japão, Austrália, Nova Zelândia e África do Sul. Nos Estados Unidos, os blocos passaram a ser bastante utilizados em projetos urbanísticos. No início dos anos 1990, os blocos de concreto passaram a ser foco de muitos estudos sobre novas tecnologias para projetos de construção de pavimentos e pesquisas sobre a estrutura das peças de concreto para o *U. S. Army Corps of Engineers – USACE* (VIRGILIIS, 2009).

Segundo Ono, Balbo e Cargnin (2017), os três tipos de blocos de concreto, mais usados no Brasil, descritos na ABNT NBR 16416/2015: em concreto convencional com juntas alargadas, em concreto poroso ou vazados podem ser mais frequentemente encontrados no Brasil e em outros países, porém, os formatos e tecnologias existentes são bem mais abrangentes; podendo, inclusive, apresentar qualidade superior em desempenho e permeabilidade.

Como exemplo disso, estão os blocos de concreto articulados. Recentemente empregados em países como Estados Unidos e Coréia do Sul, apresentam articulações unidirecionais e são encaixados dispensando qualquer tipo de rejunte. Com o espaçamento existente entre as peças no sentido não articulado somado à ausência de rejunte, a capacidade de infiltração é bastante favorável, possibilitando um pavimento com alta permeabilidade ($4,89 \times 10^{-3}$ m/s) (SMG, 2014; WEISS *et al.*, 2015).

Em seu estudo, Ono, Balbo e Cargnin (2017) constataram que a taxa de infiltração da estrutura do pavimento com blocos de concreto articulados em uma só direção apresentou valores maiores que os obtidos em outras pesquisas com blocos intertravados com juntas alargadas (10^{-6} m/s) e com asfalto poroso (10^{-5} m/s). Apesar do método experimental para verificação da taxa de infiltração ser o mesmo, a idade dos pavimentos, as condições de uso e

conservação, o volume de tráfego, os locais de aplicação e espaçamento das juntas são diferentes. Logo, os parâmetros servem apenas como estimativas.

Ainda segundo os mesmos autores, o trecho pavimentado sobre base de agregado reciclado apresentou coeficiente médio de permeabilidade de $4,87 \times 10^{-3}$ m/s; o trecho sobre base de agregado natural obteve uma média de $4,94 \times 10^{-3}$ m/s. Os resultados demonstraram a interferência das camadas adjacentes no coeficiente de permeabilidade. Por conta da heterogeneidade do material reciclado, os resultados obtidos nesse trecho apresentaram maior discrepância.

De acordo com a ABNT NBR 16416/2015, as placas de concreto poroso diferem do revestimento em blocos de concreto poroso pelo tamanho e por não apresentarem intertravamento. Mas são semelhantes no que diz respeito à infiltração de água que ocorre pelos poros do próprio concreto da placa.

Os blocos de concreto são fabricados conforme as especificações da ABNT NBR 9781/2013. Quando em concreto convencional, a infiltração ocorre através das juntas que podem variar entre 6mm e 10mm e devem representar aberturas mínimas de 7% em relação à área total do bloco. A velocidade de infiltração da água varia de acordo com a área das juntas e com o coeficiente de permeabilidade dos agregados utilizados no rejuntamento e nas camadas adjacentes (assentamento, base, sub-base e subleito). Os agregados utilizados nos pavimentos permeáveis devem possuir diferentes distribuições granulométricas para cada camada, baixos teores de finos e percentual de vazios em torno 30%. Resultando em coeficientes de permeabilidade mínimo de $3,5 \times 10^{-5}$ m/s (MARCHIONI; SILVA, 2011).

Segundo a ABNT NBR 9781/2013, os blocos de concreto suportam tráfego leve, médio ou pesado, desde que dimensionados com espessura e resistência compatíveis com o tráfego de projeto. As peças devem ser travadas nas bordas, a fim de evitar o destrave pelas tensões provocadas pelo tráfego. Apresentam bom desempenho em diferentes condições climáticas, além de apresentarem colmatação mais lenta que os revestimentos porosos (concreto poroso ou concreto asfáltico poroso). Geralmente possuem boa durabilidade e vida útil, apresentando bom custo benefício (MARCHIONI; SILVA, 2011).

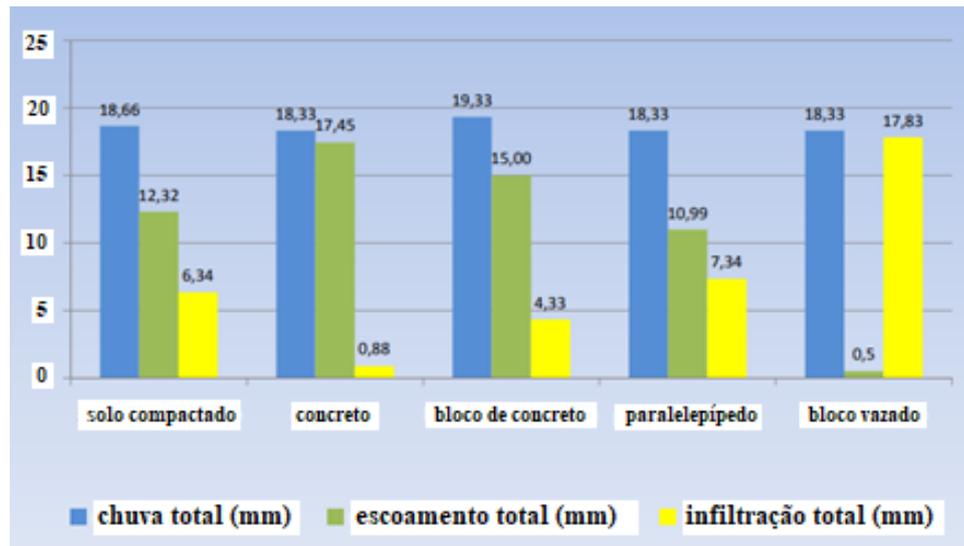
- Blocos vazados de concreto

Os blocos vazados de concreto, também conhecidos como concregrama ou pisograma, são assentados sobre material permeável granular, como areia, e preenchidos normalmente com solo e grama, ou outro tipo de material vegetal, ou brita. Apresentam custo elevado, mas

vida útil bastante satisfatória, alta porosidade, permeabilidade e condutividade hidráulica. Quanto ao assentamento, é recomendada a colocação de filtros geotêxteis, abaixo da camada de areia, a fim de evitar o carreamento de partículas finas para as camadas granulares inferiores (URBONAS; STAHRÉ, 1993; ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; MAUS; RIGHES; BURIOL, 2007; ALENCAR, 2013; HARVEY *et al.*, 2017).

Conforme observado no Gráfico 3, do estudo de Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) e na Tabela 3, de Maus, Righes e Buriol (2007), o escoamento superficial em PP de blocos vazados é praticamente inexistente. A infiltração é de 100% no estudo de Maus, Righes e Buriol (2007) e de quase a totalidade no de Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), demonstrando a eficiência do PP em blocos vazados, como técnica compensatória, na mitigação dos efeitos da impermeabilização do solo.

GRÁFICO 3 - Comparativo entre o total de escoamento e infiltração em diferentes tipos de pavimento, baseado nos estudos do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.



Fonte: Adaptado de Araújo, Tucci e Goldenfum (2000).

TABELA 3 - Valores acumulados de escoamento e infiltração de água em diferentes superfícies.

TRATAMENTO	PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (mm)	ESCOAMENTO SUPERFICIAL (mm)	INFILTRAÇÃO (mm)
Asfalto	236,62	168,00	68,62
Paralelepípedo	236,62	51,34	185,28
Gramado	236,62	5,00	231,62
Bloco vazado	236,62	0,00	236,62

Fonte: Adaptado de Maus, Righes e Buriol (2007).

2.3.1.3 Taxas de Infiltração em Pavimentos Permeáveis

Para verificação da taxa de infiltração em pavimentos permeáveis, o ensaio mais comumente recomendado e utilizado é o ASTM C1701/2009, incorporado pela ABNT NBR 16416/2015, denominado ensaio de coeficiente de permeabilidade. Porém, a taxa de infiltração obtida através do método ASTM C1701/2009 não possui significado físico. De acordo com Coutinho *et. al.*, (2016) a aplicação da metodologia Beerkan é mais adequada por fornecer sete parâmetros hidráulicos (M , N , m ou n , η , K_s , h_g e θ_s) que indicam a capacidade de retenção da água ($\theta(h)$) e de condutividade do solo ($K(\theta)$).

Ono, Balbo e Cargnin (2017) avaliaram a capacidade de infiltração, em uma pista experimental construída com blocos de concreto unidirecionalmente articulados. Para verificar a eficiência do material, com relação às taxas de infiltração, os valores encontrados foram comparados com outros trabalhos em pavimentos permeáveis de blocos de concreto com juntas alargadas estudados por Marchioni e Silva (2013), Martins (2014) e Santos *et al.* (2015) e de camada porosa de atrito (concreto asfáltico poroso) avaliada por Pellizarri (2013). Chegaram à conclusão que o material possui taxa de infiltração de $4,89 \times 10^{-3}$ m/s, semelhante à permeabilidade da brita ($>10^{-3}$) e superior aos materiais comparados no estudo, conforme demonstrado na Tabela 4.

TABELA 4 - Levantamento da taxa de infiltração *in situ* em diferentes tipos de revestimentos permeáveis.

Referência	Tipo de Revestimento	Aplicação	Condição do Pavimento	Taxa de Infiltração (m/s)
Marchioni e Silva (2013)	Bloco c/ juntas alargadas (espinha)	Estacionamento	Novo	$7,2 \times 10^{-4}$
Marchioni e Silva (2013)	Bloco c/ juntas alargadas (trama)	Estacionamento	Antigo (sem manutenção)	$2,26 \times 10^{-4}$
Martins (2014)	Bloco c/ juntas alargadas (espinha)	Calçada	Novo	$8,80 \times 10^{-6}$
Martins (2014)	Bloco c/ juntas alargadas (trama)	Calçada	Novo	$7,16 \times 10^{-6}$
Martins (2014)	Bloco c/ juntas alargadas (espinha)	Calçada	Antigo (sem manutenção)	$7,45 \times 10^{-6}$
Martins (2014)	Bloco c/ juntas alargadas (trama)	Calçada	Antigo (sem manutenção)	$6,79 \times 10^{-6}$
Pellizarri (2013)	Camada porosa de atrito (CPA)	Estacionamento	Antigo (sem manutenção)	$1,69 \times 10^{-5}$
Pellizarri (2013)	Camada porosa de atrito (CPA)	Estacionamento	Antigo (sem manutenção)	$5,25 \times 10^{-5}$
Santos <i>et al.</i> (2015)	Bloco c/ juntas alargadas (espinha)	Calçada	Antigo (sem manutenção)	$1,99 \times 10^{-6}$

Fonte: Ono, Balbo e Cargnin (2017).

Kumar *et al.* (2016) estudaram, durante quatro anos (de 2009 a 2012), o desempenho da infiltração *in situ* de blocos de concreto permeável, concreto permeável e concreto asfáltico permeável em um estacionamento nos EUA. Após um ano de uso, ocorreu apenas um discreto declínio nas taxas de infiltração dos pavimentos estudados. Entre dois e quatro anos, as taxas de infiltração diminuíram significativamente devido à colmatação dos poros, seja por deposição de partículas e/ou pela tensão de cisalhamento produzida pela passagem dos veículos. Esta obstrução não apenas reduziu o espaço total do volume dos poros, como também bloqueou os poros diminuindo, assim, a sua conectividade e, em última análise, dificultou o fluxo da água.

Foram empregadas técnicas de manutenção para recuperar a taxa de infiltração, mas o sucesso foi limitado. No entanto, ainda assim, as taxas de infiltração medidas foram 380 vezes maior que a maioria dos eventos de chuva que ocorrem na área do estudo e nenhum escoamento superficial foi observado (KUMAR *et al.*, 2016).

Ainda segundo Kumar *et al.* (2016), quanto às taxas de infiltração relativa aos três tipos de pavimentos, do melhor para o pior, foi nessa ordem: concreto permeável > blocos permeáveis > concreto asfáltico permeável. Isso pode estar relacionado ao maior tráfego no lote de concreto asfáltico.

Reduções similares nas taxas de infiltração de pavimentos permeáveis dentro de três anos após sua instalação já haviam sido relatadas em estudos anteriores (BEAN; HUNT; BIDELSPACH, 2004; SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2007; SANSALONE *et al.*, 2012). Segundo estes estudos, as principais causas de entupimento podem ser: (1) deposição de partículas de desgaste dos pneus ou escapes dos carros penetrando nos poros; (2) matérias particuladas na água que drena nos poros do pavimento; (3) esforços de cisalhamento nas superfícies causados pela condução dos veículos, o que pode gerar colapso da superfície do pavimento resultando em um efeito de moagem, produzindo partículas finas, bem como o colapso de vazios maiores; (4) um vazamento de óleo que pode bloquear os poros ou tornar os vazios hidrófugos e, assim, impedir o movimento da água.

Mullaney e Lucke (2014) referiram-se a um estudo realizado pelo *French Ministry of Works Central Laboratory* onde se evidenciou o entupimento desde o primeiro ano em estradas com pavimentos permeáveis e uma redução de 35% a 50% nas taxas de infiltração de estacionamentos permeáveis após dois a três anos. O declínio na permeabilidade foi relacionado à intensidade do tráfego e a níveis de poluição. Nas áreas fora das cidades a diminuição da infiltração foi de 30% a 50%, de 40% a 70% nas cidades e de 60% a 90% em regiões muito poluídas. Evidentemente, a intensidade do tráfego aumentou a taxa de desgaste

do pavimento e o processo de colmatação dos poros, conforme demonstrado também nos estudos de Bean, Hunt e Bidelspach (2004) e de Dierkes, Lucke e Helmreich (2015).

Os quatro métodos de manutenção (para desobstrução dos poros) geralmente adotados em pavimentos permeáveis são: (1) pulverizador suave de água na superfície seguido de varredura; (2) varredura seguida de sucção; (3) sucção sozinha; e (4) lavagem com jatos de alta pressão e sucção em conjunto. De forma abrangente, os pesquisadores verificaram que o entupimento pode ser combatido por limpeza com sucção como manutenção preventiva e lavagem com jatos de alta pressão seguida de sucção como manutenção corretiva (DIERKES; LUCKE; HELMREICH, 2015).

Fassman e Blackburn (2010), na cidade de Auckland, Nova Zelândia, realizaram um estudo comparativo em um pavimento permeável dividido em duas camadas por um geotêxtil. A primeira camada de infiltração com 23 cm de areia grossa e a segunda composta por agregado graúdo com 25 mm de diâmetro. O solo natural do subleito composto por silte argiloso apresentou condutividade hidráulica saturada de 4×10^{-9} m/s e possui classificação hidrológica no grupo C do *Soil Conservacion Service*, com CN (*Curve Number*) 74. Durante 3 anos foram monitorados 81 eventos de chuvas fortes. Comparativamente ao asfalto convencional, o pavimento permeável resultou em um amortecimento do hidrograma da ordem de 19% a 82% da vazão de pico.

Castro *et al.* (2013) estudaram a evolução do comportamento de um pavimento permeável no controle do escoamento superficial, no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Durante os anos de 2003 e 2004 ocorreu a primeira etapa de monitoramento. O pavimento foi construído numa área com 246 m², metade revestida em concreto asfáltico poroso e a outra em blocos vazados preenchidos com gramíneas. Entre os anos de 2007 a 2009 foi realizada a segunda etapa do monitoramento quantitativo. Nunca houve nenhum tipo de manutenção nem de limpeza nos revestimentos permeáveis, a fim de demonstrar a condição de uso na realidade brasileira.

Os resultados demonstraram que, dos dois revestimentos pesquisados, apenas o de blocos vazados continuou atendendo satisfatoriamente ao propósito de controle do escoamento superficial. No concreto asfáltico poroso a perda da capacidade de infiltração foi maior, com fortes evidências de colmatação superficial e funcionamento bastante comprometido. Foram observados pontos de acúmulo d'água no revestimento de asfalto poroso enquanto que nos blocos vazados não houve nenhum sinal de poças de água na superfície, nem de deformação. No caso do concreto asfáltico poroso, a indicação de

obstrução na camada superficial sugere a necessidade de manutenções periódicas (CASTRO *et al.*, 2013).

Jabur *et al.* (2015) avaliaram a capacidade de infiltração dos mesmos pavimentos permeáveis estudados por Castro *et al.*, (2013), por meio do *Standard Test Methods for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete* (ASTM C1701/2009) e do infiltrômetro de anéis concêntricos. Durante a instalação do experimento, foi definido que não haveria manutenção para avaliar as condições de uso na realidade brasileira. Após nove anos de uso, os resultados indicaram taxas de infiltração entre $8,9 \times 10^{-6}$ m/s e 19×10^{-6} m/s para o concreto asfáltico poroso e maiores que 10^{-5} m/s para os blocos vazados. Deste modo, os autores concluíram que os blocos vazados de concreto possuem capacidade de infiltração superior ao concreto asfáltico poroso (em 44% pelo teste ASTM C1701/2009 e 98,35% pelo infiltrômetro de anéis concêntricos), com médio grau de permeabilidade, mesmo nas condições brasileiras de uso, sem manutenção.

Os resultados corroboram com as críticas, indicando que, no Brasil, sem manutenção periódica os revestimentos em concreto asfáltico poroso não estão cumprindo com o controle no escoamento superficial de acordo com a estimativa do projeto.

O desempenho de pavimentos permeáveis, com um mínimo de manutenção, exige um modelo preciso de programa computacional que possa simular e prever o comportamento em longo prazo, a fim de que os engenheiros possam determinar o projeto apropriado para a mitigação dos eventos em níveis desejados. Vários estudos (TAN; FWA; HAN, 2003; MONTES; HASELBACH, 2006; DEO; SUMANASOORIYA; NEITHALATH, 2010; KUANG *et al.*, 2011; YOUNG *et al.*, 2013) simularam o desempenho de pavimentos permeáveis por técnicas de modelagem (numéricas ou empíricas), mas poucos compararam suas previsões com dados obtidos através de investigações de campo e experiências de laboratório (COUTINHO *et al.*, 2016; RIBAS, 2017).

Tan, Fwa e Han (2003) modelaram a redução da porosidade nas camadas de base para pavimentos permeáveis usando a equação de Kozeny-Carman em conjunto com dados experimentais.

Montes e Haselbach (2006) estabeleceram uma relação quantitativa entre porosidade e condutividade hidráulica de uma superfície de concreto poroso usando uma metodologia similar a de Tan, Fwa e Han. (2003).

Deo, Sumanasooriya e Neithalath (2010) desenvolveram um modelo para simular a degradação das taxas de infiltração superficial (SIR – *surface infiltration rate*) para um

pavimento de concreto poroso com base em uma abordagem probabilística de captura de partículas e dados experimentais.

Kuang *et al.* (2011) compararam o sistema de condutividade hidráulica da camada superficial de um concreto poroso com o simulado para diferentes modelos usando várias equações de estrutura de poros. A comparação demonstrou que a equação de Kozeny-Carman pode ser bem sucedida para simular a condutividade hidráulica com o ajuste adequado da porosidade e tortuosidade.

Young *et al.* (2013) desenvolveram um modelo de regressão para prever a degradação da porosidade em uma superfície de concreto asfáltico poroso usando dados experimentais de laboratório. Alguns estudos mais antigos (MACDONALD; EL-SAYED; DULLIEN, 1979; ZHU; FOX; MORRIS, 1999; SCHLÜTER; JEFFERIES, 2002; ECK *et al.*, 2011) se concentraram na simulação do escoamento superficial, infiltração e saída da água nos pavimentos permeáveis.

Macdonald; El-Sayed; Dullien (1979) modelaram o fluxo da água através de um meio de cascalho usando uma versão revisada da equação de Ergun e os resultados do modelo foram consistentes com os obtidos a partir de experiências de laboratório.

Zhu, Fox e Morris (1999) desenvolveram um modelo numérico baseado na hidrodinâmica das partículas (SPH) a fim de descrever o fluxo através do meio de cascalho.

Schlüter e Jefferies (2002) desenvolveram um modelo computacional para simular a saída (taxa de pico e volume) no pavimento poroso usando um programa de *software* (Erwin) para águas pluviais.

Eck *et al.* (2011) desenvolveram um modelo numérico usando a equação de Boussinesq para simular a mitigação do escoamento superficial durante eventos de tempestade, aplicando a conservação da massa para a camada superficial de um concreto asfáltico poroso.

2.3.1.4 Avaliação do Comportamento Hidráulico de Pavimentos Permeáveis através do Modelo Hydrus

Coutinho *et al.* (2016) estudaram, durante os anos de 2010 e 2011, a dinâmica do fluxo de água infiltrada através de um pavimento permeável de blocos vazados e de quatro tipos de solos coletados no local (silte, silte arenoso, areia siltosa e areia). O pavimento para a realização do estudo foi construído numa área de estacionamento na Universidade Federal de Pernambuco, na cidade do Recife. Os solos de preenchimento do revestimento do pavimento e

o do subleito foram caracterizados, sobre o ponto de vista da hidrodinâmica e granulometria, pela metodologia Beerkan. Sendo realizados 52 ensaios de infiltração. As propriedades hidráulicas não-saturadas foram obtidas pelo BEST. Através das curvas de retenção da água e de condutividade hidráulica, com o modelo HYDRUS1D, foi possível realizar a modelagem do movimento da água (infiltração, evaporação e escoamento) para um período.

Para o gerenciamento do escoamento superficial urbano, a simulação numérica demonstrou que o pavimento permeável é um sistema de importância fundamental. Os resultados indicaram que o revestimento do pavimento apresentou capacidade de infiltração maior que a camada do subleito e foi capaz de drenar a água em menos de 24h (COUTINHO *et al.*, 2016).

Brunetti, Simunek e Piro (2016) verificaram que a falta de adequação das ferramentas de modelagem representa uma barreira na concepção e construção dos sistemas de drenagem. Investigaram o ajuste do HYDRUS 1D para descrever corretamente o comportamento hidráulico do sistema do pavimento permeável instalado na Universidade de Calabria, na Italia. Foram analisados dois diferentes cenários: o primeiro utilizando um único modelo para todas as camadas do pavimento permeável; o segundo, um modelo de dupla porosidade para as camadas de base e sub-base. O resultado confirmou a adequação e precisão do HYDRUS 1D na descrição correta do comportamento hidráulico de pavimentos permeáveis. A análise de sensibilidade também revelou que o desgaste da camada influenciou principalmente o comportamento hidráulico do pavimento.

Os resultados de otimização e validação indicaram que a implantação do modelo de dupla porosidade para as camadas de base e sub-base produziram resultados mais precisos que o modelo de porosidade única, descrevendo muito melhor o comportamento hidráulico do pavimento permeável. Também confirmaram a validade do pressuposto de que o comportamento hidráulico das camadas de base e sub-base era semelhante ao comportamento de uma rocha fraturada altamente permeável interligada a uma matriz altamente estática. A principal vantagem em usar um modelo simples, com dupla porosidade, com base em transferência de massa de saturação é que esse modelo requer apenas dois parâmetros adicionais quando comparado ao modelo de porosidade única. Podem ser obtidas melhorias ao caracterizar as propriedades hidráulicas da camada de superfície em laboratório, como sugerido pela análise de sensibilidade.

Brunetti *et al.* (2017) investigaram o benefício da modelagem através do HYDRUS 2D, que foi empregado para simular o comportamento hidráulico variadamente saturado de um meio poroso. A análise de sensibilidade revelou que os dois parâmetros hidráulicos do

solo, índice de forma e condutividade hidráulica saturada (K_s), afetam a resposta hidráulica da camada de infiltração. Estes dois parâmetros foram estimados usando o algoritmo PSO com um valor NSE de 0,85, o que indicou uma boa precisão do modelo. Além disso, a análise da superfície de resposta confirmou os resultados do GSA, identificando como o parâmetro mais influente. A análise de confiabilidade baseada em um substituto foi avaliada validando os parâmetros otimizados em um conjunto de dados de saída medidos. Um valor de NSE = 0,8 confirmou a confiabilidade do modelo HYDRUS 2D calibrado através da técnica krigagem.

Turco *et al.* (2017) estudaram o comportamento hidráulico não saturado de um pavimento permeável através de ensaios laboratoriais e análise numérica usando o modelo HYDRUS 2D. Uma descrição hidrológica adequada do fluxo de água em sistemas de pavimentos permeáveis depende muito do conhecimento das propriedades hidráulicas não saturadas dos materiais de construção. Embora vários modelos, ferramentas e métodos de laboratório já existam para determinar as propriedades hidráulicas dos solos, a importância de uma descrição hidráulica precisa dos materiais do sistema do pavimento permeável é cada vez mais reconhecida no campo da hidrologia urbana.

O sistema estudado por Turco *et al.* (2017) consiste em três materiais: camada de blocos de concreto poroso, camadas de cascalho fino e camada sub-base de cascalho grosso.

Os resultados confirmaram a aplicabilidade e adequação do HYDRUS 2D para descrever corretamente o comportamento hidráulico do sistema em escala de laboratório e identificação dos parâmetros hidráulicos reais dos materiais de construção que compõem o pavimento. A otimização da solução inversa que utiliza um parâmetro do tipo Marquardt-Levenberg para a estimativa inversa dos parâmetros hidráulicos do material foi conduzida a fim de calibrar o modelo. A abordagem melhorou a identificação de parâmetros hidráulicos de pavimentos permeáveis e, embora a medição da pressão de saída não possa ser realizada devido à natureza dos materiais (concreto, cascalho fino e brita), medições do teor de água ajudaram a reduzir a incerteza na estimativa dos parâmetros hidráulicos. Por fim, os resultados obtidos demonstraram que a implantação de um modelo voltado para sistemas de solo, em conjunto com procedimentos experimentais e numéricos precisos, é capaz de descrever com precisão o comportamento hidráulico de um sistema composto de vários materiais, em camadas constituídas não somente de solos (TURCO *et al.*, 2017).

Ribas (2017) avaliou a capacidade de infiltração, em escala real, de um pavimento permeável através de ensaios de infiltração e a modelagem do comportamento hidrodinâmico pelo HYDRUS 1D. A avaliação da capacidade hidrodinâmica do pavimento foi realizada utilizando diferentes modelos unidimensionais acoplados à parcela de dispersão lateral da

infiltração, modelos tridimensionais de infiltração, modelos de infiltração para regime permanente, método Inverso e o método Beerkan. Os resultados dos ensaios de infiltração e de 8 dos 9 métodos utilizados para caracterização hidrodinâmica do conjunto camadas do solo com pavimento confirmaram satisfatoriamente o potencial hidrológico do pavimento permeável como técnica compensatória, com poucos pontos isolados apresentando baixíssima permeabilidade.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na fundamentação teórica são apresentados o comportamento físico do solo e o fenômeno de infiltração da água no solo.

3.1 ESTUDO DO SOLO

Desde o final da década de 1990 a ciência vem constatando a importância do solo e da vegetação, como sistemas naturais de drenagem, para o equilíbrio qualitativo e quantitativo de águas de chuva, favorecendo a infiltração, a evapotranspiração e o contato desta água com bactérias e plantas (SOUZA *et al.*, 2008; SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012).

O movimento da água em meio poroso está intimamente ligado às propriedades hidráulicas do solo, representadas por duas características fundamentais: a curva de retenção da água no solo $h(\theta)$ e a curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$ (SOUZA, 2005). O estudo do solo é essencial para a interpretação do desempenho das práticas compensatórias, uma vez que o mesmo funciona como exutório das técnicas de infiltração.

Klar (1988) define o solo como um sistema poroso formado por partículas sólidas e volume de vazios, que podem ser ocupados pelo ar ou pela água.

O solo é considerado um sistema trifásico heterogêneo, do ponto de vista da física do solo. No qual as três fases são representadas da seguinte maneira: a fase sólida que constitui a *matriz do solo*, composta de matéria orgânica e mineral; a fase líquida que consiste na água do solo na qual existem substâncias dissolvidas (sais minerais e compostos orgânicos) cuja concentração varia de solo para solo, devendo ser chamada então de *solução do solo*, e a fase gasosa que é a *atmosfera do solo* (constituída de ar e vapor d'água). As fases líquida e gasosa são complementares, à medida que ocorre a presença máxima de uma fase, há a diminuição da outra (FERREIRA, 2010; ALVES, 2015).

Através do conhecimento dos parâmetros físicos desse sistema, é possível um entendimento dos processos naturais ou não que ocorrem no solo.

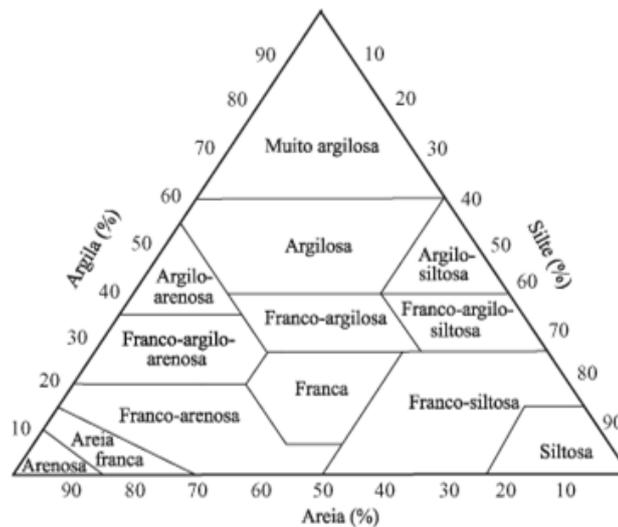
Quanto à granulometria, usualmente os grãos são classificados em três classes básicas: areia, silte e argila. A Tabela 5 apresenta a classificação proposta pela Sociedade Internacional de Ciências do Solo – ISST.

TABELA 5 - Classificação granulométrica, segundo a Sociedade Internacional de Ciência do Solo.

Classificação	Tamanho dos grãos (diâmetro médio, mm)
Areia muito grossa	2,0 – 1,0
Areia grossa	1,0 – 0,5
Areia média	0,5 – 0,25
Areia fina	0,25 – 0,10
Areia muito fina	0,10 – 0,05
Silte	0,05 – 0,002
Argila	< 0,002

Fonte: USDA, 1993.

As classes texturais dos solos podem ser determinadas através do triângulo de texturas, proposto pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), conforme apresentado na Figura 2.

FIGURA 2 - Triângulo de classificação de textura do solo.

Fonte: USDA, 1993.

Segundo Caputo (1988), é relevante aos estudos de física do solo o conceito de densidade das partículas do solo, ou densidade real, ou massa específica das partículas do solo (d_p ou ρ_p), dada pela razão entre a massa da fração sólida do solo (m_s) e o volume desta fração (V_s), Equação 1.

$$d_p = \frac{m_s}{V_s} \quad (1)$$

Em que: d_p é dado em $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$; m_s em $[\text{g}]$ e V_s em $[\text{cm}^3]$.

A densidade global, ou densidade de um solo, ou massa específica do solo (d_g ou d_s ou ρ_s), é definida como a relação entre a massa de fração sólida do solo (m_s) e o volume total do solo (V_t), conforme Equação 2. Por sua susceptibilidade às variações no tempo, não é considerada um parâmetro físico do solo, mas é de relevante análise. Principalmente em estudos agrônômicos, entre outros objetivos, para a determinação da quantidade de água a aplicar no solo em projetos de irrigação (ALMEIDA, 2006).

$$d_s = \frac{m_s}{V_t} \quad (2)$$

Em que: d_s é dado em $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$; m_s em $[\text{g}]$ e V_t em $[\text{cm}^3]$.

Segundo Klar (1988), porosidade total ou porosidade de um solo ou porosidade aparente, ϕ (%), é a relação entre a densidade global (d_s) e a densidade de partículas do solo (d_p), conforme Equação 3:

$$\phi (\%) = \left(1 - \frac{d_s}{d_p} \right) \times 100 \quad (3)$$

Também podendo ser calculada pela proporção entre o volume de poros de uma amostra e o seu volume total; o que reflete a percentagem de poros conectados e não conectados (Equação 4).

$$\phi (\%) = \left(\frac{V_v}{V_t} \right) \times 100 \quad (4)$$

A umidade gravimétrica, w , é a relação entre a massa de água e a massa de partículas sólidas em uma amostra do solo, conforme Equação 5; enquanto que a umidade volumétrica, θ , é a relação entre o volume de água e o volume total do solo em uma determinada amostra, conforme Equação 6.

$$w = \left(\frac{m_l}{m_s} \right) \quad (5)$$

$$\theta = \left(\frac{V_l}{V_t} \right) \quad (6)$$

O índice de vazios, e , é a relação entre o volume de vazios (volume de poros) presentes na amostra do solo e o volume de partículas sólidas, expresso pela Equação 7.

$$e = \left(\frac{V_v}{V_s} \right) \quad (7)$$

O Grau de Saturação, GS , de um solo é obtido pela relação entre o volume de água e o volume de vazios (volume de poros) presente na amostra do solo, sendo numericamente igual à umidade volumétrica saturada (Equação 8).

$$GS = \left(\frac{V_l}{V_v} \right) \quad (8)$$

A saturação efetiva, S_e , é a relação entre o volume de água e o volume de vazios de uma amostra de solo (Equação 9). A diferença entre o GS e a S_e é que no GS desconsidera-se a umidade volumétrica residual, θ_r .

$$S_e = \left(\frac{V_l}{V_v} \right) = \frac{\theta_x - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (9)$$

3.1.1 Propriedades Hidrodinâmicas do Solo

Para a modelagem do transporte de água em meios porosos é indispensável a compreensão das propriedades hidráulicas dos solo, tais como as curvas de retenção da água no solo $\Theta(H)$ e da condutividade hidráulica $K(\theta)$.

3.1.1.1 Curva Característica ou Curva de Retenção $\Theta(H)$

A curva característica do solo ou curva de retenção de água no solo $\theta(h)$ representa graficamente uma propriedade físico-hídrica do solo, sendo a relação entre o potencial matricial, que é o potencial de água no solo (h) e a umidade do solo (θ), que caracteriza o armazenamento de água pelo solo num determinado potencial matricial (RICHARDS, 1941; JALBERT; DANE, 2001). Ela é típica para cada tipo de solo e varia de acordo com a classe textural, o conteúdo de matéria orgânica, o grau de compactação, a geometria (conectividade e tamanho) dos poros e outras propriedades físicas (ALVES, 2015).

Segundo Klar (1988), geralmente a curva característica é também uma representação gráfica da função que correlaciona o volume de água dentro dos poros do solo e a energia necessária para extração dessa água pela ação de uma força de sucção.

Como estão intimamente ligadas à distribuição dos poros que, por sua vez, está relacionada à pressão capilar, as curvas são diferentes para cada tipo de solo. Solos arenosos possuem poros maiores que apresentam redução brusca da umidade, quando submetidos à sucção. No caso da curva de solos argilosos, o decréscimo da umidade é gradual, devido à redução dos poros e às forças iônicas entre partículas de solo e água (ALMEIDA, 2006).

Vários modelos foram desenvolvidos para descrever o comportamento da curva de retenção da água no solo (GARDNER, 1958; BROOKS; COREY, 1964; VAN GENUCHTEN, 1980; ZHANG; VAN GENUCHTEN, 1994). Dentre os que mais se destacam na literatura estão:

a) a equação de van Genuchten (1980):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (10)$$

$$S_e = [1 + |ah|^n]^{-m} \quad (11)$$

Com, $m = 1-1/n$; $n \geq 1$ Mualem (1976) e $m = 1-2/n$; $n \geq 2$ Burdine (1953). Sendo: S_e a saturação efetiva; θ_r e θ_s a umidade volumétrica residual e saturada, respectivamente; $\alpha = 1/h_g$ a pressão de entrada de ar e n e m parâmetros de forma.

b) a equação de Brooks e Corey (1964):

$$S_e = \left(\frac{h}{h_b}\right)^{-\eta} \quad (12)$$

Sendo $S_e \leq 1$, e η um parâmetro característico do solo, que indica a distribuição do tamanho dos poros (CHEN *et al.*, 1993).

3.1.1.2 Curva de Condutividade Hidráulica $K(\theta)$

A condutividade hidráulica é um parâmetro hidrogeológico que representa a facilidade/agilidade com que a água pode ser conduzida ao longo do perfil do solo,

correlacionando as características do meio, tais como: porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas; e as propriedades do fluido que está escoando, em especial a viscosidade e a massa específica (PAULETTO *et al.*, 1988; ALVES, 2015).

A principal diferença entre o escoamento em meio saturado e em meio não-saturado está na condutividade hidráulica. Quando saturado, o solo possui todos os poros preenchidos por água e conduzindo água, apresentando uma condição de condutibilidade máxima do fluido. Em meio não-saturado, os poros encontram-se preenchidos por água e ar, ocorrendo um decréscimo da condutividade hidráulica nesta situação. Assim, a condutividade hidráulica varia em função da umidade do solo e atinge o seu valor máximo na saturação, onde é chamada de condutividade hidráulica de saturação, K_s . A curva de condutividade hidráulica do solo não saturado $K(\theta)$ é obtida quando o solo encontra-se sob a condição de não saturação. Para meios porosos saturados ou não saturados, a maior dificuldade na quantificação do fluxo está na determinação da condutividade hidráulica (PAULETTO *et al.*, 1988).

Para determinação direta da condutividade hidráulica dos solos, utilizam-se métodos que podem ser de laboratório ou de campo. Nos métodos de laboratório, podem ser utilizadas amostras deformadas ou indeformadas. Nos métodos de campo, como o próprio nome diz, as medidas são obtidas no próprio campo e a perturbação do solo deve ser a mínima possível. Devido às dificuldades envolvidas para a obtenção da condutividade hidráulica, alguns pesquisadores buscaram calculá-la teoricamente, com base em outras propriedades do meio poroso de mais fácil medida (LIBARDI; MELO FILHO, 2006).

Dentre os métodos de laboratório, pode-se citar: o permeâmetro de carga constante e o permeâmetro de carga decrescente; e de campo são: o método do permeâmetro de Guelph e o método do perfil instantâneo. Estes métodos de determinação direta da condutividade hidráulica em solo não saturado geralmente consomem tempo, são caros e, algumas vezes, estão sujeitos a hipóteses simplificadoras. Uma alternativa à medida direta é o cálculo teórico da condutividade hidráulica, a partir de dados de retenção da água no solo, mais facilmente medidos no campo ou em laboratório.

Dentre os modelos (formulações algébricas) que mais se destacam para a determinação da condutividade hidráulica não saturada, estão:

a) a equação de van Genuchten (1980), com a hipótese de Mualem (1976):

$$K(S_e) = K_s S_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (13)$$

Segundo Libardi (2005), a Equação 14 para a previsão da função $K(\theta)$ parece ajustar-se melhor aos solos de textura média a arenosa.

Com a hipótese de Burdine (1953):

$$K(S_e) = K_s S_e^2 \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right] \quad (14)$$

b) e a equação de Brooks e Corey (1964), com a hipótese de Burdine ($\lambda = n-2$):

$$K(S_e) = K_s S_e^\eta, \text{ sendo } \eta = 3 + \frac{2}{\lambda} \quad (15)$$

Ou utilizando a hipótese de Mualem ($\lambda = n-1$):

$$K(S_e) = K_s S_e^{c-\frac{1}{2}} \quad (16)$$

3.2 MÉTODO BEERKAN

Beerkan é um método semifísico que tem como principal objetivo estimar os parâmetros das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$, através da textura e da estrutura do solo. Pelo método Beerkan as curvas de retenção da água no solo $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ são descritas analiticamente por cinco parâmetros: dois são de forma m ou n e η , relativos à textura e três são de normalização, que dependem da estrutura do solo θ_s , K_s e h_g . Os parâmetros de forma são encontrados através da curva de distribuição granulométrica das partículas $F(D)$ e da porosidade; os de normalização são obtidos a partir de ensaios de infiltração com infiltrômetro de anel simples (HAVERKAMP *et al.*, 1998; BRAUD *et al.*, 2005; SOUZA, 2005; LASSABATÈRE *et al.*, 2006; SOUZA *et al.*, 2008).

Os parâmetros (de forma e de normalização) das curvas de retenção da água no solo $\theta(h)$ podem ser obtidos pela equação de Van Genuchten (Equações 13 e 14) e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pela equação de Brooks e Corey (Equação 15).

A curva da condutividade hidráulica do solo é fundamental para verificar e entender o movimento da água no meio. Essa propriedade físico-hídrica, que pode ser determinada por diferentes métodos experimentais, é, com frequência, apontada como um problema da experimentação, por possuir grande variabilidade entre repetições. Para contornar esse problema, metodologias que consigam obter, de forma rápida e eficiente, as curvas de retenção e de condutividade hidráulica não saturada são tão necessárias (LIBARDI; MELO FILHO, 2006).

3.3 MODELO HYDRUS

O HYDRUS é um modelo de elementos finitos para a simulação e análise do fluxo da água e do transporte de calor e de soluto em meios porosos saturados ou não saturados. O modelo inclui um algoritmo de otimização de parâmetros para a estimativa inversa de uma variedade de parâmetros de transporte de água e/ou solutos nos solos. Sendo suportado por uma interface gráfica baseada em gráficos para pré-processamento de dados, geração de malha de elementos finitos estruturados e não estruturados e apresentação gráfica dos resultados.

Através da utilização de elementos finitos, o programa computacional resolve numericamente as equações de Richards (1931), permitindo a obtenção dos parâmetros hidráulicos pela resolução da modelagem inversa.

A rotina para a dinâmica da água em um meio poroso unidimensional, isotérmico, parcialmente saturado é descrita por uma forma modificada da equação de Richards (Equação 17), na qual são desconsiderados os efeitos da fase gasosa e do gradiente térmico no fluxo da água.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (17)$$

Sendo h o potencial mátrico da água no solo [L]; θ a umidade volumétrica da água [L³.L⁻³]; t o tempo [T]; x a coordenada espacial [L]; S o termo de sumidouro [L³.L⁻³.T⁻¹] e α o ângulo entre a direção do fluxo e o eixo vertical.

O HYDRUS pode lidar com domínios de fluxo delimitados por limites irregulares. A própria região de fluxo pode ser composta por solos não uniformes com um grau arbitrário de anisotropia local. O fluxo e o transporte podem ocorrer no plano vertical, no plano horizontal, numa região tridimensional que exibe simetria radial em torno de um eixo vertical ou em uma região tridimensional.

As propriedades hidráulicas do solo não-saturado são descritas usando as equações de Van Genuchten (1980), Brooks e Corey (1964), Durner (1994), Kosugi (1996) e Van Genuchten modificada. Foram feitas modificações para melhorar a descrição das propriedades hidráulicas perto da saturação. O HYDRUS incorpora histerese usando o modelo empírico introduzido por Scott, Farquhar e Kouwen (1983) e Kool, Parker e van Genuchten (1987). Como alternativa, também está incorporado o modelo de histerese de Lenhard, Parker e Kaluarachchi (1991) e Lenhard e Parker (1992), que elimina o bombeamento, observando os pontos históricos de reversão, para o HYDRUS. O programa também implementa um procedimento de escala para aproximar a variabilidade hidráulica em um determinado perfil do solo por meio de um conjunto de transformações de escala linear que relacionam as características hidráulicas do solo individual com as de um solo de referência.

As equações governantes são resolvidas numericamente usando um método de elemento finito linear de tipo Galerkin aplicado a uma rede de elementos triangulares. A integração no tempo é alcançada usando um esquema de diferença finita implícita para condições saturadas e não saturadas. As equações resultantes são resolvidas de forma iterativa, por linearização e posterior eliminação gaussiana para matrizes de bandas, um método de gradiente conjugado para matrizes simétricas ou o método Orthomin para matrizes assimétricas. Medidas adicionais são tomadas para melhorar a eficiência da solução em problemas transitórios, incluindo o ajuste automático do tempo e garantir que os números Courant e Peclet não excedam os níveis predefinidos. O conteúdo de água é avaliado usando o método conservador de massa proposto por Celia, Bououtas e Zarba (1990). Para minimizar as oscilações numéricas, a medida à montante é incluída como uma opção para resolver a equação.

Além disso, o HYDRUS implementa uma técnica de estimação de parâmetros do tipo Marquardt-Levenberg para a estimativa inversa de parâmetros selecionados (somente em 2D). O procedimento permite que vários parâmetros desconhecidos sejam estimados a partir de conteúdos de água observados, de pressão, concentrações e/ou fluxos de limite instantâneos ou cumulativos (por exemplo, dados de infiltração ou saída).

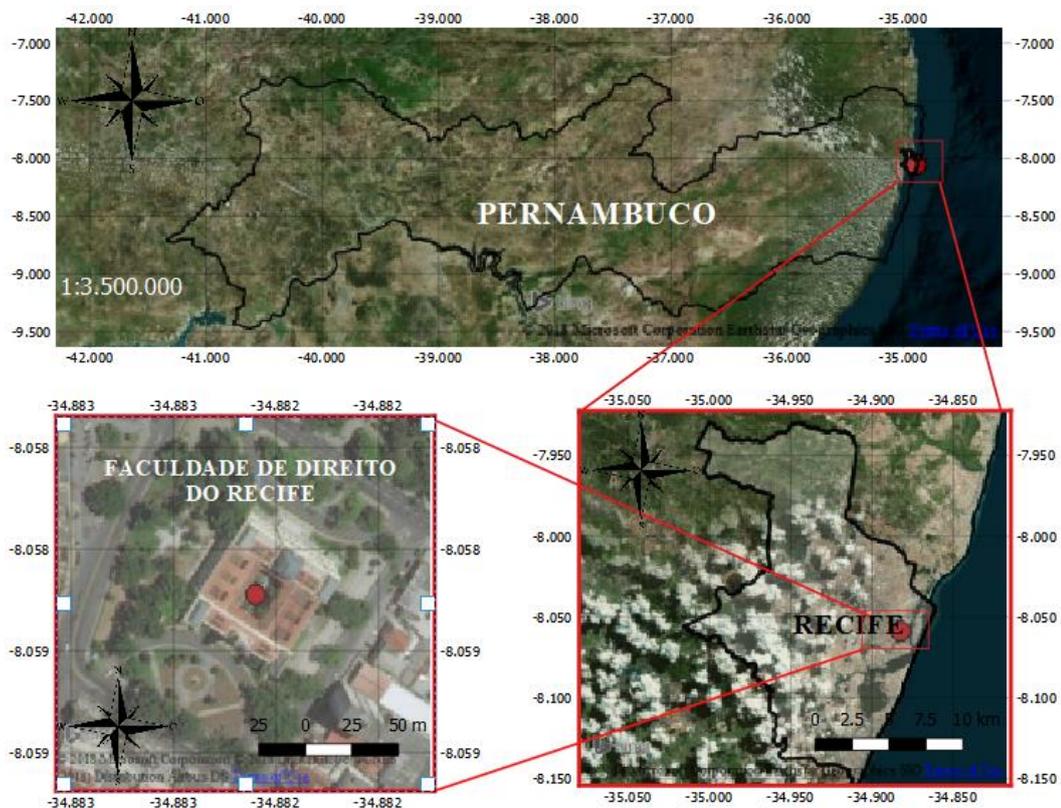
4 MATERIAIS E MÉTODOS

No capítulo 4 é apresentado o Programa Experimental, descrevendo os Materiais e Métodos utilizados nesta pesquisa. Desde as técnicas experimentais adotadas para a realização dos ensaios de campo e de laboratório até a obtenção dos parâmetros hidráulicos do pavimento permeável pelo método Beerkan. E, com os dados obtidos, simular as condições hidrodinâmicas do pavimento estudado através do HYDRUS 1D.

4.1 ÁREA DE ESTUDO: CARACTERIZAÇÃO DE RECIFE

O estudo foi realizado no sítio experimental localizado a $8^{\circ}03'31''$ de latitude sul e $34^{\circ}52'57''$ de longitude oeste, com aproximadamente 3,00 metros acima do nível do mar, no estacionamento do Centro de Ciências Jurídicas (CCJ) da Universidade Federal de Pernambuco, na Praça Dr. Adolfo Cirne, no bairro da Boa Vista, em Recife (Mapa 1).

MAPA 1 - Foto de satélite da microrregião de Recife onde foram realizados os ensaios de campo.



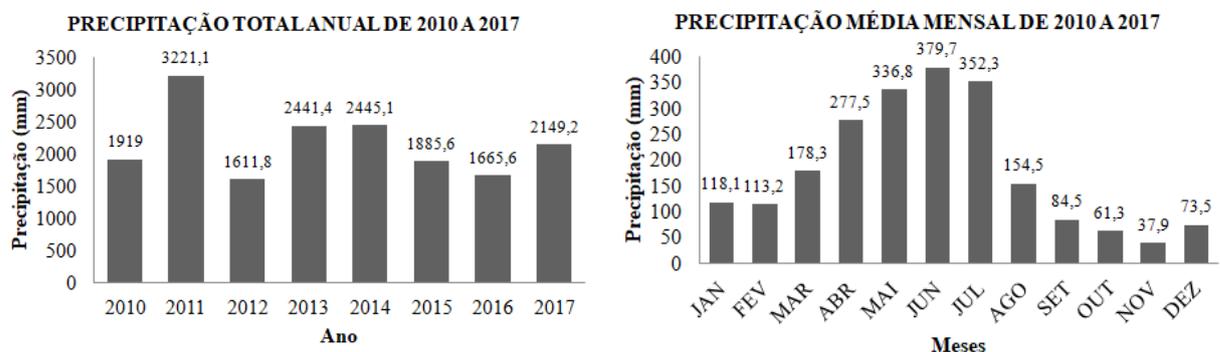
Fonte: A Autora (2018).

O estado de Pernambuco está localizado no centro-leste da região nordeste e ocupa uma área de 98.937,84 km². A capital, Recife, está situada entre 8°04'03'' de latitude sul e 34°52'00'' de longitude oeste e ocupa uma área de 219,49 km² no litoral norte oriental da Região Nordeste do Brasil. Segundo o censo demográfico de 2000, tem uma população de 1.422.905 habitantes, com alta densidade demográfica de 6.483 habitante por km² (CAVALCANTI; LYRA; AVELINO, 2008).

A cidade assentou-se numa região onde ocorreram sucessivas transgressões e regressões marinhas que formaram uma extensa planície fluvio-marinha em forma de anfiteatro. É cortada pelos rios Capibaribe e Beberibe e também por rios menores, dentre eles o Tejipió, o Jiquiá e o Jordão, e mais 66 canais, cercada por pequenos morros terciários da Formação Barreiras. Essa conformação geomorfológica dificultou a expansão da cidade e condicionou a hidrodinâmica e a estruturação de uma densa e ramificada rede de drenagem; impondo sérias restrições ao escoamento pluvial (GUSMÃO FILHO, 1998; SILVA, 2003).

A cidade do Recife possui um clima do tipo As', quente e úmido, pela classificação de Köppen-Geiger. A estação chuvosa ocorre no período do inverno, com maiores precipitações entre os meses de março a agosto, concentrando 70% do total precipitado (COUTINHO, 2011). Na maioria dos meses do ano existe uma precipitação significativa, com pluviosidade média anual de 2.167,35 mm (entre os anos de 2010 e 2017). Pela série histórica de 2010-2017, da Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, junho é o mês com maior precipitação pluviométrica, em média 379,7 mm; e novembro o mês mais seco, com média de 37,9 mm (APAC, 2018) (Gráfico 4). A temperatura média anual em Recife é 25,8°C.

GRÁFICO 4 - Precipitação média mensal e total anual de Recife entre os anos de 2010 a 2017, Estação Várzea.

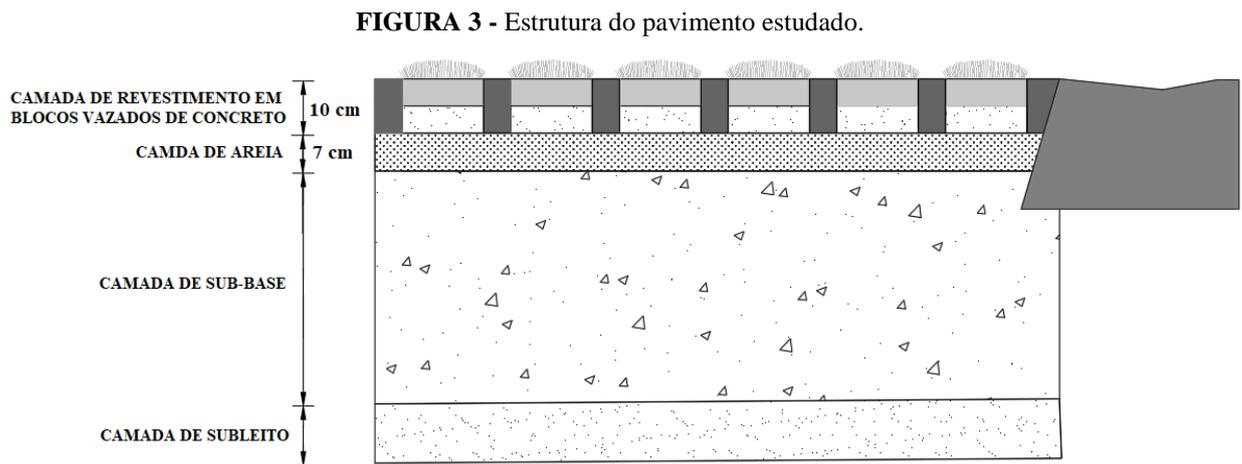


Fonte: Adaptado da APAC (2018).

4.1.1 Pavimento Permeável: Descrição

O pavimento estudado foi construído em 2012, tem 6 anos de uso e ainda não passou por nenhum tipo de intervenção nem manutenção. É composto por uma camada de revestimento de blocos vazados de concreto, assentados sobre um colchão de areia com 7 cm de espessura, compactado mecanicamente com compactador de 400 kg. Os blocos são preenchidos com grama esmeralda e terra vegetal e medem 39 cm x 21 cm e espessura de 10 cm, cada. No local de implantação existia um jardim, onde a camada superficial foi removida para o assentamento dos blocos vazados do PP (Figura 3).

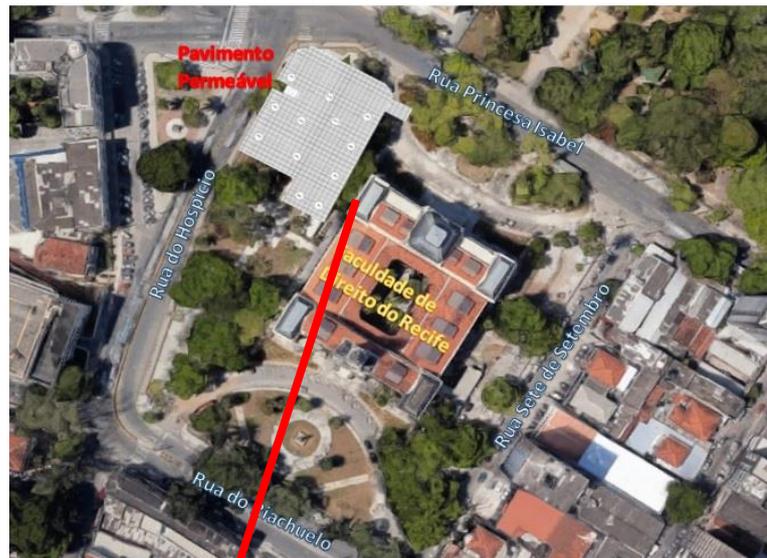
A caracterização do solo foi realizada nas amostras retiradas da parte vazada dos blocos de concreto de acordo com a ABNT NBR 7181/1984. E a classificação granulométrica pelo *United States Department of Agriculture- USDA* e EMBRAPA (1999).



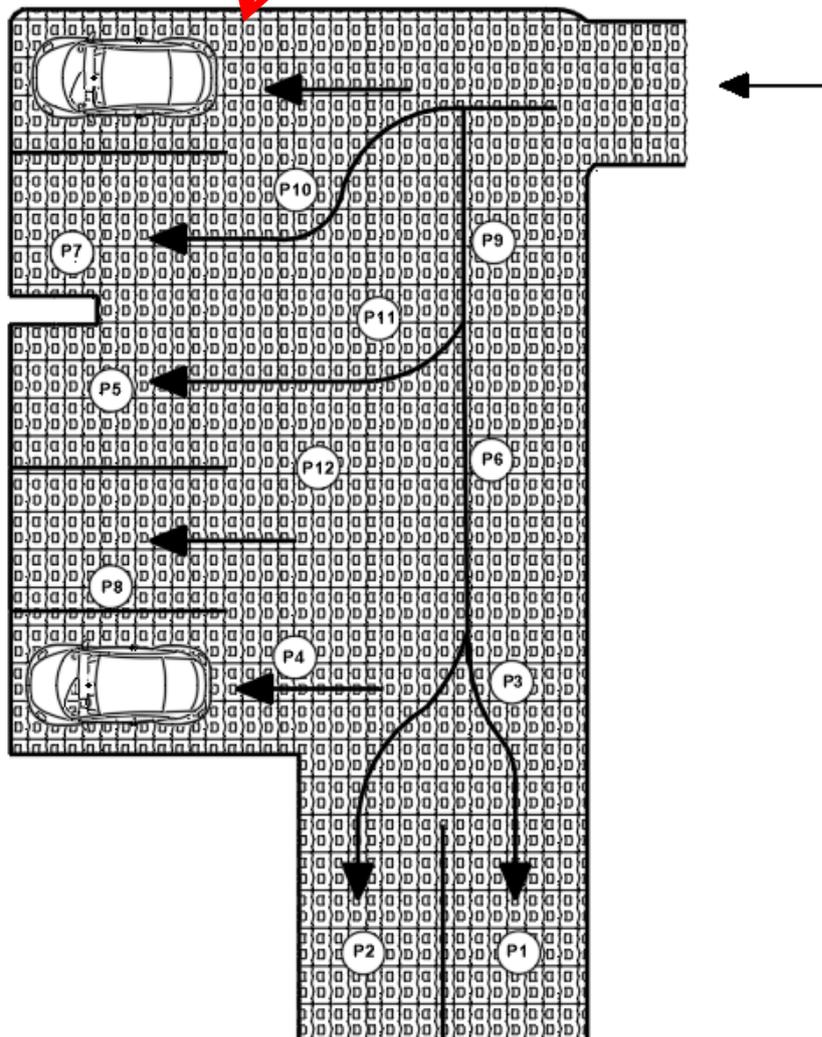
Fonte: A Autora (2018).

Com a finalidade de verificar a variabilidade espacial do comportamento do PP quanto à infiltração, foram escolhidos 12 pontos aleatórios para experimentação (Mapa 2). Os ensaios de infiltração foram realizados utilizando um infiltrômetro de anel simples, com 100 cm de diâmetro para aumentar a escala real e diminuir as incertezas na representação do fluxo da água.

MAPA 2 – (a) Mapa e (b) croqui ilustrativo do local e dos 12 pontos avaliados no estudo.



(a)



(b)

Fonte: (a) Adaptado de Google Maps (2017) e (b) A Autora (2018).

4.2 MÉTODO BEERKAN

O método Beerkan, baseia-se nas propriedades estáticas (curva granulométrica) e dinâmicas do solo (curva de infiltração da água no solo) para obtenção dos parâmetros de forma (m , n , η) que dependem da textura do solo e de normalização (θ_s , K_s , h_g) que dependem da estrutura do solo, os quais são obtidos pelo BEST (*Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments*) (LASSABATÈRE *et al.*, 2006; SOUZA *et al.*, 2008).

É considerado um método semi-físico que utiliza a equação de Haverkamp *et al.* (1998) para simplificar a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos, que são obtidos de forma indireta, com rapidez e economia. Os parâmetros das curvas de retenção da água no solo ($\theta(h)$), e de condutividade hidráulica do solo ($K(\theta)$) são descritos pelos modelos de van Genuchten (1980) e de Brooks e Corey (1964) (Equação 19), respectivamente. Reescrevendo a Equações 10 e 11, obtem-se a Equação 18 (Sendo $\alpha = \frac{1}{h_g}$). A Equação 19 é outra forma de demonstrar a Equação 15:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + \left| \frac{h}{h_g} \right|^n \right]^{-m} \quad (18)$$

Com $m = 1 - \frac{2}{n}$ (Burdine, 1953)

$$K(\theta) = K_s \cdot \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (19)$$

Sendo θ a umidade volumétrica [$L^3 L^{-3}$]; θ_r e θ_s as umidades volumétricas residual e saturada [$L^3 L^{-3}$], respectivamente; h o potencial matricial [L]; h_g [L] um valor de escala de h considerado o potencial de entrada de ar; m e n são parâmetros de forma; K_s a condutividade hidráulica saturada do solo [$L T^{-1}$] e η o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica.

Com a granulometria do meio, foi possível estimar de maneira indireta as curvas de retenção ($\theta(h)$) e de condutividade hidráulica ($K(\theta)$) ao se considerar que a curva de retenção da água é similar à curva granulométrica e que o meio é rígido. A curva de retenção indica

quais são os limites de água que podem ser armazenados naquele meio poroso. No caso em estudo, a camada de revestimento do pavimento permeável.

A capacidade de infiltração depende da estrutura do meio poroso. Através do método Beerkan foi possível avaliar tanto o volume que pode ser infiltrado na estrutura, quanto a absorção de água, além de fornecer indicadores para a necessidade de manutenção (RIBAS, 2017).

Ao ser utilizado o infiltrômetro de anel simples, assumiu-se a hipótese de que está sendo mantida uma carga constante. Ao contrário de outros métodos (por exemplo: ASTM C1701/2009, anel duplo e infiltrômetro a disco), a metodologia Beerkan, possui uma base física muito forte, pois se baseia, principalmente, na equação de Haverkamp *et al.* (1994), na qual a infiltração é dependente da condutividade hidráulica (K_s) e da sorvidade (S).

4.2.1 Ensaios de Campo

Os ensaios foram realizados em 12 pontos distintos do PP de acordo com os seguintes procedimentos operacionais: um anel cilíndrico de material metálico com diâmetro de 100 cm foi posicionado na superfície do pavimento de blocos vazados (Fotografias 2a e 2b). A interface de contato entre o cilindro e os blocos foi vedada com betonita (Fotografia 3), a fim de evitar a fuga de água pela lateral estanque na superfície dos blocos de concreto.

FOTOGRAFIA 2 - (a) Anel de infiltração simples com diâmetro 100 cm; (b) locação dos anéis no pavimento permeável.



(a)



(b)

Fonte: A Autora (2018).

FOTOGRAFIA 3 - Vedação entre o infiltrômetro e o pavimento com betonita.



Fonte: A Autora (2018).

A escolha do anel com diâmetro de 1 m justifica-se pela finalidade do estudo: avaliar a capacidade de infiltração do PP em escala real.

O método Beerkan levou em consideração apenas as características hidrodinâmicas da camada superior do solo, material de preenchimento do vazado do bloco do pavimento. Durante os ensaios de infiltração, foram coletadas amostras indeformadas (Fotografias 4a e 4b), para determinação da densidade do solo (ρ_s) e amostras deformadas (Fotografias 5a e 5b) para obtenção dos conteúdos volumétricos de água inicial (θ_0) e final (θ_f); e também para determinação da curva granulométrica. A retirada das amostras de solo não altera a estrutura do pavimento e faz com que se possa assumir a hipótese de que a estrutura do solo é rígida.

FOTOGRAFIA 4 - (a) e (b) Coleta de amostras indeformadas.



(a)



(b)

Fonte: A Autora (2018).

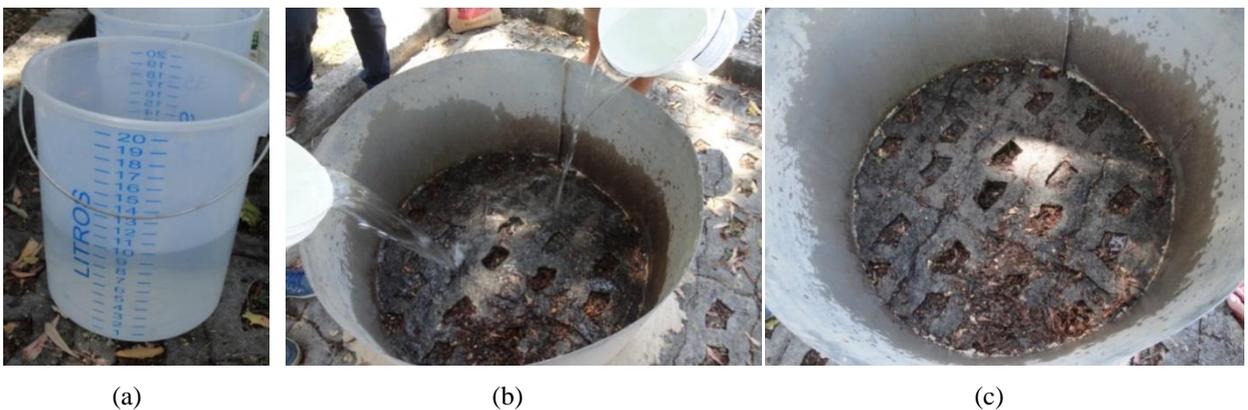
FOTOGRAFIA 5 - (a) Coleta de amostra deformada; (b) coleta de solo para determinação granulométrica.



Fonte: A Autora (2018).

Volumes fixos de 20 l de água foram vertidos na área interior do cilindro, sucessivamente (Fotografia 6a) até a estabilidade do tempo de infiltração da lâmina de água (regime permanente). O primeiro volume fixo de água foi lançado no tempo zero e o tempo cumulativo decorrido durante a infiltração total foi medido com cronômetro e lançado em planilha (Fotografias 6b e 6c).

FOTOGRAFIA 6 - Ensaio de infiltração.



Fonte: A Autora (2018).

O material coletado em campo (Fotografia 7) passou por pesagem sendo catalogado na mesma planilha. Esses dados foram utilizados para a determinação da curva de infiltração de água no solo e, conseqüentemente, para a obtenção da condutividade hidráulica saturada do solo, K_s . O conjunto de dados foi composto por uma série de números gerando uma curva de infiltração da lâmina acumulada em função do tempo $I^{exp}(t)$.

FOTOGRAFIA 7 - Amostra deformada do solo úmido.



Fonte: A Autora (2018).

4.2.2 Ensaios de Laboratório: Análise Granulométrica por Peneiramento e Sedimentação

Para determinação da granulometria, as frações mais grossas passaram por peneiramento (Fotografia 8a) e as frações finas (argila e silte) foram determinadas por sedimentação, após dispersão com hexametáfosfato de sódio, utilizando o método do densímetro (Fotografia 8b).

FOTOGRAFIA 8 - (a) Ensaio de peneiramento e (b) sedimentação.



(a)

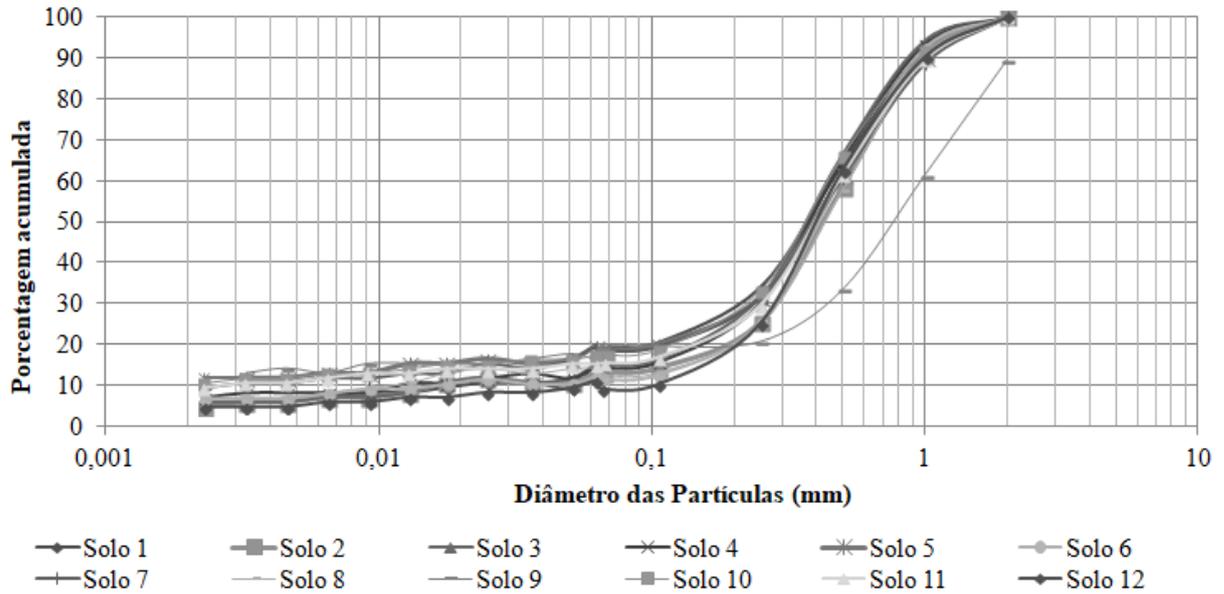


(b)

Fonte: A Autora (2018).

Esta ilustrado no Gráfico 5 a caracterização granulométrica do solo de preenchimento dos blocos vazados. Observa-se uma predominância dos diâmetros das partículas na faixa de textura da areia com porcentagens sempre acima de 80%.

GRÁFICO 5 - Curvas granulométricas.



O baixo percentual de argila e silte observado nas doze amostras indica uma possível classificação hidrológica, pela metodologia do *Soil Conservation Service- SCS* (desenvolvido pelo *United States Department of Agriculture – USDA*), no Grupo A. A confirmação só é possível através do cálculo da condutividade hidráulica saturada (K_s), pois o conhecimento da textura não é suficiente para afirmar com segurança as condições de infiltração e redistribuição de água no solo. A estrutura, o grau de compactação, o arranjo das partículas e a conectividade dos poros também influenciam na capacidade de infiltração e geram subsídios para a obtenção de dados precisos sobre o fluxo da água.

Para a determinação da umidade inicial (θ_0) foram separadas 3 amostras de 30 g para cada um dos 12 pontos. Após 24 h de secagem em estufa (Fotografia 9), essas amostras foram novamente pesadas e a umidade obtida pela média dos três resultados.

FOTOGRAFIA 9 - Secagem das amostras em estufa.



Fonte: A Autora (2018).

4.2.3 BEST Slope e BEST Intercept

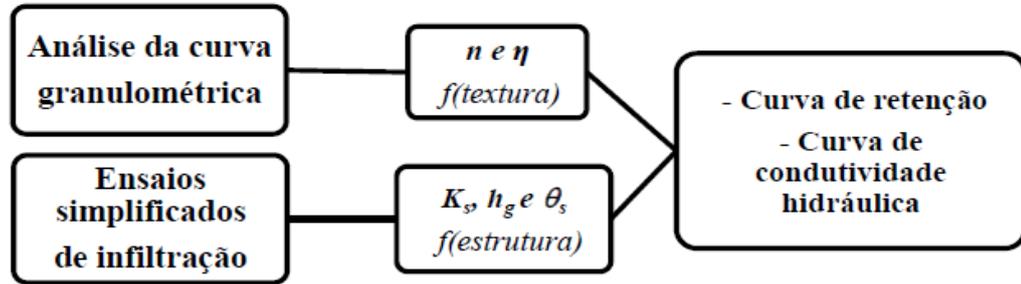
Lassabatère *et al.* (2006) sugeriu a obtenção das propriedades hidrodinâmicas, curvas de retenção da água e curvas de condutividade hidráulica, a partir da modelagem dos experimentos de infiltração dando origem ao BEST (*Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments*).

Para que os resultados de campo fossem satisfatoriamente interpretados e detalhados pelo BEST, foi necessário atingir um número suficiente de lançamentos de volumes conhecidos de água durante o estado transitório, até que fosse observada uma condição de estado permanente de infiltração. Isto porque uma descrição mais precisa da primeira parte da curva de condutividade hidráulica (estado transitório) é importante na redução do risco de falhas de interpretação dos dados pelo BEST (Slope e Intercept).

Neste trabalho foi utilizado o BEST com as versões do *software* Scilab-6.0.0: Slope e Intercept.

Para a obtenção dos cinco parâmetros desconhecidos presentes nas equações m , n ou η e θ_s , K_s e h_g , o método utiliza as propriedades texturais e estruturais do solo (Fluxograma 1).

FLUXOGRAMA 1 - Fluxograma simplificado da metodologia Beerkan.



Fonte: Cavalcanti (2012).

Os detalhes para obtenção dos parâmetros de forma e de normalização para o método Beerkan são apresentados a seguir:

a) Parâmetros de forma (m , n ou η)

Após a determinação da curva granulométrica, do ensaio de infiltração e dos valores de umidade volumétrica (θ_0) e na saturação (θ_s) e massa específica do solo (ρ_d), foram determinados os parâmetros de forma e normalização (K_s e h_g).

Haverkamp e Parlange (1986) apresentaram uma equação para expressar a distribuição do tamanho das partículas $F(D)$ a partir da observação de similaridade de forma entre a distribuição e a curva de retenção da água $\theta(h)$. A equação de $F(D)$ é descrita a seguir:

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M} \quad (20)$$

Com $M = 1 - \frac{2}{N}$

D é o diâmetro efetivo da partícula; D_g é o parâmetro de escala do tamanho das partículas; e M e N são os parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas. Os parâmetros M , N e D_g foram obtidos pelo ajuste da Equação 20 aos dados experimentais granulométricos.

Neste caso, o índice de forma do meio (P_m) pode ser estimado a partir de M e N (ZATARÁIN *et al.*, 2003):

$$P_m = \frac{MN}{1+M} \cdot (1+k)^{-1} \quad (21)$$

Sendo k um coeficiente definido por Fuentes *et al.* (1998):

$$k = \frac{2s - 1}{2s(1 - s)} \quad (22)$$

Sendo s a dimensão fractal.

A porosidade total do solo (Φ) é definida por Fuentes, Haverkamp e Parlange (1992) pela equação 23.

$$(1 - \Phi)^s + \Phi^{2s} = 1 \text{ com } \frac{1}{2} < s < 1 \quad (23)$$

Os parâmetros de forma da curva de retenção (m e n), Equações 24 e 25, são obtidos por derivação a partir do índice de forma, que considera a raiz positiva da Equação 23, para m e deriva n a partir de m pela condição de Burdine (1953) (SANTOS; SILVA, 2012):

$$m = \frac{1}{P_m} \left(\sqrt{1 + P_m^2} - 1 \right) \quad (24)$$

$$n = \frac{2}{1 - m} \quad (25)$$

O parâmetro de forma η da condutividade hidráulica pode ser determinado a partir do modelo de capilaridade sendo função do produto dos parâmetros de forma e de tortuosidade, p (Equação 26).

$$\eta = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad (26)$$

Sendo $p=1$, pelo modelo de Burdine (1953).

b) Parâmetros de normalização (θ_s , K_s e h_g)

As umidades volumétricas (inicial (θ_0) e na saturação (θ_s)) foram obtidas medindo, respectivamente, as umidades gravimétricas iniciais (w_0) e finais (w_f), e depois multiplicando os resultados pela massa específica do solo (ρ_d).

Os parâmetros de normalização (K_s , h_g) foram obtidos por intermédio da minimização de $I(S, K_s)$, pela otimização dos quadrados das diferenças entre as lâminas de água infiltradas observadas e calculadas.

A lâmina de água infiltrada foi calculada pela Equação 27 proposta por Haverkamp *et al.* (1994), válida para períodos de tempo curtos e médios.

$$I(S, K_s) = \sum_{i=1}^{N_{obs}} \left(I_i - (S \cdot \sqrt{t_i} + a \cdot S^2 \cdot t_i + b_2 \cdot K_s \cdot t_i) \right)^2 \quad (27)$$

Sendo:

$$a = \frac{\gamma}{r\Delta\theta} \quad (28)$$

$$b_2 = \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} \cdot \left(1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right)$$

S é a sorvidade [$L \cdot T^{-1/2}$], r é o raio do cilindro [L], γ pode ser considerado igual a 0,75 e β igual a 0,6.

Para minimização de $I(S, K_s)$ utiliza-se o algoritmo de Levenberg-Marquardt, técnica de iteração usada para localizar o mínimo de uma função expressa como a soma dos quadrados de funções não lineares (MARQUARDT, 1963). Em resumo, o método Levenberg-Marquardt trata, simplesmente, da determinação do vértice de uma parábola. O desempenho dos ajustes analisado pelos valores que correspondem ao erro quadrático médio. Obtidos os valores de θ_s e K_s , determina-se o parâmetro de escala para a pressão de água h_g , pela Equação 29 (LASSABATÈRE *et al.*, 2006).

$$h_g = \frac{S^2}{c_p(\theta_s - \theta_0) \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right]} k_s \quad (29)$$

Sendo c_p um parâmetro que depende apenas dos parâmetros de forma n , m e η (CONDAPPA *et al.*, 2002; HAVERKAMP *et al.*, 1998), Equação 30.

$$c_p = \Gamma \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left[\Gamma \frac{(m\eta - \frac{1}{n})}{\Gamma(m\eta)} + \frac{\Gamma(m\eta + m - \frac{1}{n})}{\Gamma(m\eta + m)} \right] \quad (30)$$

Γ é a função Gama clássica, que é uma extensão da função fatorial aos números complexos.

c) Escalas características

Durante o processo de infiltração tridimensional os fatores que podem interferir no fluxo de entrada de água no solo são a geometria da fonte de água, a capilaridade e a gravidade (SOUZA *et al.*, 2008). Uma das formas de caracterizar esses fatores é a partir das escalas de comprimento capilar, λ_c (WHITE; SULLY, 1987) e o raio característico dos poros hidraulicamente ativos, λ_m (PHILIP, 1987) determinados, respectivamente, pelas seguintes Equações 31 e 32.

$$\lambda_c = \frac{\delta s^2}{(\theta_s - \theta_0) K_s} \quad (31)$$

$$\lambda_m = \frac{\sigma}{\rho_a g \lambda_c} \quad (32)$$

Sendo σ é a tensão superficial da água ($0,0719 \text{ N m}^{-1}$), ρ_a a massa específica da água (10^3 kg m^{-3}), g a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$) e δ um parâmetro de forma da difusividade ($\frac{1}{2} \leq \delta \leq \frac{\pi}{4}$), o qual foi considerado igual a 0,55 (WHITE; SULLY, 1987).

Segundo Souza *et al.* (2008) a escala de comprimento capilar representa a relevância relativa das forças capilares em relação à gravidade, quando a água é transmitida de uma fonte através do solo, com umidade inicial θ_0 . O raio característico de poros determina a dimensão média dos poros que participam do processo de infiltração submetida à pressão aplicada h . Quanto maior for o raio característico (λ_m), maior é o efeito da gravidade em comparação ao da capilaridade.

Souza *et al.* (2008) demonstram o número de poros $C_{\lambda m}$, estimado usando-se a lei de Peiseuille para fluxo em um tubo capilar, a partir da expressão a seguir (Equação 33):

$$C_{\lambda m} = \frac{8\mu K}{\rho_a g \pi \lambda_m^4} \quad (33)$$

Sendo μ a viscosidade dinâmica da água ($0,00089 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$).

4.3 ANÁLISE QUALITATIVA DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO PP

A condutividade hidráulica saturada (K_s) foi classificada qualitativamente por dois critérios, conforme recomendado no trabalho de Ribas (2017): classificação hidrológica pelo método *Soil Conservation Service* (SCS), desenvolvido pelo *United States Department of Agriculture* (USDA) e grau de permeabilidade proposto por Terzaghi, Peck e Mesri (1996).

O método mais conhecido e aplicado nos Estados Unidos é o SCS (*Soil Conservation Service*), atualmente denominado de NRCS (*National Resources Conservation Service*). Geralmente utilizado em áreas que variam de 3 km² a 250 km². Baseia-se no conceito de hidrograma unitário, aplicado pela primeira vez em 1932 por Sherman, no qual a unidade do tempo equivale à unidade de chuva excedente de 1 cm (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1994).

4.3.1 Classificação Hidrológica do Pavimento Permeável

De acordo com a metodologia do *Soil Conservation Service* (SCS), desenvolvida pelo *United States Department of Agriculture* (USDA), os solos são separados em quatro grandes classes (A, B, C e D) quanto ao seu potencial de geração de escoamento. Distintas quanto à capacidade de infiltração e de geração de escoamento superficial. A identificação dos tipos de solo em função da condutividade hidráulica saturada proposta por Rawls *et al.* (1993) *apud* Ribas (2017) e suas características são apresentadas na Tabela 6.

TABELA 6 - Classificação hidrológica do solo em função da condutividade hidráulica saturada.

Classificação Hidrológica	Condutividade Hidráulica Saturada (mm/h)	Características
GRUPO A	$K_{sf} \geq 7,6$	Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos, profundos, com pouco silte e argila.
GRUPO B	$3,8 \leq K_{sf} < 7,6$	Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundos que o grupo A e com permeabilidade superior à média.
GRUPO C	$1,3 \leq K_{sf} < 3,8$	Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, pouco profundos, contendo percentagem considerável de argila.
GRUPO D	$K_{sf} < 1,3$	Solos contendo argilas expansivas e pouco profundos, com muito baixa permeabilidade.

Fonte: Adaptado de RAWLS *et al.* (1993) *apud* Ribas (2017).

4.3.2 Grau de Permeabilidade (GP)

A classificação dos solos, em grupos, através da correlação entre o seu grau de permeabilidade e a condutividade hidráulica foi proposta por Terzaghi, Peck e Mesri (1996) *apud* Ribas (2017) conforme apresentado na Tabela 7.

TABELA 7 - Classificação dos solos quanto ao grau de permeabilidade.

GRAU DE PERMEABILIDADE	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA (mm/h)
Alto (A)	3600,00
Médio (M)	36,00
Baixo (B)	0,3600
Muito Baixo (MB)	0,0036
Praticamente impermeável (PI)	< 0,0036

Fonte: Adaptado de Terzaghi, Peck e Mesri (1996) *apud* Ribas (2017).

4.4 HYDRUS 1D

Através do programa Hydrus 1D, conhecidas as propriedades hidrodinâmicas do meio poroso e a curva granulométrica (obtidas pelo método Beerkan), foi possível realizar simulações, com previsões e criação de cenários do comportamento hidráulico e hidrológico da estrutura do pavimento permeável.

4.4.1 Simulação Numérica no Hydrus 1D: Hipóteses e Considerações

Para avaliar cenários do comportamento hidráulico da superfície do pavimento permeável foi utilizada a seguinte solicitação hidráulica: fluxo variável a partir de uma série de precipitação pluviométrica.

Como condição de fronteira superior as condições atmosféricas, considerando que o pavimento permeável é solicitado pelo escoamento superficial direto resultante da ação da precipitação pluviométrica diária na área de captação. A série de precipitação utilizada foi uma série de 365 dias para o ano de 2014 da estação Recife (Várzea).

A condição de fronteira inferior foi a de drenagem livre, que permitiu simular a infiltração de água em condições em que o lençol freático está muito distante da condição

limite inferior. Na hipótese de drenagem livre, assume-se a hipótese de gradiente hidráulico unitário entre a superfície e a condição limite inferior.

Foi realizada a passagem da hipótese de Burdine para a de Mualem, já que o modelo Hydrus aplica os parâmetros da curva de retenção calculados para a hipótese de distribuição dos poros de Mualem (1976).

Além disso, foi realizada uma análise de sensibilidade da malha, usando 100, 200 e 300 nós.

4.4.2 Modelos de Infiltração para Caracterização Hidrodinâmica da Camada de Revestimento do PP

O infiltrômetro de anel simples utilizado nos ensaios forneceu uma infiltração tridimensional, para complementar as informações hidrodinâmicas obtidas através do método Beerkan (LASSABATÈRE *et al.*, 2006), foram utilizados os métodos Bagarello *et al.* (2013) e Wu 2 *et al.* (1999), Quadro 2.

QUADRO 2 - Método W2 e Bagarello.

Modelo de Infiltração de regime permanente	Equação	Parâmetros
Wu 2 <i>et al.</i> (1999)	$I = i \cdot t + c = af \cdot K$ $\frac{(-)}{—}$ <p style="text-align: center;">—</p>	(mm/h)
Bagarello <i>et al.</i> (2013)	$\frac{(-)}{—} \cdot \ln(b_1)$	(mm/h) (cm)

Fonte: Adaptado de Ribas (2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

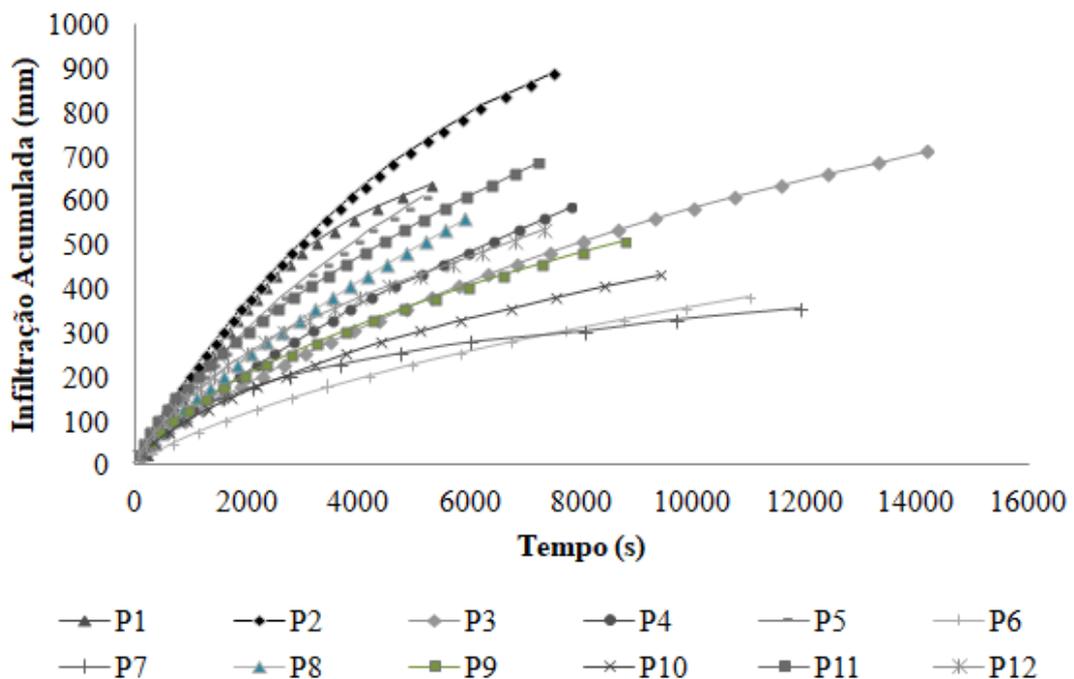
Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios e simulações numéricas realizados no pavimento estudado. Para uma melhor visualização e interpretação, os mesmos serão apresentados em forma de gráficos e tabelas.

5.1 MÉTODO BEERKAN: CURVAS DE INFILTRAÇÃO

No Gráfico 6 são apresentadas as lâminas infiltradas acumuladas nos 12 pontos ensaiados com o infiltrômetro de anel simples de 1m de diâmetro. As classificações texturais do solo de preenchimento do pavimento permeável segundo a EMBRAPA (2006) e a USDA são apresentadas na Tabela 8.

Apesar dos diferentes valores das curvas de infiltração, um valor representativo médio pode ser utilizado, pois se trata de um parâmetro obtido em paralelo, não em série.

GRÁFICO 6 - Lâmina Infiltrada acumulada (mm) em função do tempo (s) para 12 ensaios de infiltração num pavimento permeável.



Fonte: A Autora (2018).

TABELA 8 – Percentuais de Areia, Silte, Argila e Classificação Granulométrica do solo de preenchimento do pavimento permeável.

Ensaio	% Argila	% Silte	% Areia	Classificação Textual (USDA)	Classificação Textual (EMBRAPA)
P1	5,86	10,00	84,14	Areia Franca	Arenosa
P2	4,69	8,28	87,03	Areia Franca	Arenosa
P3	5,86	9,14	85,00	Areia Franca	Arenosa
P4	7,03	7,68	85,29	Areia Franca	Arenosa
P5	11,72	7,54	80,73	Franco Arenosa	Franca
P6	7,03	5,34	87,63	Areia Franca	Arenosa
P7	9,38	10,11	80,51	Areia Franca	Arenosa
P8	7,03	7,21	85,76	Areia Franca	Arenosa
P9	12,89	6,72	80,38	Franco Arenosa	Franca
P10	10,55	6,84	82,61	Areia Franca	Arenosa
P11	9,38	5,80	84,82	Areia Franca	Arenosa
P12	4,69	6,35	88,96	Areia	Arenosa

Fonte: A Autora (2018).

Observa-se que as elevadas frações arenosas resultaram em classes texturais do tipo arenosa ou areia franca (EMBRAPA, 1999) e arenosa, areia franca e franco arenosa (USDA,1993). O percentual mínimo de areia no material de preenchimento foi 80,38% em P9 e máximo de 88,96% em P12.

Para os pontos 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10 e 11, de classe textural areia franca (USDA), a lâmina mínima infiltrada foi de 356,51 mm em 11.900 s, no ponto 7 e máxima de 891,27 mm em 7.475 s no ponto 2. Nos pontos 5 e 9, classificados como franco arenosa (USDA), a lâmina mínima infiltrada foi de 509,30 mm em 8.755 s, no ponto 9, e máxima de 611,16 mm em 5.150 s no ponto 5. O ponto 12 foi o único com classificação textural areia (USDA), a lâmina infiltrada foi de 534,76 mm em 7.325s. Conforme observado pelas lâminas infiltradas acumuladas, apenas a classificação textural não é suficiente para determinar a capacidade de infiltração do solo (Gráfico 6).

A Tabela 9 confirma o que foi observado nos resultados da Tabela 8, considerando a classificação textural. Verificou-se uma variação na lâmina acumulada de 498,70 mm para a areia franca e de 238,60 mm para franco arenosa, no tempo 5.150 s (Tabela 9). Tal fato pode ser devido à interferência de outros fatores (grau de compactação, dimensão e conectividade entre os poros, teor de matéria orgânica, presença de minerais), além da classe textural do solo, na capacidade de infiltração.

TABELA 9 - Percentuais de Areia, Silte, Argila e Classificação Granulométrica do solo de preenchimento do pavimento permeável.

Ensaio	Classificação Textual (USDA)	Classificação Textual (EMBRAPA)	Lâmina Infiltrada (mm)	Tempo (s)
P1	Areia Franca	Arenosa	629,6	5150
P2	Areia Franca	Arenosa	734,4	5150
P3	Areia Franca	Arenosa	375,3	5150
P4	Areia Franca	Arenosa	435,7	5150
P5	Franco Arenosa	Franca	611,2	5150
P6	Areia Franca	Arenosa	235,7	5150
P7	Areia Franca	Arenosa	263,3	5150
P8	Areia Franca	Arenosa	506,9	5150
P9	Franco Arenosa	Franca	372,6	5150
P10	Areia Franca	Arenosa	307,5	5150
P11	Areia Franca	Arenosa	559,3	5150
P12	Areia	Arenosa	435,7	5150

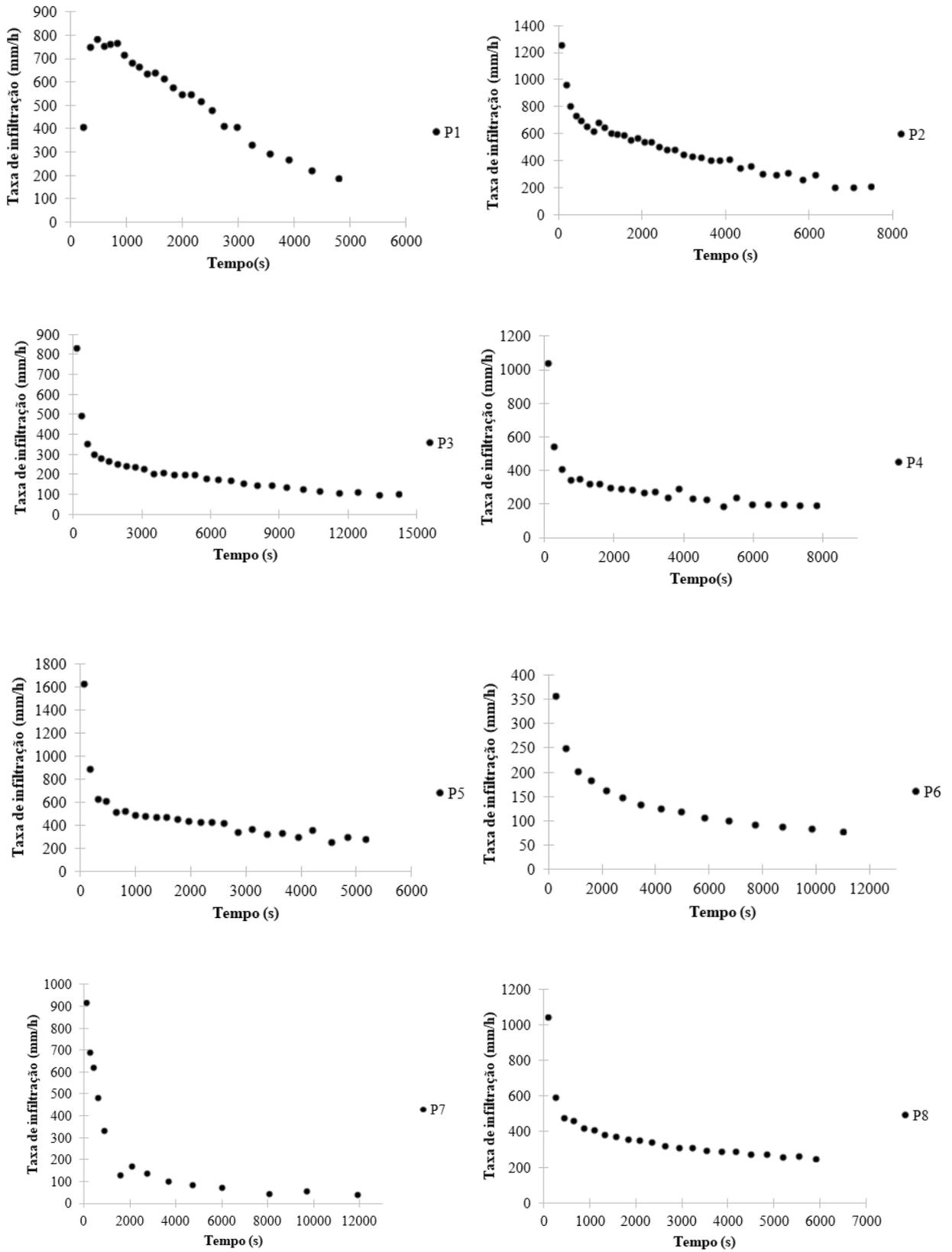
Fonte: A Autora (2018).

No Gráfico 7 são apresentadas as Taxas de Infiltração. De uma maneira geral, com exceção de P1, em todos os gráficos pode-se observar que as taxas de infiltração iniciais apresentam velocidades elevadas que decaem até um valor aproximadamente constante, quando atingem a condutividade hidráulica saturada. No ensaio realizado em P1, percebe-se que a taxa de infiltração parte de 400 mm/h e acelera até um valor de aproximadamente 800 mm/h. Segundo a teoria da infiltração, a infiltração é um processo desacelerado de modo que o surgimento de fenômenos como esse, onde a taxa de infiltração aumenta ao invés de decair, é relatado na literatura como hidrofobicidade (BASTOS *et al.*, 2005; MAIA *et al.* 2010; VOGELMANN, 2014).

Segundo Vogelmann (2014), tal fato se dá por modificações no ângulo de contato entre a água e a fase sólida. Pelo recobrimento das partículas do solo por substâncias orgânicas hidrofóbicas (como folhas, gravetos, raízes) que causam repelência à água e interferem de maneira complexa com os poros e as partículas minerais, inibindo o molhamento. A presença desses compostos hidrófobos ocasiona alterações na sortividade e no ângulo de contato água-solo, interferindo diretamente na capilaridade e na curva de retenção da água no solo, diminuindo o volume de água retido.

GRÁFICO 7 - Taxa de infiltração real (mm/h) para o pavimento permeável.

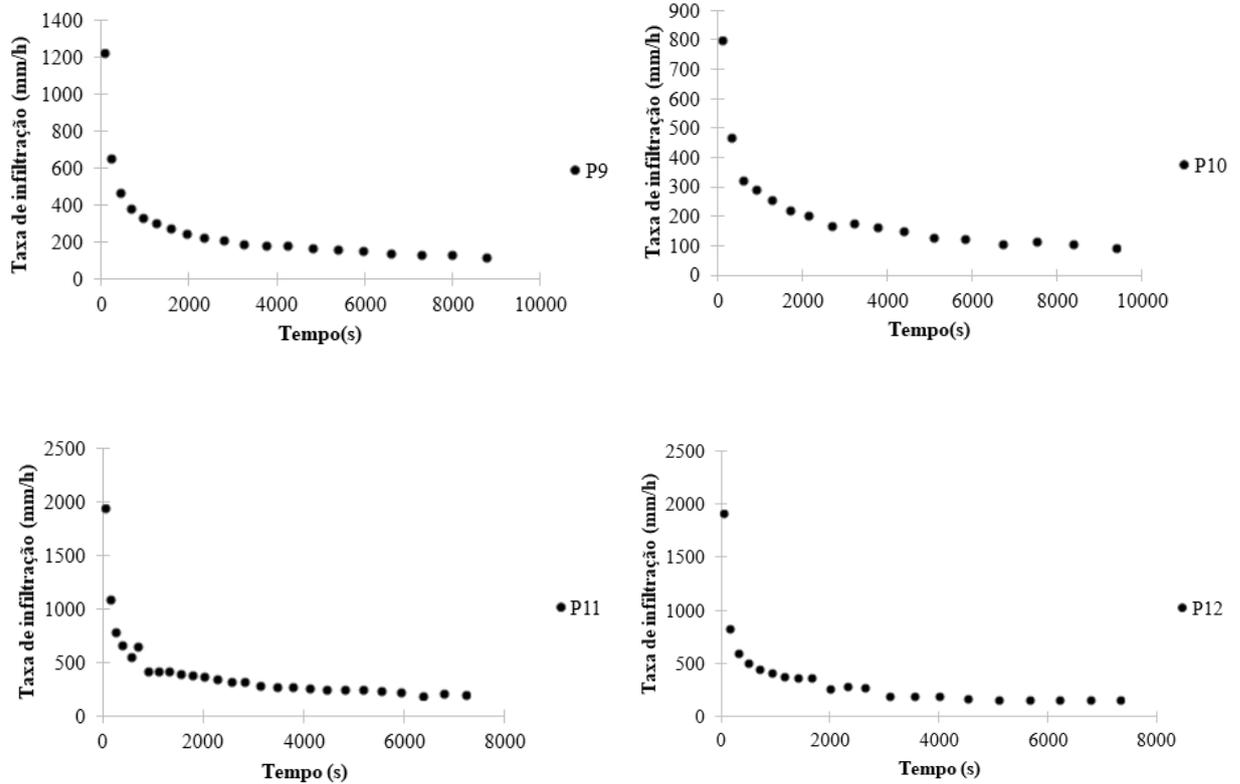
(continua)



Fonte: A Autora (2018).

GRÁFICO 7 - Taxa de infiltração real (mm/h) para o pavimento permeável.

(conclusão)



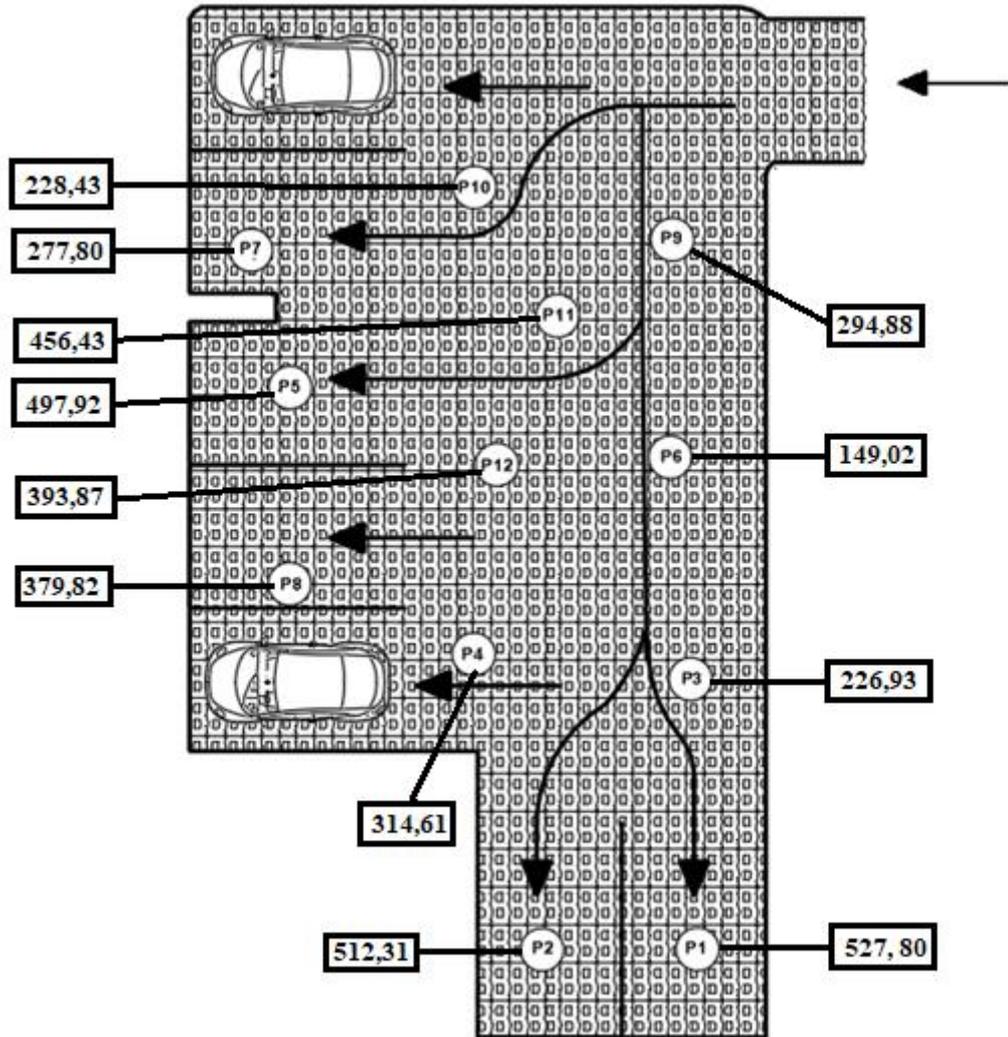
Fonte: A Autora (2018).

TABELA 20 – Taxas de infiltração médias no pavimento permeável.

Ensaio	Taxa de infiltração real (mm/h)	Classificação Textual (USDA)
P1	527,80	Areia Franca
P2	512,31	Areia Franca
P3	226,93	Areia Franca
P4	314,61	Areia Franca
P5	497,92	Franco Arenosa
P6	149,02	Areia Franca
P7	277,80	Areia Franca
P8	379,82	Areia Franca
P9	294,88	Franco Arenosa
P10	228,43	Areia Franca
P11	456,43	Areia Franca
P12	393,87	Areia

Fonte: Autora (2018).

FIGURA 4 - Croqui da Área de Estudo.



Fonte: A Autora (2018).

Observa-se na Figura 4 e Tabela 10 que os pontos P9, P10, P6, P3, apresentaram as menores taxas de infiltração real, devido ao intenso e constante tráfego dos veículos nos locais de acesso às vagas e manobra, que causam a compactação, ou seja, redução do volume de vazios do solo (perda da sua porosidade) que gera o aumento do índice de impermeabilidade.

De acordo com os pontos ensaiados, a média da taxa de infiltração real (valores apresentados na Tabela 10) foi de 355 mm/h, sendo a menor encontrada em P6 (149,02 mm/h) e a maior em P1 (527,80 mm/h). Comparativamente com os valores encontrados nos trabalhos de Coutinho *et al.* (2016), Jabur *et al.* (2015) e Bruno, Amorim e Silveira (2013), pode-se observar que a taxa de infiltração apresenta grande variabilidade espacial.

Coutinho *et al.* (2016) observaram uma taxa de infiltração média de 800mm/h para um pavimento permeável com blocos de concreto intertravados e elevada variabilidade

especial na capacidade de infiltração e nas velocidades de infiltração para tempos longos, através do método Beerkan.

Jabur *et al.* (2015) obtiveram taxa de infiltração entre 100, 44 mm/h e 170, 64 mm/h para um pavimento permeável de blocos de concreto intertravados. Esses resultados foram obtidos a partir da aplicação da metodologia indicada pela norma ASTM C1701/2009. As desvantagens da metodologia prevista nessa norma é que, ao contrário do método Beerkan, não se garante o alcance de um regime permanente no ensaio de infiltração.

Bruno, Amorim e Silveira (2013) obtiveram taxa de infiltração de 84 mm/h em parcela experimental de blocos de concreto intertravados com 0,7 m², utilizando um simulador de chuva. As taxas de infiltração foram obtidas experimentalmente e a partir do ajuste da equação de Horton aos dados experimentais.

É importante salientar que os ensaios de infiltração realizados nesta pesquisa e na de Coutinho *et al.* (2016) pelo método Beerkan, ao fazer uso do infiltômetro considera-se como se estivesse mantendo uma carga constante; e no método ASTM C1701/2009, como não se considera uma carga constante, existem dúvidas quanto aos resultados da condutividade hidráulica.

Neste trabalho não foi possível fazer uma correlação entre o decréscimo da taxa de infiltração com a classificação pelo triângulo textural, visto que solos com a mesma classificação textural apresentaram valores bem diferentes. Essa diferença nas propriedades hidrodinâmicas pode ser ocasionada por fatores que interferem diretamente na condutividade hidráulica (textura e estrutura do solo, tamanho e conectividade dos poros).

5.2 RESULTADOS DO BEST

O algoritmo BEST estima os parâmetros de forma com base no tamanho das partículas e calcula a capacidade de infiltração através do ajuste da taxa de infiltração em função do tempo, utilizando o modelo teórico de Haverkamp *et al.* (1994). O ajuste é feito pela substituição da condutividade hidráulica saturada K_s e da taxa de infiltração, pela verificação se o ensaio está em estado transitório ou estacionário.

5.2.1 Propriedades Hidrodinâmicas no Revestimento do Pavimento Permeável Oriundas da Aplicação do Algoritmo Best: Métodos Slope e Intercept

Os métodos BEST Slope e BEST Intercept fornecem, para cada aplicação, quatro gráficos: Infiltração acumulada ajustada aos dados experimentais (nos modelos transiente e estacionário), variação da taxa de infiltração ao longo do tempo, erro relativo dos parâmetros experimentais e simulados para a infiltração acumulada e erro relativo dos parâmetros experimentais e simulados para a taxa de infiltração.

Os parâmetros de forma n e η dependem principalmente da textura do solo, sendo proporcionais às dimensões e à curva de distribuição das partículas (HAVERKAMP *et al.*, 1998). Quanto maior o tamanho dos grãos, maior o valor de n . A avaliação desse parâmetro é importante para que possa relacionar futuramente de maneira indireta a distribuição da curva granulométrica com a capacidade de infiltração, para a padronização na concepção do material de preenchimento de pavimentos permeáveis com blocos intertravados. Pequenas mudanças nos valores de n , fornecem grandes diferenças em η , pois são variações exponenciais.

Santos e Silva (2012) obtiveram para um solo do tipo areia franca o parâmetro de forma da curva de retenção n com valor de 2,425 e 2,569. Souza *et al.* (2008), obtiveram para n , também numa areia franca, o valor de 2,31; e neste trabalho, o valor de n para mesma classificação textural, variou de 2,26 a 2,37.

Para a classe textural do tipo areia, Coutinho *et al.* (2016) obtiveram o valor de 2,617 para o fator de forma n . Santos e Silva (2012) obtiveram n igual a 2,62 e 2,88; e Souza *et al.* (2008) n igual a 2,54. E neste trabalho, o valor obtido para n foi de 2,43.

Santos e Silva (2012) encontraram um valor de n igual a 2,19 e 2,42 para o solo franco arenoso. No estudo de Souza *et al.* (2008) n variou de 2,13 a 2,16; a autora encontrou valores de 2,23 e 2,24 para n .

Neste trabalho, o parâmetro de forma η oscilou de 7,67 a 11,63; que representa uma variação de 34,05%, decorrente de uma diferença de apenas 0,45% no valor de n . Souza *et al.* (2008) obtiveram valores entre 6,70 e 18,16 (variação de 63,11% em η); Silva *et al.* (2009) entre 6,23 e 8,09 (variação de 22,99% em η). Santos e Silva (2012) entre 1,34 e 7,83 (variação de 82,89% em η) e Coutinho *et al.* (2016) 2,31 (Tabela 11).

P2, P6, P8 e P12 são os pontos ensaiados onde os solos de preenchimento do pavimento vazado apresentaram maior percentual de areia (87,03%; 87,63%; 85,76% e 88,96%, respectivamente). Como n e m são parâmetros que dependem da textura do solo, os

valores apresentados foram maiores nestes pontos que possuem classes texturais com maior teor de areia. Os valores de η (da curva de condutividade hidráulica de Brooks e Corey (1964)) e de c_p foram menores para os mesmos pontos. A relação inversa entre m , n e η se explica pela Equação 34, sendo p o fator de tortuosidade igual a 1 para o modelo de Burdine (1953).

$$\eta = \frac{2}{nm} + 2 + p \quad (34)$$

Conforme observado na Tabela 10, comparativamente aos valores obtidos por Souza *et al.* (2008), Silva *et al.* (2009), Santos e Silva (2012) e Coutinho *et al.* (2016), para as mesmas classes texturais, os valores de m , n e η obtidos neste estudo estão compatíveis com os valores apresentados na literatura.

O parâmetro h_g (comprimento médio dos poros) contrariamente aos parâmetros n e η não depende da textura do solo, mas sim da estrutura do solo. Os comprimentos médios dos poros variaram entre 229,952 mm em P1 e 365,303 mm em P11, para BEST Intercept. E, para o BEST Slope, h_g variou entre 268,475 mm em P1 e 803,886 mm em P12. Observa-se que os valores de h_g no BEST Slope são maiores que no BEST Intercept e apresentaram maiores diferenças, principalmente, entre os dois métodos nos pontos P9 (781,085 mm, Slope; 357,445 mm, Intercept), P10 (778,441 mm, Slope; 309,917 mm, Intercept) e P12 (803,886 mm, Slope; 341,686 mm, Intercept).

A sorvidade (S) pode ser estimada a partir do conteúdo inicial e final de água (θ_0 e θ_f) durante o ensaio de infiltração. Deste modo, é um parâmetro de difícil comparação, por depender das condições relativas da umidade inicial do solo θ_0 que varia bastante ao longo do tempo, de acordo com a dinâmica da atmosfera e principalmente de acordo com o teor de matéria orgânica e precipitação antecedente.

Enquanto a condutividade hidráulica saturada (K_s) indica a facilidade com que um fluido é transportado no interior do solo e apresenta seu pico na saturação; a sorvidade (S) corresponde à capacidade do solo em absorver água por capilaridade na ausência de efeitos gravitacionais, e prevalece nos primeiros momentos da infiltração (BORGES *et al.*, 1999).

Pelo teor de areia, os valores máximos de K_s e S deveriam ter ocorrido em P12, no entanto, ocorreram em P1. Isto ocorre porque K_s e S são parâmetros de normalização que dependem da densidade, quantidade e conectividade entre os poros hidráulicamente ativos. O que demonstra a importância da estrutura do solo para que possam ser entendidos os comportamentos hidráulicos em solos com mesma classificação textural.

Para alguns casos onde a parcela da sorvidade é muito grande, o BEST Slope pode estimar valores nulos ou negativos da condutividade hidráulica saturada, neste caso o BEST Intercept corrige o erro.

Os resultados obtidos neste estudo, através do algoritmo BEST (Slope e Intercept), estão demonstrados na Tabela 11. O ponto 7 foi descartado porque não apresentou convergência numérica com o método Beerkan, não se enquadrando dentro dos critérios do método.

TABELA 11 – Parâmetros hidráulicos do PP: comparativo BEST Slope e BEST Intercept.
COMPARATIVO ENTRE PARÂMETROS HIDRÁULICOS.

(continua)

Ponto	Método	Hg (mm)	Ks (mm/h)	N	η	M	Cp	S (mm/s ^{0,5})	Autores
1 (AF)	Slope	-268,48	231,86	2,31	9,53	0,13	2,13	3,92	A Autora (2018)
	Intercept	-229,95	254,17	2,31	9,53	0,13	2,13	3,80	
2 (AF)	Slope	-478,51	155,01	2,32	9,32	0,14	2,11	4,42	
	Intercept	-352,71	198,95	2,32	9,32	0,14	2,11	4,30	
3 (AF)	Slope	-559,00	53,64	2,31	9,35	0,14	2,12	2,72	
	Intercept	-312,16	86,63	2,31	9,35	0,14	2,12	2,58	
4 (AF)	Slope	-425,46	83,61	2,30	9,73	0,13	2,14	2,97	
	Intercept	-287,35	115,25	2,30	9,73	0,13	2,14	2,87	
5 (FA)	Slope	-481,78	116,62	2,23	11,63	0,10	2,26	3,83	
	Intercept	-337,60	156,51	2,23	11,63	0,10	2,26	3,71	
6 (AF)	Slope	-318,25	45,88	2,37	8,46	0,15	2,05	1,85	
	Intercept	-249,61	55,35	2,37	8,46	0,15	2,05	1,80	
8 (AF)	Slope	-394,86	113,66	2,32	9,27	0,14	2,11	3,16	
	Intercept	-277,11	150,75	2,32	9,27	0,14	2,11	3,05	
9 (FA)	Slope	-781,09	38,08	2,24	11,49	0,11	2,25	2,74	
	Intercept	-357,45	74,47	2,24	11,49	0,11	2,25	2,59	
10 (AF)	Slope	-778,44	29,14	2,26	10,68	0,12	2,21	2,38	
	Intercept	-309,92	63,92	2,26	10,68	0,12	2,21	2,23	
11 (AF)	Slope	-586,17	86,15	2,28	10,20	0,12	2,17	3,75	
	Intercept	-365,30	127,69	2,28	10,20	0,12	2,17	3,60	
12 (A)	Slope	-803,89	51,39	2,43	7,67	0,18	1,98	3,24	
	Intercept	-341,69	105,66	2,43	7,67	0,18	1,98	3,03	
HP (A)		-23,31	648,00	2,88	5,50	0,30	1,75	1,48	Santos e Silva (2012)
HP (AF)		-110,75	262,80	2,43	7,83	0,17	1,99	1,84	
HP (FA)		-146,95	216,00	2,19	1,34	0,09	2,35	2,18	
PV3 (A)		-68,10	518,40	2,62	6,23	0,24	1,85	1,02	
PV3 (AF)		-58,57	518,40	2,57	6,62	0,22	1,87	1,16	
PV3 (FA)		-31,65	806,40	2,42	7,76	0,17	2,11	1,57	

Fonte: A Autora (2018).

TABELA 11– Parâmetros hidráulicos do PP: comparativo BEST Slope e BEST Intercept.
COMPARATIVO ENTRE PARÂMETROS HIDRÁULICOS.

								(conclusão)
(A)	-69,13	57,6	2,62	6,31	0,24			Coutinho <i>et al.</i> (2016)
LA(FA)		468,00	2,13	18,16	0,06	2,52	2,07	Souza <i>et al.</i> (2008)
NF(FA)		72,00	2,16	15,67	0,07	2,44	0,49	
NF(AF)		108,00	2,31	9,54	0,13	2,13	0,79	
NF(A)		684,00	2,54	6,70	0,21	1,88	2,48	
A(AF)	32,71	0,17		8,09	0,16	2,01	2,10	Silva <i>et al.</i> (2009)
B(AF)	153,36	0,01		6,23	0,24	1,87	0,79	
C(AF)	25,77	0,02		6,69	0,21	1,88	0,57	

A = areia; AF = areia franca; FA = franco arenosa.

Fonte: A Autora (2018).

O comportamento do fluxo d'água em um meio poroso está incorporado em duas características fundamentais: a curva de retenção da água no solo $h(\theta)$ e a curva de condutividade hidráulica K_s . Com os dados obtidos em campo (e trabalhados em laboratório) e com o uso do algoritmo BEST (Slope e Intercept) obteve-se a estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos do pavimento permeável (curvas de retenção da água no solo $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica saturada K_s , e a sorvidade S).

5.2.2 Classificação Quantitativa da Condutividade Hidráulica Saturada Usando os Métodos BEST (Slope e Intercept), os Métodos Bagarello e Wu.

Qualitativamente, pode-se avaliar a condutividade hidráulica saturada obtida neste estudo através de dois critérios: classe hidrológica (Tabela 6) e grau de permeabilidade (Tabela 7). A classificação hidrológica permite identificar os locais, ao longo do pavimento permeável, que não atendem aos critérios mínimos para que uma superfície apresente boa capacidade de infiltração e baixa capacidade de geração de escoamento superficial.

O grau de permeabilidade (GP) é expresso numericamente pelo coeficiente de permeabilidade obtido através da lei de Darcy, na qual a velocidade de percolação é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico. Terzaghi, Peck e Mesri (1996) correlacionaram o grau de permeabilidade à condutividade hidráulica saturada.

TABELA 12 - Condutividade hidráulica saturada obtida pelo método BEST Slope e BEST intercept, classificação hidrológica e grau de permeabilidade para camada de revestimento do pavimento permeável.

Ponto	BEST INTERCEPT			BEST SLOPE			
	Ks (mm/h)	Classif. Hidrol.	Grau de permeab.	Ks (mm/h)	Classif. Hidrol.	Grau de permeab.	Classif. pelo triângulo textural
1	254,17	A	Médio	231,86	A	Médio	AF
2	198,95	A	Médio	155,01	A	Médio	AF
3	86,63	A	Médio	53,64	A	Médio	AF
4	115,25	A	Médio	83,61	A	Médio	AF
5	156,51	A	Médio	116,62	A	Médio	FA
6	55,35	A	Médio	45,88	A	Médio	AF
7	-	-	-	-	-	-	-
8	150,75	A	Médio	113,66	A	Médio	AF
9	74,47	A	Médio	38,08	A	Médio	FA
10	63,92	A	Médio	29,14	A	Médio	AF
11	127,69	A	Médio	86,15	A	Médio	AF
12	105,66	A	Médio	51,39	A	Médio	A*
MÉDIA	126,30	A	Médio	91,37	A	Médio	
D. P.	60,72	A	Médio	60,68	A	Médio	
C.V. (%)	48,08	A	Médio	66,41	A	Médio	

D.P.: Desvio padrão; C.V.: Coeficiente de variação; A: grupo de solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração; AF: Areia Franca; FA: Franco-Arenosa; A*: Areia.

Fonte: A Autora (2018).

Para os ensaios realizados, conforme apresentado na Tabela 12, todos os pontos tiveram classificação hidrológica no GRUPO A (solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração). O ponto 7 não se enquadrou dentro dos critérios de análise para os métodos BEST (Slope e Intercept).

Conceitualmente, torna-se indispensável distinguir os parâmetros de condutividade hidráulica (K) e permeabilidade. A condutividade hidráulica representa a capacidade do solo em promover o escoamento de água, ao passo que a permeabilidade relaciona-se às características inerentes do meio (textura, porosidade, estrutura, dentre outros) (OLIVEIRA; GONÇALVES; MARTINS, 2010).

Conforme demonstrado na Tabela 12, os pontos apresentaram médio grau de permeabilidade ($36,00 \text{ mm/h} < K_s < 3.600,00 \text{ mm/h}$), mesmo para condutividade hidráulica saturada de $29,139 \text{ mm/h}$, que foi o valor mínimo calculado (em P10). De acordo com a Tabela 7, para a classe textural mais abundante, do tipo areia franca, o GP ainda manteve-se médio.

Em relação à condutividade hidráulica saturada, os valores obtidos pelo BEST Intercept foram mais altos em comparação aos obtidos pelo BEST Slope (Tabela 12). K_s variou de $55,354 \text{ mm/h}$ (em P6) a $254,165 \text{ mm/h}$ (em P1) para BEST Intercept e $29,139 \text{ mm/h}$ (em

P10) a 231,859 mm/h (em P1) para BEST Slope. Observando-se que o coeficiente de variação (CV) foi maior que 30% para os dois métodos, pode-se concluir que K_s possui alta dispersão com dados bastante heterogêneos. Sendo igual a 48,077% no BEST Intercept e 66,408% no BEST Slope.

O desvio padrão (D.P.), que representa o grau de dispersão do conjunto de dados em relação à média aritmética, demonstrou que os métodos BEST Intercept e Slope apresentaram valores bem próximos, 60,723 mm/h e 60,675 mm/h, respectivamente. Quanto mais próximo de zero for o DP, mais homogêneos são os dados. Conforme observado na Tabela 12, os valores de K_s são bastante heterogêneos.

A análise estatística dos resultados de condutividade hidráulica saturada (K_s) resultou em valores médios de 126,303 mm/h pelo método BEST Intercept e 91,367 mm/h pelo método BEST Slope.

Um comparativo de classificação hidrológica e grau de permeabilidade entre os métodos Bagarello e Iovino (2003) e Wu *et al.* (1999) é apresentado na Tabela 13.

TABELA 13 - Condutividade hidráulica saturada, Classificação Hidrológica e Grau de Permeabilidade decorrentes da aplicação dos métodos propostos por Bagarello e Iovino (2003) e Wu *et al.* (1999).

Ponto	Bagarello e Iovino (2003) Ks (mm/h)	Classif. Hidrol. (SCS)	GP	Wu <i>et al.</i> (1999) Ks (mm/h)	Classif. Hidrol. (SCS)	GP
1	-	-	-	-	-	-
2	95,96	GRUPO A	A	94,36	GRUPO A	A
3	28,74	GRUPO A	M	25,87	GRUPO A	M
4	176,96	GRUPO A	A	78,07	GRUPO A	A
5	263,75	GRUPO A	A	124,5	GRUPO A	A
6	51,02	GRUPO A	A	25,14	GRUPO A	M
7	-	-	-	-	-	-
8	269,11	GRUPO A	A	114,21	GRUPO A	A
9	53,78	GRUPO A	A	77,13	GRUPO A	A
10	35,17	GRUPO A	M	27,14	GRUPO A	M
11	135,04	GRUPO A	A	85,47	GRUPO A	A
12	56,55	GRUPO A	A	47,71	GRUPO A	A
MÉDIA	116,61			69,96		
D.P.	91,61			36,77		
C.V. (%)	78,56			52,56		

Fonte: A Autora (2018).

Conforme demonstrado na Tabela 13, os pontos P1 e P7 não se enquadraram dentro dos critérios de análise para os métodos Bagarello e Iovino (2003) e Wu *et al.* (1999). Para ambos os métodos, P2 a P6 e P8 a P12 apresentaram classificação hidrológica no Grupo A. Quanto ao GP, pelo método Bagarello e Iovino (2003), P3 e P10 apresentaram médio GP, os demais pontos, com exceção do P1 e P7, que não foram avaliados, apresentaram alto GP. Pelo método Wu *et al.* (1999), os pontos P3, P6 e P10 apresentaram médio GP, os demais pontos foram classificados com alto GP.

Em relação à condutividade hidráulica saturada, os valores obtidos pelo método Bagarello e Iovino (2003) variaram entre 28,74 mm/h em P3 e 269,11 mm/h em P8. No método Wu *et al.* (1999), os valores obtidos para K_s estão entre 25,87 mm/h (em P2) e 124,50 mm/h (em P5).

Observando-se que o coeficiente de variação (C.V.) foi maior que 30% para os dois métodos, pode-se concluir que K_s possui alta dispersão com dados bastante heterogêneos. Sendo igual a 78,559% pelo método Bagarello e Iovino (2003) e 52,556% por Wu *et al.* (1999).

O desvio padrão (D.P.), que representa o grau de dispersão do conjunto de dados em relação à média aritmética, demonstra que os métodos Bagarello e Iovino (2003) e Wu *et al.* (1999) apresentaram valores bem distintos de K_s , 91,606 mm/h e 36,768 mm/h, respectivamente. Conforme observado na Tabela 13, os valores de K_s são bastante heterogêneos.

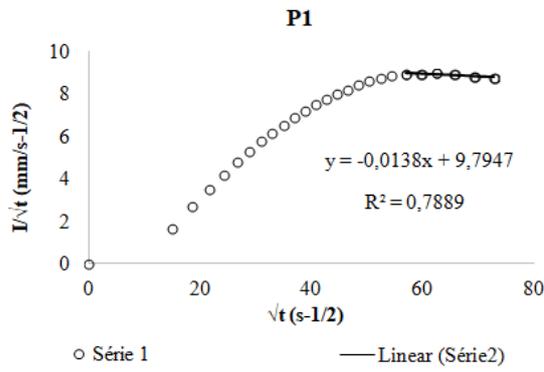
A análise estatística dos resultados de condutividade hidráulica saturada (K_s) resultou em valores médios de 116,608 mm/h pelo método Bagarello e Iovino (2003) e 69,96 mm/h pelo método Wu *et al.* (1999).

A caracterização hidrodinâmica pelos métodos Bagarello e Wu, confirmam a classificação hidrológica obtida pelo BEST Slope e Intercept para todos os pontos analisados (Grupo A).

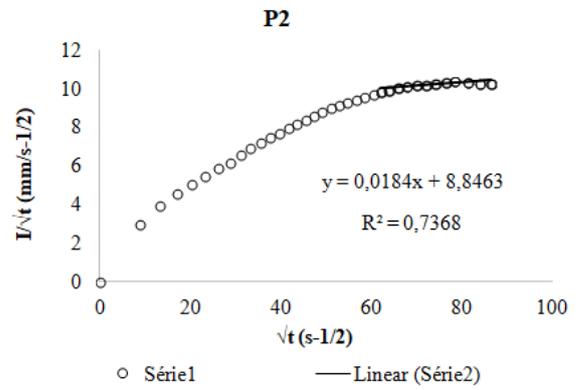
Para os 12 pontos ensaiados experimentalmente, foram obtidas as curvas de infiltração acumulada x tempo, linearizadas através de curva de regressão dos dados (I/\sqrt{t} x \sqrt{t}). O regime permanente foi identificado pela variação constante, demonstrada pela parte horizontal da curva de taxa de infiltração, o que proporciona o ajuste linear e o uso da metodologia para estimativa adequada de K_s e α . O comportamento dos ajustes pelo método Bagarello *et al.* (2013) está demonstrado no Gráfico 8.

GRÁFICO 8 - Curvas de infiltração x tempo com ajuste pelo método Bagarello *et al.* (2013).

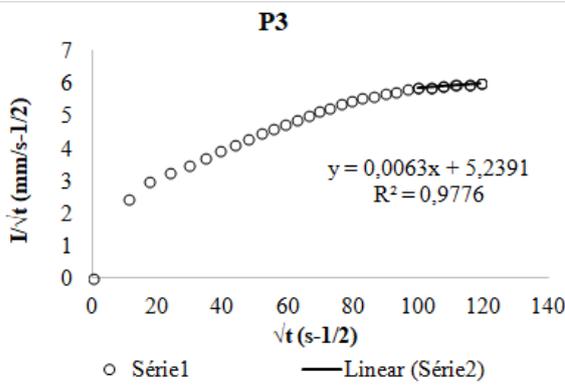
(continua)



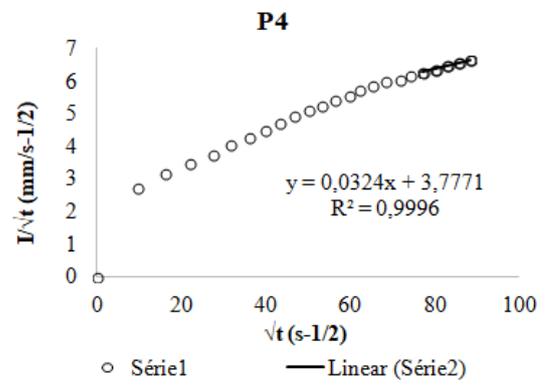
(a)



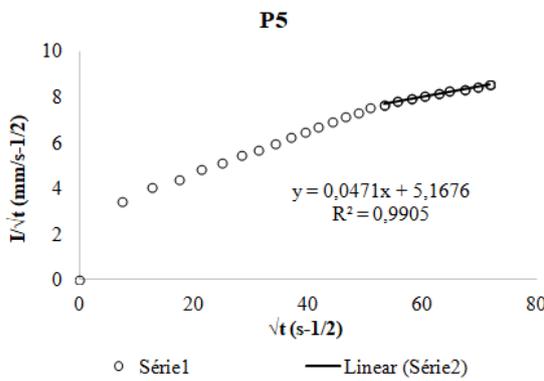
(b)



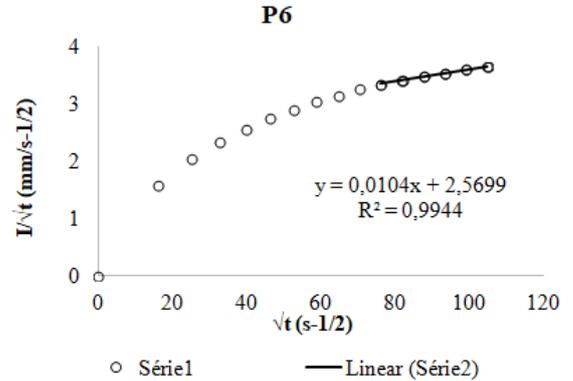
(c)



(d)



(e)

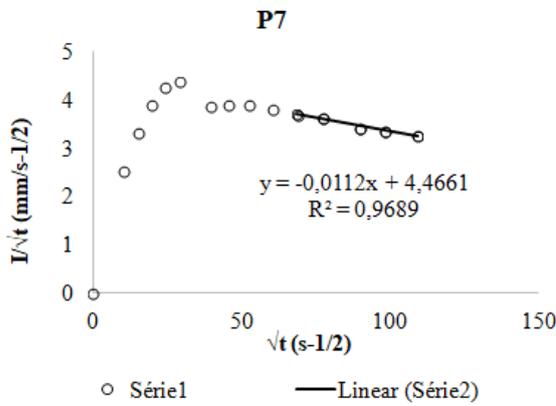


(f)

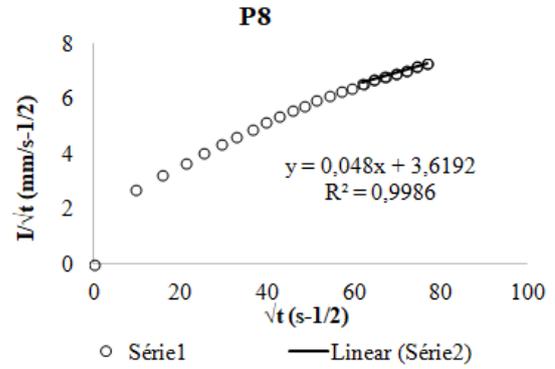
Fonte: A Autora (2018).

GRÁFICO 8 - Curvas de infiltração x tempo com ajuste pelo método Bagarello *et al.* (2013).

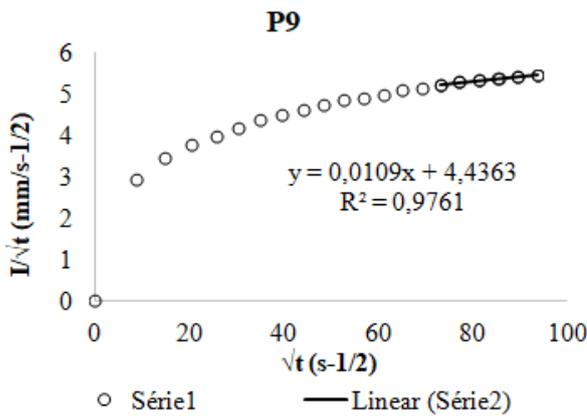
(conclusão)



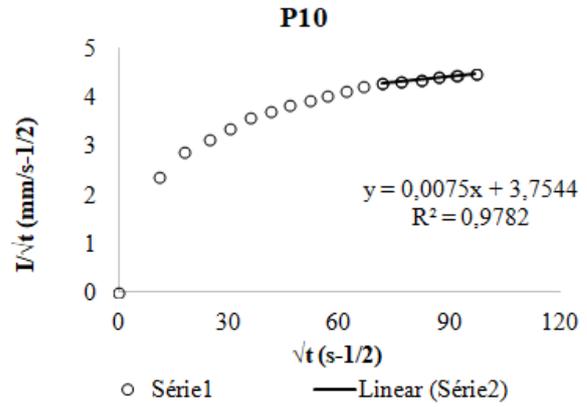
(g)



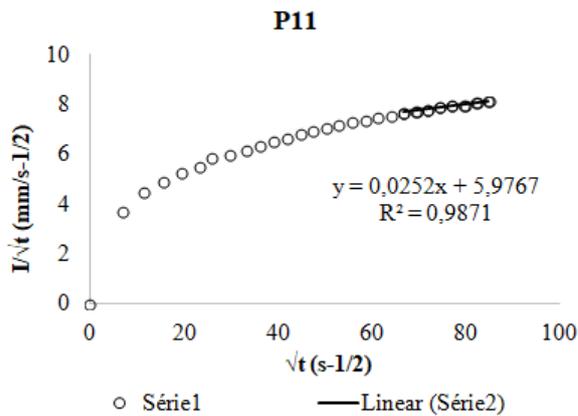
(h)



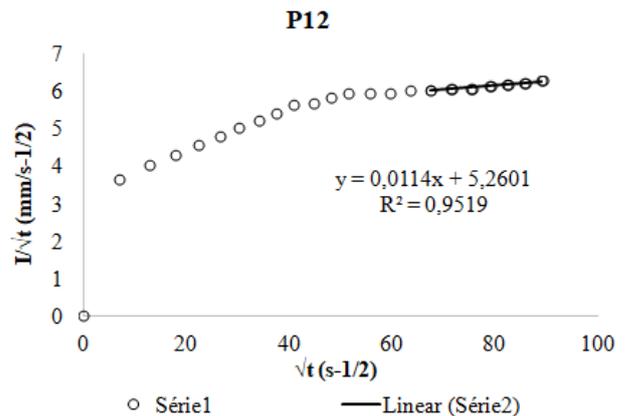
(i)



(j)



(k)



(l)

Fonte: A Autora (2018).

Os Gráficos 8(b), 8(c), 8(d), 8(e), 8(f), 8(h), 8(i), 8(j), 8(k), 8(l) representam o ajuste do modelo Bagarello aos experimentos nos pontos P2 a P6 e P8 a P12, demonstrando bons ajustes ao método utilizado. O que pode ser observado pelas retas que definem visivelmente

o regime permanente. Com relação aos pontos 1 e 7 (Gráficos 8(a) e 8(g)), não apresentaram convergência com o modelo. Nesses casos, o coeficiente angular obtido foi negativo, não sendo possível obter os parâmetros de caracterização hidráulica do solo (α e K_{fs}).

Pelos Gráficos 9(a) a 9(j), observa-se que o método Wu 2 apresentou bons ajustes às curvas de infiltração acumulada x tempo para os pontos P2 a P6 e P8 a P12. Com relação aos pontos P1 e P7, o modelo não se ajustou adequadamente.

GRÁFICO 9 - Curvas de infiltração x tempo ajustadas pelo método Wu 2 (1999).

(continua)

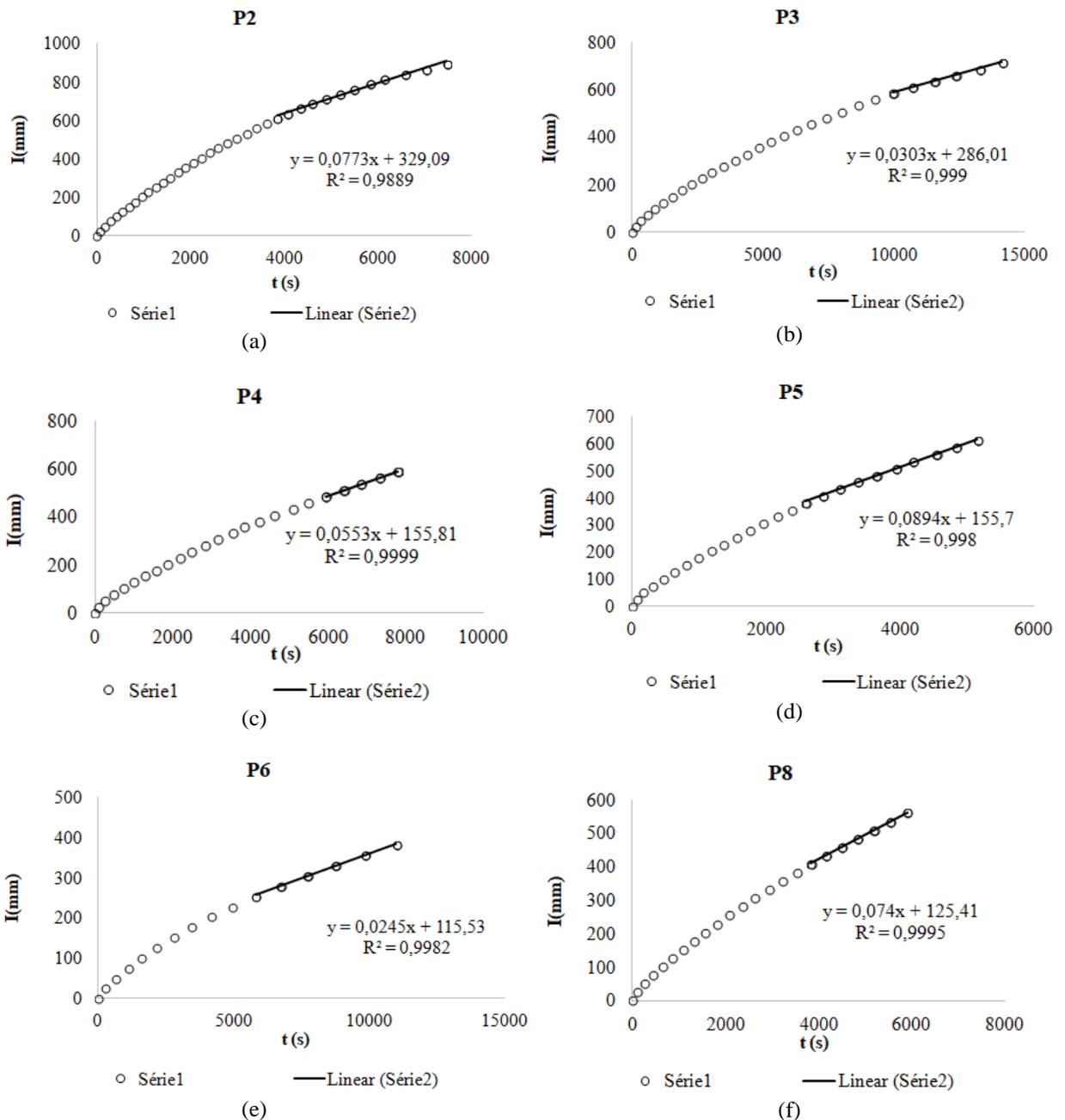
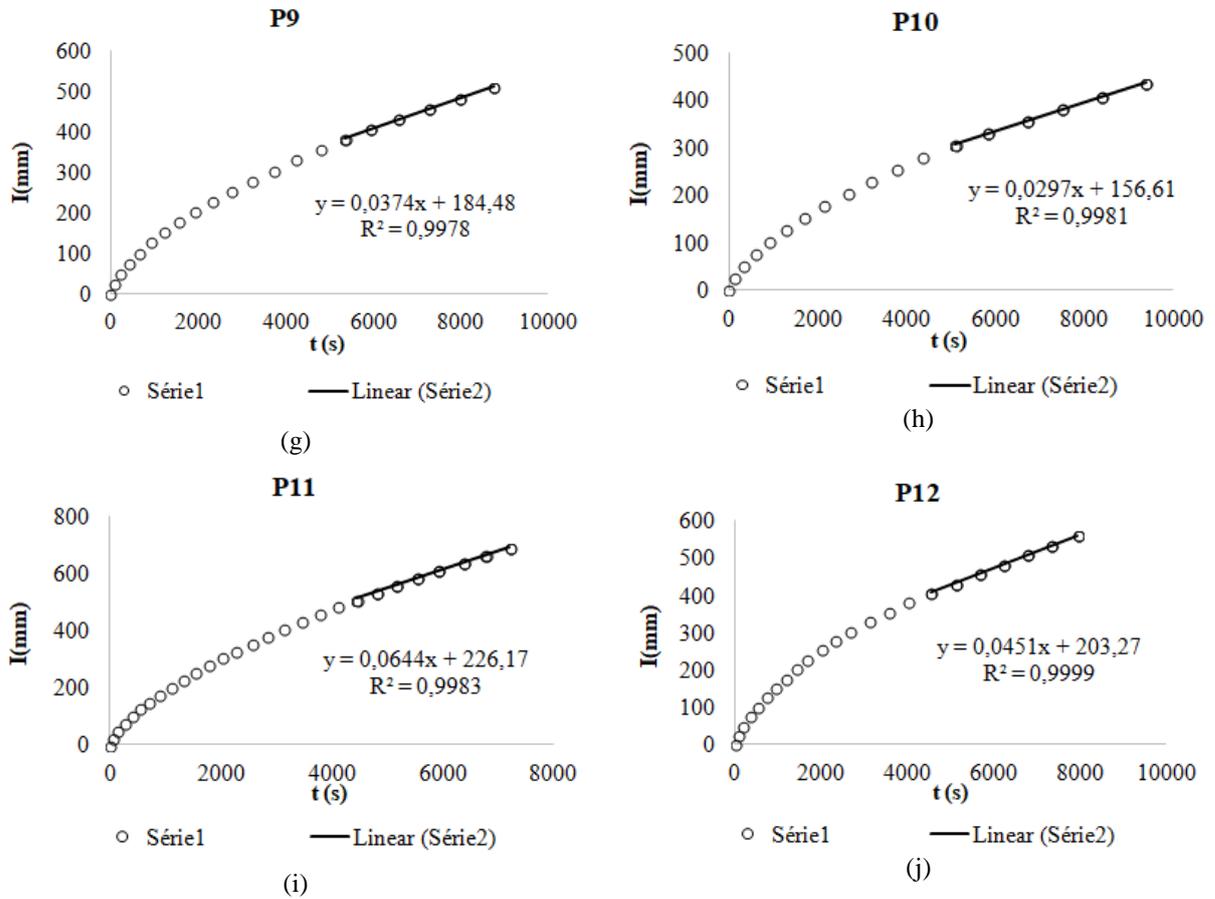


GRÁFICO 9 - Curvas de infiltração x tempo ajustadas pelo método Wu 2 (1999).

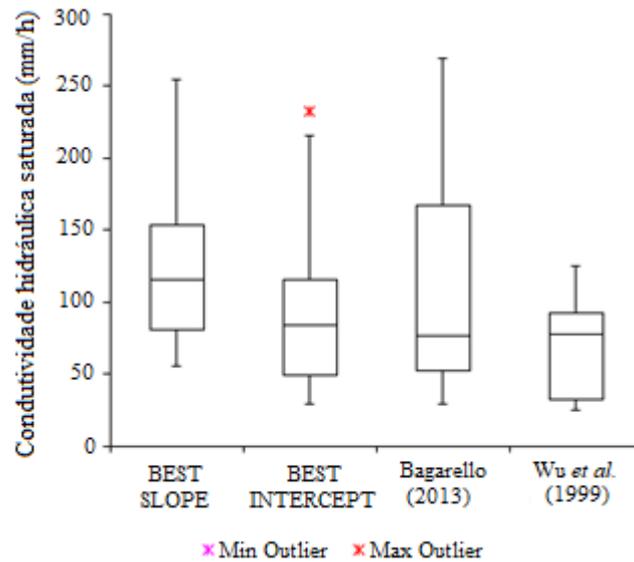
(conclusão)



Fonte: A Autora (2018).

O gráfico box-plot da condutividade hidráulica saturada para os quatro métodos (BEST Slope e Intercept, Bagarello *et al.* (2013) e Wu *et al.* (1999)) (Gráfico 10). Observa-se que o método BEST Intercept apresentou outlier, indicando uma heterogeneidade da capacidade de infiltração entre as estimativas dos parâmetros K_s para o PP estudado, conforme dados apresentados na Tabela 14.

GRÁFICO 10 - Box Plot relativo às condutividades hidráulicas saturadas obtidas dos métodos BEST Slope, BEST Intercept, Bagarello *et al.* (2013) e Wu *et al.* (1999).



Fonte: A Autora (2018).

TABELA 14 - Resumo estatístico das condutividades hidráulicas saturadas obtidas pelos métodos BEST Slope, BEST Intercept, Bagarello *et al.* (2013) e Wu *et al.* (1999).

Método	BEST Slope	BEST Intercept	Bagarello <i>et al.</i> (2013)	Wu <i>et al.</i> (1999)
Mínimo	55,354	29,139	28,740	25,140
Q1	80,549	48,632	51,710	32,283
Median	115,246	83,606	76,255	77,600
Q3	153,629	115,144	166,480	92,138
Maximo	254,165	231,859	269,110	124,500
IQR	73,080	66,512	114,770	59,855
Outliers Superior	0,000	1,000	0,000	0,000
Outlier Inferior	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: A Autora (2018).

5.2.3 Curvas de Retenção e de Condutividade Hidráulica pelos Métodos Best Slope e Best Intercept

Definidos os parâmetros de forma (m ou n e η) e de normalização (θ_s , K_s e h_g), foram obtidas as curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ para 11 dos doze pontos estudados (Gráfico 11 a 21). Os pontos de origem de cada curva (θ_s) foram fixados em 0,46792, considerando-se a mesma umidade volumétrica para todas as amostras de solo.

As curvas de retenção determinam a quantidade de água que cada ponto estudado consegue armazenar em determinado potencial matricial (h). Sendo o potencial matricial e a

umidade volumétrica dependentes da textura e estrutura do solo, conectividade e tamanho dos poros (COUTINHO, 2011).

Com exceção do ponto 7, foram geradas as curvas de retenção $h(\theta)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ para cada um dos pontos analisados no PP (Gráfico 11 a 21). Com a obtenção dos dados de condutividade hidráulica, foi possível verificar a semelhança no comportamento das curvas. Observa-se também que a condutividade hidráulica apresenta rápido crescimento à medida que ocorre um aumento da umidade volumétrica. Nota-se que a condutividade hidráulica não cresce indefinidamente, mas apresenta um valor máximo igual à condutividade hidráulica saturada, correspondendo à umidade na saturação.

As curvas de retenção e de condutividade hidráulica saturada apresentaram valores bastante próximos nos dois métodos (BEST Slope e BEST Intercept), conforme se observa nos Gráficos 11 a 21. Os valores $K(\theta)$ são maiores para o método BEST Intercept; a diferença está nos dados de saída do BEST em que o valor de h_g é maior no BEST Intercept.

GRÁFICO 11 - Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intercept (P1).

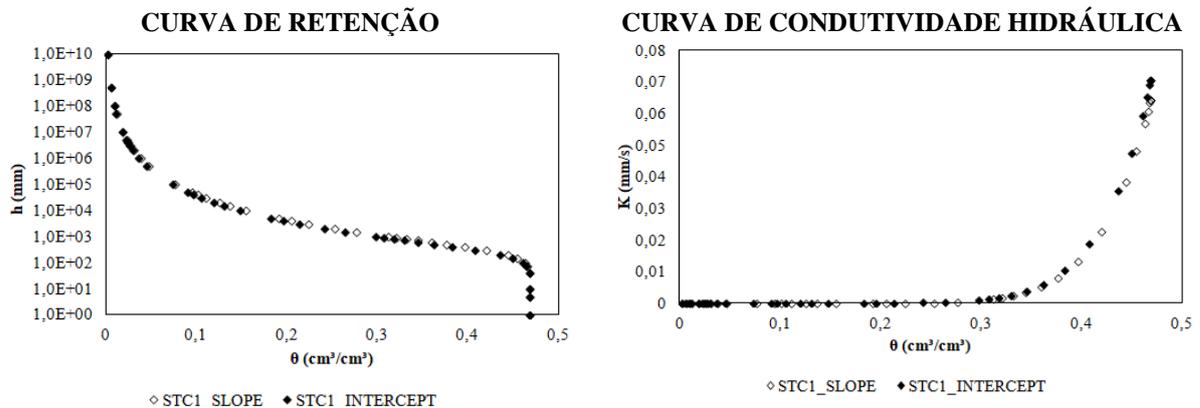


GRÁFICO 12 - Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intercept (P2).

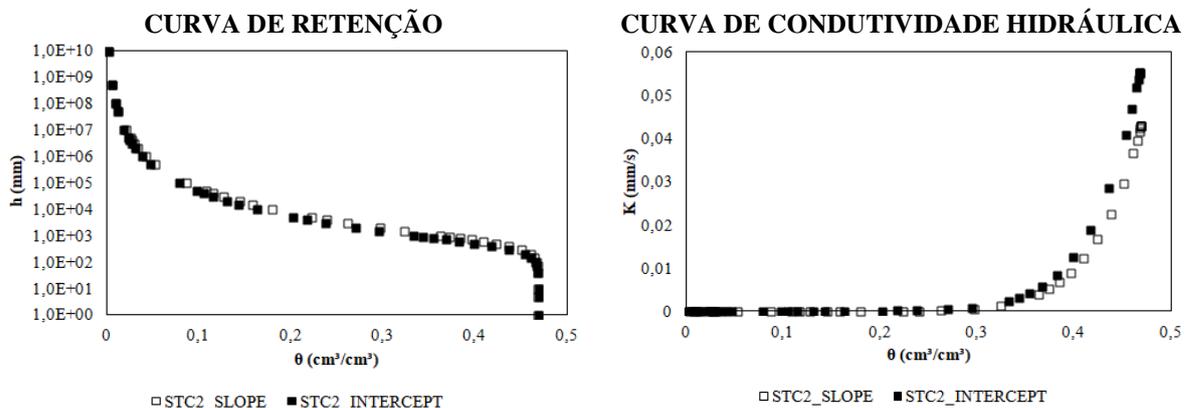
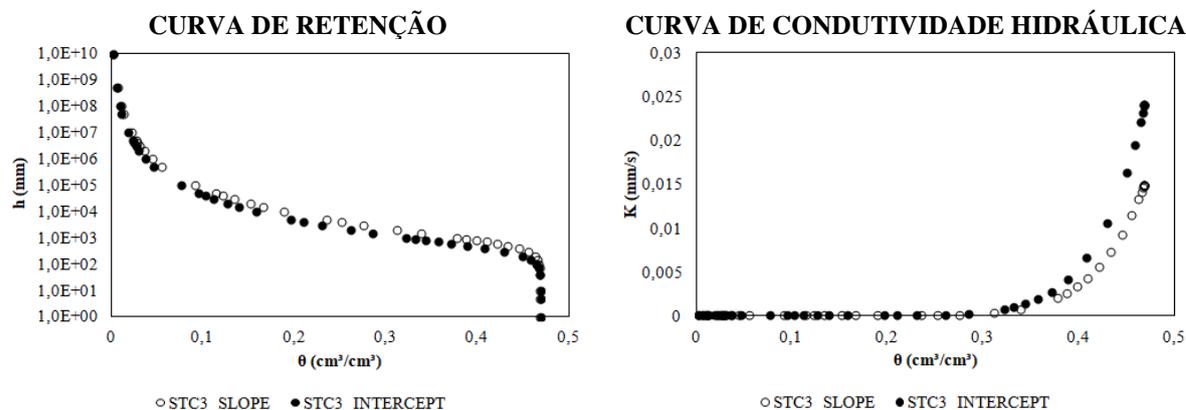
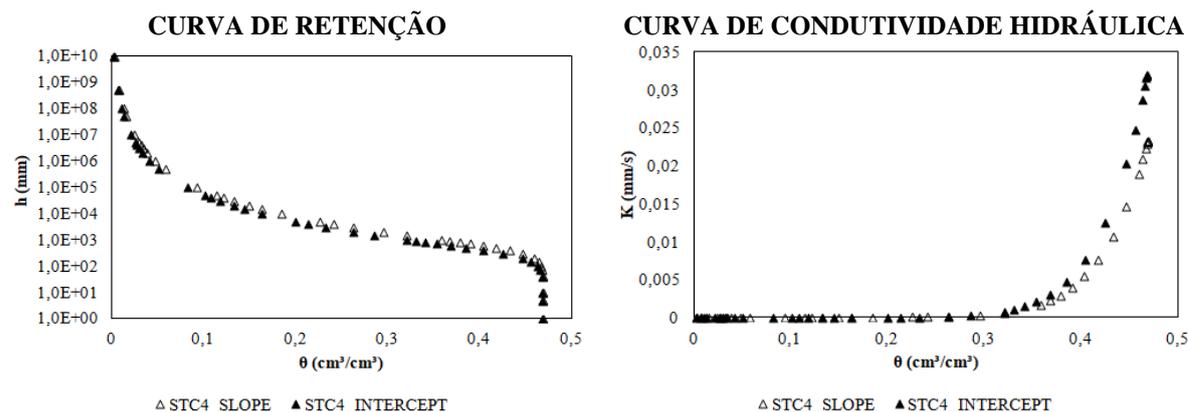


GRÁFICO 13 - Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P3).



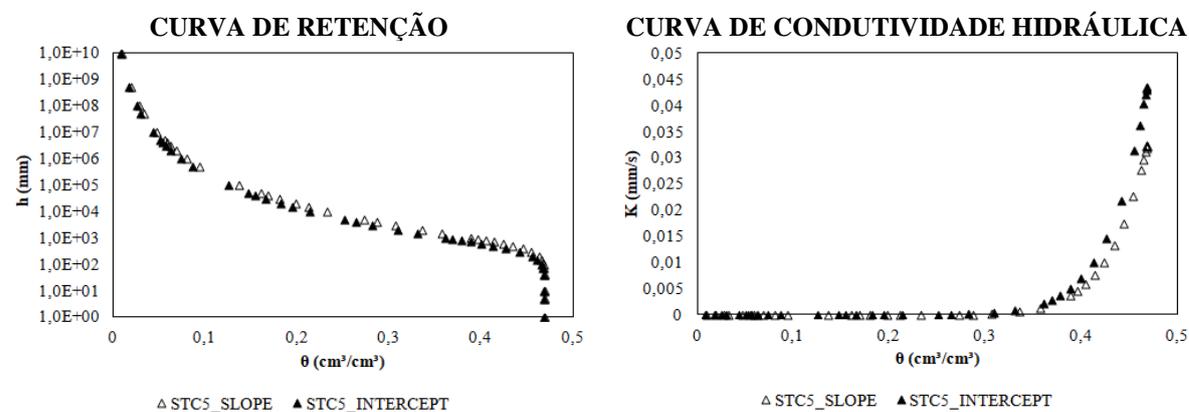
Fonte: A Autora (2018).

GRÁFICO 14 - Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P4).



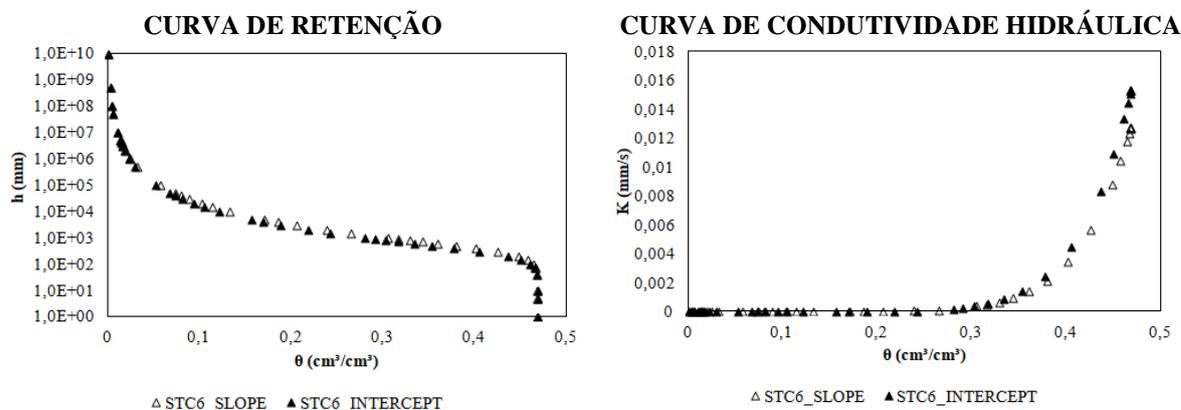
Fonte: A Autora (2018).

GRÁFICO 15 - Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P5).



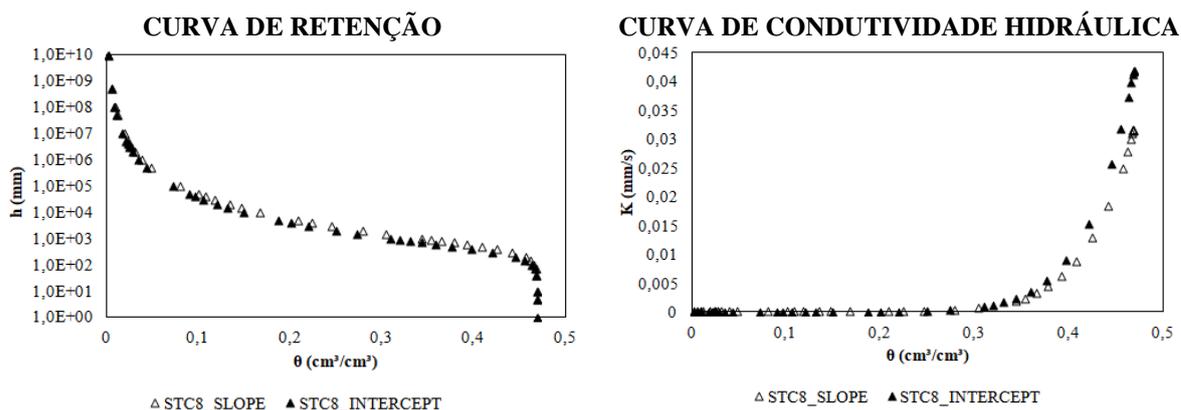
Fonte: A Autora (2018).

GRÁFICO 16 - Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intercept (P6).



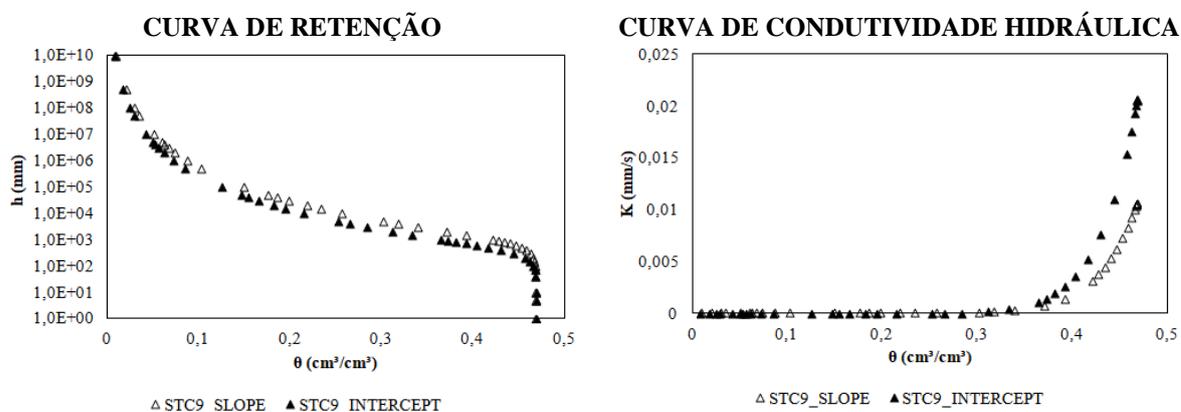
Fonte: A Autora (2018).

GRÁFICO 17 - Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intercept (P8).



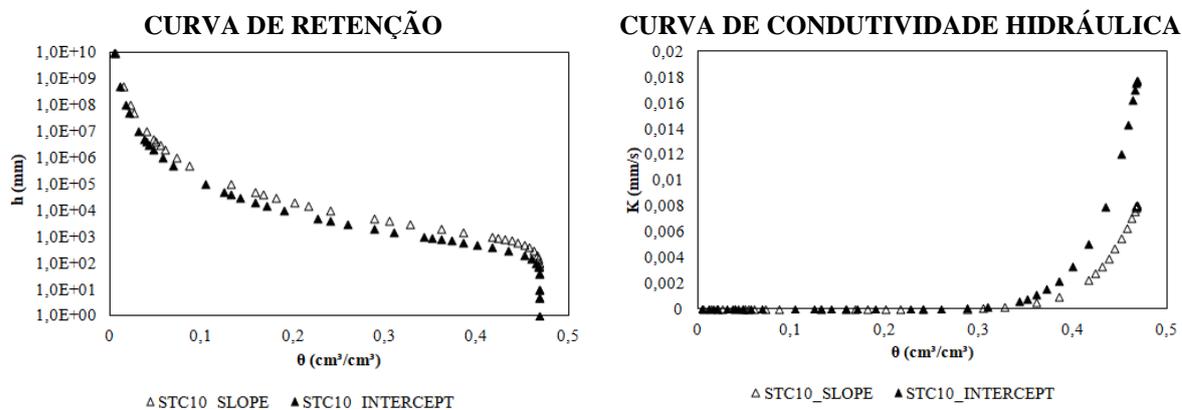
Fonte: A Autora (2018).

GRÁFICO 18 - Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intercept (P9).



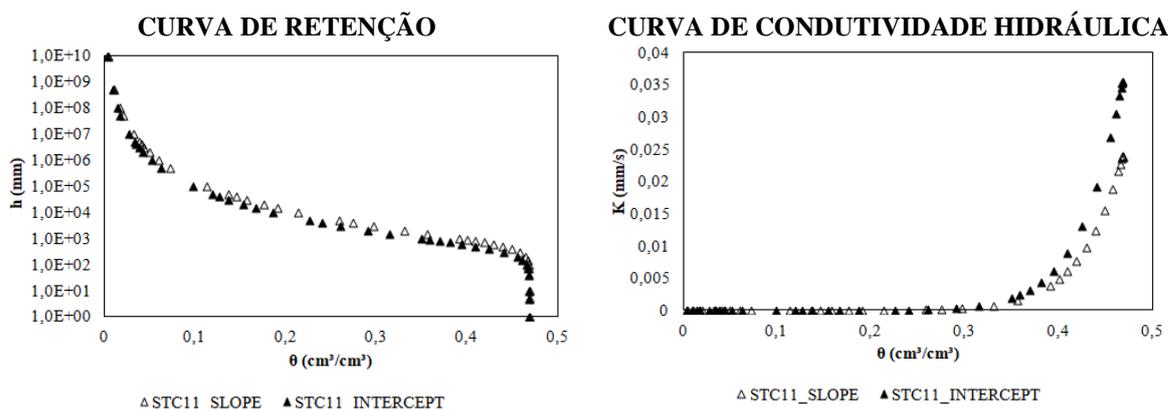
Fonte: A Autora (2018).

GRÁFICO 19 - Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P10).



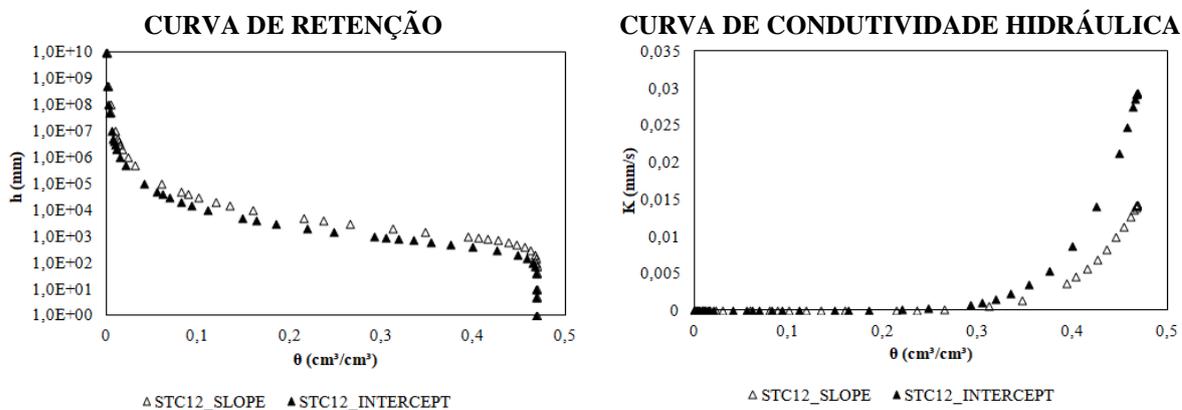
Fonte: A Autora (2018).

GRÁFICO 20 - Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P11).



Fonte: A Autora (2018).

GRÁFICO 21 - Curvas de retenção $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$ pelos métodos Slope e Intecept (P12).



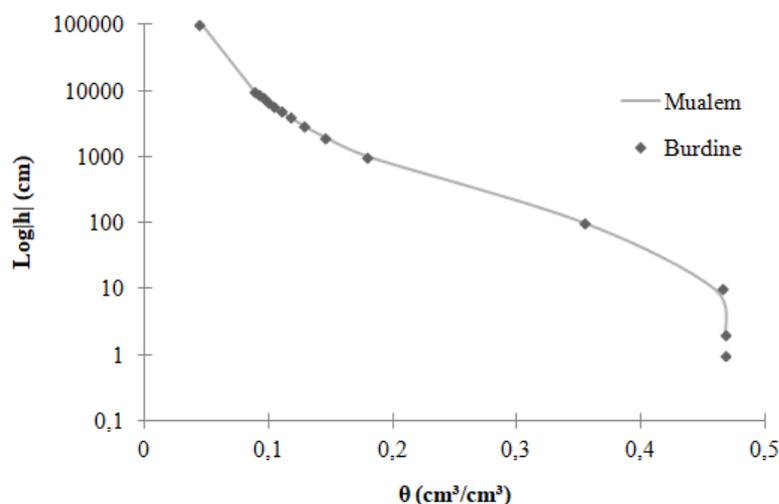
Fonte: A Autora (2018).

Com relação à curva de retenção da água no solo $\theta(h)$, observa-se que os onze pontos apresentaram curvas bastante semelhantes, pois esta é uma propriedade que depende diretamente do teor de areia, argila e silte presentes no solo. Quanto maior o percentual de areia, menor a capacidade de retenção da água no solo. Isto porque a maior proximidade entre as partículas em solos argilosos resultam em efeitos de adsorção e capilaridade mais elevados. Além disto, em geral, os solos com alto percentual de areia (como é o caso do estudo) possuem uma alta concentração de poros hidraulicamente ativos.

As curvas de condutividade hidráulica saturada K_s contribuem para o melhor entendimento do comportamento hidráulico nos pontos ensaiados. Para maiores conteúdos volumétricos de água (θ), os valores de $K(\theta)$ tendem a aumentar em solos com maior percentual de areia.

A curva de retenção média obtida através dos parâmetros médios correspondentes ao modelo de distribuição dos poros de Burdine, conforme a aplicação do algoritmo Beerkan é apresentada no Gráfico 22. A simulação dos processos de transferência de água no modelo Hydrus requer parâmetros que obedeçam à hipótese de distribuição dos poros de Mualem. Desse modo, nota-se que houve bom ajuste da hipótese de distribuição dos poros de Burdine para a hipótese de Mualem. A qualidade do ajuste pode ser observada para o trecho próximo à saturação e ocorre da mesma maneira para os trechos correspondentes a baixas umidades e elevados potenciais matriciais.

GRÁFICO 22 – Ajuste do Modelo de Distribuição dos Poros de Burdine para o Modelo de Distribuição dos Poros de Mualem.



Fonte: A Autora (2018).

A simulação numérica dos processos de transferência de água num pavimento permeável possui como principais variáveis o escoamento superficial e a infiltração da água. O Hydrus, ao resolver numericamente a equação de Richards, pode ter seus resultados apresentando uma dependência da malha ou da densidade de discretização da malha.

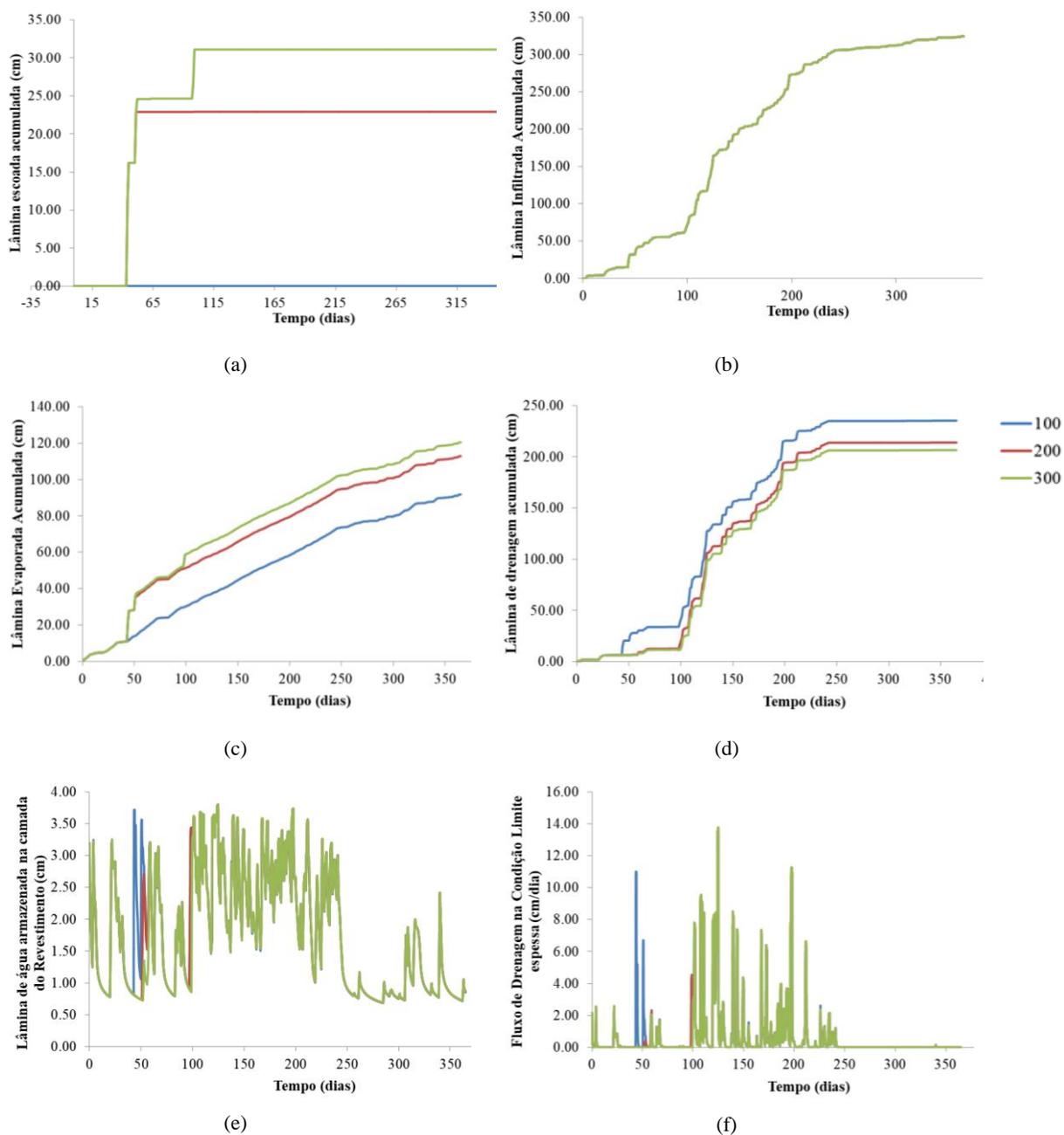
Observa-se no Gráfico 23 a influência do grau de detalhamento da malha nas variáveis de fluxo como (a) Lâmina escoada acumulada, (b) Lâmina infiltrada acumulada, (c) Lâmina evaporada acumulada, (d) Lâmina de drenagem correspondente à recarga do subsolo acumulada, (e) Lâmina de água correspondente ao armazenamento de água na camada de revestimento, e (f) Fluxo de drenagem livre na condição limite inferior.

Observa-se que existe uma influência da malha nos resultados das simulações para as variáveis de fluxo, exceto para a infiltração acumulada (Gráfico 23b). Para a Lâmina escoada superficialmente (Gráfico 23a), variável de grande importância na avaliação da capacidade de drenagem de um pavimento permeável, nota-se que uma malha com 300 nós representa de maneira mais sensível a dinâmica da geração do escoamento superficial em função da precipitação pluviométrica.

No tocante à infiltração acumulada, observa-se que não houve diferenças entre as malhas na estimativa dessa variável (Gráfico 23b). De modo geral, os períodos de ascensão demonstram a infiltração quando da ocorrência de eventos de precipitação pluviométrica com intensidade menor que a capacidade de infiltração do revestimento do pavimento permeável. Os períodos em que a curva de infiltração acumulada apresenta patamares horizontais demonstram os períodos secos, com ausência de precipitação.

Alterações importantes na dinâmica do tempo são notadas na Evaporação real (Gráfico 23c) e na Lâmina de drenagem acumulada (Gráfico 23d). Para o caso da Evaporação real, a adoção de um modelo numérico com menor grau de discretização, provoca uma subestimativa na Evaporação real, e conseqüentemente, erros de estimativa na Lâmina de drenagem acumulada na base do perfil. Isso demonstra que podem ocorrer erros de estimativa no balanço hídrico, principalmente na lâmina de drenagem, que é uma variável de fluxo importante na previsão da capacidade de recarga artificial do lençol freático por uma ecoestrutura como um pavimento permeável.

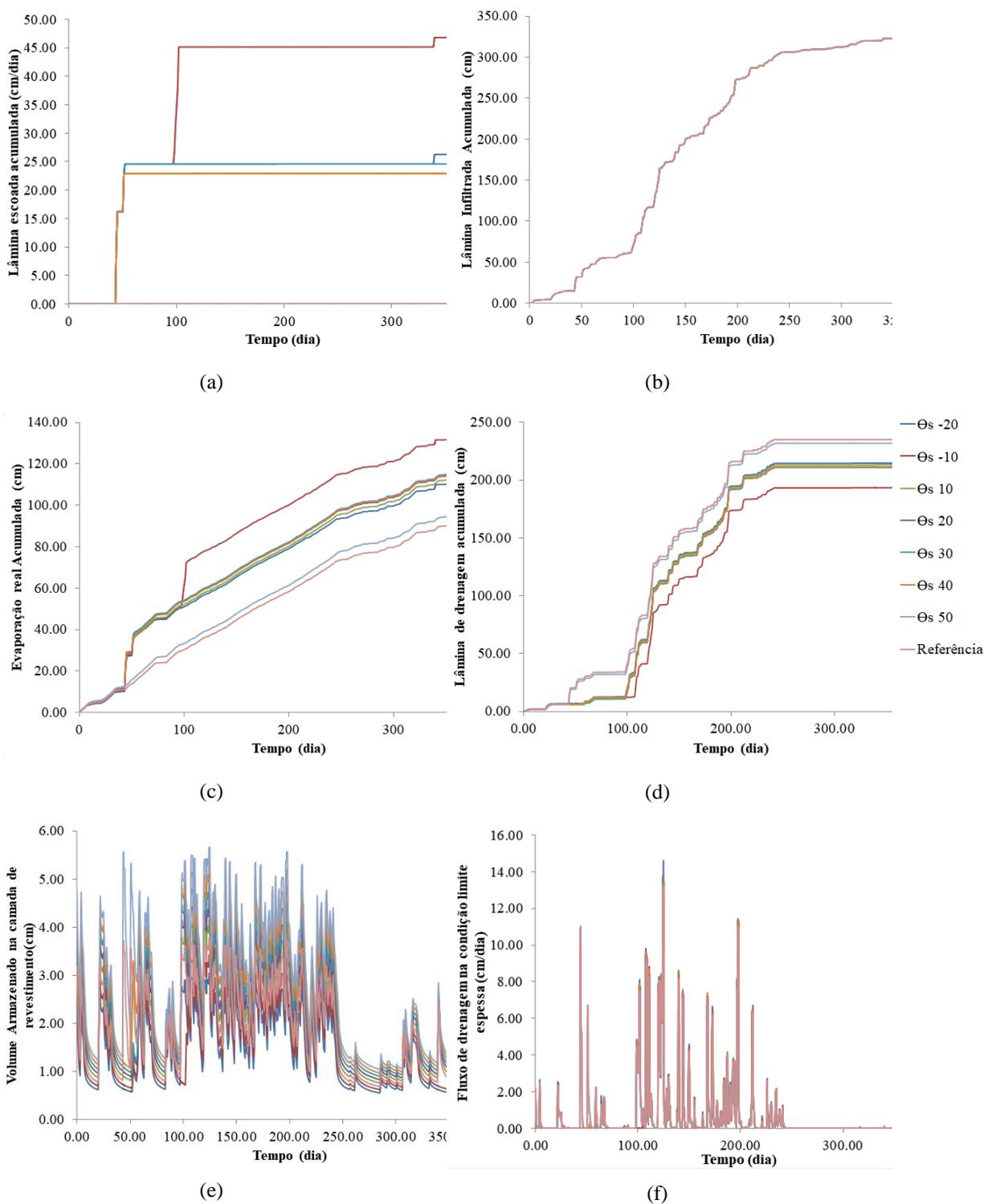
GRÁFICO 23 - Análise de Sensibilidade da Malha: (a) Lâmina Escoda Acumulada; (b) Lâmina Infiltrada Acumulada; (c) Lâmina Evaporada Acumulada; (d) Lâmina de Drenagem Acumulada; (e) Lâmina de Água Armazenada na Camada de Revestimento; (f) Fluxo de Drenagem na Camada Limite Espessa.



Fonte: A Autora (2018).

No Gráfico 24 são apresentadas as diferenças nas variáveis de fluxo decorrentes das variações na porosidade da camada de revestimento. Nota-se que as seguintes variáveis acumuladas são influenciadas pela variação da porosidade: (a) Lâmina escoada superficialmente, (b) Lâmina infiltrada acumulada, (c) Evaporação real acumulada e (d) Lâmina de drenagem acumulada, (e) Lâmina de água armazenada na camada de revestimento e (f) Fluxo de drenagem na condição da camada limite.

GRÁFICO 24 - Influência do parâmetro Θ_S para as variáveis analisadas: (a) Lâmina Escoda Acumulada; (b) Lâmina Infiltrada Acumulada; (c) Lâmina Evaporada Acumulada; (d) Lâmina de Drenagem Acumulada; (e) Lâmina de Água Armazenada na Camada de Revestimento; (f) Fluxo de Drenagem na Camada Limite Espessa.



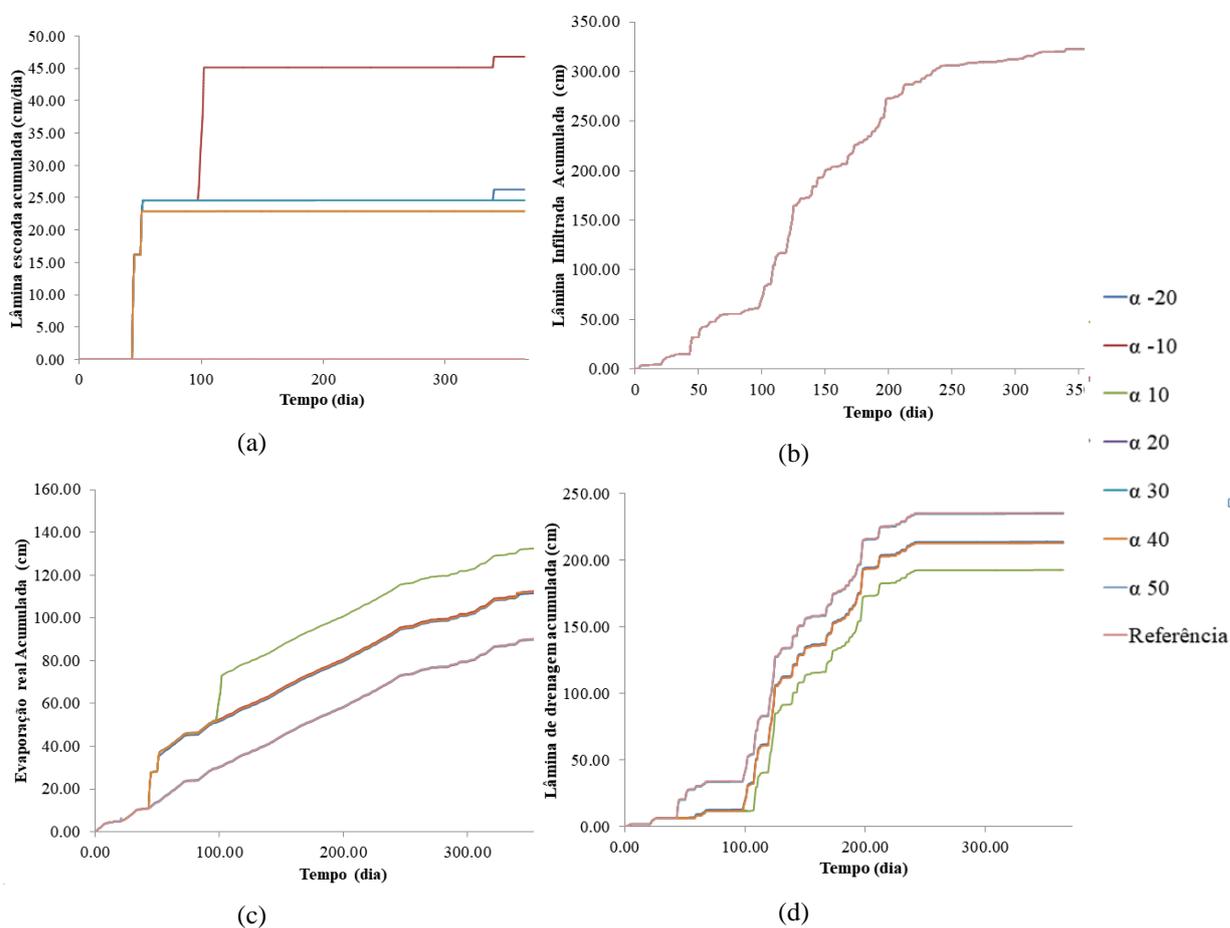
Fonte: A Autora (2018).

As diferenças nas variáveis de fluxo decorrentes das variações no inverso do comprimento capilar da camada de revestimento são apresentadas no Gráfico 25. Nota-se que

as seguintes variáveis acumuladas são influenciadas pela variação da porosidade: (a) Lâmina escoada superficialmente, (b) Lâmina infiltrada acumulada, (c) Evaporação real acumulada, (d) Lâmina de drenagem acumulada, (e) Volume armazenado na camada de revestimento e (f) Fluxo de drenagem na condição limite. A infiltração acumulada não apresentou variações decorrentes das alterações do inverso do comprimento capilar.

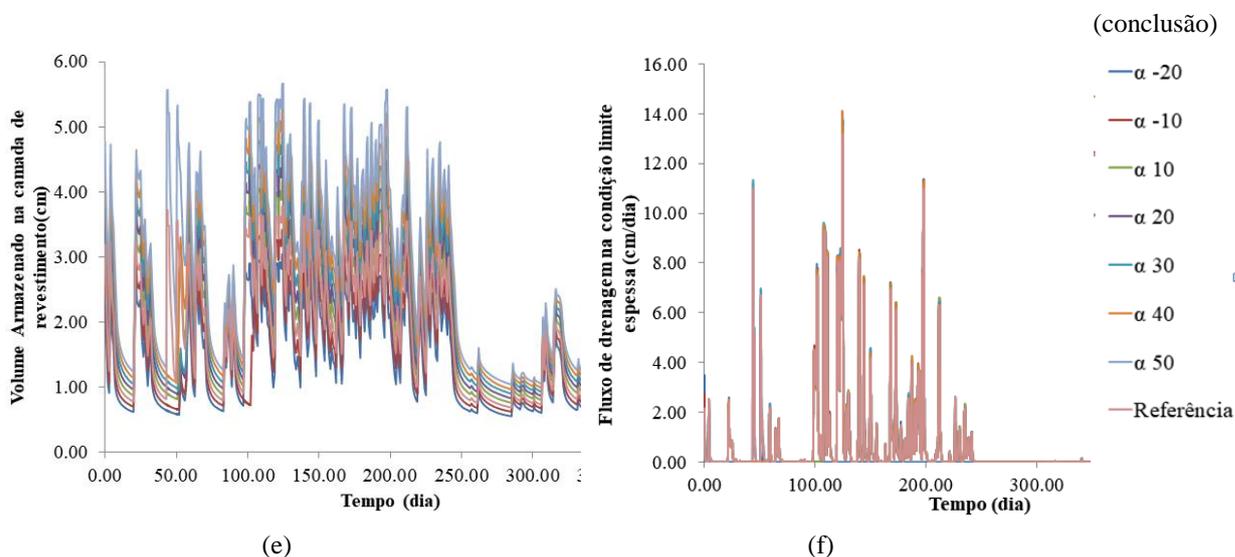
GRÁFICO 25 - Influência do parâmetro α no solo do PP para as variáveis analisadas: (a) Lâmina Escoada Acumulada; (b) Lâmina Infiltrada Acumulada; (c) Lâmina Evaporada Acumulada; (d) Lâmina de Drenagem Acumulada; (e) Lâmina de Água Armazenada na Camada de Revestimento; (f) Fluxo de Drenagem na Camada Limite Espessa.

(continua)



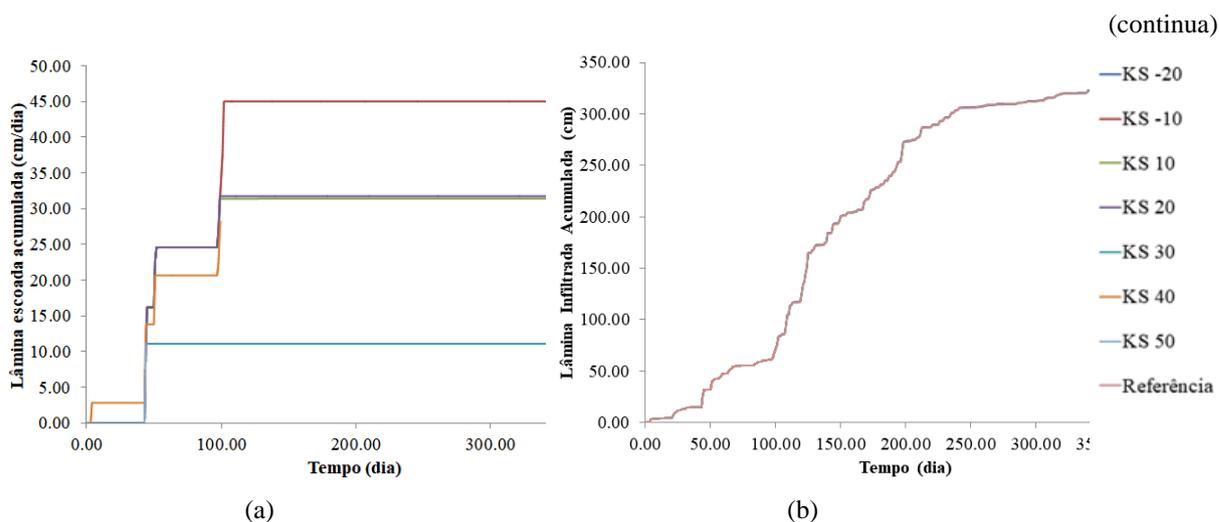
Fonte: A Autora (2018).

GRÁFICO 25 - Influência do parâmetro α no solo do PP para as variáveis analisadas: (a) Lâmina Escoada Acumulada; (b) Lâmina Infiltrada Acumulada; (c) Lâmina Evaporada Acumulada; (d) Lâmina de Drenagem Acumulada; (e) Lâmina de Água Armazenada na Camada de Revestimento; (f) Fluxo de Drenagem na Camada Limite Espessa.



Fonte: A Autora (2018).

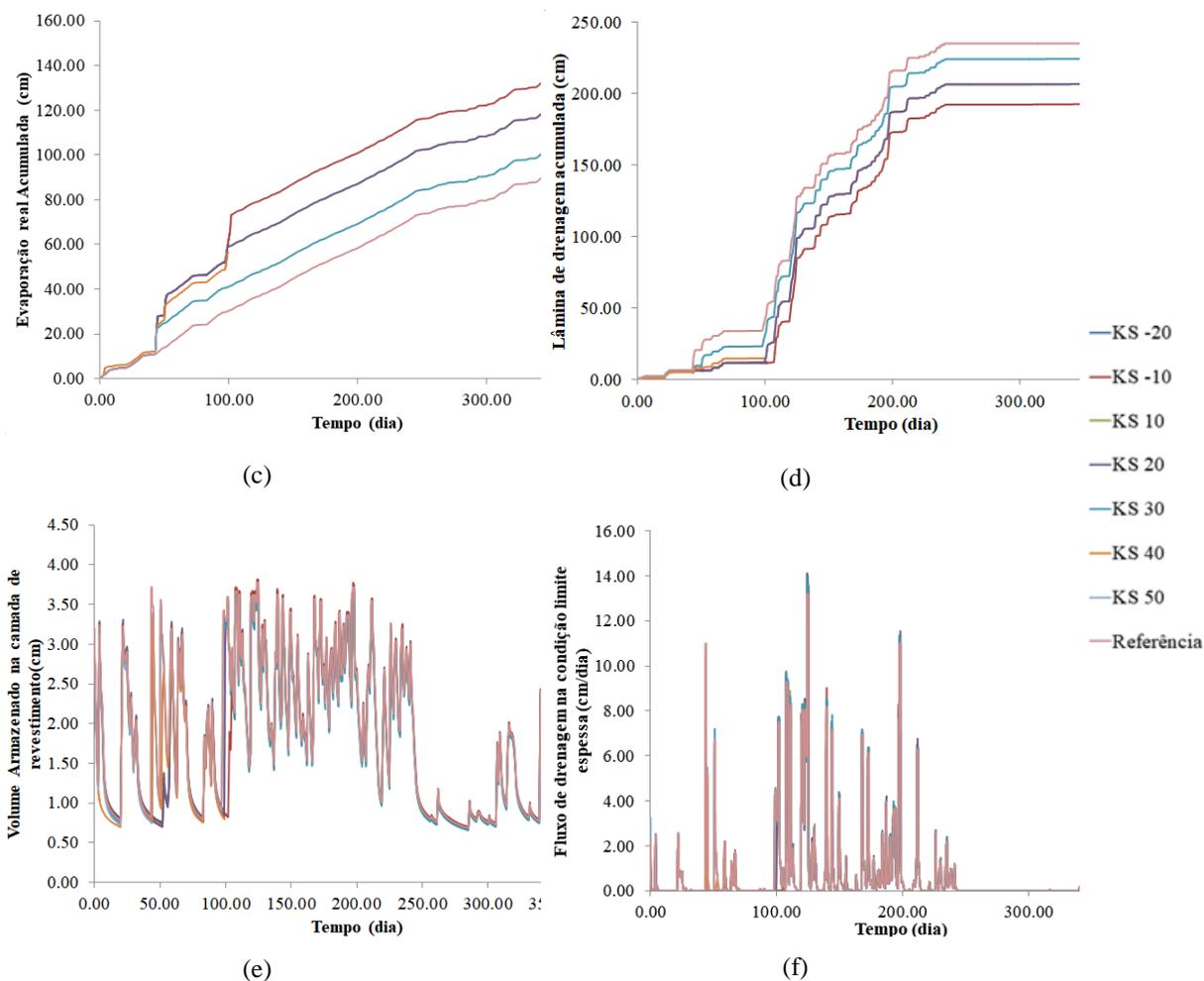
GRÁFICO 26 - Influência do parâmetro K_s no solo do PP para as variáveis analisadas: (a) Lâmina Escoada Acumulada; (b) Lâmina Infiltrada Acumulada; (c) Lâmina Evaporada Acumulada; (d) Lâmina de Drenagem Acumulada; (e) Lâmina de Água Armazenada na Camada de Revestimento; (f) Fluxo de Drenagem na Camada Limite Espessa.



Fonte: A Autora (2018).

GRÁFICO 26 - Influência do parâmetro K_s no solo do PP para as variáveis analisadas: (a) Lâmina Escoda Acumulada; (b) Lâmina Infiltrada Acumulada; (c) Lâmina Evaporada Acumulada; (d) Lâmina de Drenagem Acumulada; (e) Lâmina de Água Armazenada na Camada de Revestimento; (f) Fluxo de Drenagem na Camada Limite Espessa.

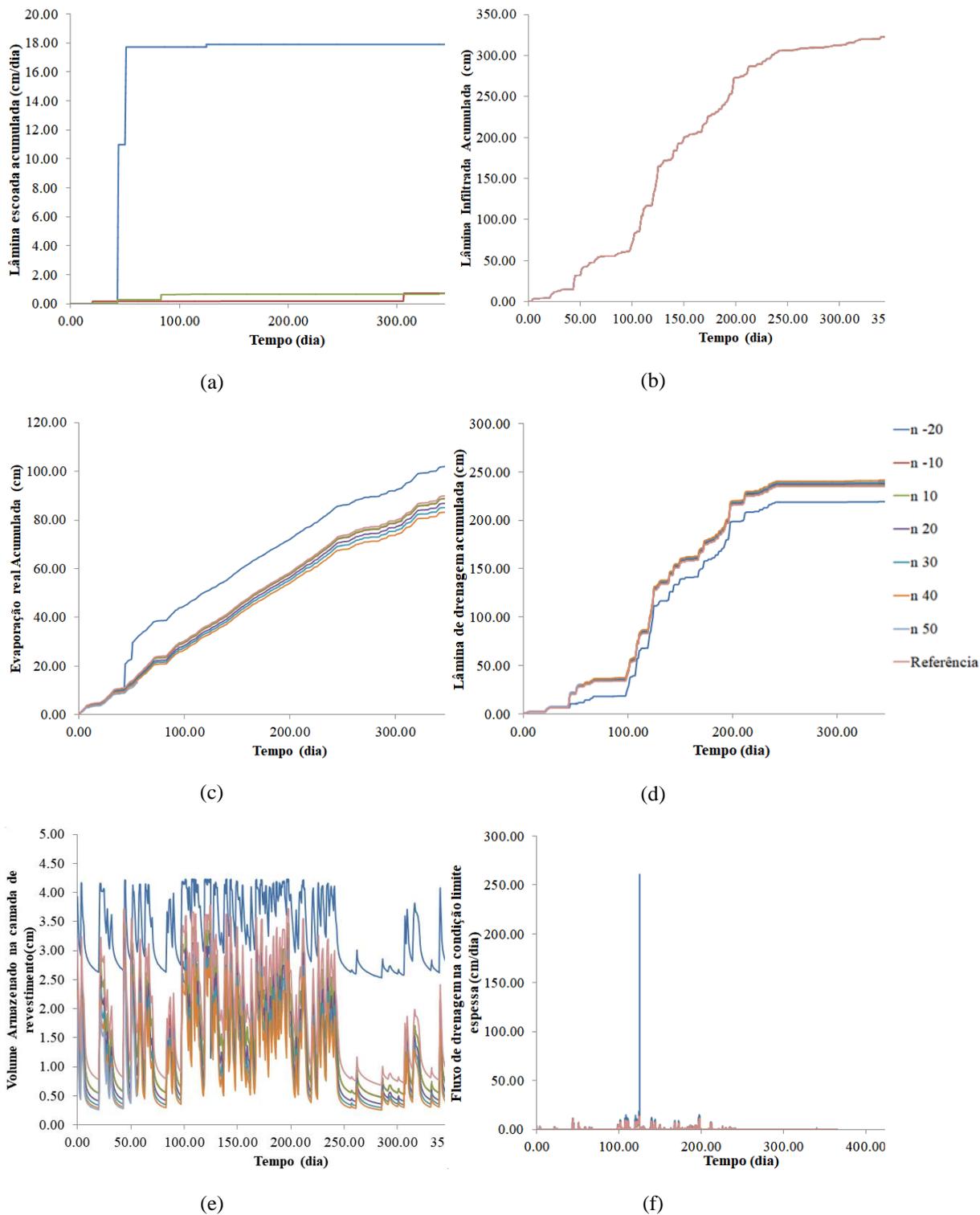
(conclusão)



Fonte: A Autora (2018).

No Gráfico 27 são apresentadas as variações nas variáveis de fluxo decorrentes das alterações do parâmetro de forma n da camada de revestimento. Nota-se que todas as variáveis apresentaram variações em função das alterações desse parâmetro de forma. A única exceção foi a infiltração acumulada (Gráfico 27b). Para variações do parâmetro de forma n , menores que 30%, a simulação não apresenta sentido físico, uma vez que o parâmetro de forma da curva de retenção resulta em menor que um (<1), não obedecendo às hipóteses que relacionam m e n .

GRÁFICO 27 - Influência do parâmetro n no solo do PP para as variáveis analisadas: (a) Lâmina Escoadada Acumulada; (b) Lâmina Infiltrada Acumulada; (c) Lâmina Evaporada Acumulada; (d) Lâmina de Drenagem Acumulada; (e) Lâmina de Água Armazenada na Camada de Revestimento; (f) Fluxo de Drenagem na Camada Limite Espessa.



Fonte: A Autora (2018).

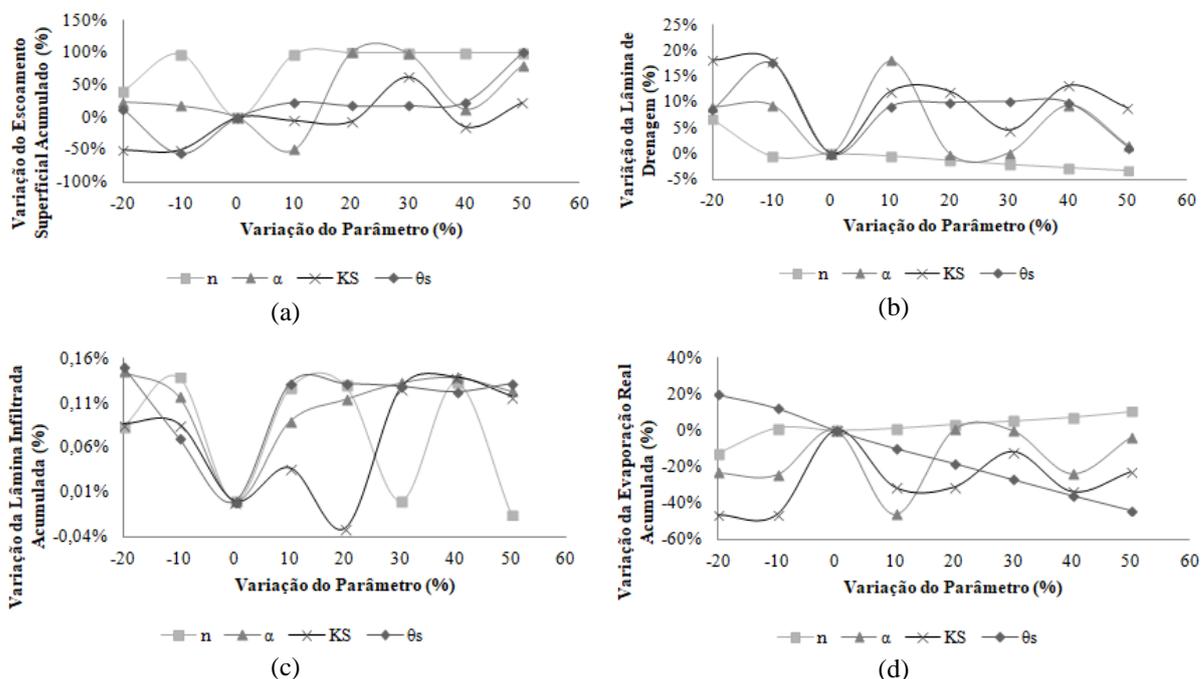
No Gráfico 28 foi observada a influência dos parâmetros n , α , K_s e θ_s na variação: do escoamento superficial acumulado (Gráfico 28a), da lâmina de drenagem (Gráfico 28b), da lâmina infiltrada acumulada (Gráfico 28c) e da evaporação real acumulada (Gráfico 28d).

Conforme demonstrado no Gráfico 28, em todos os casos simulados, nota-se que os erros na estimativa da infiltração acumulada são menores que 0,16% (Gráfico 28c). Isso ocorre independente do parâmetro hidrodinâmico e das incertezas associadas à estimativa dos parâmetros aqui testados para a curva de retenção no modelo de van Genuchten (1980).

Para a lâmina escoada acumulada, um erro de 10 a 50 % na estimativa do parâmetro de forma da curva de retenção, n , implica em aproximadamente 100% de erro na estimativa da lâmina escoada superficialmente. Com relação ao parâmetro de normalização (α), não foi possível observar uma tendência nos erros associados em função da variação do parâmetro (Gráfico 28a).

No tocante à evaporação real acumulada, observa-se um comportamento praticamente linear com a porosidade da camada de revestimento. Tal fato pode ser explicado porque um aumento da porosidade implica em acréscimo da capacidade de armazenamento na camada de revestimento e diminuição da evaporação real. De maneira inversa à porosidade, um aumento do parâmetro de forma da curva de retenção, resultou em cenários de maior evaporação real na camada de revestimento do pavimento permeável. Explica-se esse cenário porque o parâmetro n é proporcional ao tamanho médio dos grãos, de modo que, solos com diâmetros dentro da faixa considerada arenosa possuem poros hidraulicamente funcionais, que permitem uma maior disponibilidade de fase líquida para servir aos processos de evaporação (Gráfico 28d).

GRÁFICO 28 - Simulação numérica dos processos de transferência de água no revestimento do pavimento permeável.



Fonte: A Autora (2018).

Chaves (2009) observou que um erro de 10% na estimativa de n resultaria em um erro de 27,9% nas saídas do modelo Hydrus, quando da simulação do fluxo acumulado de água na base de um perfil de solo.

Alves *et al.* (2012) observaram elevada sensibilidade do armazenamento de água devido ao parâmetro de forma n . Abbasi *et al.* (2003) e Ritter *et al.* (2003) também observaram que o parâmetro de forma n e a porosidade foram os parâmetros hidrodinâmicos mais sensíveis na estimativa do armazenamento de água. Na simulação da dinâmica da água em solo de textura predominantemente arenosa; Wang, Li e Li (2014) observaram que os parâmetros θ_s e n foram os mais sensíveis, e que o parâmetro α foi mais sensível que a condutividade hidráulica saturada.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No capítulo 6 encontram-se as considerações Finais, com Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

O método Beerkan em conjunto com o HYDRUS 1D produziu, de forma rápida, simples e a um baixo custo, um conjunto importante de dados que ajudaram a avaliar e caracterizar a capacidade do PP de blocos vazados como técnica compensatória.

Comumente empregado para ensaio de solos, o método Beerkan demonstrou ser adaptável para medir em escala real a infiltração tridimensional da superfície do pavimento permeável. Forneceu as infiltrações acumuladas e também valores de parâmetros hidrodinâmicos compatíveis com os obtidos na literatura.

Através da mensuração da capacidade de infiltração e da caracterização hidrodinâmica da camada de revestimento do pavimento permeável, foi possível qualificar e simular numericamente, pelo modelo HYDRUS 1D, os processos de transferência da água e o desempenho hidráulico do PP em diferentes cenários.

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram a eficiência hidrodinâmica do PP de blocos vazados para o amortecimento da vazão afluente. Os métodos BEST (Slope e Intercept), Bagarello e Iovino (2003) e Wu *et al.* (1999), foram utilizados comparativamente, através dos valores de K_s , para obter a classificação hidrológica e o grau de permeabilidade.

A não obtenção do estado estacionário pode comprometer as estimativas de K_s e S . Porém, quando respeitadas as condições do ensaio de campo, o uso do algoritmo BEST leva a resultados bastante representativos dos parâmetros hidrodinâmicos do pavimento permeável.

O algoritmo BEST obteve valores aceitáveis para a sorvidade (S) e para a condutividade hidráulica saturada (K_s) para 11 dos 12 pontos analisados, além de fornecer ajustes precisos das infiltrações acumuladas.

Os métodos Bagarello e Iovino (2003) e Wu *et al.* (1999) são métodos simplificados para determinação das propriedades hidrodinâmicas no caso em que a infiltração está em regime permanente. Para a maior parte dos pontos ensaiados, também demonstraram ser modelos bastante rápidos e apropriados para qualificar o pavimento permeável quanto à classificação hidrológica (RAWLS *et al.*, 1993) e ao grau de permeabilidade (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

Os elevados valores dos desvios padrão de K_s observados nos métodos BEST (Intercept e Slope), Bagarello e Iovino (2003) e Wu *et al.* (1999), demonstram a grande variabilidade da capacidade de infiltração do pavimento. Esta variância pode ser devido ao grau de compactação que interfere no arranjo das partículas e conectividade dos poros, decorrente das condições de uso do pavimento.

A classificação hidrológica do PP pelo método SCS confirmou que o dispositivo enquadra-se no Grupo A, o qual possui superfície com baixa geração de escoamento superficial e elevada capacidade de infiltração. Qualitativamente, o PP foi classificado, em sua maior parte, com médio grau de permeabilidade.

Através da equação de Richards, que consegue retratar a dinâmica da água no conjunto PP + solo, o HYDRUS demonstrou ser um modelo capaz de gerar uma enorme gama de resultados futuros e hipotéticos e permitiu, de maneira rápida, a estimativa de diferentes cenários de funcionamento da estrutura do pavimento e a sua avaliação com relação ao seu potencial como técnica compensatória.

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a importância de conhecimento do desempenho hidrodinâmico de pavimentos permeáveis em escala real, a fim de que possam ser largamente implantados e integrados aos ambientes urbanos e contribuam para a mitigação dos efeitos decorrentes da alta taxa de impermeabilização do solo.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com os resultados apresentados neste trabalho, pode-se dar continuidade aos estudos e fazer uma análise mais aprofundada quanto ao grau de influência que as camadas que constituem a base e sub-base do pavimento permeável exercem com relação ao desempenho hidrodinâmico do PP. É importante analisar também a influência da bacia de contribuição e o nível do lençol freático.

O aprofundamento da pesquisa pode servir a um embasamento técnico mais contundente que contribua para a aplicação em larga escala desse tipo de pavimento permeável como técnica compensatória.

Pode-se realizar uma análise do comportamento hidráulico através do Hydrus 2D, levando-se em conta a variação temporal e um perfil de solo heterogêneo.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, F.; JACQUES, D.; SIMUNEK, J.; FEYEN, J.; VAN GENUCHTEN, M. T. Inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Heterogeneous soil. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 4, p. 1097, 2003.
- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Pavimento Permeável**. 2014. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/37/pavimento-permeavel-308773-1.aspx>>. Acesso em: 08 de jan. de 2018.
- ACI COMMITTEE 522. **Report on Previous Concrete**. Report ACI 522R-10, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, p. 1-37, 2010.
- ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, p. 162, 2005.
- AGOSTINHO, M. S. P.; POLETO, C. Sistemas sustentáveis de drenagem urbana: dispositivos. **HOLOS Environment**, v. 12, n.2, p.121, 2012.
- ALENCAR, P. C. D. **Avaliação experimental do concreto poroso na atenuação do escoamento superficial em parcelas urbanizadas**. Dissertação de Mestrado. Brasília: Universidade de Brasília - UNB, p. 174, 2013.
- ALVES, E. M.; NETTO, A. M.; ANTONINO, A. C. D. ; LIMA, J. R. S.; SOUZA, E. S. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CABRAL, J. J. J. P.; GONDIM, M. V. S. G. Simulação da Dinâmica da Água em Solo Cultivado com Feijão Caupi no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n.3, p. 175-186, 2012.
- ALVES, E. M. **Fluxos de energia, vapor d'água e CO₂ entre a vegetação e a atmosfera no agreste meridional de Pernambuco**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.
- APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Monitoramento pluviométrico**. 2018. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php?posto_id=30>. Acesso em: 18 de fev. de 2018.
- ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.5, n.3, p. 21-29, 2000.
- ASCE – American Society Of Civil Engineers. **Design and construction of urban stormwater management systems**. New York, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Análise granulométrica**. Rio de Janeiro. 1984.

_____. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro. 2013.

_____. **NBR 16416**: Pavimentos permeáveis – requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro. 2015.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete**. C1701. Pennsylvania, 2009.

BAEK, S. S.; CHOI, D. H.; JUNG, J. W.; LEE, H. J.; LEE, H.; YOON, K. S.; CHO, K. H. Optimizing Low Impact Development (LID) for stormwater runoff treatment in urban área, Korea: Experimental and modeling approach. **Water Research**, v. 86, p. 122-131, 2015.

BAGARELLO, V.; CASTELLINI, M.; DRI PRIMA, S.; GIORDANO, G.; IOVINO, M. Testing a simplified approach to determine field saturated soil hydraulic conductivity. **Procedia Environmental Sciences**, v. 19, p. 599-608, 2013.

BAGARELLO, V.; IOVINO, M. Field testing parameter sensitivity of the two-term infiltration equation using differentiated linearization. **Vadose Zone Journal**, v. 2, n. 3, p. 358-367, 2003.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. Técnicas compensatórias em drenagem urbana. Porto Alegre: **ABRH**, 266p. 2005.

BASTOS, R. S.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H.; CORRÊA, M. M. Soil aggregate formation and stabilization as influenced by organic compounds with different hydrophobic characteristics. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 1, p. 11-20, 2005.

BEAN, E. Z.; HUNT, W. F.; BIDELESPACH, D. A. Study of the surface infiltration rate of permeable pavements. In: Sehlke, G., Hayes, D.F., Stevens, D.K. (Eds.), Proceedings of the American Society of Civil Engineers and EWRI 2004. World Water and Environmental Resources Congress. **Anais...** Salt Lake City, UT, USA, 2004.

BERNUCCI, L. B.; DA MOTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, RJ: PETROBRÁS: ADEBA, 2008.

BORGES, E.; ANTONINO, A. C. D.; DALL’OLIO, A.; AUDRY, P.; CARNEIRO, C. J. G. Determinação da condutividade hidráulica e da sorvidade de um solo não saturado utilizando-se permeâmetro a disco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.11, p. 2083-2089, 1999.

BRASIL. **Programa de Drenagem Urbana Sustentável**. Ministério das Cidades. Manual para apresentação de propostas. 23p. 2006.

BRASIL. **Manual para apresentação de propostas para sistemas de drenagem urbana sustentável e de manejo de águas pluviais. Programa 2040: gestão de riscos e respostas a desastres**. Ministério das Cidades. 2012. Disponível em: <https://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNAS/Arquivos_PDF/Manual_de_Drenagem_2012.pdf> . Acesso em: 13 de jun. de 2018.

BRAUD, I.; CONDAPPA, D.; SORIA UGLADE, J. M.; HAVERKAMP, R.; ANGULO-JARAMILLO, R.; GALLE, S.; VAUCLIN, M. Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (the Beerkan method). **European Journal of Soil Science**, v.56, p. 361-374, 2005.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Paper**, n.3, Fort Collins: Colorado State University, p. 27, 1964.

BRUNETTI, G.; SIMUNEK, J.; PIRO, P. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behaviour of permeable pavement. **Journal of Hydrology**, v. 540, p. 1146-1161, 2016.

BRUNETTI, G.; SIMUNEK, J.; TURCO, M.; PIRO, P. On the use of surrogate-based modeling for the numerical analysis of Low Impact Development techniques. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 263-277, 2017.

BRUNO, L. O.; AMORIM, R. S. S.; SILVEIRA A. Estudo da redução do escoamento superficial direto em superfícies permeáveis. RBRH – **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, p. 237-247, 2013.

BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. **Journal of Petroleum Technology**, v. 5, n. 3, p. 71-78, 1953.

BUTLER, D.; DAVIES, J. W. **Urban Drainage**. Londres: Spon Press, 543p. 2004.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 234p. 1998.

CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L.; MARQUES, D. M. Avaliação da Evolução do Comportamento Quantitativo de Pavimentos Permeáveis no Controle do Escoamento Superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 1, p. 263-273. 2013.

CAVALCANTI, G. I. F. N. **Caracterização hidrodinâmica de solos de Unidades Geoambientais de Pernambuco a partir da metodologia Beerkan**. Dissertação (Mestrado). Recife: Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, p. 73, 2012.

CAVALCANTI, H.; LYRA, M. R. B.; AVELINO, E. **Mosaico urbano do Recife. Exclusão Inclusão Socioambiental no Recife**, Editora Massangana. p. 309. 2008.

CELIA, M. A.; BOUOUTAS, E. T.; ZARBA, R. L. **A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation**, **Water Resour. Res.**, 26, p. 1483-1496, 1990.

CHAFFIN, B. C.; SHUSTER, W. D.; GARMESTANI, A. S.; FURIO, B.; ALBRO, S. L.; GARDINER, M.; SPRING, M.; GREEN, O. O. 2016. **A tale of two rain gardens: barriers and bridges to adaptive management of urban stormwater in Cleveland, Ohio**. **J. Environ. Manag.** 183, p. 431-441, 2016.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 111, p.262–274. 2016.

CHANG, N. B.; LU, J. W.; CHUI, T. F. M.; HARTSHORN, N. **Global policy analysis of low impact development for stormwater management in urban regions**. *Land Use Policy*, 70, p. 368-383, 2018.

CHAVES, H. M. L. Sensibilidade do modelo Hydrus aos parâmetros hidráulicos do solo em diferentes texturas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 2, p. 33-37, 2009.

CHEN, C. *et al.* Two-domain estimation of hydraulic properties in macropore soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.680-686, 1993.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. Bogotá: Mc Graw Hill, 214 p. 1994.

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

CIRIA – **Construction Industry Research and Information Association – C697**. The SuDS Manual. London, 2007.

CONDAPPA, D.; SORIA UGALDE, J. M.; ANGULO-JARAMILLO, R.; HAVERKAMP, R. 2002. Méthode Beerkan. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols non saturés. **Rapport interne Hydrologie de la Zone Non Saturés - LTHE**, Grenoble: Université de Grenoble, p. 82, 2002.

COUTINHO, A. P. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife**. Dissertação (Mestrado). Recife: Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia e Geociencias, Recife. p. 132, 2011.

COUTINHO, A. P.; LASSABATERE, L.; MONTENEGRO, S.; ANTONINO, A. C. D.; JARAMILLO, R. A.; CABRAL, J. J. S. P. Hydraulic characterization and hydrological behavior of a pilot permeable pavement in an urban centre, Brazil. **Hydrol. Process**, v. 30, p. 4242-4254. 2016.

CRMCA – Colorado Ready Mixed Concrete Association. **Specifier’s Guide for Pervious Concrete Pavement Design**. 2009. Disponível em: <http://www.udfcd.org/downloads/pdf/tech_papers/Pervious_Concrete_Guide_2009_08-18.pdf>. Acesso em: 12 de fev. de 2018.

DECINA, T. G. T.; BRANDÃO, J. L. B. Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 207-217, 2016.

DEO, O.; SUMANASOORIYA, M.; NEITHALATH, N. Permeability reduction in pervious concretes due to clogging: experiments and modeling. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 7, p. 741-751, 2010.

DIERKES, C.; LUCKE, T.; HELMREICH, B. General technical approvals for decentralised sustainable urban drainage systems (SUDS)—The current situation in Germany. **Sustainability**, v. 7, n. 3, p. 3031-3051, 2015.

DURNER, W. **Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure**. **Water Resources Research, AN AGU Journal**. 1994. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/93WR02676>>. Acesso em: 27 de fev. de 2018.

EISENBERG, B.; LINDOW, K. C.; SMITH, D. R. (Eds.). **Permeable pavements**. American Society of Civil Engineers - ASCE. 2015.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa - Serviço de Produção da Informação; Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 412p., 1999.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Centro Nacional de pesquisa de solos**. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. Ed. Rio de Janeiro, 306 p. 2006.

EMIKO, L. **Characteristics of pervious concrete for pavement use**. Tese de Doutorado. Department of Civil and Environmental Engineering. Singapura: National University of Singapore, 2016.

EMLURB – EMPRESA DE MANUTENÇÃO E LIMPEZA URBANA. **Relatório de andamento do RAP: caracterização da Área de Influência Direta – AID**. In: ABF Engenharia, Serviço e Comércio LTDA. Estudo elaboração dos estudos de concepção para gestão e manejo de águas pluviais e drenagem urbana do Recife. Recife, 2013.

EMLURB – EMPRESA DE MANUTENÇÃO E LIMPEZA URBANA. **Plano Diretor de drenagem e manejo de águas pluviais da cidade do Recife**. Recife, 2017.

EUROPEAN COMMISSION. **Building a Green Infrastructure for Europe**. Belgium. 2013.

FASSMAN, E. A.; BLACKBOURN, S. Permeable pavement performance over 3 years of monitoring. In: **Low impact development 2010: Redefining water in the city**. p. 152-165. 2010.

FERGUSON, B. K. Porous Pavements. **Integrative Studies in Water Management and Land Development**. Florida, 2005.

FERREIRA, M. M. **Caracterização física do solo**. In: VAN LIER, Q. de J. (ed.). Física do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa. p. 1–27. 2010.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intretravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. **Revista Ambiente Construído**, v. 7, n. 4, p. 43-54, 2007.

FLETCHER, T. D.; SHUSTER, W.; HUNT, W. F.; ASHLEY, R.; BUTLER, D.; SCOTT, A.; TROWSDALE, S.; BARRAUD, S.; SEMADENI-DAVIES, A.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J. L.; MIKKELSEN, P. S.; RIVARD, G.; UHL, M.; DAGENAIS, D.; VIKLANDER, M..

SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 7, p. 525-542, 2015.

FRATINI, C.; GELDOF, G. D.; KLUCK, J.; MIKKELSEN, P. S. Three Points Approach (3PA) for urban flood risk management: A tool to support climate change adaptation through transdisciplinarity and multifunctionality. **Urban Water Journal**, v. 9, n. 5, p. 317-331. 2012.

FUENTES, C.; HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y. Parameter constraints on closed-form soilwater relationships. **Journal of hydrology**, v. 134, n. 1-4, p. 117-142, 1992.

FUENTES, C.; VAUCLIN, M.; PARLANGE, J. Y.; HAVERKAMP, R. **Soil water conductivity of a fractal soil**. In: Baveye, P.; Parlange, J. Y.; Stewart, B. A. (eds.). *Fractals in soil science*. Boca Raton: CRC, 1998. cap. 11, p.333-340.

GARDNER, W.R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from water table. **Soil Science**, v. 85, p. 228-232, 1958.

GHODSI, S. H.; KERACHIAN, R.; ESTALAKI, S. M.; NIKOO, M. R.; ZAHMATKESH, Z. Developing a stochastic conflict resolution model for urban runoff quality management: Application of info-gap and bargaining theories. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 200-212, 2016.

GOOGLE MAPS. **Mapas**. 2017. Disponível em: <
<https://www.google.com.br/maps/place/Faculdade+de+Direito+do+Recife/@-8.0586839,-34.8836354,384m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x7ab18bfb01e4e75:0xac28ef7b13c1a400!8m2!3d-8.0586892!4d-34.8825411>>. Acesso em: 01 de dez. de 2017.

GUSMÃO FILHO, J. A., **Fundações: do conhecimento à prática da Engenharia**, Editora Universitária, UFPE, 333p,1998.’

HARVEY, J.; SHAN, S.; LI, H.; JONES, D. J.; WU, R. Fully Permeable Pavement for Stormwater Management: Progress and Obstacles to Implementation in California. **In Airfield and Highway Pavements 2017**. p. 125-136. 2017.

HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y.; CUENCA, R.; ROSS, P. J.; STEENHUIS, T. S. **Scaling of the Richards equation and its application to watershed modeling**. In: Sposito, G. (ed.). *Scale dependence and scale invariance in hydrology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p.190-223.

HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y. Predicting the water retention curve from particle size distribution: I Sandy soils without organic matter. **Soil Science**, v.142, p.325-335, 1986.

HAVERKAMP, R.; ROSS, P. J.; SMETTEM, K. R. J.; PARLANGE, J. Y. **Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer**. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research*, v.30, p.2931-2935, 1994.

HENDERSON, V. “**Evaluation of the Performance of Pervious Concrete Pavement in the Canadian Climate**”, Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2012.

HOPTON, M. E.; SIMON, M. A.; BORST, M.; GARMESTANI, A. S.; JARNAGIN, T.; JACOBS, S.; LYE, D.; O'CONNOR, T. P.; SHUSTER, W. D. **Green Infrastructure for Stormwater Control: Gauging its Effectiveness with Community Partners**. U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, p. 57. EPA/600/R-15/219. 2015.

HUANG, J.; HE, J.; VALEO, C.; CHU, A. Temporal evolution modeling of hydraulic and water quality performance of permeable pavements. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 15-27, 2016.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **População rural e urbana**. 2015. Disponível em: <<https://teen.ibge.gov.br/sobre-o-brasil/populacao/populacao-rural-e-urbana.html>>. Acesso em: 13 abr. 2018.

JABUR, A. S.; DORNELLES, F.; SILVEIRA, A. L. L.; GOLDENFUM, J. A.; OKAWA, C. M. P.; GASPARINI, R. R.. Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 20, n. 4, p. 937-945, 2015.

JALBERT, M.; DANE, J. H. Correcting laboratory retention curves for hydrostatic fluid distributions. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, p.648-654, 2001.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2ª ed. São Paulo: Nobel, 1988. 408p.

KOOL, J. B.; PARKER, J. C.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models - A review, **J. Hydrol.**, v. 91, p. 255-293, 1987.

KOSUGI, K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, **Water Resour. res.**, v. 32, n. 9, p. 2697-2703, 1996.

KUANG, X.; SANSALONE, J.; YING, G.; RANIERI, V. Pore-structure models of hydraulic conductivity for permeable pavement. **Journal of hydrology**, v. 399, n. 3-4, p. 148-157, 2011.

KUMAR, K.; KOZAK, J.; HUNDAL, L.; COX, A.; ZHANG, H.; GRANATO, T. In-situ infiltration performance of diferente permeable pavements in a employee used parking lot – A four-year study. **Jornal of Environmental Management**, v. 167, p. 8-14, 2016.

LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA, J. M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments - BEST. **Soil Science Society of American Journal**, v.70, p.521-532, 2006.

LENHARD, R. J.; PARKER, J. C.; KALUARACHCHI, J. J. Comparing simulated and experimental hysteretic two-phase transient fluid flow phenomena, **Water Resour. Res.**, v. 27, n. 8, p. 2113-2124, 1991.

LENHARD, R. J.; PARKER, J. C. **Modeling multiphase fluid hysteresis and comparing results to laboratory investigations**, In, Proc. Intl. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, edited by M. Th van Genuchten, F. J. Leij, and L. J. Lund, University of California, Riverside, pp. 233-248, 1992.

LIBARDI, P. L.; MELO FILHO, J. F. Análise exploratória e variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica, em um experimento de perfil instantâneo. **Rev. Bras. Ciência Solo**, v. 30, p. 197-206, 2006.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo, Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, 335p. 2005.

LIU, Y.; BRALTS, V. F.; ENGEL, B. A. Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model. **Science of the Total Environment**, v. 511, p. 298-308, 2015.

MACDONALD, I. F.; EL-SAYED, M. S.; DULLIEN, F. A. “Flow Through Porous Media – The Ergun Equation Revisited”, **Ind. Chemical Fundamentals**, v. 18, n. 3, p. 199-108. 1979.

MAIA, C. M. B. F.; FUKAMACHI, C. R. B.; CAMBRONERO, Y. C.; DEDECEK, R. A.; MANGRICH, A. S.; NARIMOTO, K. M; MILORI, D. M. B. P.; SIMÕES, M.
L. Hidrofobicidade em Neossolo litólico sob plantação de Pinus taeda. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 62, p. 93, 2010.

MARCHIONI, M.; BECCIU, G.; SILVA, C. O. **Critical Analysis Of The Brazilian National Standard For Concrete Permeable Pavement. Ecosystems and Sustainable Development X**. WIT Transactions on Ecology and The Environment, v. 192. p. 443-453, 2015.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. **Pavimento intertravado permeável** – melhores práticas - ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 2011.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. Método de ensaio para avaliação de pavimento permeável executado. In: Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto, 2013, Gramado. **Anais...** Gramado: Congresso Brasileiro do Concreto, 2013.

MARQUARDT, D. W. An algorithm for least squares estimation of non linear parameters. **SIAM Journal on Applied Mathematics**, v.11, p.431-441, 1963.

MARTINS, R. M. **Análise da Capacidade de Infiltração do Pavimento Intertravado de Concreto**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

MARUYAMA, C. M.; FRANCO, M. A. R. Pavimentos permeáveis e infraestrutura verde. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, v. 4, n. 9, 2016.

MAUS, V.W; RIGHES, A.A; BURIOL, G.A. Pavimentos Permeáveis e escoamento superficial das águas em áreas urbanas. **Anais...** do I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste, 2007.

MELO, T. A. T.; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. S. P.; ANTONINO, A. C. D.; CIRILO, J. A. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, v.14, n. 4, p. 147-165, 2014.

MELO, T. A. T. **AVALIAÇÃO Hidrodinâmica de trincheira de infiltração no manejo das águas pluviais urbanas**. 136p. Tese (Doutorado). Recife: Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia e Geociências, 2015.

MIGUÉZ, M. G.; VERÓL, A. P.; MASCARENHAS, F. C. B. Storage measures as compensatory techniques for urban lowlands flood control. **Internacional Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 9, n. 2, p. 225-236, 2014.

MONTES, F.; HASELBACH, L. Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete. **Environmental Engineering Science**, v. 23, n. 6, p. 960-969, 2006.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v.12, p. 513-522, 1976.

MULLANEY, J.; LUCKE, T. Practical review of pervious pavement designs. **CLEAN–Soil, Air, Water**, v. 42, n. 2, p. 111-124, 2014.

NAÇÕES UNIDAS. **Relatório da ONU mostra população mundial cada vez mais urbanizada, mais de metade vive em zonas urbanizadas ao que se podem juntar 2,5 mil milhões em 2050**. 2014. Disponível em: <<https://www.unric.org/pt/actualidade/31537-relatorio-da-onu-mostra-populacao-mundial-cada-vez-mais-urbanizada-mais-de-metade-vive-em-zonas-urbanizadas-ao-que-se-podem-juntar-25-mil-milhoes-em-2050>>. Acesso em: 29 de jan. de 2018.

NASCIMENTO, N. O.; BAPTISTA, M. B. **Técnicas Compensatórias em Águas Pluviais**. In: Righetto, A. M. (coord.). Manejo de Águas Pluviais urbanas. Rio de Janeiro: ABES. 396 p. 2009.

NRMCA - National Ready Mix Concrete Association. **Pervious Concrete Pavement: When it rains**. 2008. Disponível em: <<http://www.perviouspavement.org/index.html>>. Acesso em 08 de jan. de 2018.

OLIVEIRA, L. A.; GONÇALVES, R. M.; MARTINS, F. P. Contraste de condutividade hidráulica em solos de texturas arenosa e argilosa encontrados nos tributários da margem esquerda do rio tijuco, município de Ituiutaba (MG). **Caminhos de Geografia**, v. 11, n. 33, 2010.

ONO, B. W.; BALBO, J. T.; CARGNIN, A. P. Análise da capacidade de infiltração em pavimento permeável de bloco de concreto unidirecionalmente articulado. **Revista Transportes**, v.25, n. 2, 2017.

PAGE, J. L.; WINSTON, R. J.; MAYES, D. B.; PERRIN, C.; HUNT, W. F. Hydrologic mitigation of impervious cover in the municipal right-of-way through innovative stormwater control measures. **J. Hydrol**, v. 527, p. 923-932, 2015.

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.

PARRA, G. G. **Estudo comparativo dos efeitos dos Espaços de Circulação e Permanência de Pedestres (E CPP) sobre o manejo das águas de chuva.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, p. 120, 2016.

PAULETTO, E. A.; LIBARDI, P. L.; MANFRON, P. A.; MORAES, S. O. Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 12, p. 189-195, 1988.

PELLIZZARI, V. **Avaliação da Eficácia da Restauração da Capacidade de Infiltração da Camada Superior de Pavimentos Porosos.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Departamento de Engenharia Civil, Porto Alegre, 2013.

PHILIP, J. R. **The quasi-linear analysis, the scattering analog, and other aspects of infiltration and seepage.** In: Y. S. Fok (ed.), *Infiltration development and application*, Honolulu: Water Resources Research Center, p.1-27, 1987.

PINTO, L. L. C. A. **O Desempenho de Pavimentos Permeáveis como Medida Mitigadora da Impermeabilização do Solo Urbano.** 255p. Tese (Doutorado). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 2011.

PRATT, C. J.; POWELL, J. J. M. Design of infiltration systems: the new UK approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE DOMAIN OF URBAN STORM WATER DRAINAGE, Lyon, France. **Proceedings**. Lyon: Congrès Novatech, p. 155-164. 1992.

PREFEITURA DO RECIFE, **Lei Ordinária 18.112** de 12 de janeiro de 2015. Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do ‘telhado verde’ e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. 2015.

RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D. L.; SHIRMOHAMMADI, A. **Infiltration and soil water movement, in Handbook of Hydrology.** Ed. David R. Maidment, Mc-Graw-Hill, Inc. USA, p.5.1-5.51. 1993.

RHEAD, D. **“Evolution of Pervious Concrete Pavement at the Ministry of Transportation Ontario, Canada”**, Transportation Research Board, 2012.

RIBAS, L. V. S. **Experimentação e modelagem do comportamento hidrodinâmico de um pavimento permeável.** Dissertação (Mestrado). Recife: Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia e Geociências, p. 124, 2017.

RICHARDS, L. A. **Capillary conduction of liquids in porous mediums.** *Physics 1*, p. 328-333, 1931.

RICHARDS, L. A. A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. **Soil Science**, v. 51, p. 377-386, 1941.

- RITTER, A.; HUPET, F.; MUÑOZ-CARPENA, R.; LAMBOT, S.; VANCLOOSTER, M. Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. **Agricultural Water Management**, v. 59, n. 2. p. 77-96. 2003.
- SANSALONE, J.; KUANG, X.; YING, G.; RANIERI, V. Filtration and clogging of permeable pavement loaded by urban drainage. *Water Res.* v. 46, p. 6763 – 6774, 2012.
- SANTOS, C. A. G.; SILVA, J. F. C. B. C. Caracterização hidrodinâmica dos solos da bacia experimental do Riacho Guaíra utilizando o método Beerkan. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 4, p. 149-160, 2012.
- SANTOS, L. P.; CUBA, R. M.; LEITÃO, V. S.; NETO, A. S. Análise da eficiência de calçadas ecológicas como sistema de drenagem sustentável nos centros urbanos: estudo de caso no Parque Flamboyant, Goiânia–Goiás. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 837-849, 2015.
- SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. **Build. Environ**, v. 42, p. 3830-3836, 2007.
- SCHÜELER, T. R. Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs. **Washington Metropolitan Water Resources Planning Board**, p. 229.1987.
- SCHLÜTER, W.; JEFFERIES, C. Modelling the outflow from a porous pavement. **Urban Water**, v. 4, n. 3, p. 245-253, 2002.
- SCOTT, G.; SCOTT, S.; ANGELA, A. G. Life Cycle Analysis for Sustainable Development: A Case Study of Parking Lot Pavements, **International Journal of Construction Education and Research**, v. 9, n. 3. p. 226-236. 2013.
- SCOTT, P. S.; FARQUHAR G. J.; KOUWEN N. **Hysteresis effects on net infiltration**, **Advances in Infiltration**, Publ. 11-83. p.163-170. Am. Soc. Agri. Eng., St. Joseph, Mich. 1983.
- SILVA JÚNIOR, J. J. **Aplicação do método inverso pelo modelo Hydrus – 2D para a obtenção de propriedades físico hídricas de solos tropicais**, 2014. 109 p.: il. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.
- SILVA, J. F. C. B. C.; RODRIGUES, A. C. L.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. Caracterização hidrodinâmica de solos através da aplicação da metodologia Beerkan: estudo de caso na Bacia Experimental do Guaraíra — PB. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2009.
- SILVA, J. P. **Sedimentologia, batimetria, qualidade da água e vulnerabilidade do Rio Capibaribe na Cidade do Recife** – PE. Dissertação de mestrado em geociências. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, p. 101, 2003.
- SILVA, P. O.; CABRAL, J. J. S. P. Atenuação de picos de vazão em área problema: estudo comparativo de reservatórios de retenção em lote, em logradouros e em grande área da bacia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p. 7-18, 2014.

SMG - Seoul Metropolitan Government. Importance of the technology: **field permeability test**. Apresentação em PowerPoint. Seoul. 2014.

SMITH, D. R. **A road to the future tracing the history of concrete pavers**, Landscape design. p. 19-21. 1999.

SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. Desenvolvimento urbano de baixo impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 9-18, 2012.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ANGULO- JARAMILLO, R.; NETTO, A. M. **Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 12, n. 2, p. 128-135, 2008.

SOUZA, E. S. **Caracterização hidrodinâmica na escala local e da parcela agrícola de dois solos do estado da Paraíba: variabilidade espacial e temporal, e meio homogêneo equivalente**. Tese (Doutorado). Recife: Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Energia Nuclear, p.138, 2005.

SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; KABBACH JÚNIOR, F. I. **Drenagem Subsuperficial de Pavimentos: conceitos e dimensionamento**. Oficina de Textos, 2013.

TAN, S. A.; FWA, T. F.; HAN, C. T. Clogging evaluation of permeable bases. **Journal of transportation engineering**, v. 129, n. 3, p. 309-315, 2003.

TERZAGHI, K.; PECK, R.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York. 1996.

TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas**. Porto Alegre: ABRH, 389p. 2007.

TURCO, M.; KODESOVÁ, R.; BRUNETTI, G.; NIKODEM, A.; FÉR, M.; PIRO, P. Unsaturated hydraulic behaviour of permeable pavement: Laboratory investigation and numerical analysis by using the HYDRUS-2D model. **Journal of Hydrology**, v. 554, p. 780-791, 2017.

URBAN STORM DRAINAGE CRITERIA MANUAL: Management. **Hydrology, and Hydraulics**, v.1, p. 6-8, 2016.

URBONAS, B.; STAHERE, P. **Stormwater: best management practices and detention for water quality, drainage, and CSO management**. Englewood Cliffs, New Jersey: PTR Prentice-Hall, 449p. 1993.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soil Survey Manual**. Natural Resources Conservation Service, edição revisada, 1993.

USEPA – Environmental Protection Agency. **Managing Wet Weather with Green Infrastructure: Funding Options**. United States Environmental Protection Agency. 2008.

USEPA – Environmental Protection Agency. **National Priorities: Life Cycle Costs of Water Infrastructure Alternatives**. 2015.

USEPA – Environmental Protection Agency. **National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES): NPDES Stormwater Program**. 2016. Disponível em: <<https://www.epa.gov/npdes/npdes-stormwater-program>>. Acesso em: 13 de jan. 2018.

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

VASCONCELOS, A. F.; MIGUEZ, M. G.; VAZQUEZ, E. G. **Critérios de projeto e benefícios esperados da implantação de técnicas compensatórias em drenagem urbana para controle de escoamentos na fonte, com base em modelagem computacional aplicada a um estudo de caso na zona oeste do Rio de Janeiro**. 2016.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, p. 191, 2009.

VOGELMANN, E. S. **Relações da matéria orgânica com a hidrofobicidade do solo**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. 2014.

WANG, Z.; LI, J.; LI, Y. Simulation of nitrate leaching under varying drip system uniformities and precipitation patterns during the growing season of maize in the North China plain. **Agricultural Water Management, Amsterdam**, v. 142, p. 19-28, 2014.

WEISS, P. T.; KAYHANIAN, M.; KHAZANOVICH, L.; GULLIVER, J. S. **Permeable pavements in cold climates: state of the art and cold climate case studies – Report**. Center for Transportation Studies. University of Minnesota, Minneapolis. 2015.

WHITE, I.; SULLY, M. J. Macroscopic and microscopic capillary length and times scales from field infiltration. **Water Resources Research**, v.23, n.8, p.1514-1522, 1987.

WU, L.; PAN, L.; MITCHELL, J.; SANDEN, B. Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrometers. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 63, p. 788-792. 1999.

YANNOPOULOS, S. I.; GRIVAKI, G.; GIANNOPOULOU, I.; BASBAS, S.; OIKONOMOU, E. K. Environmental impacts and best management of urban stormwater runoff: measures and legislative framework. **Global NEST Journal**, v. 15, n. 10, p. 324-332, 2013.

ZHANG, R.; VAN GENUCHTEN, M. Th. New models for unsaturated soil hydraulic properties. **Soil Science**, v. 158, p. 77-85, 1994.

ZHU, Y.; FOX, P. J.; MORRIS, J. P. A pore- scale numerical model for flow through porous media. **International journal for numerical and analytical methods in geomechanics**, v. 23, n. 9, p. 881-904, 1999.

ZATARÁIN, F.; FUENTES, C.; HAVERKAMP, R.; ANTONIO, A. C. D. Predicción de la forma de la característica de humedad del suelo a partir de la curva granulométrica. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO, 2003, Zacatecas. **Anais...** Zacatecas: ANEI, 2003. v. 2, p. 212—219.