

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

LARISSA VIRGÍNIA DA SILVA RIBAS

EXPERIMENTAÇÃO E MODELAGEM DO COMPORTAMENTO
HIDRODINÂMICO DE UM PAVIMENTO PERMEÁVEL

Recife

2017

LARISSA VIRGÍNIA DA SILVA RIBAS

**EXPERIMENTAÇÃO E MODELAGEM DO COMPORTAMENTO
HIDRODINÂMICO DE UM PAVIMENTO PERMEÁVEL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e
Geociências da Universidade Federal de Pernambuco,
para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto

Coorientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho

Recife

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

R482e	Ribas, Larissa Virgínia da Silva. Experimentação e modelagem do comportamento hidrodinâmico de um pavimento permeável. Larissa Virgínia da Silva Ribas - 2018. 124folhas, Il., Tab.; Abr.; Sigl.; e Simb. Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto. Coorientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2018. Inclui Referências, Apêndices. 1. Engenharia Civil. 2. Hydrus. 3. Condutividade hidráulica. 4. Técnica compensatória. 5. Método inverso. 6. Indicadores hidrodinâmicos. I. Ribeiro Neto, Alfredo. (Orientador). II. Coutinho, Artur Paiva (Coorientador). III. Título. UFPE 624 CDD (22. ed.) BCTG/2018-38
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**EXPERIMENTAÇÃO E MODELAGEM DO COMPORTAMENTO HIDRÔDINÂMICO
DE UM PAVIMENTO PERMEÁVEL**

defendida por

Larissa Virgínia da Silva Ribas

Considera a candidata APROVADA

Recife, 27 de dezembro de 2017

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto – Orientador – UFPE

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho – Coorientador – UFPE

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho – UFPE
(coorientador)

Prof.^a Dr.^a Tássia dos Anjos Tenório de Melo – IFPB
(examinadora externa)

Prof.^a Dr.^a Suzana Maria Gico Lima Montenegro – UFPE
(examinadora interna)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por permitir que este milagre se realize, por iluminar a minha vida a cada momento e por ser abrigo e fonte de amor ininterrupto.

Agradeço à Artur Paiva Coutinho, meu mentor e amigo, cuja orientação foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, sobretudo, por ser fonte de inspiração, de foco e de dedicação à ciência, por acreditar no meu potencial acadêmico e não desistir de mim.

Aos professores orientadores, Antônio Celso Dantas Antonino e Alfredo Ribeiro Neto, pela contribuição técnica para a realização desse trabalho.

Aos amigos que fiz no grupo de pesquisa de física dos solos do DEN-UFPE, Ana Emília Rabelo, Felipe Galdino, José Angelin, Larissa Fernandes, Paulo Lopes, Severino Martins Neto e Rodrigo Lustosa, por tornarem o ambiente mais descontraído e agradável, pelas ajudas nos ensaios de campo e motivação para conclusão dos trabalhos científicos.

À minha família, Maria do Socorro (mãe), Lilian e Elvis por respeitarem o silêncio para que eu me concentrasse melhor, pela paciência com os meus apanhos e ausência diversos momentos e por sempre acreditarem que eu seria capaz de concluir essa etapa; à Dinha por corrigir meu texto, mesmo sem entender tecnicamente sobre o assunto e à Antônia de Araújo (avó) por sempre rezar por mim, pedindo à Deus que abençoasse o caminho que escolhi trilhar.

À PDCA engenharia, em nome de Sidclei Teixeira Magalhães, por ter cedido e flexionado o meu expediente de trabalho, por prezar pelo meu crescimento e desenvolvimento técnico e profissional.

Aos meus amigos pessoais, Danisete Neto e Leonardo Barbosa por serem meus exemplos próximos de dedicação e amor à pesquisa científica e, sobretudo, pela disponibilidade em me ajudar e apoiar nessa caminhada.

RESUMO

O aumento populacional, acompanhado pelo elevado processo de urbanização nas grandes cidades brasileiras, implica em efeitos marcantes nas transformações das paisagens urbanas como o aumento do uso e ocupação do solo e alterações contínuas no ciclo hidrológico e microclima locais. De maneira notória, fenômenos como o escoamento superficial direto e a infiltração da água no solo são fortemente afetados, gerando consequências de disponibilidade de água no solo urbano e impactos negativos na recarga natural dos aquíferos. As técnicas compensatórias de drenagem das águas urbanas visam controlar, quantitativa e qualitativamente o escoamento, utilizando a visão sistêmica e multidisciplinar do problema, para garantir condições hidrológicas às mais próximas possíveis daquelas anteriores ao processo de urbanização. O pavimento permeável é uma técnica compensatória que consiste em uma superfície de infiltração constituída de um revestimento poroso e um reservatório subsuperficial para armazenamento do volume infiltrado, cujo desempenho hidráulico depende das propriedades hidrodinâmicas do revestimento e da capacidade de armazenamento do subleito. Este trabalho teve por objetivo principal avaliar a capacidade de infiltração de um pavimento permeável (PP) em escala real, através de experimentação com ensaios de infiltração e modelagem do seu comportamento hidrodinâmico. A caracterização hidrodinâmica da camada do revestimento foi avaliada utilizando diferentes modelos unidimensionais acoplados à parcela de dispersão lateral da infiltração, modelos de infiltração para regime permanente, modelos tridimensionais de infiltração, o método inverso e o método Beerkan. Os resultados indicaram que os modelos propostos para caracterização hidrodinâmica do revestimento do pavimento permeável foram considerados adequados na estimativa dos parâmetros: condutividade hidráulica saturada e sorvidade. Os ensaios com infiltrômetro de 1m de diâmetro indicaram que o PP possui boa capacidade de infiltração de água quando analisado sob a perspectiva de funcionamento do sistema de blocos vazados atuando conjuntamente, confirmando o desempenho esperado para aplicação como técnica compensatória alternativa aos pavimentos clássicos impermeáveis. Para 8 dos 9 métodos de infiltração utilizados para estimativa do K_s , a classificação hidrológica do pavimento permeável foi enquadrada preponderantemente como “Grupo A”, cujo potencial hidrológico é característico de solos com baixa geração de escoamentos superficiais e alta capacidade de infiltração. Em contraste, a condutividade hidráulica média calculada pelo método inverso classificou o revestimento como “Grupo D”, característico de solos com baixa permeabilidade. A análise dos resultados individuais permitiu também identificar a existência de pontos isolados de baixíssima permeabilidade, decorrentes da colmatação parcial e/ou total do revestimento.

Palavras-chave: Hydrus. Condutividade hidráulica. Técnica compensatória. Método inverso. Indicadores hidrodinâmicos.

ABSTRACT

The increase of population, followed by the high urbanization process in big cities from Brazil, implies in great effects in continuous transformations in urban landscapes as increases in management and occupation of soils and continuous changes in the hydrologic cycle and local microclimate. In a notorious way, the phenomenon like runoff and infiltration of water in the soil is strongly affected, creating consequences in water availability in urban soil and negative impact on natural recharge of aquifers. The drainage compensatory techniques aim to control, quantitative and qualitative, the runoff, using the systemic and multidisciplinary vision of the problem, to guarantee hydrologic conditions as close as possible to that before the urbanization process. The permeable floor is a compensatory technique which consists of an infiltration surface made of a porous coating and a subsurface reservoir to storage the infiltrated volume, which hydraulic performance depends on hydrodynamic properties of the coating and the storage capacity. This work has aimed to evaluate the infiltration capacity of a permeable paving (PP) in real scale, by experimentation with infiltration tests and modeling it the hydrodynamic behavior. The Hydrodynamic characterization of the paving layer was evaluated using different unidimensional modeling attached to the portion of lateral dispersion of infiltration, modeling of infiltration to a permanent regime, tridimensional modeling of infiltration, the inverse method and Beerkan's method. The results show that the proposed models for the hydrodynamic characterization of the coating of permeable paving were considered adequate to estimate the parameters: saturated hydraulic conductivity and sorptivity. The tests using infiltrometers with 1m of diameter shows that the PP has good water infiltration capacity when analyzed from the perspective of system operation of leaked blocks acting together, confirming the expected performance to the application as an alternative compensatory technique to the classic permeable pavements. To 8 of the 9 infiltration methods used to estimate Ks, the hydrologic classification of permeable pavement was framed preponderantly as "Group A", which the hydrologic potential characteristic of soil with low generation of surface runoff and high infiltration capacity. In contrast, the average hydraulic conductivity calculated by the inverse method classified the coating as "Group D", characterized by soils with low permeability. The analysis of individual results also allows identifying the existence of isolated points of really low permeability, due to partial and/or full clogging of the coating.

Keywords: Hydrus. Hydraulic conductivity. Compensatory technique. Inverse method. Water budget process. Hydrodynamic indicators.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de seções transversais – classificação pela infiltração do subleito.	24
Figura 2 - Tipos de revestimentos permeáveis.	25
Figura 3 - Fluxograma de projeto de um pavimento permeável.....	26
Figura 4 Fluxograma de Atividades de execução da obra.	31
Figura 5 - Sinalização potencial - Atividades proibidas em um Pavimento Permeável.....	35
Figura 6 - Tendência de crescimento de publicações científicas com a palavra chave “pavimentos permeáveis”.	36
Figura 7 - Esquema do permeâmetro de carga decrescente.....	40
Figura 8 - Pavimentos simulados.....	43
Figura 9 - (a) Cilindro instalado com massa de calafetar (b) Infiltrômetro de anéis concêntricos instalados no asfalto poroso.....	45
Figura 10 - Equipamento utilizado no ensaio SWIFT.	46
Figura 11 - O sistema trifásico do solo.....	48
Figura 12 - Modelo de curva de retenção da água no solo.	54
Figura 13 - Mapa de situação da área de estudo.....	61
Figura 14 - Climas do Brasil – Classificação de Köppen.....	62
Figura 15 - Precipitações totais anuais.	63
Figura 16 - Precipitações mensais.	63
Figura 17 - Número de dias de chuva por ano.....	64
Figura 18 - Precipitações e número de dias de chuva por ano.	64
Figura 19 - Mapa litológico da área de estudo – UFPE.....	65
Figura 20 - Mapa de locação/situação do PP – Estacionamento do CTG – UFPE, delimitação das bacias de contribuição e sentidos dos escoamentos.....	66
Figura 21 - Estrutura do pavimento permeável.	67
Figura 22 - Memorial fotográfico – Etapas construtivas do pavimento permeável piloto – Estacionamento do CTG/ UFPE.....	68
Figura 23. Fluxograma da organização dos dados da pesquisa para responder aos objetivos. ..	71
Figura 24 Condições de contorno do modelo inserido no software Hydrus	75
Figura 25 - Croqui de locação dos ensaios de infiltração – Estacionamento do CTG/UFPE.	77
Figura 26 - Ensaios de infiltração com infiltrômetro de anel simples – Estacionamento CTG/UFPE.	77
Figura 27 - Curvas de infiltração x tempo com ajuste pelo método Bagarello (2013).....	85

Figura 28 - Curvas de infiltração x tempo ajustadas pelo método Wu 2 (1999).	88
Figura 29. Gráfico box-plot para o parâmetro K_s , métodos Bagarello e Wu2.	90
Figura 30 - Curvas de infiltração x tempo ajustados pelo método Wu (1999).	91
Figura 31 - Box-plot do parâmetro condutividade hidráulica saturada para os modelos teóricos de infiltração unidimensionais para solução completa da curva de infiltração	98
Figura 32 - Curvas de infiltração x tempo com ajustadas pelo método Inverso.	99
Figura 33 - Infiltração acumulada para os ensaios com infiltrômetro de 1m de diâmetro	103
Figura 34 - Resultados da aplicação do método BEST para os dados de infiltração do pavimento permeável: Ajuste ao modelo transiente e estacionário.....	105
Figura 35 - Resultados da aplicação do método BEST para os dados de infiltração do pavimento permeável: Taxa de infiltração.	106
Figura 36 - Resultados da aplicação do método BEST para os dados de infiltração do pavimento permeável: Erro relativo para infiltração acumulada.	107
Figura 37 - Resultados da aplicação do método BEST para os dados de infiltração do pavimento permeável: Erro relativo para taxa de infiltração.	108
Figura 38 - Curvas de infiltração x tempo ajustadas pelo método Phillip (1957).	122
Figura 39 - Curvas de infiltração x tempo com ajuste pelo método Stroosnijder (1976).	122
Figura 40 - Curvas de infiltração x tempo ajustadas pelo método The “Knight” soil (Philip 1974).	123
Figura 41 - Curvas de infiltração x tempo ajustadas pelo método Brutsaert (1977).	124
Figura 42 - Curvas de infiltração x tempo com ajustadas pelo método Swartzendruber (1987).	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proporções de misturas usadas na produção de concreto permeável	39
Tabela 2 - Correlação do método SWIFT, classe de obstrução e manutenção do PP.	46
Tabela 3 - Classificação da textura, massa específica do solo, massa específica das partículas do solo e porosidade teórica para os solos do revestimento e subleito do pavimento permeável.	69
Tabela 4. Propriedades hidrodinâmicas do solo heterogêneo estimadas pelo Hydrus 1-D a partir do software Rosetta.	70
Tabela 5. Parâmetros Hidráulicos das camadas do pavimento permeável.	70
Tabela 6 - Modelos de Infiltração de regime permanente	72
Tabela 7 - Modelo de infiltração tridimensional para solução completa da curva de infiltração.	73
Tabela 8 - Modelos de infiltração unidimensionais para solução completa da curva infiltração.	74
Tabela 9. Classificação hidrológica do solo em função da condutividade hidráulica saturada..	81
Tabela 10. Classificação dos solos quanto ao grau de permeabilidade.	81
Tabela 11. Manutenção sugerida pelo resultado do IHM.....	82
Tabela 12 - Resumo estatístico dos parâmetros hidráulicos obtidos pelo modelo em regime permanente de Bagarello (2013).....	86
Tabela 13 – Resumo da classificação hidrológica do revestimento pelo modelo em regime permanente de Bagarello (2013).....	87
Tabela 14 - Estatística do parâmetro hidráulico estimadas pelo modelo de Wu 2 (1999).	89
Tabela 15 – Resumo da classificação hidrológica do revestimento pelo modelo em regime permanente de Wu 2 (1999).	89
Tabela 16 - Estatística dos parâmetros hidráulicos estimados pelo modelo de Wu (1999).	92
Tabela 17 - Resumo da classificação hidrológica do revestimento pelo modelo de Wu (1999).	92
Tabela 18 – Resumo da análise estatística entre ajustes estimados pelo modelo de Wu (1999) e os valores experimentais.....	93
Tabela 19 – Resumo estatístico dos parâmetros hidrodinâmicos Ks e S através dos modelos unidimensionais de infiltração acoplados à parcela de dispersão lateral.....	94
Tabela 20 – Resumo da análise qualitativa dos resultados de Ks, classificação hidrológica (SCS), grau de permeabilidade (GP) e indicador hidrodinâmico de manutenção (IHM)	96

Tabela 21 – Resumo da análise estatística entre ajustes estimados pelos modelos unidimensionais e os valores experimentais.	97
Tabela 22 - Estatística dos parâmetros hidráulicos obtidos pelo Método Inverso	99
Tabela 23 - Resumo da classificação hidrológica do revestimento pelo Método Inverso.	100
Tabela 24 - Resumo da análise estatística entre ajustes estimados pelo Método Inverso e os valores experimentais.	101
Tabela 25. Avaliação da qualidade de ajuste dos métodos aplicados aos dados de campo	102
Tabela 26 - Parâmetros do Método BEST - Slope	110
Tabela 27 - Parâmetros do Método BEST – Intercept.....	110
Tabela 28 - Classificação hidrológica pelo método do SCS e Grau de permeabilidade dos ensaios.	111
Tabela 29 - Parâmetros do Método BEST – Slope ajustado por Mualem (1976).....	112
Tabela 30 - Parâmetros do Método BEST – Intercept ajustado por Mualem (1976).....	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
AS	Coeficiente de Pearson
BMP	<i>Best Management Practices</i>
CMR	Coeficiente de Massa Residual
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
Ct	Grau de achatamento
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EM	Eficiência de Modelagem
EUA	Estados Unidos da América
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LID	<i>Low Impact Development</i>
NA	Nível de Água
NBR	Norma Brasileira
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PIB	Produto Interno Bruto
PP	Pavimento Permeável
R ²	Coeficiente de Determinação
RD	Razão de Devios
RMR	Região Metropolitana do Recife
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SUD	<i>Sustainable Urban Drainage System</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
WSUD	<i>Water Sensitive Urban Design</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

H	Profundidade do reservatório granular	[L]
V _r	Altura total precipitada	[L]
n	Porosidade	
w	Umidade gravimétrica	[g.g ⁻¹]
m _l	Massa de água	[M]
m _s	Massa de sólidos	[M]
ρ	Massa específica do solo	[g.cm ⁻³]
V _t	Volumen total	
V _s	Volume de sólidos	
V _v	Volume de vazios	
V _l	Volume de água	
θ	Umidade volumétrica	[cm ³ .cm ⁻³]
ρ _p	Massa específica das partículas do solo	
Φ	Porosidade aparente	
e	Índice de Vazios	
GS	Grau de saturação	%
Se	Saturação efetiva	
K	Condutividade hidráulica	[mm.s ⁻¹]
θ _r	Umidade residual	[cm ³ .cm ⁻³]
θ _s	Umidade saturada	[cm ³ .cm ⁻³]
g	Aceleração da gravidade	[m.s ⁻²]
κ	Permeabilidade intrínseca	[L ²]
μ_{vd}		
$K_r(\theta)$	Viscosidade dinâmica da água	[kg.mm ⁻¹ .s ⁻¹]
	Permeabilidade relativa	
h	Potencial matricial	[m]
z	Potencial gravitacional	
F(D)	Distribuição do tamanho das partículas	
h(θ)	Curva de retenção da água no solo	
h _g	Parâmetro de normalização	[mm]
M e N	Parâmetros de forma da curva de F(D)	
n e m	Parâmetros de forma h(θ)	
p	Parâmetro de tortuosidade	
P	Precipitação pluviométrica	[mm]
q	Densidade de fluxo de água	[mm.s ⁻¹]
S	Sorvidade do solo	[mm.s ^{-1/2}]
A	Parâmetro da equação de Philip	[L.T ⁻¹]
I	Infiltração acumulada	
i	Taxa de infiltração	

m	Parâmetro de forma da curva de retenção	adimensional
n	Parâmetro de forma da curva de retenção	adimensional
η	Parâmetro de forma da equação de Brooks & Corey	
ψ_g	Potencial gravitacional	
ψ_{os}	Potencial osmótico	
ψ_p	Potencial de pressão	
ψ	Potencial Total da água no solo	
Md	Mediana	
μ	Média	
s	Desvio padrão	
r	Raio do infiltrômetro	m
$\Delta\theta$	Variação da umidade volumétrica	[cm ³ .cm ⁻³]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	20
2.1	OBJETIVO GERAL	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
3.1	TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS	21
3.2	TIPOS DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS	23
3.3	CONSIDERAÇÕES DE PROJETO	25
3.3.1	Concepção do pavimento permeável	26
3.3.2	Análise Hidrológica	28
3.3.3	Análise Estrutural	29
3.4	SISTEMA CONSTRUTIVO	30
3.5	OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO SISTEMA DE UM PAVIMENTO PERMEÁVEL	32
3.6	PERSPECTIVA ATUAL DE PESQUISA	36
3.6.1	A experiência brasileira	42
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	48
4.2	DEFINIÇÃO DE SOLO	48
4.3	PROPRIEDADES BÁSICAS DO SOLO	49
4.3.1	Umidade Gravimétrica	49
4.3.2	Umidade Volumétrica	49
4.3.3	Massa Específica do Solo	49
4.3.4	Massa Específica das Partículas do Solo	49
4.3.5	Porosidade Aparente	49
4.3.6	Índice de Vazios	50
4.3.7	Grau de Saturação.....	50
4.3.8	Saturação Efetiva.....	50
4.3.9	Condutividade Hidráulica	50
4.4	EQUAÇÕES DE FLUXO NO SOLO	51
4.4.1	Equação de Darcy	51

4.4.2	Equação de Darcy-Buckingham.....	52
4.5	POTENCIAL E RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO	52
4.5.1	Modelos para Curvas de Retenção	53
4.5.2	Modelos para Curva de Condutividade Hidráulica	55
4.5.3	Fluxo de água em condições de solo não saturado - Equação de Richards.....	56
4.6	MODELOS CLÁSSICOS DE INFILTRAÇÃO.....	57
4.6.1	O modelo de Horton (1940)	57
4.6.2	O modelo de Kostiakov (1932).....	58
4.6.3	O modelo de Kostiakov-Lewis (1945)	58
4.6.4	O modelo Beerkan	59
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	60
5.1.1	Recife e Região metropolitana.....	60
5.1.2	Climatologia	62
5.1.3	Regime pluviométrico	63
5.1.4	Características Geológicas/Geotécnicas	64
5.2	MODELO EXPERIMENTAL	65
5.2.1	Pavimento permeável (PP).....	65
5.2.2	Etapas construtivas do pavimento piloto e características físicas do subleito	67
5.2.3	Propriedades hidráulicas do subleito do pavimento piloto	69
5.2.4	Ensaio de infiltração	71
5.3	ORGANIZAÇÃO DOS DADOS DA PESQUISA PARA RESPONDER AOS OBJETIVOS	71
5.3.1	Experimentação - Etapa 1.....	72
5.3.1.1	Modelos de infiltração para caracterização hidrodinâmica da camada de revestimento.....	72
5.3.1.2	O método inverso para caracterização hidrodinâmica da camada de revestimento.....	75
5.3.2	Experimentação - Etapa 2.....	75
5.3.2.1	Ensaio de infiltração com infiltrômetro de 1m de diâmetro.....	75
5.3.2.2	Método Beerkan.....	78
5.4	ANÁLISE QUALITATIVA DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS	80
5.4.1	Classificação hidrológica do pavimento permeável.....	80
5.4.1.1	Grau de permeabilidade	81
5.4.1.2	Indicador de hidrodinâmico de manutenção	82

5.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA DA QUALIDADE DOS AJUSTES	83
5.5.1	Estatística Descritiva dos parâmetros dos modelos de infiltração	83
5.5.1.1	Medidas de Assimetria.....	83
5.5.2	CrITÉrios estatísticos para análise da qualidade dos ajustes	83
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
6.2	MODELOS DE INFILTRAÇÃO DE REGIME PERMANENTE	85
6.2.1	Método Bagarello (2013)	85
6.2.2	Método Wu 2 (1999)	87
6.2.3	Análise das metodologias de infiltração em regime permanente	90
6.3	MODELOS DE INFILTRAÇÃO TRIDIMENSIONAL PARA SOLUÇÃO COMPLETA/ REGIME TRANSITÓRIO DA CURVA DE INFILTRAÇÃO	91
6.3.1	Método Wu (1999)	91
6.4	MODELOS DE INFILTRAÇÃO UNIDIMENSIONAIS ACOPLADOS À PARCELA DE DISPERSÃO LATERAL PARA SOLUÇÃO COMPLETA DA CURVA DE INFILTRAÇÃO.....	93
6.4.1	Análise das metodologias de infiltração unidimensionais acoplados à parcela de dispersão lateral para solução completa da curva de infiltração.....	97
6.5	MÉTODO INVERSO	98
6.6	AValiação da qualidade dos ajustes	102
6.7	ANÁLISE HIDRODINÂMICA USANDO O MÉTODO BEERKAN/ INFILTRÔMETRO COM 1M DE DIÂMETRO	103
7	CONCLUSÕES	113
	REFERÊNCIAS	116
	APÊNDICE	122

1 INTRODUÇÃO

Afetados em praticamente todas as etapas do seu processo, os componentes do ciclo hidrológico nos centros urbanos sofrem contínuas alterações. Em virtude do aumento de áreas impermeabilizadas, a infiltração é bastante reduzida e boa parte da precipitação acaba por gerar escoamento superficial. Com a redução do tempo de concentração dessas bacias urbanas, os picos elevados de vazão combinado com o sistema de drenagem subdimensionado e/ou prejudicado pela falta de manutenção e acúmulo de resíduos sólidos, ocasionam recorrentes e perigosos eventos de cheias. Além dos inúmeros prejuízos de ordem social e econômica, as cheias urbanas também são um problema de saúde pública e ambiental, tendo em vista que a água escoada superficialmente carrega consigo todos os tipos de poluentes existentes no seu percurso até a sua disposição no corpo d'água receptor, contaminando pessoas, animais, solos e águas (CANHOLI, 2015).

Nesse contexto, as técnicas não convencionais de drenagem urbana ganham visibilidade frente às técnicas clássicas. Novos conceitos nas diretrizes gerais de projetos de drenagem urbana são incrementados, substituindo-se a concepção de canalização do fluxo de água por um conceito mais inovador de reservação da água. A canalização é a metodologia tradicional utilizada para drenagem desde os tempos mais remotos e ainda bastante utilizada nas cidades brasileiras, a qual consiste em obras que promovam o escoamento de forma rápida, transferindo o problema de picos de enchentes para jusante, onde serão requeridas obras de maiores portes em relação à condição anterior do sistema pré-urbanizado.

As técnicas compensatórias de drenagem das águas urbanas visam controlar, quantitativa e qualitativamente o escoamento, utilizando a visão sistêmica e multidisciplinar do problema, para garantir condições hidrológicas às mais próximas possíveis daquelas anteriores ao processo de urbanização. Estas podem ser constituídas de obras, estruturas e dispositivos que facilitam a infiltração e a percolação da água no solo ou que restringem a entrada do escoamento na rede de drenagem, ou ainda que armazenem temporariamente o volume.

Atualmente, técnicas de gestão da drenagem urbana vem ganhando espaço no planejamento estratégico urbano visando a garantia do controle de enchentes de forma inteligente, integrando o desenvolvimento à sustentabilidade. As alternativas ao sistema de drenagem convencional visam desde a correção dos pontos de problemas de inundações existentes, como a proposição de novas tecnologias para a implantação de sistemas de drenagem em locais a serem ocupados. Entre as técnicas compensatórias mais comumente conhecidas e utilizadas no Brasil estão os

sistemas de infiltração como poços e trincheiras de infiltração, as bacias de retenção, telhados verdes e os pavimentos permeáveis.

O pavimento permeável é uma técnica compensatória dispersiva (CANHOLI, 2015), que consiste numa superfície de infiltração constituída de um revestimento poroso e um reservatório subsuperficial para armazenamento do volume infiltrado, o qual, a depender das características do subleito local poderá também reabastecer o lençol freático, ou ainda, armazenar água para reuso com fins diversos. As camadas granulares, geralmente, funcionam também como filtros naturais, removendo os poluentes sólidos e melhorando a qualidade da água infiltrada.

A função técnica do dispositivo é servir como elemento de retenção na fonte, reduzindo os picos de vazão veiculadas para rede de drenagem e promover o aumento do tempo de concentração da bacia. O desempenho hidráulico do pavimento está associado ao tipo de material utilizado no revestimento, suas propriedades hidrodinâmicas e da periodicidade de manutenção do sistema. A necessidade de manutenção do pavimento poroso é um ponto notável à garantia de preservação das condições hidrológicas de uma bacia pré-urbanizada, com a devida promoção da drenagem e disposição das águas pluviais (CANHOLI, 2015).

A estimativa das propriedades hidrodinâmicas do revestimento e do subleito, bem como a caracterização funcional do sistema pode ser medida por ensaios de infiltração, fundamentais para avaliar e monitorar a capacidade de infiltração do pavimento permeável e, assim, identificar as possíveis perdas da capacidade hidráulica do sistema ao longo do tempo. Os ensaios de infiltração são utilizados também para identificar as áreas pontuais de obstrução devido à colmatação dos poros, indicar a necessidade de manutenção do pavimento e avaliar a eficácia dos métodos de manutenção utilizados.

A análise de desempenho das técnicas compensatórias também pode ser realizada através de modelos matemáticos para simulações numéricas que descrevam o escoamento e a transferência da água no solo em relação à situação existente ou na análise de diferentes cenários, que permitam conhecer as características e benefícios provenientes da sua utilização em meios urbanos, bem como as necessidades de intervenções de manutenção para segurança de funcionamento adequado do sistema.

Os pavimentos permeáveis são projetados para substituírem áreas impermeáveis que devem integrar parte de um sistema global e estruturado de drenagem urbana, funcionando em conjunto com outras técnicas na gestão de águas pluviais. Assim, é possível perceber a relevância do estudo integrado de técnicas compensatórias visando à obtenção de parâmetros técnicos que

auxiliem na tomada de decisão dos gestores públicos e das equipes técnicas seja no dimensionamento, na implantação e/ou na gestão da manutenção dos pavimentos permeáveis.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a capacidade de infiltração de um pavimento permeável em sua escala real a partir de experimentação e modelagem matemática.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Efetuar a caracterização hidrodinâmica da camada de revestimento de um pavimento permeável utilizando modelos unidimensionais acoplados à parcela de dispersão lateral da infiltração.
- Efetuar a caracterização hidrodinâmica da camada de revestimento de um pavimento permeável utilizando modelos tridimensionais de infiltração.
- Efetuar a caracterização hidrodinâmica da camada de revestimento de um pavimento permeável utilizando o método inverso.
- 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.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS

Os pavimentos permeáveis são dispositivos de infiltração, filtração e/ou armazenamento e retenção de águas pluviais utilizados como tecnologias alternativas para minimizar diversos problemas urbanos, como o aumento do escoamento superficial, dos eventos de cheias e elevação dos picos de vazão (PRATT *et al.*, 1989; FASSMAN & BLACKBOURN, 2010). Sua função como técnica compensatória é a de minimizar os efeitos da impermeabilização das bacias urbanas através da criação de áreas de captação, as quais podem vir a exercer, também, outras funções desejáveis como a melhoria da qualidade e reaproveitamento da água e recarga do lençol freático (BRATTEBO & BOOTH, 2003; GILBERT & CLAUSEN, 2006; COLLINS *et al.*, 2008; DRAKE *et al.*, 2014).

Os problemas gerados por eventos chuvosos, que afetam várias cidades do planeta, sobretudo aquelas cujo crescimento urbano se deu de forma acelerada e desordenada, combinados aos episódios chuvosos extremos cada vez mais recorrentes provenientes das mudanças climáticas, acarretam altíssimos investimentos públicos para criação de sistemas de alerta, técnicas de prevenção e atenuação dos prejuízos de ordem material e garantia da segurança da população. Neste contexto, surgiram diversas concepções (BMPs, LIDs, SUDS) cuja filosofia básica é buscar soluções e práticas para proporcionar uma drenagem urbana sustentável.

A drenagem urbana sustentável, independente da abordagem, possui o objetivo comum de resgatar as características naturais do ciclo hidrológico da pré-urbanização, respeitando o funcionamento da bacia hidrográfica e proporcionando ambientes mais agradáveis. No Reino Unido, por exemplo, o SUDS – *Sustainable Urban Drainage Systems* – constituem uma gama de técnicas desenvolvidas para melhorar o layout urbano e a gestão de riscos ambientais, buscando reduzir os escoamentos superficiais através de estruturas de controle da água pluvial. Os sistemas sustentáveis de drenagem são conhecidos na América do Norte como *Best Management Practices* (BMPs), que incentivam a utilização de medidas estruturais e não-estruturais num conjunto planejado de ações visando atenuar os impactos da urbanização. As técnicas de desenvolvimento com baixo impacto ambiental, conhecido como LID – *Low Impact Development*, exercidas nos EUA e Canadá, se referem a sistemas e práticas de preservação e recriação das características de paisagem natural, reduzindo o efeito das áreas impermeáveis, visando a uma drenagem funcional e efetiva das águas pluviais (DIETZ, 2007; PAGE *et al.*,

2015). Assim como o *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) australiano que tem como seu principal objetivo a gestão integrada de água potável, águas residuais e água pluvial no país.

Essas práticas são desenvolvidas e estimuladas em vários países, inclusive no Brasil, em algumas cidades como Porto Alegre, Caxias do Sul, Santo André em São Paulo, Belo Horizonte, Curitiba e a Bacia Iguaçu-Sarapuí no Rio de Janeiro, que já incluíram as técnicas de drenagem sustentável e princípios ecológicos em planos diretores e legislações municipais. No entanto, apesar de conterem alguns princípios sustentáveis, estão longe de se enquadrarem no modelo ideal de drenagem pluvial como preconiza o SUDS (POLETO, 2011).

Sob a luz da Lei Nº 18.112/2015, a Cidade do Recife também se mostra preeminente na adesão das práticas que dispõem sobre o controle de enchentes e redução do impacto ambiental pelo desenvolvimento urbano. Assim, os regimentos visam à melhoria da qualidade ambiental das edificações construídas na Cidade por meio da obrigatoriedade de instalação de telhados verdes e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem. Desde sua publicação em 2015, todas as edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos ou não-habitacionais com mais de 400m² de área coberta deverão prever a implantação de telhados verdes, os quais, além de melhorarem o aspecto paisagístico das edificações, contribuem na redução dos efeitos das ilhas de calor, absorvem parte do escoamento superficial e melhoram o microclima local. Já os reservatórios são previstos para lotes com área superior a 500m², cuja área impermeabilizada supere 25%. Os reservatórios podem ser de acumulação ou de retardo, destinados ao acúmulo de águas pluviais para reaproveitamento para fins não potáveis ou destinados ao acúmulo de águas pluviais para posterior descarga amortizada na rede pública de drenagem, respectivamente.

Segundo Poleto (2011), as principais dificuldades encontradas para implantação desses sistemas são: a falta de integração urbano-paisagística; contaminações por esgotos e resíduos sólidos; falta de manutenção do sistema de drenagem e falta de consciência ambiental da população. Além disso, as obras de drenagem brasileiras ainda seguem o conceito tradicional de aumento de velocidade dos escoamentos com obras de retificação dos rios e canalizações, o que transfere o problema para jusante e implica em contínuas intervenções pontuais após eventos de inundações.

É importante ressaltar que, em virtude da grande disponibilidade de água, o Brasil toma uma posição importante na responsabilidade em relação à preservação dos recursos hídricos. Para tanto, é essencial que nas áreas urbanas haja um planejamento integrado de procedimentos e técnicas viáveis à compensação dos impactos causados pela urbanização, reestabelecendo as

condições naturais do ciclo hidrológico e a redução da vulnerabilidade às inundações. O pavimento permeável encontra-se como uma opção viável e eficiente para contribuir nesse sentido.

3.2 TIPOS DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Os pavimentos permeáveis possuem, essencialmente, a mesma configuração de um pavimento comum, cuja estrutura consiste de uma superfície exposta ao fluxo de veículos, assentado sob as camadas de base e/ou sub-base, normalmente compostas por material granular e que contribuem no suporte e dissipação das cargas atuantes. O subleito, por sua vez, consiste na camada semi-infinita de solo natural que funciona como a fundação do pavimento.

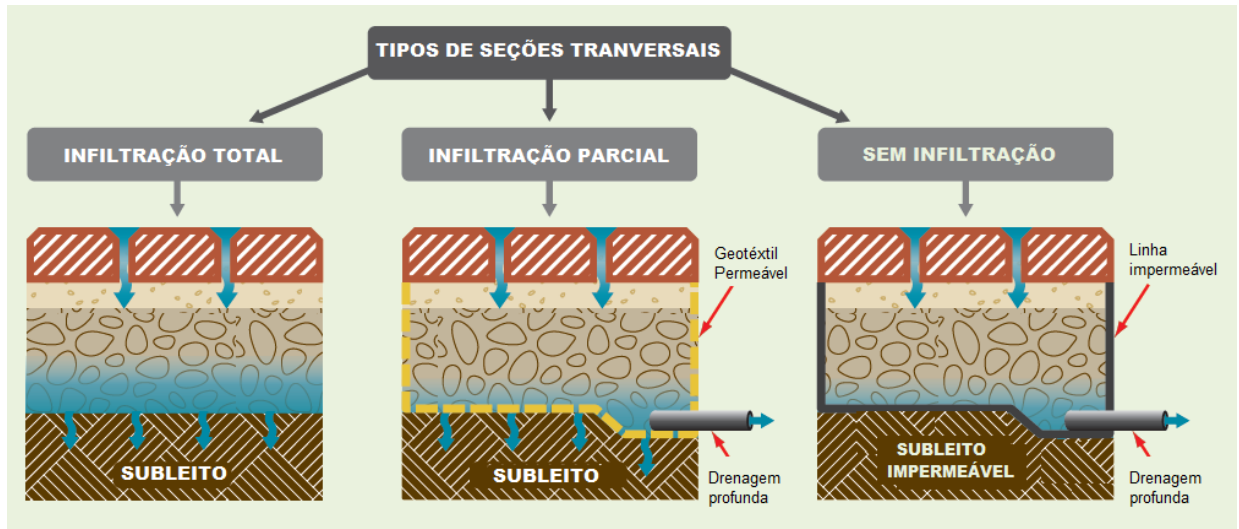
Apesar da configuração estrutural semelhante, os pavimentos ditos permeáveis precisam de elevado volume de vazios para desempenhar a função para a qual foram projetados, incidindo na diferença básica entre os dois sistemas.

O solo do subleito determina o tipo de seção transversal do pavimento, visando balancear as necessidades de resistência ao tráfego e os requisitos de gestão da água (CMAA, 2010). Os vazios das camadas granulares permitem que a água proveniente do escoamento superficial ou diretamente da própria precipitação seja armazenada, temporariamente, no pavimento, até que haja condições adequadas para destinação desse volume. Genericamente, três casos são possíveis a depender das condições naturais do subleito e, sobretudo, do objetivo do projeto: infiltração total através do subleito; infiltração parcial; sem infiltração.

Para os casos em que o subleito possui boa permeabilidade, toda a água estocada no pavimento infiltra, o que, além de dispensar a necessidade dos dispositivos de drenagem, contribui para o reabastecimento do lençol freático local. Se o sistema funcionar com infiltração parcial, parte do volume armazenado infiltra através do subleito, enquanto que o excedente é drenado por tubulação profunda até o sistema público de drenagem ou reservatório externo, de forma controlada, isto é, com vazão compatível ao perfeito funcionamento do sistema de drenagem. Já para os materiais coesivos, expansivos ou rochosos, cuja permeabilidade é bastante reduzida, ou ainda para subleitos com nível d'água muito elevado ou cujo solo esteja contaminado, recomenda-se não haver infiltração. Nesses casos, o sistema do pavimento permeável consiste apenas em um reservatório de retenção do volume infiltrado e todo o estoque é controladamente

extravasado (CMAA, 2010). O esquema dos tipos de infiltração de um pavimento permeável é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Tipos de seções transversais – classificação pela infiltração do subleito.



Fonte: Adaptado CMAA, (2010).

Após a escolha do tipo de seção transversal, é preciso definir a superfície drenante mais adequada para o revestimento do pavimento permeável. O revestimento dita as características funcionais do sistema, seja em relação à capacidade de infiltração ou ao rolamento dos veículos. Uma vasta variedade de superfícies permeáveis encontra-se disponível atualmente, incluindo asfalto poroso, concreto permeável e blocos de concreto intertravado. A descrição básica dos principais materiais utilizados para camada de revestimento e suas características físicas são apresentadas na Figura 2.

Figura 2 - Tipos de revestimentos permeáveis.

DESCRIÇÃO DO MATERIAL	DETALHE
Asfalto poroso	
O asfalto poroso é similar ao asfalto convencional, cujos os finos foram removidos para criar um maior volume de vazios na massa asfáltica. Aditivos e aglutinantes são utilizados para promover mais durabilidade e prevenir escoamento.	
Concreto permeável	
O concreto permeável é produzido a partir da redução dos grãos finos na mistura para obtenção de uma estrutura interligada de vazios. Sua aparência é mais grosseira se comparada a superfície de concreto convencional.	
Blocos intertravados de concreto	
O pavimento intertravado é composto por blocos de concreto convencional, cujas juntas são preenchidas por material granular drenante.	
Sistema de pavimento tipo GRID	
O pavimento tipo GRID é composto por peças modulares preenchidas por brita ou grama que permitem a infiltração através da superfície. As unidades estruturais são de plástico ou de concreto, facilmente instaláveis e aumentam a estabilidade do solo.	

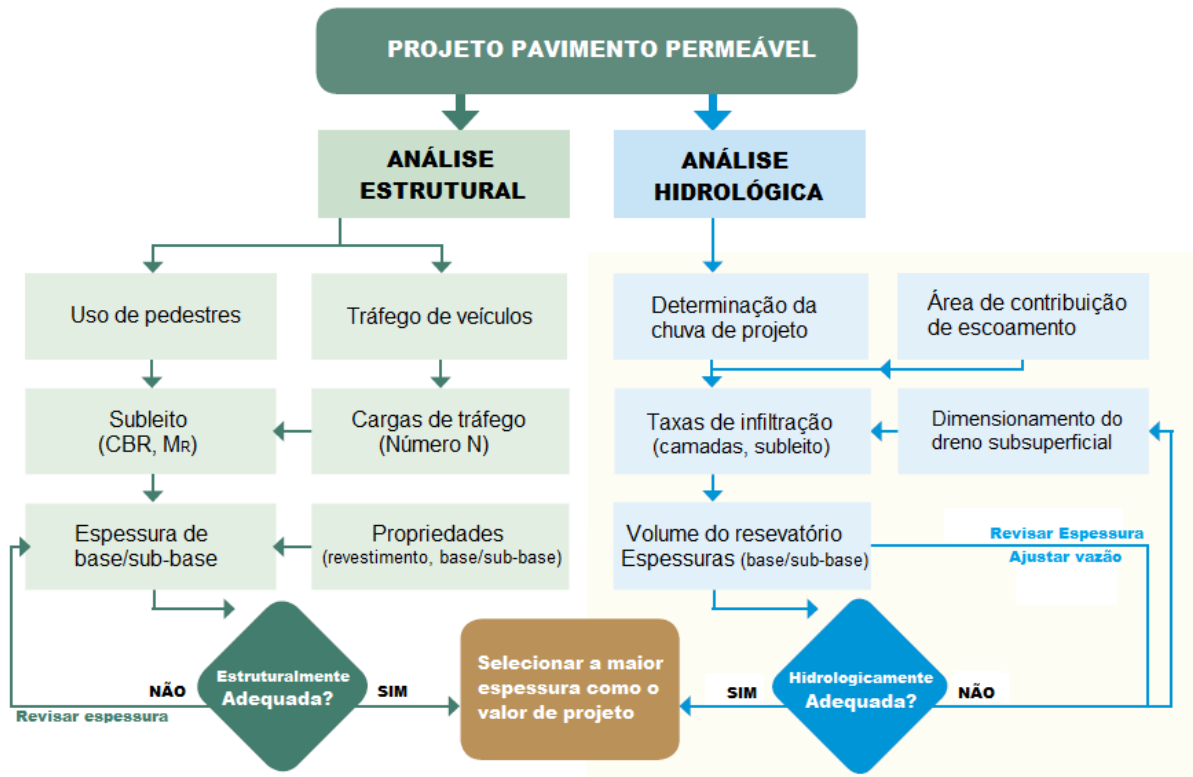
Fonte: Adaptado Eisenberg *et al.* (2013).

3.3 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

O projeto de um pavimento permeável deve garantir desempenho hidrológico e estrutural satisfatório para o funcionamento do sistema. O dimensionamento do pavimento consiste, basicamente, em definir as espessuras das camadas constituintes, considerando as características físicas da área de implantação, do uso pretendido e do subleito. As principais variáveis a serem

analisadas no processo de concepção de um projeto de pavimento permeável são apresentadas no fluxograma a seguir (Figura 3).

Figura 3 - Fluxograma de projeto de um pavimento permeável.



Fonte: Adaptado Eisenberg *et al.* (2013).

Para o dimensionamento do pavimento é preciso determinar a espessura da camada de base/sub-base no mínimo duas vezes, uma para atender aos requisitos pretendidos do ponto de vista hidráulico e de gerenciamento da água pluvial, e a outra para resistir aos esforços mecânicos ao qual o mesmo estará exposto pelo período de vida útil de projeto. A espessura da camada adotada deverá ser a maior entre as duas calculadas.

3.3.1 Concepção do pavimento permeável

Na fase de concepção são estabelecidas as diretrizes e critérios necessários para realização dos estudos complementares à elaboração do projeto. Nesta etapa, determinam-se as características do local de implantação do empreendimento, realizam-se os ensaios geotécnicos e os estudos hidrológicos, bem como se analisa a viabilidade técnica-econômica dessa técnica compensatória.

A primeira atividade consiste na definição funcional da estrutura a ser projetada, isto é, definir qual será o uso preponderante do pavimento: via local (residencial), estacionamento, pátio de estocagem, área de recreação, calçadas. As características físicas e operacionais da obra devem ser compatíveis ao uso destinado. Por conseguinte, é necessário proceder ao reconhecimento geral do local de implantação do pavimento e definição dos dados para projeto (MARCHIONI & SILVA, 2011).

A caracterização do local de implantação perpassa, desde o reconhecimento topográfico da região, vegetação, cadastro das interferências, levantamento das áreas de drenagem, até o cadastro das vias de acesso, incluindo a composição e características dos veículos necessários para elaboração do estudo de tráfego. Esta etapa é determinante para os pormenores do projeto, como a definição das declividades do pavimento, cálculo dos volumes de contribuição das áreas laterais, conhecimento sobre a potencialidade de carreamento de poluentes e volume de finos, cargas de tráfego, tipo e quantidade de material disponível para construção, entre outros.

O reconhecimento das características do solo do subleito, entretanto, representa uma das fases mais relevantes dos estudos básicos, uma vez que o bom funcionamento da estrutura de infiltração está intimamente relacionado a sua condutividade hidráulica saturada. Através dos estudos geológicos e, sobretudo, da execução das sondagens e ensaios de caracterização do material do subleito, quanto aos aspectos geotécnicos e hidrológicos, pode-se definir o tipo de seção transversal do pavimento em relação ao tipo de funcionamento do reservatório.

Além dos ensaios geotécnicos de simples caracterização, granulometria, limites de Atterberg, compactação e classificação HRB, o ensaio de ISC é essencial para estimativa da resistência do subleito quando no dimensionamento mecânico do pavimento. A profundidade do nível do lençol freático e suas flutuações sazonais são também informações importantes para o desempenho do sistema de infiltração e, comumente, não se recomenda a implantação de pavimentos permeáveis em locais cuja cota do NA é menor que 1 metro do topo subleito. A NBR 16416/2015 é menos conservadora e reduz para 0,6 m o afastamento mínimo.

Os estudos básicos, obrigatoriamente, devem ainda ater-se à caracterização hidrológica da região para servir de base para elaboração do projeto. Nesta fase são realizados os estudos pluviométricos locais para a caracterização da chuva de projeto bem como para a caracterização da área urbanizada a ser compensada, como localização do exutório, levantamento das áreas contribuintes e definição do coeficiente de escoamento, vazão máxima de saída permitida para a rede de drenagem (AZZOUT *et al.*, 1994).

O conjunto de todos esses estudos fornecem os dados de entrada e fomentam a concepção do pavimento permeável e o desenvolvimento dos projetos: geométrico, de terraplenagem, drenagem e pavimentação.

3.3.2 Análise Hidrológica

Para fins de projeto a análise hidrológica consiste na determinação da espessura necessária do reservatório para armazenar o volume de água que infiltrará pelo pavimento. Este volume é estimado a partir da soma da altura de água precipitada no local e a contribuição proveniente do escoamento pelas superfícies adjacentes para a área do empreendimento.

Para garantir a viabilidade da instalação do pavimento permeável no contexto hidrológico, a proporção, em área, entre as superfícies impermeáveis de contribuição adjacentes ao pavimento não deve exceder 5 vezes a de pavimentação (MARCHIONI & SILVA, 2011), com risco de tornar a altura do reservatório antieconômica (CMAA, 2010).

Para determinação da chuva de projeto, recomenda-se adotar a metodologia de dimensionamento do sistema de microdrenagem, com utilização das chuvas padronizadas ou das equações de intensidade-duração-frequência que melhor representem as condições da região de implantação. No Brasil, os dados pluviométricos são obtidos através das agências de monitoramento das precipitações disponíveis por websites (Agência Nacional de Águas (ANA), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC)), cujas séries históricas adotadas devem ser do posto mais próximo ao local de estudo.

A escolha do tempo de retorno associa a obra de drenagem ao seu risco de falha, o que pode implicar em prejuízo de ordem material e ameaças ao bem-estar e à segurança da população. O tempo de retorno também pode interferir na viabilidade econômica do empreendimento, uma vez que o elevado nível de segurança acarreta maiores custos (ACIOLI, 2005).

Devido à escassez de normas/diretrizes técnicas específicas para projeto de estruturas de pavimentos permeáveis no Brasil, inclusive no que diz respeito ao gerenciamento municipal para drenagem urbana, usualmente adota-se o tempo de retorno de 10 anos conforme recomendado pelo Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006) para obras de microdrenagem urbana. Apenas em meados de 2015, entrou em vigor a NBR 16416 – Pavimentos permeáveis de concreto

– requisitos e procedimentos, ratificando que o uso do período de retorno da precipitação de projeto deve ser de no mínimo 10 anos, considerando-se a duração mínima da chuva de 1 hora.

A análise hidrológica objetiva fornecer os dados de entrada para o dimensionamento adequado do reservatório PP do ponto de vista de funcionamento hidráulico. O dimensionamento do reservatório das camadas granulares do pavimento é obtido pela razão entre o volume total contribuinte e a porosidade do material constituinte da camada:

$$H = \frac{V_r}{n} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

H – Profundidade do reservatório granular (mm);

V_r – altura total precipitada (mm), para uma duração t (min) e um tempo de retorno T (anos);

n – porosidade do material.

3.3.3 Análise Estrutural

O dimensionamento da camada granular, sob a ótica estrutural, consiste em determinar a mínima espessura capaz de resistir adequadamente aos esforços solicitantes. Resistir adequadamente significa que a camada estrutural de base/sub-base será capaz de dissipar as cargas atuantes de modo a proteger o subleito de sofrer deformações permanentes ao longo do tempo de vida útil do projeto. Já as cargas solicitantes são aquelas provenientes do tráfego ao qual o pavimento estará exposto, seja de veículos ou de pedestres, ou ainda, as cargas estáticas de armazenamento.

Em virtude do relativo baixo conhecimento e experiência técnica na área de desempenho estrutural das estruturas permeáveis, os projetistas acabam por restringir as cargas de tráfego pesado de veículos comerciais nessas áreas, limitando a sua utilização a tráfegos leves e moderados de vias locais e estacionamentos. Nesse contexto, não existem metodologias de dimensionamento específicas e a depender o tipo de revestimento adotado, são feitas adaptações das vigentes para pavimentos comuns. As metodologias consolidadas para dimensionamento de pavimentos comuns, no entanto, não foram concebidas e/ou calibradas para pavimentos

permeáveis, cujas cargas de tráfego são, substancialmente, mais baixas e construídas com bases granulares de granulometria aberta (CMAA, 2010).

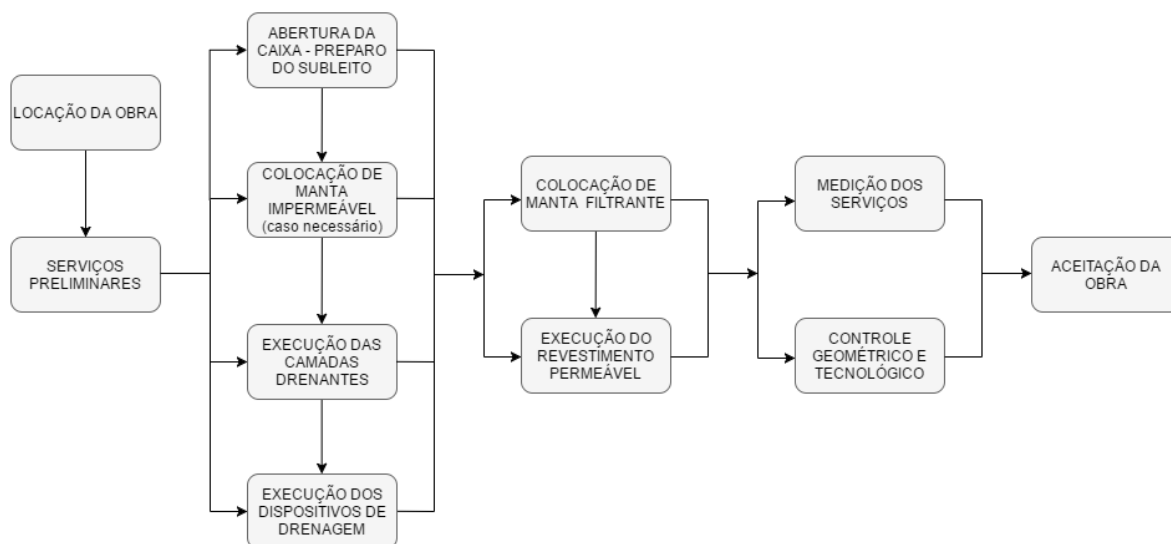
Atualmente podem ser encontrados com alguma facilidade softwares computacionais de dimensionamento estrutural de pavimentos permeáveis a partir de dados de entrada simples como vida útil do pavimento, características do tráfego (tipo e composição dos veículos comerciais), estimativa diária de fluxo, propriedade dos solos de base e subleito (ISC e Módulo de resiliência), tipo e resistência do material de revestimento. Os proprietários destes softwares são, normalmente, os órgãos regulamentadores de técnicas compensatórias ou os próprios fabricantes das peças.

3.4 SISTEMA CONSTRUTIVO

Como qualquer obra de engenharia, a execução de um pavimento permeável requer projeto, detalhes e especificações construtivas, procedimentos de limpeza e manutenção do sistema. Apesar dos diferentes tipos de pavimento requerem diferentes técnicas construtivas, de forma geral, as camadas granulares de base/sub-base são comuns a todos os tipos, bem como as técnicas de inspeção de serviço, ensaios de material e das camadas executadas, instrumentação e cuidados gerais.

As atividades de execução de uma obra genérica de um pavimento permeável são apresentadas no fluxograma da Figura 4.

As atividades iniciais são comuns a qualquer obra de pavimentação. A locação consiste na demarcação dos limites da obra e da poligonal de apoio, executada com o auxílio da topografia em concordância com o projeto geométrico e o levantamento planialtimétrico cadastral. Nesta etapa são lançadas as cotas finais terraplenagem, as inclinações de fundo da caixa, as marcações dos eixos e locados os pontos de captação e saída de água do sistema. Em sequência, a execução dos serviços preliminares consiste na limpeza da camada de expurgo do terreno e/ou, caso haja necessidade, a demolição do pavimento existente, a fim de dar condições para início do preparo do subleito.

Figura 4 Fluxograma de Atividades de execução da obra.

Fonte: Adaptado Virgilis (2009).

O preparo do subleito constitui-se do conjunto de atividades cujo objetivo é obter uma superfície plana, limpa e resistente, ideal ao recebimento das camadas de pavimentação. O projeto de terraplenagem é o responsável por indicar a necessidade de corte ou reposição do material para alcançar a cota desejada. Caso precise, deverá ser importado material de empréstimos ou jazidas a fim de obter todas as especificações requeridas em projeto. A compactação do subleito deve ser executada com rolo liso, dentro dos critérios previstos nas normas vigentes ou especificações de serviços próprios determinadas pelo projetista.

De acordo com o propósito definido para o pavimento, deverá ou não ser instalada uma manta impermeável sob o subleito, de preferência logo após a sua preparação, a fim de evitar qualquer transtorno à superfície. A manta impermeável, comercialmente conhecida como geomembrana, isola o reservatório do subleito, ideal para pavimentos permeáveis com fins de armazenamento e retenção da água pluvial. A instalação deve ser realizada por equipe especializada devido aos cuidados necessários, sobretudo, os referentes à ancoragem das bordas e às emendas. Para pavimentos concebidos para fins de infiltração a geomembrana é dispensável, mas recomenda-se forrar o subleito com geotêxtil, o qual servirá como barreira à deposição de finos das camadas subjacentes.

Antes da execução das camadas granulares do reservatório, sugere-se o uso de uma camada de areia que serve para proteger a geomembrana ou o geotêxtil da ação direta da brita e dos equipamentos de obra. A deposição do material pétreo de granulometria aberta, especificada para obtenção da porosidade aspirada, deve ser cuidadosa para não penetrar a camada de areia. O

acabamento é realizado por compactação do material com rolo liso vibratório ou equivalente recomendado para evitar conformações e deformações da camada quando sob ação das cargas do tráfego.

A instalação dos dispositivos de drenagem requer bastante atenção e devem seguir à risca o projeto para garantir o bom desempenho do pavimento permeável. Basicamente os dispositivos são para captação do volume do escoamento superficial ou para captação do volume do reservatório. Estes últimos consistem nos drenos subsuperficiais, normalmente compostos de tubos PEAD furados e envolvidos por geotêxtil, para captação da água armazenada. Em especial, é necessário que as cotas de saídas dos drenos estejam compatíveis com os dispositivos do sistema de drenagem público ou para o reservatório externo.

O ideal é que, nesta fase, também sejam executados e instalados os poços de observação e controle para monitoramento do pavimento permeável. Os poços são usados para observar a taxa de infiltração após eventos de chuva, durante a fase da obra ou após seu término, cuja regularidade recomendada é de no mínimo duas vezes ao ano (CMAA, 2010).

Para fins de isolamento e filtração, é indicado o uso de geotêxtil por cima da camada de base, sobretudo se o revestimento requisitar de camada de areia para o assentamento, como os blocos intertravados ou pavimento tipo Grid.

A execução da camada de rolamento propriamente dita deverá seguir as especificações pertinentes a cada tipo de revestimento permeável. Recomenda-se a realização de testes e inspeções adequados para o material em campo, como a padronização das peças, espessura e preenchimento das juntas, temperatura de aplicação do concreto asfáltico, entre outros. Essa camada rege o funcionamento do sistema como um todo e efetivamente influencia o desempenho da técnica compensatória.

A aceitação da obra depende substancialmente da aprovação das etapas construtivas no controle geométrico e tecnológico dos materiais e serviços executados.

3.5 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO SISTEMA DE UM PAVIMENTO PERMEÁVEL

Um pavimento permeável funcional reduz gradativamente sua capacidade de infiltração ao longo do tempo devido ao processo de colmatação dos poros (GALLI, 1992; NOZI *et al.*, 1999). Isto é, as partículas carregadas pelo escoamento superficial ou por componentes da própria

precipitação se depositam e preenchem os vazios da superfície porosa, afetando a permeabilidade do revestimento. Consequentemente, visando manter as condições funcionais ótimas do sistema durante sua vida útil, torna-se necessária a elaboração de um planejamento de serviços periódicos integrados de manutenção do pavimento.

A manutenção preventiva é a melhor forma de preservar a capacidade operacional do pavimento permeável, e pode reduzir substancialmente os riscos de mau funcionamento do sistema e futuros gastos com restaurações. Estudos afirmam que, se bem projetado, executado e conservado, um pavimento poroso possui durabilidade semelhante a de um pavimento comum. Shackel *et al.* (2010), após vários testes realizados em um pavimento de blocos intertravados de concreto permeável, na Austrália, relatam que, mesmo sem manutenção sistemática, as taxas de infiltração do sistema se mantêm adequadas por mais de 10 anos de funcionamento.

Shackel *et al.* (2010) afirmam ainda que, em geral, a colmatção ocorre sobretudo no horizonte superior do material que preenche as juntas. Assim, a capacidade de infiltração do pavimento pode ser facilmente restaurada por uso de práticas de varrição mecanizada da superfície, combinada ou não com lavagem a jato, ou através da remoção e substituição dos primeiros 3 cm do material drenante das juntas.

Vários tipos de varrição, incluindo a mecânica, a regeneração de ar ou a vácuo, podem ser utilizados para limpeza dos poros da camada colmatada (BALADÈS *et al.*, 1995; KELEMIT & STENBECK, 2012), bem como outros tratamentos de manutenção, como lavagem sob pressão e aspiração a vácuo (DRAKE & BRADFORD, 2013).

Winston *et al.* (2016) compararam o impacto de diferentes técnicas de restauração das taxas de infiltração de 9 pavimentos permeáveis, cujas idades de construção variavam entre 6 meses e 28 anos, e localizados em quatro regiões climáticas distintas, nos EUA e na Suécia. Três tipos de superfícies porosas foram avaliados: (i) asfalto poroso, (ii) blocos de concreto intertravado e (iii) pavimento permeável tipo Grid. Cada pavimento permeável foi monitorado imediatamente antes e imediatamente depois das suas intervenções de manutenção serem realizadas. Os métodos de manutenção utilizados foram: nos pavimentos tipo (i) - lavagem sob pressão, aspiração a vácuo e fresagem; para o tipo (ii), varrição mecânica, varrição por ar regenerado e varrição por caminhão a vácuo; para os tipos (ii) e (iii) removeu-se os primeiros 2cm do material drenante através de fresagem.

Para todos os casos avaliados as tecnologias empregadas produziram um aumento na capacidade de infiltração pós-manutenção. A combinação das técnicas de limpeza por aspiração à vácuo e

lavagem sob pressão apresentou significativa recuperação das taxas de infiltração dos pavimentos de asfalto poroso, com aumento da ordem de até 25 mm/min. A manutenção com jato d'água mostrou-se mais eficiente do que a aspiração a vácuo quando utilizados separadamente. O método mais eficiente testado para manutenção do pavimento asfáltico, entretanto, foi a fresagem superficial, com real capacidade de restauração das taxas de infiltração, aproximando-se às taxas pré-funcionamento. Para os pavimentos de intertravados e pavimento tipo Grid, a remoção manual dos 2 cm superficiais de material drenante das juntas não demonstrou aumento significativo da infiltração, o que foi associado a prováveis problemas construtivos como presença de finos nas juntas e camada de assentamento dos blocos. Já as técnicas de varrição apresentaram desempenho semelhante para manutenção com significativo aumento da infiltração pós-manutenção em pavimentos intertravados.

Num estudo realizado por Kumar *et al.* (2016) em áreas de estacionamentos com pavimentos permeáveis monitorados sistematicamente por quatro anos e cuja manutenção era realizada por aspersão de água seguida de varrição mecanizada, conclui-se que as superfícies mais drenantes, da maior para a menor, foram: asfalto poroso, concreto poroso e blocos intertravados. Foi observado ainda que, as taxas de infiltração apresentaram redução expressiva de seus valores a partir do terceiro ano. Entretanto, ainda assim, os pavimentos eram capazes de drenar uma lâmina aproximadamente 380 vezes maior do que a gerada pela chuva de projeto da bacia, e nenhum escoamento superficial foi observado durante o período.

A colmatagem das superfícies permeáveis pode ser bastante preocupante se o local de implantação do sistema estiver sujeito a grande exposição de finos e áreas com solos não estabilizados como locais em construção ou áreas erodíveis. Algumas espécies de árvores também contribuem bastante para obstrução da superfície, reduzindo temporariamente a permeabilidade do pavimento, mas que pode ser facilmente reduzida através de práticas simples de varrição e limpeza.

Assim, o planejamento da manutenção do sistema permeável começa desde a escolha do local de implantação, e consiste em um processo contínuo e sistemático de inspeção, manutenção preventiva e corretiva.

Basicamente, as inspeções consistem no exame visual da superfície permeável do pavimento para identificação prévia de locais de acúmulo de sedimentos e detritos obstrutores e crescimento de plantas daninhas. Uma das formas de verificação de obstrução dos poros é a formação de poças imediatamente após eventos de precipitação, ou através de ensaios de infiltração. Segundo o Guia

de recomendações para projetos de pavimentos permeáveis (EISENBERG *et al.*, 2013), o critério mínimo de aceitação de pavimentos em serviço é que a infiltração da superfície seja da ordem de 25 cm/h.

Do ponto de vista da permeabilidade, a limpeza da superfície é a tarefa de manutenção mais importante para o funcionamento a longo prazo. A manutenção preventiva ocorre quando a obstrução dos poros é superficial e o material depositado ainda não se encontra consolidado. Dessa forma, práticas de varrição mecânica ou varrição com ar regenerado são suficientes para restaurar as taxas de infiltração do pavimento. Recomenda-se que a manutenção preventiva seja realizada pelo menos de 2 a 4 vezes ao ano (EISENBERG *et al.*, 2013). As ervas daninhas devem ser removidas manualmente, e, sobretudo em pavimento cujo subleito é permeável, deve-se evitar o uso de herbicidas.

Quando o pavimento permeável é negligenciado por vários anos, as práticas de limpeza superficiais deixam de ser efetivas e torna-se necessário a utilização de manutenção corretiva para restauração das taxas de infiltração. A varrição a vácuo ou a prática de vários serviços associados, como a aspiração a vácuo seguida de lavagem sob pressão, são utilizados na maioria dos tipos de pavimentos para recuperação da permeabilidade perdida.

Uma técnica viável e que pode vir a reduzir, significativamente, a necessidade de manutenções corretivas e, conseqüentemente, os custos associados, é a sinalização. Isto é, utilização de placas sinalizadoras com informações proibitivas e recomendações de manutenção do sistema para utilização da área do pavimento permeável e suas proximidades. Um exemplo da sinalização é apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Sinalização potencial - Atividades proibidas em um Pavimento Permeável.

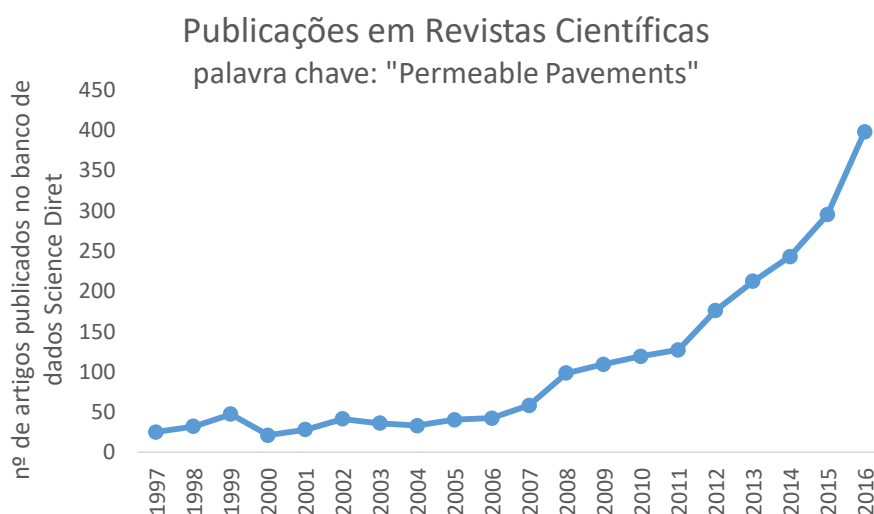


Fonte: Adaptado Eisenberg *et al.* (2013).

3.6 PERSPECTIVA ATUAL DE PESQUISA

Em virtude da crescente relevância e necessidade de desenvolvimento sustentável, nas últimas décadas a ciência tem se dedicado cada vez mais às pesquisas relacionadas ao uso, evolução e aprimoramento de tecnologias ecologicamente viáveis, entre as quais destacam-se os pavimentos permeáveis. No gráfico da Figura 6 é possível observar a tendência crescente das publicações sobre o tema nas principais revistas científicas do mundo, tornando-se mais proeminente a partir do ano de 2010.

Figura 6 - Tendência de crescimento de publicações científicas com a palavra chave “pavimentos permeáveis”.



Fonte: Science Direct (2017). Acesso em 17/07/2017.

A funcionalidade dos pavimentos permeáveis no auxílio da drenagem urbana já é conhecida desde a década de 70 (FIELD *et al.*, 1982), com aplicações regulares em estradas nos EUA e pistas de pouso de aeroportos europeus. O programa de pesquisa desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, em meados dos anos 80, teve por objetivo estudar o desenvolvimento dessa técnica de gerenciamento de águas pluviais em termos de custo/benefício, potencial de aplicação, status e necessidades futuras de pesquisa.

Field *et al.* (1982) concluíram que os pavimentos permeáveis são eficazes na redução dos volumes de escoamento e na degradação da qualidade da água, além de reduzirem os custos com o sistema de drenagem convencional, o que, consequentemente, viria a recuperar os gastos iniciais de sua construção. Apesar do estudo relatar bom desempenho dos pavimentos porosos, algumas questões remanescentes foram apontadas para maior discussão e análise: quantificação

do escoamento e das mudanças na qualidade da água; os efeitos a longo prazo da saturação contínua do subleito; efeitos da limpeza, manutenção e potencial de colmatção; resistência aos ciclos de gelo-degelo; traço das misturas asfálticas e composição dos agregados; tipos e configuração dos materiais de construção; normas e regulamentos próprios e a eficiência econômica do uso desses pavimentos. Contudo, os autores alertaram sobre a necessidade de melhor entendimento do sistema quando construído sob subleitos de baixa permeabilidade e, sobretudo, destacaram a ausência de dados referentes ao desempenho da estrutura do pavimento, acusado como o motivo da sua aplicação praticamente restrita a áreas de estacionamentos.

Brattebo & Booth (2003) avaliaram a eficiência de quatro sistemas de pavimentos permeáveis utilizadas como estacionamento de automóveis e, obtiveram resultados positivos frente à alternativa tradicional de revestimentos impermeáveis. Quanto à durabilidade e capacidade de infiltração, os sistemas permeáveis apresentaram, respectivamente, nenhum desgaste excessivo do material e infiltração de praticamente toda a precipitação, com escoamento superficial praticamente nulo. Outro ponto importante de avaliação foi a qualidade da água infiltrada, cuja redução dos níveis de cobre e zinco mostrou-se significativa quando comparada à água do escoamento superficial de pavimentos asfálticos tradicionais.

Nnadi *et al.* (2015) investigaram a aplicabilidade de reciclagem da água infiltrada de um sistema de pavimento permeável para uso na irrigação agrícola. Às intensidades de precipitações aplicadas foram acrescidos hidrocarbonetos para simular o gotejamento de óleo dos veículos estacionados sobre o pavimento. A análise da água infiltrada apresentou padrões químicos aceitáveis para o uso em irrigação independentemente do tipo de sub-base adotada.

Chandrappa & Biligiri (2016a) compilaram informações das principais literaturas sobre concreto poroso e sua aplicação como revestimento de pavimentos permeáveis, a fim de ajudar pesquisadores, cientistas, projetistas, engenheiros e planejadores na consolidação do conhecimento sobre o assunto e na fomentação estratégica do seu uso. Os autores destacaram que a reduzida implementação do concreto permeável como material de pavimentação em muitos países, sobretudo os emergentes, está associada à falta de padronização no preparo do material e testes de avaliação, bem como pela ausência de normativas das práticas construtivas.

A falta de controle na construção e manutenção dos pavimentos permeáveis também foram destacadas como umas das principais limitações à sua aplicabilidade (ARAÚJO *et al.*, 2000), inclusive indicadas como possível causa da ineficiência do sistema.

Devido aos diferentes requisitos de desempenho e à inexistência de uma metodologia consagrada para determinação dos traços para a confecção dos pavimentos porosos, Kia *et al.* (2017) tentaram balancear as características de porosidade, resistência e trabalhabilidade, que acabam por apresentar alta variabilidade na composição granulométrica dos seus agregados, na relação água/cimento ou no tipo e quantidade de aditivos. A Tabela 1 apresenta uma compilação das principais proporções utilizadas nas misturas de concretos permeáveis dos principais estudos realizados e publicados na literatura (CHANDRAPPA & BILIGIRI, 2016a).

Visando iniciar o desenvolvimento de técnicas de controle da qualidade e estabelecimento de especificações de aceitação do concreto permeável, Rangelov *et al.* (2017) avaliaram o efeito do tamanho dos corpos de prova (CP) cilíndricos na porosidade e na densidade do concreto fresco e endurecido, bem como os impactos de diferentes formas de cura do material na sua resistência à compressão aos 28 dias. O tamanho do CP não influenciou nas propriedades de porosidade e densidades endurecidos, apresentando forte correlação linear entre as grandezas (R^2 0,6 -0,9) e valores médios de 16% e 2,11 kg/m³, respectivamente. Para a resistência, entretanto, tanto as dimensões do CP, quanto a escolha do tipo de cura utilizada influenciaram no desempenho do material. CP menores (100mm x 200mm) se mostraram entre 7,7 e 19% mais resistentes do que os maiores (150mm x 300mm). Já o método de cura mais eficiente para o ganho de resistência foi o 2A2M, cuja cura consiste no descanso ao ar por duas semanas, seguidas de duas semanas na câmara úmida.

Outro importante resultado do referente trabalho foi obtido através de análises gravimétricas, confirmando que a exposição excessiva do concreto poroso à câmara úmida resulta na perda de C-S-H e Ca(OH)₂ da pasta, e, conseqüentemente, na perda de resistência à compressão.

Martin III *et al.* (2014) verificaram, experimentalmente, o impacto da distribuição vertical da porosidade sobre a permeabilidade de pavimentos de concreto permeável. A partir das permeabilidades efetivas calculadas foi possível estabelecer a correlação entre estas e as permeabilidades reais das amostras estudadas, a qual foi extremamente superior à correlação estabelecida entre as reais e as obtidas com as médias das porosidades. Adicionalmente, ao analisar a relação entre a distribuição de permeabilidade e a permeabilidade efetiva, verificou-se que a permeabilidade mínima (e, portanto, a porosidade mínima) tende a ter o maior impacto na porosidade efetiva geral da amostra.

Tabela 1 - Proporções de misturas usadas na produção de concreto permeável

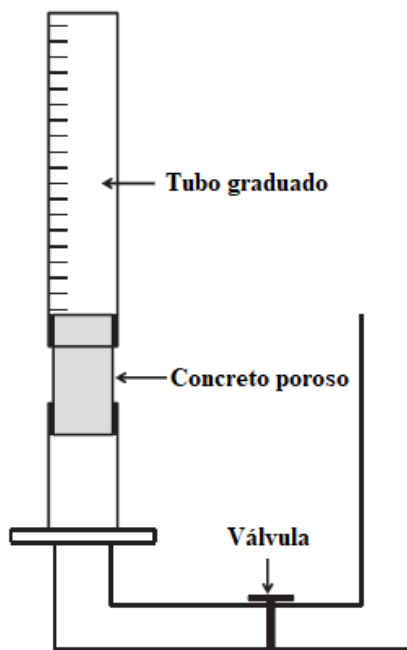
Agregados (kg/m³)	Cimento (kg/m³)	Água (kg/m³)	Agregado /cimento	a/c	Autor
1651.32	412.83	153.57	04:01	0.37	Ghaffori & Dutta (1995)
1692.00	376.00	143.25	4.5:1	0.38	
1740.00	348.00	135.72	05:01	0.39	
1800.00	300.00	125.40	06:01	0.42	
1541.93	344.69	105.01	4.47:1	0.30	Crouch <i>et al.</i> (2006)
1620.24	287.15	87.21	5.64:1	0.30	
1820.00	180.00	50.00	10:01	0.28	Kevern <i>et al.</i> (2009)
1700.00	260.00	70.00	6.5:1	0.27	
1620.00	310.00	80.00	5.2:1	0.26	
1580.00	330.00	90.00	4.78:1	0.27	
1550.00	360.00	100.00	4.3:1	0.28	
1510.00	380.00	100.00	3.97:1	0.26	
1600.00	340.00	80.00	4.7:1	0.24	
1570.00	330.00	100.00	4.75:1	0.30	Huang <i>et al.</i> (2010)
1560.00	330.00	100.00	4.72:1	0.30	
1440.80	320.20	112.10	4.5:1	0.35	
1486.90	330.40	115.60	4.5:1	0.35	
1586.90	352.60	123.40	4.5:1	0.35	
1559.00	312.00	103.00	05:01	0.33	Neithalath <i>et al.</i> (2010)
1568.00	314.00	104.00	05:01	0.33	
1558.00	312.00	103.00	05:01	0.33	
1524.00	305.00	101.00	05:01	0.33	
1546.00	309.00	102.00	05:01	0.33	
1544.00	309.00	102.00	05:01	0.33	
1560.00	367.00	110.10	4.25:1	0.30	Lim <i>et al.</i> (2013)
1560.00	242.00	72.96	6.44:1	0.30	
1560.00	367.00	73.40	4.25:1	0.20	
1560.00	367.00	110.10	4.25:1	0.30	
1560.00	430.00	110.10	3.62:1	0.26	
1560.00	495.00	148.50	3.15:1	0.30	
1600.00	200.00	70.00	08:01	0.35	Ibrahim <i>et al.</i> (2014)
1800.00	150.00	52.85	12:01	0.35	

Fonte: Adaptado de Chandrappa & Biligiri (2016).

Visando auxiliar na compreensão da hidrodinâmica do fluxo da água através do concreto permeável, Chandrappa & Biligiri (2016b) avaliaram diversas misturas de concreto poroso quanto as suas características de permeabilidade em diferentes níveis de carga hidráulica utilizando um permeâmetro de carga decrescente (Figura 7). As leituras foram realizadas em 18 misturas de concreto, cuja porosidade variou entre 15 e 37% e a permeabilidade entre 0,076 e 3,5

cm/s. Os resultados apresentados mostraram que entre as propriedades da mistura, a relação cimento-agregados é a que possui maior influência no controle da permeabilidade das amostras ensaiadas.

Figura 7 - Esquema do permeâmetro de carga decrescente.



Fonte: Chandrappa & Biligiri (2016b).

Kia *et al.* (2017) estudaram a redução da permeabilidade devido à colmatção dos poros, analisando a estrutura do concreto poroso e as características das partículas acumuladas. Como resultado, a tortuosidade foi relacionada com o potencial de colmatção do concreto poroso de forma proporcional: quanto maior a tortuosidade, maior o potencial de obstrução dos poros. Quanto à necessidade regular de manutenções dos pavimentos em concreto poroso, o estudo questiona os métodos correntes, como varrição à vácuo e lavagem sob pressão, as quais restauram apenas parcialmente a capacidade de infiltração e não costumam ser efetivos quando a obstrução ocorre abaixo da camada superficial.

A forma mais comum de se medir o desempenho hidráulico de uma superfície permeável ou de verificar o seu grau de colmatção é através de ensaios de infiltração, que podem ser utilizados tanto para garantir a qualidade da construção, como identificar a necessidade de manutenção do sistema. A comparação entre os valores de permeabilidade obtidos por dois diferentes métodos de testes de infiltração, National Center for Asphalt Technology (NCAT) e ASTM C1701, realizados em pavimentos permeáveis de asfalto poroso, concreto poroso e blocos intertravados

de concreto, mostraram que ambos podem ser efetivamente utilizados para este fim, e que os valores de permeabilidade medidos com o método ASTM foram entre 50 e 90% inferiores aos medidos com o NCAT. Para o método ASTM, o diâmetro do cilindro do permeâmetro maior melhora a confiabilidade e reduz a variabilidade da permeabilidade medida (LI *et al.*, 2013).

Kayhanian *et al.* (2012) analisaram os perfis de porosidade produzidos através de tomografia computadorizada de diversas estruturas de pavimentos permeáveis na Califórnia, a fim de avaliar a possível natureza e extensão da colmatação dos poros. Os autores observaram que a maior parte da obstrução ocorre próximo à superfície do revestimento, geralmente nos 25mm, podendo, em alguns casos, chegar aos 100mm de profundidade.

No estudo de Winston *et al.* (2016), a técnica de fresagem de 2,5cm do revestimento asfáltico foi a única entre as testadas, capaz de rejuvenescer as taxas de infiltração do pavimento próximas às taxas iniciais de construção, ratificando que a obstrução dos poros ocorre geralmente nos primeiros centímetros superficiais do revestimento poroso.

As condições de uso do sistema permeável contribuem substancialmente para o desempenho funcional da infiltração, sendo considerada, em geral, a idade do pavimento permeável o fator influenciador predominante da sua permeabilidade (KAYHSNIAN *et al.*, 2012). Por observação experimental, Kumar *et al.* (2016) verificaram que de dois a quatro anos de uso, o declínio das taxas de infiltração de superfícies porosas pode ser bastante significativo. Valinski & Chandler (2015) avaliaram a capacidade de infiltração de diferentes materiais utilizados para criar superfícies permeáveis e, a escolha do material não foi considerada fator governante no desempenho da infiltração, sendo, pois, preponderante a forma de limitar a deposição de sedimentos no pavimento.

Visando descrever o fenômeno da infiltração da água no solo, diversos modelos matemáticos foram criados (GREEN & AMPT, 1911; PHILIP, 1957; STROOSNIJDER, 1976; BRUTSAERT, 1977; PARLANGE *et al.*, 1982; SWARTZENDRUBER, 1987; HAVERKAMP *et al.*, 1990; WU *et al.*, 1999; LASSABATERE *et al.*, 2006) para obtenção dos parâmetros de retenção de água (α), condutividade hidráulica saturada (K_s), sorvidade (S), entre outros. Nesse contexto, Valiantzas (2010) propôs em seu estudo uma equação linear de dois parâmetros, K_s e S , e comparou os resultados obtidos com outros modelos de infiltração presentes na literatura, que consistem em equações não lineares (de dois ou três parâmetros). O modelo de Valiantzas (2010) expressa a infiltração acumulada (i) como função do tempo (t), apresentando boa acurácia na estimativa da condutividade hidráulica saturada e da sorvidade. Os resultados indicaram ainda

que as equações de infiltração comuns de três parâmetros podem fornecer estimativas irrealistas, devido à dificuldade de convergência ou a não singularidade da solução.

A falta de adequação às ferramentas de modelagem representa uma barreira na concepção e construção dos sistemas permeáveis. Brunetti *et al.* (2016) procurou descrever o comportamento hidráulico de um sistema de pavimento permeável utilizando a modelagem computacional no Hydrus-1D, com dois diferentes cenários: 1- modelo poroso único para todas as camadas do sistema; 2 – modelo de dupla porosidade para as camadas de base e sub-base do sistema. Os resultados mostraram que a abordagem de dupla porosidade é mais apropriada para descrever o fluxo de saturação variável nas camadas do pavimento e, sobretudo, foi possível confirmar a adequação e precisão do Hydrus-1D para modelagem correta do comportamento hidráulico de pavimentos permeáveis.

Também, a fim de estimar o parâmetro hidráulico de condutividade saturada do solo, Kuang *et al.* (2011) utilizaram tomografia de raio X para identificar as características hétero-dispersa e alta tortuosidade da matriz do solo do pavimento estudado, ao qual foi aplicado o modelo de Kozeny-Carman (KCM) modificado para parametrização. O parâmetro de condutividade hidráulica da poro-estrutura do pavimento foi previsto aceitavelmente pelo KCM modificado proposto.

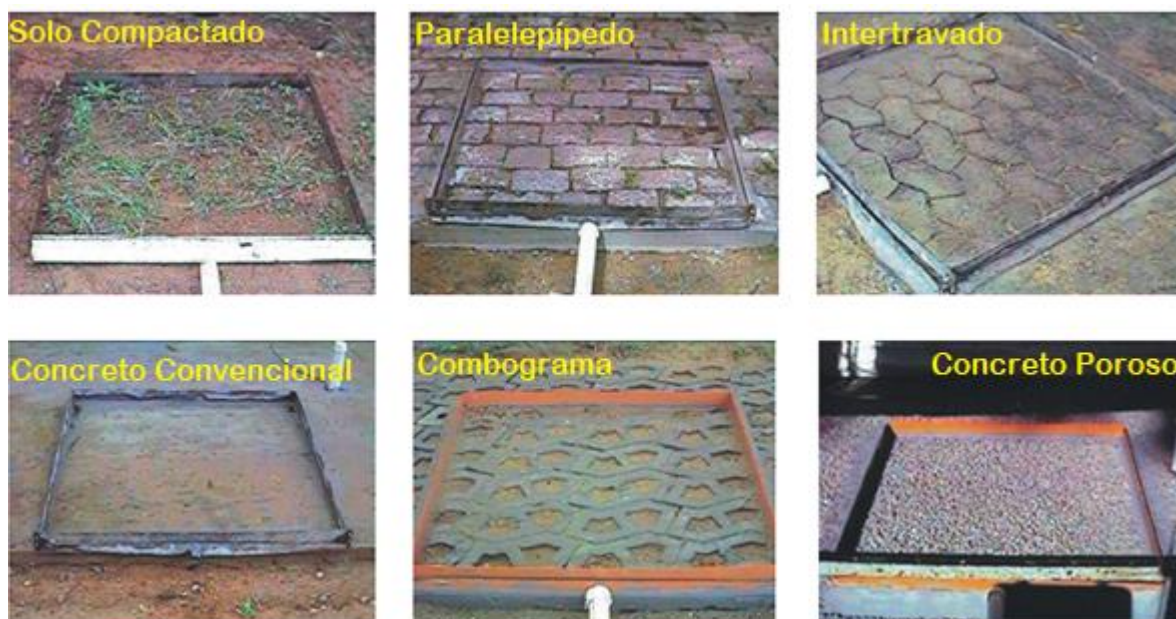
Modelos mecanísticos provaram ser ferramentas precisas para análise numérica de técnicas como pavimentos permeáveis. Brunetti *et al.* (2017) investigaram o benefício da modelagem por métodos alternativos em substituição à numérica em virtude do alto custo computacional destas. A combinação da técnica da krigagem, a eficiência de Nsh-Suctcliffe (NSE) e o algoritmo de otimização foram utilizados, respectivamente para aproximar os resultados do comportamento hidráulico de saturação do meio poroso e análise de sensibilidade global dos parâmetros obtidos; a comparação das saídas simuladas e medidas para construção de superfície de resposta; e para estimar os valores dos parâmetros hidráulicos do solo. O modelo calibrado foi validado, apresentando boa precisão dos parâmetros estimados (NSE = 0,85).

3.6.1 A experiência brasileira

Araújo *et al.* (2000) avaliaram a eficiência dos pavimentos permeáveis na redução dos escoamentos superficiais, utilizando simulações de chuva sobre parcelas de 1m² nos seguintes tipos de estruturas pavimentadas: solo compactado, pavimento impermeável de concreto convencional, pavimentos semi-permeáveis (blocos de concreto e paralelepípedos, ambos

rejuntados com areia) e pavimentos permeáveis (concreto poroso e blocos de concreto vazados), como apresentado na Figura 8. Para uma chuva de projeto de 10 minutos de duração e 5 anos de tempo de retorno, a superfície impermeável apresentou coeficiente de escoamento de 0,95, sendo 44% superior ao gerado na superfície de solo compactado. Os volumes de escoamento superficiais gerados pelos pavimentos semi-permeáveis são inferiores ao do concreto convencional, indicando que os mesmos, quando utilizados em substituição às áreas impermeáveis, garantem uma significativa redução de escoamento; enquanto que nas simulações de chuvas realizadas nos pavimentos permeáveis praticamente não ocorreu escoamento superficial, variando de 0,01 do concreto poroso a 0,5 para os blocos vazados.

Figura 8 - Pavimentos simulados.



Fonte: Araújo *et al.* (2000).

A pesquisa desenvolvida por Junior & Barbassa (2006) teve por objetivo propor, de forma prática, o uso de medidas de controle local de inundação na área da Sub-bacia Hidrográfica Urbana da Ponte Seca (SBHUPS), situada em Jaboticabal- SP. O estudo propôs a comparação em termos de viabilidade técnica e econômica da utilização de duas técnicas compensatórias de aplicação pontual (por lote): microreservatório de retenção (MRD) e pavimentos permeáveis (revestimento de blocos de concreto vazados). Para ambos os casos, as exigências quanto ao tipo de solo, nível d'água do lençol freático e profundidade da camada impermeável foram perfeitamente atendidas e, em virtude do solo da região oferecer boas condições à infiltração, a

cota topográfica não restringiu o uso de nenhum dos dispositivos. A limitação do uso se deu na aceitação dos moradores para a instalação dos mesmos, com 82,8% concordando com a medida para redução dos efeitos das inundações. Os pavimentos permeáveis tiveram seu uso restringido ainda pelo parâmetro de “área livre”, tendo em vista que seriam necessárias áreas variando de 28,2m² para lotes de até 160m², a 612,6m² de área disponível para lotes superiores a 1500m². Em relação à estimativa dos custos globais de implantação, os pavimentos permeáveis custariam o dobro do custo para a implantação do MRD.

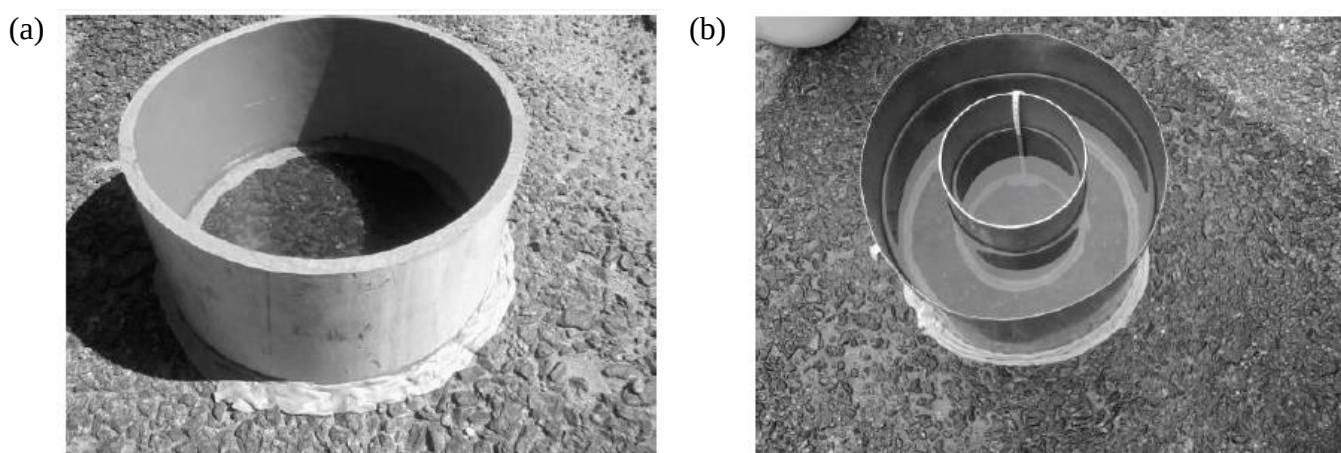
O módulo experimental estudado por Castro, *et al.* (2013) e Jabur, *et al.* (2015) consiste em um estacionamento, construído em 2004, com área de 264m² e dividido em duas partes: metade revestida com asfalto poroso e a outra metade revestida de blocos vazados. Estabeleceu-se, desde a instalação do experimento, a não manutenção ou limpeza dos dois pavimentos, a fim de caracterizar o estado natural dos pavimentos brasileiros e definir a vida útil dos materiais.

Castro, *et al.* (2013) monitorou o comportamento dos pavimentos por um período de 3 anos, de 2007 a 2009, durante 17 eventos de chuvas e comparou os resultados obtidos com os da 1ª etapa de monitoramento realizada em 2005. Para o pavimento em asfalto poroso os escoamentos superficiais superaram em 455% os escoamentos obtidos na primeira etapa. Além disso, a partir do segundo semestre de 2008, não foi mais detectado armazenamento de água no reservatório de pedra sob este revestimento, o que indica a perda de capacidade de infiltração do asfalto poroso. O revestimento de blocos de concreto vazado, entretanto, continuou apresentando adequado controle do volume de escoamento superficial, apesar de superarem em 17% os valores encontrados na 1ª etapa. A diferença comportamental entre os pavimentos era esperada, uma vez que os blocos possuem maior capacidade de retenção do escoamento mesmo quando a chuva excede a capacidade de infiltração dos mesmos. O estudo recomendou fortemente a adoção de medidas de manutenção periódicas para conservar a características de porosidade do revestimento de blocos e a tentativa de restauração da capacidade de infiltração do pavimento asfáltico.

Jabur, *et al.* (2015), resolveram avaliar a capacidade de infiltração dos pavimentos permeáveis desse estacionamento através dos ensaios da norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) C1701 – *Standard Test Methods for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete* (ASTM, 2009) e da metodologia do infiltrômetro de anéis concêntricos (Figura 9). Os autores utilizaram a escala de taxas de infiltração de solos (TERZAGUI e PECK (1967) *apud* MARCHIONI & SILVA (2011)) para classificar os graus de permeabilidade medidos nos pavimentos. O valor médio de infiltração obtido para o asfalto poroso foi de $1,92 \cdot 10^{-5}$ m/s,

estabelecido como capacidade de infiltração comparado ao de uma areia suja e silte arenoso. Porém, um dos testes realizados no pavimento de asfalto apresentou capacidade de infiltração nula, o que indica grande heterogeneidade do revestimento em relação ao índice de permeabilidade. Os resultados para os blocos vazados variaram entre $2,79$ e $4,74 \times 10^{-5}$ m/s, mantendo a característica de pavimento permeável, com capacidade de infiltração superior ao asfalto em 44,06%, se medido pelo ASTM, e 98,35% quando estimado pelo infiltrômetro de anéis concêntricos.

Figura 9 - (a) Cilindro instalado com massa de calafetar (b) Infiltrômetro de anéis concêntricos instalados no asfalto poroso.



Fonte: Jabur *et al.*, (2015).

Assim, como concluído em Jabur, *et al.* (2015), a 2ª etapa de monitoramento do módulo experimental do estacionamento confirma o asfalto poroso como menos resistente ao uso com o passar dos anos. Esses resultados ratificam a fragilidade na garantia de que as técnicas de infiltração na fonte, utilizadas como medida de controle do escoamento superficial, funcionam adequadamente no período de vida útil do projeto.

Entre os mais usuais ensaios de infiltração estão: infiltrômetro de anel simples, infiltrômetro de anel duplo e o método SWIFT (*Stormwater Infiltration Field Test*).

Os ensaios com o infiltrômetro utilizam a mesma fundamentação metodológica para obtenção da taxa de infiltração: os anéis (simples ou duplo concêntricos) são apoiados sobre a superfície permeável e selados para evitar perda lateral; um volume constante de água é despejado no anel e o tempo para infiltração total dele no solo é registrado; esse processo é repetido até que a taxa de infiltração seja constante. Já o método SWIFT, desenvolvido pela *Sunshine Coast University* da Austrália, tem como proposta a avaliação de áreas maiores, com rapidez e simplicidade. Para

tal, utiliza um equipamento próprio (Figura 10) e, consiste, basicamente na liberação de um volume pré-estabelecido de água, a partir de um furo no fundo do recipiente. A contagem da quantidade de blocos intertravados de concreto molhados é correlacionada com a classe de obstrução existente no PP e a necessidade de manutenção do mesmo (Tabela 2).

Figura 10 - Equipamento utilizado no ensaio SWIFT.



Fonte: Lucke *et al.*, (2015).

Tabela 2 - Correlação do método SWIFT, classe de obstrução e manutenção do PP.

Nº de blocos molhados	Classe de Obstrução	Necessidade de Manutenção
≤ 29	Desobstruído	Nada a fazer em um futuro próximo
30 - 132	Parcialmente Obstruído	Elaborar plano de manutenção (1 a 3 anos)
≥ 133	Totalmente Obstruído	Manutenção imediata

Fonte: Lucke *et al.*, (2015).

Com a obtenção dos coeficientes de infiltração é possível definir onde e quando será necessária a manutenção do PP. Os critérios utilizados estabelecem faixas de desempenho mínimas para aceitação da capacidade de infiltração da superfície avaliada, fornecendo um parâmetro objetivo para tomada de decisão, como o método do SCS (USDA), critério do Grau de Permeabilidade (GP) (TERZAGHI e PECK (1967) *apud* LAMBE e WHITMAN (1979)), Indicador de Hidrodinâmico e Manutenção (IHM) e classe de obstrução do pavimento (LUCKE *et al.*, 2015).

A remoção da vegetação natural do solo impacta, consideravelmente, sobre a geração de volume de escoamento superficial durante eventos chuvosos. De acordo com os resultados experimentais de Bruno *et al.* (2013), para uma mesma intensidade de precipitação (121mm/h) o coeficiente de

runoff do solo exposto foi 4,1 vezes superior ao da superfície gramada, reforçando a importância da preservação de áreas verdes no ambiente urbano e importância de alternativas compensatórias a sua não existência.

Na comparação entre diferentes tipos de materiais submetidos as simulações de chuvas, o concreto convencional apresentou cerca 90% de escoamento do volume precipitado, enquanto que as superfícies com revestimento permeável contribuíram consideravelmente para a redução do escoamento superficial, na ordem de 4,3 vezes menor para o revestimento de blocos de concreto maciços e, para os blocos vazados, os valores do coeficiente de runoff obtidos foram muito próximos aos da superfície de solo gramado (BRUNO *et al.*, 2003).

Coutinho *et al.* (2016) realizaram a caracterização hidráulica e simularam o comportamento hidrológico de um pavimento permeável piloto (blocos de concreto vazados) construído em um estacionamento na Cidade do Recife. O material de preenchimento dos blocos foi submetido à caracterização por densidade aparente e umidade e, divididos em quatro tipos de solos: silte, silte arenoso, areia siltosa e areia. As propriedades hidráulicas não-saturadas dos solos foram obtidas pelo método BEST aplicada aos 52 ensaios de infiltração realizados, cujas curvas de retenção de água e condutividade hidráulica permitiram a modelagem da infiltração, evaporação e escoamento no Hydrus para um ano. A simulação numérica mostrou que o pavimento permeável é uma ferramenta essencial para o gerenciamento de escoamento superficial em áreas urbanas.

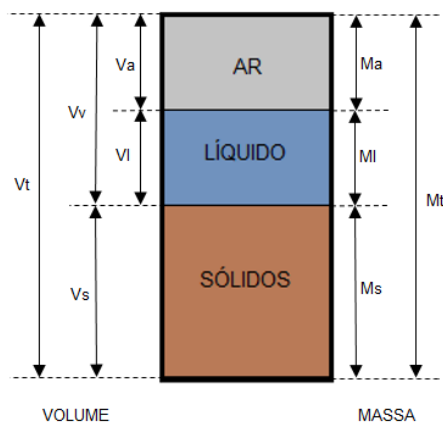
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.2 DEFINIÇÃO DE SOLO

O solo pode ser definido como a camada superficial não consolidada, constituída por uma mistura trifásica de elementos físicos (sólidos, gasosos e líquidos) que recobre as rochas e permite o desenvolvimento das atividades vegetais, animais e humanas. As partículas sólidas são geralmente de origem mineral e orgânica, variam substancialmente em dimensões, formas e disposições no espaço, cujas diferentes configurações propiciam as características de porosidade dos solos.

A rede de poros é responsável por uma série de processos e fenômenos importantes na física dos solos, tais como o transporte de água, solutos e gases. Quando entendido e analisado de maneira conjunta, o solo, uma vez adotado um volume de controle, permite definir um grupo de outras propriedades físicas associadas às relações de massa e volume das suas fases constituintes. A disposição esquemática das três fases de uma amostra de solo é demonstrada na Figura 11.

Figura 11 - O sistema trifásico do solo.



Fonte: Autor.

As proporções volumétricas são apresentadas à esquerda, enquanto que as relações de massa estão à direita. V_t é o volume total da amostra de solo, V_v é o volume de vazios (consiste no volume de poros da amostra, isto é, a soma dos volumes ocupados por água (V_l) e por ar (V_a)), e V_s representa o volume de sólidos presente no solo. Na relação de massas: M_t é a massa total da amostra de solo, M_a a massa de ar, M_l a massa de líquidos e M_s a massa dos sólidos. A partir da determinação dessas grandezas, pode-se estabelecer as relações entre elas e que definem algumas das propriedades básicas do solo.

4.3 PROPRIEDADES BÁSICAS DO SOLO

4.3.1 Umidade Gravimétrica

A razão entre a massa de água e a massa de partículas sólidas de uma amostra de solo expressa a sua umidade gravimétrica:

$$w = \frac{m_l}{m_s} \quad \text{Eq. 2}$$

4.3.2 Umidade Volumétrica

A umidade volumétrica do solo é representada pela razão entre o volume de água e o volume total do solo, determinada pela seguinte expressão:

$$\theta = \frac{V_l}{V_t} \quad \text{Eq. 3}$$

4.3.3 Massa Específica do Solo

A massa específica do solo é obtida a partir da relação entre a massa das partículas sólidas e o volume total da amostra:

$$\rho = \frac{m_s}{V_t} \quad \text{Eq. 4}$$

4.3.4 Massa Específica das Partículas do Solo

A massa específica das partículas do solo é razão entre a massa das partículas sólidas pelo volume ocupado pelas mesmas na amostra analisada:

$$\rho_p = \frac{m_s}{V_s} \quad \text{Eq. 5}$$

4.3.5 Porosidade Aparente

A porosidade de um solo pode ser definida como a proporção existente entre o volume de poros de uma amostra e o seu volume total: Essa expressão reflete a percentagem de poros conectados e não conectados.

$$\phi = \frac{V_v}{V_t} \quad \text{Eq. 6}$$

4.3.6 Índice de Vazios

O índice de vazios é a relação entre o volume de poros do solo e o volume das partículas sólidas, sendo expresso pela seguinte equação:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad \text{Eq. 7}$$

4.3.7 Grau de Saturação

O grau de saturação de um solo pode ser quantificado através da relação entre o volume de água e o volume de poros existentes na amostra, e é numericamente igual a umidade volumétrica saturada. O grau de saturação deve ser expresso em porcentagem.

$$GS = \frac{V_l}{V_v} \quad \text{Eq. 8}$$

4.3.8 Saturação Efetiva

A saturação efetiva (S_e) é a relação entre o volume de água e o volume de vazios de uma amostra de solo.

$$S_e = \frac{V_l}{V_v} = \frac{\theta_x - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \text{Eq. 9}$$

A diferença entre a saturação efetiva e o grau de saturação é que no grau de saturação, desconsidera-se o efeito da umidade volumétrica residual.

4.3.9 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica é uma propriedade do meio poroso que expressa a facilidade com que a água se movimenta no seu interior, sendo um dos parâmetros fundamentais na descrição dos processos de fluxo da água subterrânea no solo. A condutividade hidráulica do solo pode ser

expressa como função das propriedades do meio poroso, sobretudo a textura do solo, das propriedades do fluido transportado e do teor de umidade do solo.

$$K(\theta) = \left(\frac{\kappa \rho g}{\mu_{vd}} \right) \cdot K_r(\theta) \quad \text{Eq. 10}$$

Onde $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica [$L.T^{-1}$], κ a permeabilidade intrínseca [L^2], ρ a massa específica da água [$M.L^{-3}$], g é a aceleração da gravidade [$M.T^{-2}$], μ_{vd} a viscosidade dinâmica da água [$M.T^{-1}.L^{-1}$] e $K_r(\theta)$ é definida como a permeabilidade relativa, a qual varia entre 0 e 1. A permeabilidade relativa considera a dependência da condutividade hidráulica sobre a umidade (θ) ou do potencial matricial (h).

4.4 EQUAÇÕES DE FLUXO NO SOLO

4.4.1 Equação de Darcy

A Lei de Darcy foi estabelecida através de estudos das propriedades do fluxo da água ao atravessar uma camada granular, que resultou na correlação entre o gradiente de perda de energia da água no solo com sua velocidade de escoamento. A Lei de Darcy é válida para densidade de fluxo de água em regime laminar num meio poroso saturado e estabelece que a vazão do fluido (volume por unidade de tempo) que flui através de uma amostra do meio poroso de seção de área A , é diretamente proporcional ao gradiente de potencial total e a condutividade hidráulica saturada (K_s).

$$Q = -K(\theta_s)A \frac{\Delta h_t}{L} = K_s A \quad \text{Eq. 11}$$

Sendo K a condutividade hidráulica do solo ($L.T^{-1}$) em função de θ_s , A é a área em um meio poroso e $\Delta h_t/L$ é o gradiente de potencial total.

Desse modo, a complexa interação entre o fluido e os canais porosos de um meio causa transformações na energia do sistema, geralmente associadas à diminuição de pressão exercida pelo fluido, dependendo também da interação dinâmica entre ambos. O sinal negativo da equação indica que o fluxo de água se dá em direção ao decréscimo do potencial hidráulico, tendo em

vista que para solos saturados, o potencial total é dado pela soma de duas parcelas: potencial gravitacional (z) e potencial de pressão.

Na condição de fluxo saturado, a condutividade hidráulica depende da permeabilidade intrínseca do solo que está relacionada com sua geometria porosa e com a viscosidade do fluido que escoa, a qual está intimamente ligada a temperatura.

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad \text{Eq. 12}$$

Onde: k é permeabilidade intrínseca, ρ é a massa específica da água, g a aceleração da gravidade e μ é o coeficiente de viscosidade do fluido.

4.4.2 Equação de Darcy-Buckingham

A Lei de Darcy, a qual se aplica para o fluxo de água em solos saturados, foi generalizada em meados de 1907, por Buckingham, para a condição de fluxo em solos não saturados.

$$q = -K(\psi) \frac{\partial h_t}{\partial z} = -K(\psi) \left(\frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z} + 1 \right) \quad \text{Eq. 13}$$

À semelhança com a Eq. 11, onde a interpretação física do sinal negativo é idêntica à anterior, isto é, indica que o fluxo de água se dá em direção ao decréscimo do potencial hidráulico, com diferença de que o solo é não saturado.

4.5 POTENCIAL E RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

Potencial da água no solo

A água pode ser descrita por um estado de energia total dividida em duas parcelas: energia cinética e energia potencial.

Para o estudo do movimento da água no meio poroso, a componente de energia cinética é praticamente desprezível, uma vez que, nesses casos, o escoamento da água se dá a baixas velocidades. O que torna a parcela de energia potencial capaz de representar o estado de energia total da água no solo.

O movimento da água no solo ocorre quando existe diferença de potencial total. O potencial total da água no solo (ψ), também chamado de potencial hidráulico, é composto por cinco componentes: térmico (ψ_t), de pressão (ψ_p), gravitacional (ψ_g), osmótico (ψ_o) e matricial (ψ_m).

$$\psi_t = \psi_t + \psi_p + \psi_g + \psi_o + \psi_m \quad \text{Eq. 14}$$

O potencial térmico da água é normalmente desprezado em virtude da dificuldade de sua determinação e, sobretudo, porque a água no solo, em condições normais, sofre variações de temperatura mínimas devido ao seu elevado calor específico.

O potencial de pressão é considerado, desde que a pressão sobre a água seja positiva, isto é, apenas quando a pressão atuante é maior que a pressão atmosférica.

O potencial gravitacional representa a energia potencial devido à posição vertical do volume em consideração a um dado referencial do meio poroso.

O potencial osmótico, por sua vez, está relacionado a concentração de solutos da água no solo. Como em geral a variação de solutos na água é pequena, o valor desse componente é desprezível frente às outras.

A componente matricial é função da presença de forças de capilaridade e adsorção que mantém a água aderida às partículas sólidas da matriz porosa e aos fenômenos de capilaridade existentes nos interstícios da massa de solo.

Desprezando-se as parcelas térmica e osmótica, somando-se os termos que expressam pressão da água (potencial de pressão e mátrico) e escrevendo todas as parcelas e o potencial total da água no solo em termos de energia por unidade de peso, tem-se:

$$H = \psi + z \quad \text{Eq. 15}$$

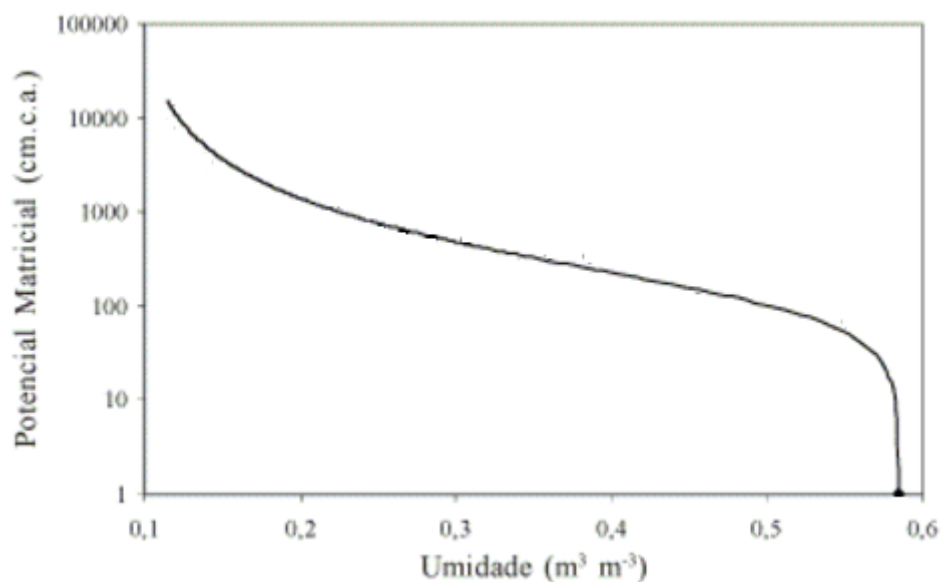
Onde: H a carga hidráulica total, ψ é a altura de coluna d'água que pode ser positiva (potencial de pressão) ou negativa (potencial de sucção) e z é carga de elevação.

4.5.1 Modelos para Curvas de Retenção

Curva de retenção da água no solo

A curva de retenção representa a relação entre o potencial matricial e o conteúdo de água presente no solo (Figura 12). Ela determina a quantidade de água que um solo consegue armazenar em determinado potencial matricial. A umidade volumétrica e potencial matricial variam principalmente com a textura e estrutura do solo, além de depender também da conectividade e do tamanho dos poros (COUTINHO, 2011).

Figura 12 - Modelo de curva de retenção da água no solo.



A análise da curva de retenção permite o entendimento dos fenômenos de retenção da água no solo: adsorção e capilaridade. Para sucção alta e baixos valores de umidade volumétrica, a adsorção torna-se dominante, governado pelas interações sólido-líquido em escala molecular; enquanto que para valores de umidade volumétrica mais altos e níveis de sucção mais baixos, as forças capilares são preponderantes e estes são controlados principalmente pelas dimensões, estrutura e distribuição dos poros (LU e LIKOS, 2004).

Modelo de retenção da água no solo

Existem diversos modelos que podem ser utilizados para descrever a dependência entre a umidade volumétrica e o potencial matricial, no entanto, devido à complexidade dos processos

envolvidos, não existe um modelo plenamente satisfatório para previsão da curva de retenção (REICHARDT & TIMM, 2004). Dentre essas equações, a mais popular é a equação de Van Genutchen (1980):

$$\theta(\psi) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha\psi|^n]^m} & \psi < 0, \\ \theta_s & \psi \geq 0, \end{cases} \quad \text{Eq. 16}$$

Sendo: α o inverso do comprimento capilar (h_g), n e m são parâmetros de forma que estão relacionados com as hipóteses de distribuição dos poros no solo.

Para determinação dos parâmetros de forma as hipóteses de Burdine (1953) e Mualem (1976) são as mais utilizadas.

A hipótese de distribuição dos poros de Burdine (1953) considera o solo como um conjunto de grupos capilares com raios diferentes e a hipótese de Mualem (1976) considera que o solo é formado por grupos de tubos capilares conectados e em série.

$$m = 1 - \frac{k_p}{n} \quad \text{Eq. 17}$$

Nessa relação, fazendo $k_p = 1$ é considerada a hipótese de distribuição dos poros de Mualem(1976), e fazendo $k_p = 2$ é considerada a hipótese de distribuição dos poros de Burdine (1953).

4.5.2 Modelos para Curva de Condutividade Hidráulica

A curva de condutividade hidráulica é a relação entre a condutividade hidráulica e a umidade volumétrica.

O modelo de condutividade hidráulica relativa de Burdine (1953) é dado pela Eq. 18. Esse modelo é dependente da saturação efetiva, variável adimensional dependente da umidade volumétrica ou da pressão da água nos interstícios do solo.

$$K_r = (S_e)^2 \frac{\int_0^{S_e} \frac{1}{\psi^2} dS_e}{\int_0^1 \frac{1}{\psi^2} dS_e} \quad \text{Eq. 18}$$

Brooks e Corey (1964) exprimem a curva de condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica.

$$K(\theta(\psi)) = K_s(S_e)^\eta = \left(\frac{\theta(\psi) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad \text{Eq. 19}$$

Van Genutchen(1980) define a curva de condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica.

$$K(\theta(\psi)) = K_s(S_e)^2 \left(1 - \left(1 - (S_e)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right) \quad \text{Eq. 20}$$

Mualem (1976) explana a curva de condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica conforme apresentado na Eq. 21. Essa equação combinada com a equação de van Genutchen (1980) (Eq. 16) para a curva de retenção resulta na Eq. 22.

$$K(\theta(\psi)) = (S_e)^{0,5} \left[\frac{\int_0^{S_e} \frac{1}{\psi} dS_e}{\int_0^1 \frac{1}{\psi} dS_e} \right]^2 \quad \text{Eq. 21}$$

$$K(\theta(\psi)) = K_s(S_e)^{0,5} \left(1 - \left(1 - (S_e)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2 \quad \text{Eq. 22}$$

4.5.3 Fluxo de água em condições de solo não saturado - Equação de Richards

A equação de Richards (1931) descreve o fluxo de água em solos saturados e não saturados. Ela demonstra que a variação do teor de água com o tempo é igual a variação de fluxo ao longo de uma distância. Esta equação é obtida através da combinação das equações de conservação de

massa e de transporte (equação de Darcy) em condições isotérmicas e é representada pela equação 23:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial}{\partial z} - K(\theta) \right] \quad \text{Com, } C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad \text{Eq. 23}$$

Sendo h o potencial matricial do solo, $K(\theta)$ a condutividade hidráulica do solo, θ o conteúdo de água no solo (umidade volumétrica).

Para a solução da equação de Richards são necessárias informações relacionadas às características hidrodinâmicas do solo, a geometria do problema (condições de contorno ou condições limite) e a um estado inicial de pressão ou de conteúdo de água no solo. Para as características hidrodinâmicas, a solução da equação de Richards necessita do parâmetro da curva de retenção e dos parâmetros da curva de condutividade hidráulica saturada.

Os parâmetros necessários à resolução da equação de Richards podem ser obtidos através das metodologias propostas por Lassabatère *et al.* (2006) - BEST, Bagarello *et al.* (2013) e Wu *et al.* (1999). A partir dos ensaios de infiltração com infiltrômetro de anel simples é possível obter os parâmetros de forma e dos parâmetros de escala $h(\theta)$ e $k(\theta)$.

Outras informações, como condições iniciais e finais de umidade, curva granulométrica e densidade são necessárias para os métodos BEST (LASSABETERE *et al.*, 2006) e Wu *et al.* (1999). Esses métodos semi-físicos são, na verdade, um conjunto de equações de pedo transferência que resolvem numericamente a equação de Richards.

4.6 MODELOS CLÁSSICOS DE INFILTRAÇÃO

4.6.1 O modelo de Horton (1940)

O modelo descrito por Horton é um dos mais clássicos modelos de infiltração. Através de uma relação exponencial, que é válida apenas quando o solo está submetido a uma precipitação inferior ou igual a capacidade de infiltração, Horton formulou empiricamente o decréscimo da infiltração ao longo do tempo, como apresentado na expressão abaixo:

$$i(t) = i_b + (i_i - i_b)e^{-\beta t} \quad \text{Eq. 24}$$

Onde: i_i é a taxa de infiltração inicial em $t = 0$, i_b é a taxa de infiltração final ou velocidade básica de infiltração (a qual se aproxima de um valor constante e muito próximo a condutividade hidráulica da saturação) e β é a constante de decaimento.

Nos períodos em que a intensidade de precipitação é nula, ocorre uma recuperação da capacidade de infiltração do solo (influenciada por fatores como temperatura, radiação solar e velocidade do vento), para esse caso, podem ser utilizadas expressões com formato semelhante ao da equação 22, na qual a constante de decaimento (β) passa ser substituída por um parâmetro de recuperação da capacidade de infiltração do solo.

4.6.2 O modelo de Kostiakov (1932)

O modelo empírico descrito por Kostiakov (1932) fornece a infiltração acumulada no tempo, segundo a seguinte equação:

$$I = Kt^\alpha \quad \text{Eq. 25}$$

Sendo: I a infiltração acumulada, t o tempo, K e α as constantes que dependem do solo e das suas condições iniciais.

Para obter a taxa de infiltração da água no solo, a partir da equação de Kostiakov (1932), é preciso deriva-la em função do tempo, assumindo a seguinte forma:

$$i = \alpha K t^{\alpha-1} \quad \text{Eq. 26}$$

Esse modelo descreve bem a infiltração para períodos curtos de tempo. De acordo com Coutinho (2011), esse modelo apresenta como deficiência o fato da taxa de infiltração inicial tender ao infinito, bem como, para longos períodos de tempo a taxa de infiltração tender a um valor muito próximo de zero e não a um valor constante, como o esperado.

4.6.3 O modelo de Kostiakov-Lewis (1945)

Com o objetivo de solucionar o problema da taxa de infiltração tender a zero para longos períodos de tempo, é proposta uma correção para equação de Kostiakov, a qual ficou conhecida como modelo de Kostiakov-Lewis.

$$I = Kt^{\alpha} + i_f t \quad \text{Eq. 27}$$

$$i = Kt^{\alpha-1} + i_f \quad \text{Eq. 28}$$

Neste caso, os parâmetros da equação de infiltração (k e α) são estimados por regressão linear. Após a correção citada, quando o tempo tende ao infinito, a taxa de infiltração tende a i_f .

4.6.4 O modelo Beerkan

O modelo Beerkan é um método semifísico, cuja principal proposta é estimar, a partir do conhecimento da textura e da estrutura do solo, os parâmetros da curva de retenção $\theta(h)$ e da curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$ em função da umidade volumétrica.

As curvas citadas, $\theta(h)$ e $K(\theta)$, podem ser completamente descritas através de parâmetros de forma (n e η) e parâmetros de normalização (θ_s , K_s , h_g). Os primeiros estão intimamente relacionados com a textura do solo e são obtidos a partir da curva de distribuição granulométrica $F(D)$ e da porosidade, enquanto que os demais parâmetros são dependentes da estrutura da matriz do solo e determinados através dos experimentos de infiltração.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

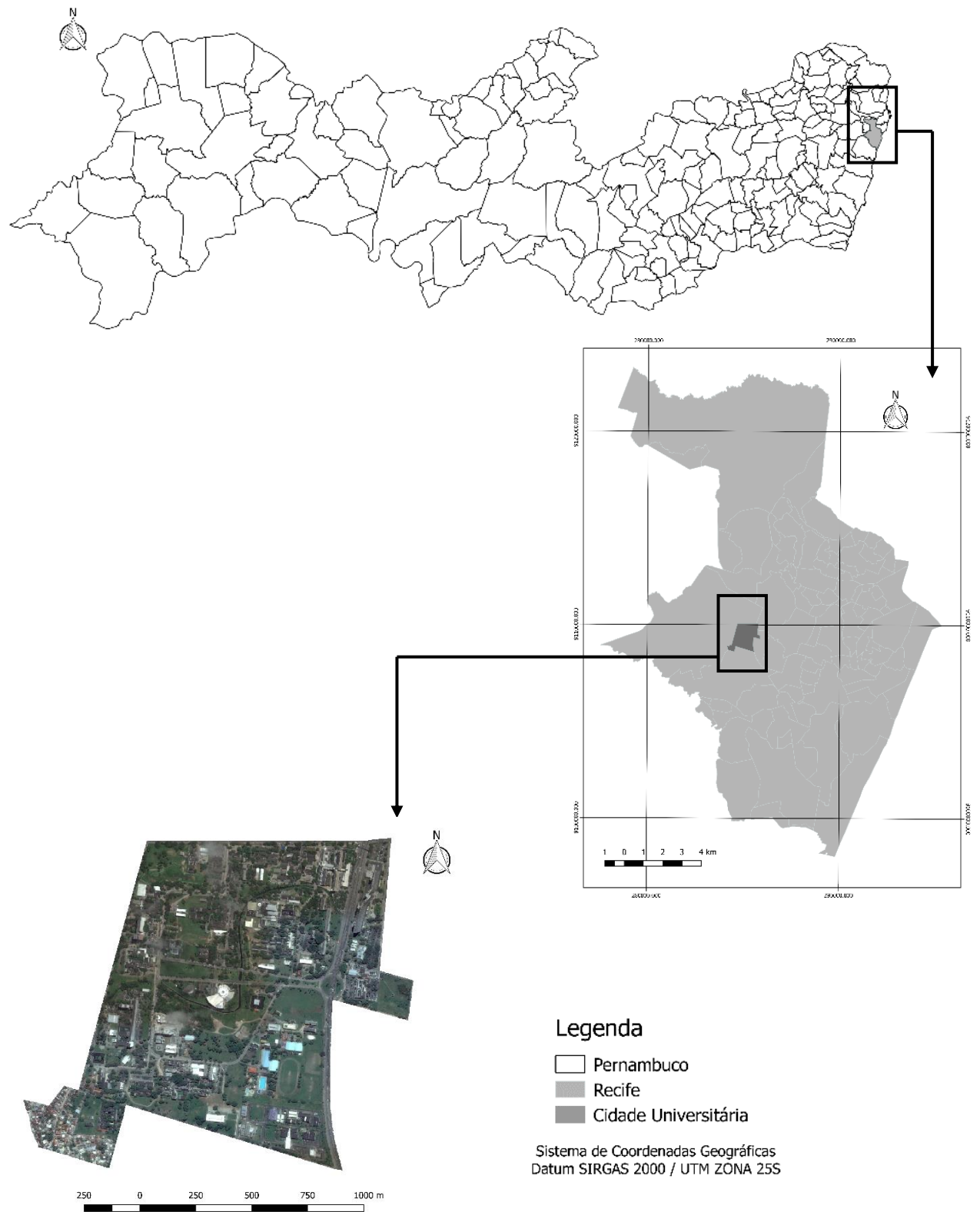
5.1.1 Recife e Região metropolitana

A área de estudo se situa na Região Metropolitana do Recife (RMR), formada por 14 municípios, cuja unidade territorial possui uma área de 2.766 km² e abriga uma população de 3.690.485 habitantes (IBGE, 2010). Na RMR encontram-se as mais expressivas dinâmicas urbanas do estado de Pernambuco, concentrando 42% da população do estado e 65% do PIB (IBGE, 2010).

A configuração espacial de ocupação da Cidade possui vários núcleos urbanos, cuja dinâmica funciona de forma contínua e integrada em relação aos serviços, funções e relações socioeconômicas, inclusive considerando o seu entorno, mais notoriamente, os municípios de Jaboatão dos Guararapes, Olinda e Paulista. Esses municípios encontram-se bastante urbanizados, principalmente nas zonas costeiras e bairros centrais, onde se concentra uma exorbitante parcela de área impermeável composta de vias pavimentadas e edificações e escassez de áreas verdes ou áreas não construídas (COUTINHO, 2011).

Cary *et al.* (2013) enquadraram a RMR como um caso típico de problemas ambientais enfrentados nos países Sul Americanos, fundamentados pela rápida industrialização e desordenado crescimento urbano, desenvolvimento turístico sem planejamento e possível impacto causado pelas mudanças climáticas. A grande conurbação, caracterizada pela ocupação de áreas de riscos, associada à precária infraestrutura de drenagem e saneamento básico, a falta de educação ambiental da população, a impermeabilização do solo e o regime pluviométrico da região, confluem para geração de vultuosos volumes de escoamento superficial e recorrentes episódios de enchentes, prejudicando o desenvolvimento das atividades, causando danos materiais e expondo a população a situações de perigo. O gerenciamento de águas pluviais é um dos grandes desafios hidrológicos na infraestrutura de drenagem urbana em cidades como o Recife, cujos eventos de alta intensidade de chuvas são recorrentes, associadas ao crescimento de áreas impermeáveis e interferência de esgotos e resíduos sólidos (COUTINHO *et al.*, 2016). Na Figura 13 está apresentado o mapa de situação da área de estudo, com destaque ao bairro da Cidade Universitária - UFPE.

Figura 13 - Mapa de situação da área de estudo.



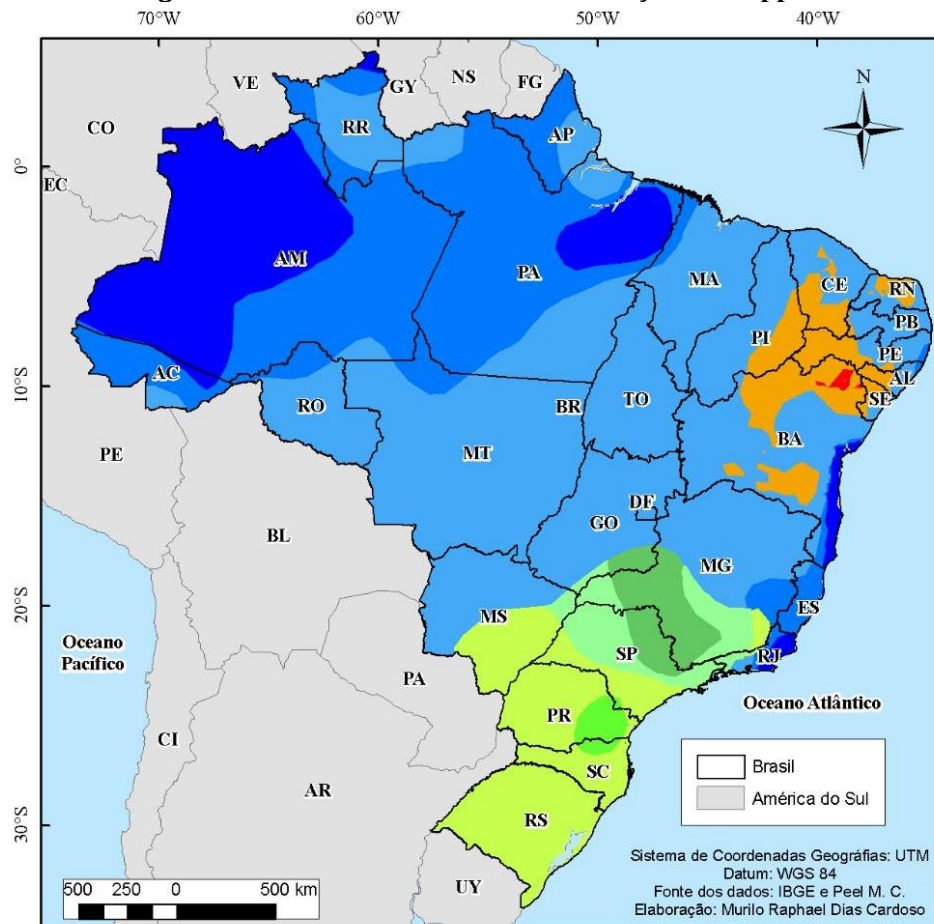
Fonte: Autor.

5.1.2 Climatologia

O município do Recife situa-se no litoral do Estado de Pernambuco, de clima tropical-úmido, cujo período chuvoso preponderantemente está compreendido entre os meses de março a julho, responsável por aproximadamente 70% da precipitação média anual, e o período de estiagem entre os meses de setembro a novembro. A precipitação média anual, de mais de 2400 mm/ano, é considerada alta em relação à Região Nordeste do Brasil (COUTINHO *et al.*, 2016).

O clima é classificado como Am, segundo Köppen (Figura 14), com temperatura média anual de 24,5°C. A umidade relativa do ar média mensal é de 80% e a evaporação média mensal é de 100 mm.

Figura 14 - Climas do Brasil – Classificação de Köppen.



Classificação Climática: Köppen

Af - Clima tropical úmido ou Clima Equatorial	Cfa - Clima temperado úmido com Verão quente
Am - Clima de monção	Cfb - Clima temperado úmido com Verão temperado
Aw - Clima Tropical com Estação seca no inverno	Cwa - Clima temperado úmido com Inverno seco e Verão quente
BSh - Clima das estepes quentes de baixa latitude e altitude	Cwb - Clima temperado úmido com Inverno seco e Verão temperado
BWb - Clima das regiões desérticas quentes de baixa latitude e altitude	

Fonte: Cardoso, *et al.* (2014).

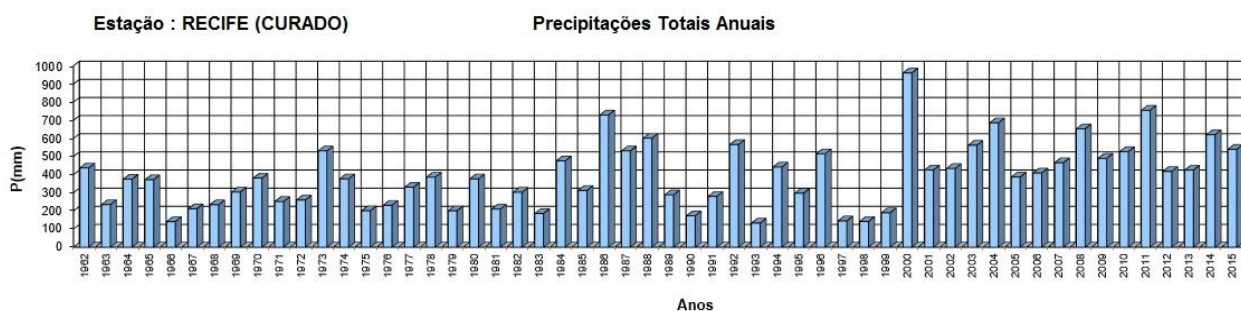
5.1.3 Regime pluviométrico

Os dados de precipitação que serviram de base para realização da caracterização hidrológica foram obtidos através das informações coletadas a nível mensal do posto pluviométrico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizado no Município do Recife, para o período de observação de 1962 a 2015. A estação meteorológica utilizada, Posto Recife (Curado) está situada na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe e Mundaú (ANA, 2016).

Os gráficos de precipitações anuais, mensais e números de dias de chuva por ano para RMR, bem como os dados meteorológicos da região, são apresentados abaixo, respectivamente, nas Figura 15, Figura 16, Figura 17 e Figura 18.

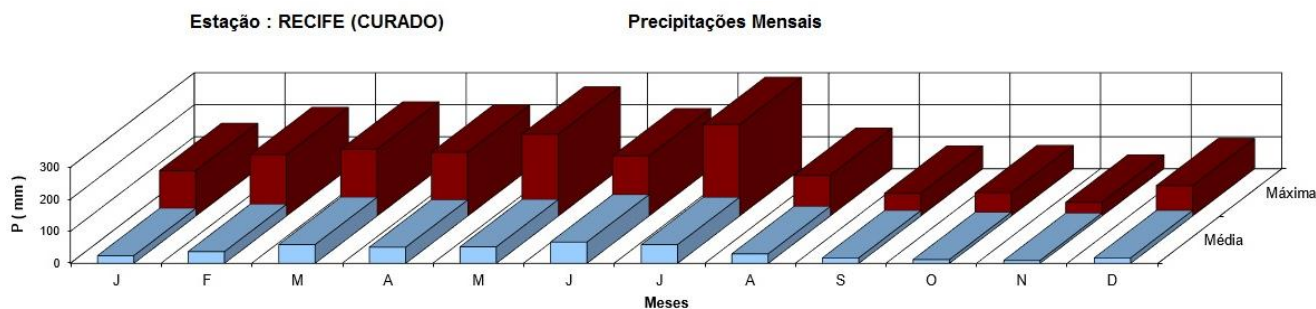
Os dados demonstram que o período de maior precipitação se concentra entre os meses de março a agosto, com máximas mensais variando entre 199,00 mm e 286,0 mm.

Figura 15 - Precipitações totais anuais.



Fonte: Autor.

Figura 16 - Precipitações mensais.



Fonte: Autor.

Figura 17 - Número de dias de chuva por ano.



Fonte: Autor.

Figura 18 - Precipitações e número de dias de chuva por ano.

Estação: RECIFE (CURADO) Pluviograma
PRECIPITAÇÕES E NÚM. DE DIAS DE CHUVA POR ANO

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Diagrama Climatológico
	P(mm)	P(mm)	P(mm)	P(mm)	P(mm)	P(mm)	P(mm)	P(mm)	P(mm)	P(mm)	P(mm)	P(mm)	
Prec. Máx. Mensal	142.00	192.00	209.00	199.00	256.00	188.00	286.00	127.00	71.00	73.00	43.00	95.00	Pmáx = 361 mm (Precip. Máxima Anual para o período).
Prec. Méd. Mensal	19.80	29.04	55.19	45.67	47.56	65.26	57.19	27.83	14.07	9.31	6.70	13.48	Pméd = 331.09 mm (Precip. Média Anual para o período).
Prec. Min. Mensal	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00	1.00	4.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	Pmín = 133 mm (Precip. Mínima Anual para o período).
NDC Máx. Mensal	9	6	10	11	9	10	11	8	6	5	5	7	Nmáx = 54 (Núm. máximo de dias de chuva por ano no período).
NDC Méd. Mensal	2	2	4	3	3	4	4	3	2	2	1	2	Nméd = 32 (Média do núm. de dias de chuva por ano no período).
NDC Min. Mensal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Nmín = 13 (Número mín. de dias de chuva por ano no período).

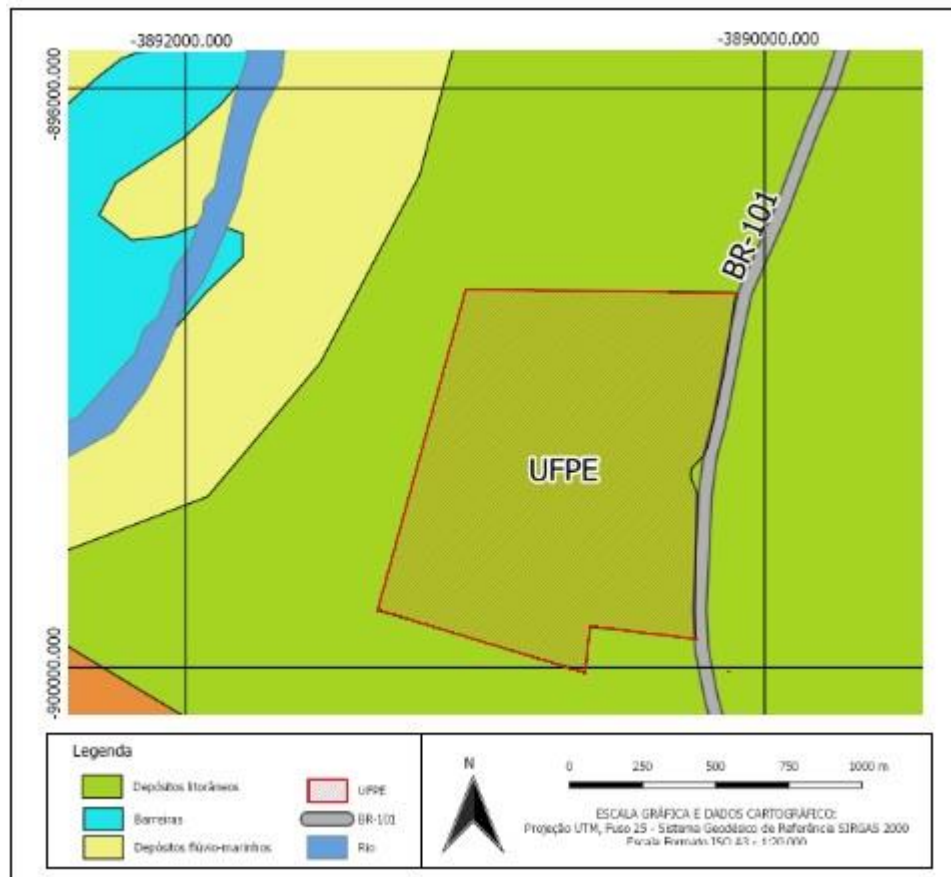
Fonte: Autor.

5.1.4 Características Geológicas/Geotécnicas

A RMR está localizada em uma Planície Costeira cujos sedimentos são provenientes de origens diversas: fluvial, marinha, coluvial, mangues, etc., circundada por morros isolados ou sob forma de tabuleiros. A área de estudo, caracterizada por região litorânea densamente urbanizada está situada na unidade geológica “Depósitos litorâneos” (Figura 19), que representa uma formação de rochas sedimentares, cuja característica de subsuperfície é de extrema irregularidades com predomínio de areias retrabalhadas pela ação fluvial e depósitos de argilas plásticas, orgânicas, sedimentadas em planícies fluviais de inundação (SILVA, 2003).

Os solos dessa região são classificados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) como “área urbana”, caracterizados por intensa modificação antrópica, sobretudo, pela construção de aterros, compactação do solo e impermeabilização das superfícies, com consequente alteração do regime hídrico e térmico dos solos. Essas variedades de efeitos dificultam o estabelecimento do levantamento e classificação morfológica dos solos urbanos (PEDRON *et al.*, 2004).

Figura 19 - Mapa litológico da área de estudo – UFPE.



Fonte: Autor

5.2 MODELO EXPERIMENTAL

5.2.1 Pavimento permeável (PP)

O pavimento permeável piloto utilizado na etapa experimental do trabalho está situado no estacionamento do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, no bairro da Cidade Universitária – Recife/PE, nas coordenadas geográficas 8°03'67'' e 34°57'12'' (Figura 20).

O pavimento piloto foi construído no ano de 2010 para fins acadêmicos e dimensionado para drenar uma área de 110m² de um estacionamento, ocupando uma área retangular de 4,5 m² e uma espessura total 64 cm. Nessa área experimental já foram realizados estudos anteriores envolvendo a caracterização hidráulica e hidrológica do sistema de pavimento permeável (COUTINHO, 2011; COUTINHO *et al.*, 2016).

Figura 20 - Mapa de localização/situação do PP – Estacionamento do CTG – UFPE, delimitação das bacias de contribuição e sentidos dos escoamentos.

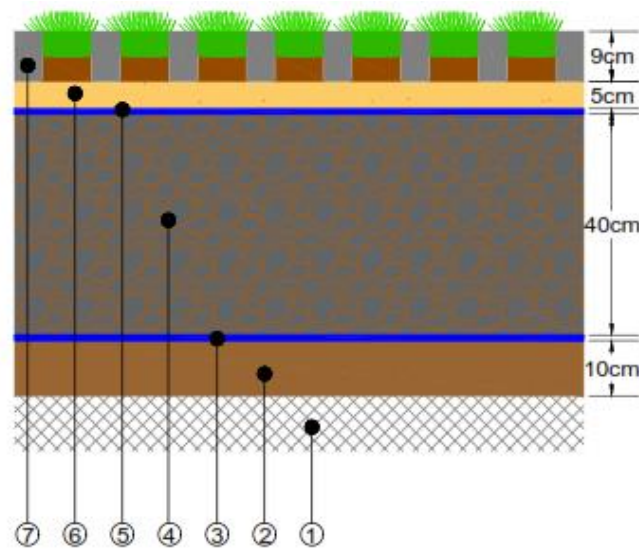


Fonte: Autor.

O revestimento do PP é constituído de blocos de concreto vazados, cujos espaços vazios foram preenchidos com solo e grama, assentados sobre um colchão drenante. O rejunte entre os blocos é em argamassa convencional, a fim de proporcionar melhor intertravamento das peças. A camada de sub-base é constituída de material granular, brita de granulometria uniforme com 43% de porosidade, que possui a função de reservatório do pavimento permeável (Figura 21).

Coutinho *et al.* (2016) consideram que para esta estrutura, a capacidade de infiltração global do sistema é limitada pela capacidade de infiltração do solo nos eventos chuvosos. Isto significa que, para todos os eventos de precipitação, espera-se que a capacidade de armazenamento da sub-base e sua condutividade hidráulica sejam suficientes para garantir o completo armazenamento da água infiltrada.

Figura 21 - Estrutura do pavimento permeável.



- ① Camada de subleito natural;
- ② Camada de Sub-base em areia grossa;
- ③ Geotêxtil (bidim);
- ④ Camada de base em brita uniforme (Reservatório);
- ⑤ Geotêxtil (bidim);
- ⑥ Camada de areia para assentamento;
- ⑦ Revestimento em blocos de concreto vazado;

Fonte: Autor.

5.2.2 Etapas construtivas do pavimento piloto e características físicas do subleito

Para a construção do pavimento piloto foram necessárias, basicamente, as seguintes etapas: escavação da vala (3,0m x 1,5m x 0,64m), regularização do subleito, execução das camadas do pavimento, assentamento dos blocos de revestimento e rejuntamento dos blocos com argamassa. O memorial fotográfico das etapas construtivas está apresentado na Figura 22.

Na época da construção foram instalados instrumentos no interior do pavimento, como poços de observação dos níveis de água e um equipamento de monitoramento da umidade volumétrica. Além disso, foram instalados 7 tensiômetros de cápsula porosa para medir o potencial matricial do solo. A leitura, monitoramento e análise dos dados gerados pela instrumentação não fazem parte do escopo desse trabalho.

Figura 22 - Memorial fotográfico – Etapas construtivas do pavimento permeável piloto – Estacionamento do CTG/ UFPE.

	
a) Execução de escavação da vala.	b) Execução da camada de brita (40 cm).
	
c) Aplicação de geotêxtil para separação de duas camadas drenantes consecutivas e instalação dos piezômetros..	d) Execução da camada de areia grossa (5cm) e instalação do tubo de acesso para sonda de nêutrons.
	
e) Execução do revestimento com blocos de concreto vazados (cobograma).	f) Preenchimento das juntas com argamassa.

Fonte: Coutinho (2011).

A fim de caracterizar fisicamente o material de preenchimento dos blocos de concreto e do solo do subleito natural do pavimento foram realizadas análises granulométricas, com a utilização de ensaios de peneiramento para fração grossa e sedimentação para determinação dos percentuais

de argila e silte. O subleito foi investigado ao longo de 1m, com determinações das texturas a cada 10cm (COUTINHO, 2011).

A classificação da textura de acordo com EMBRAPA (2006), a massa específica do solo e as massas específicas das partículas para as profundidades de 0 a 100 centímetros dos solos do subleito e da camada de revestimento do pavimento estão representados na Tabela 3. Os resultados da composição granulométrica aprestaram a predominância de areia, com percentuais acima de 70%, sobretudo entre 30 e 40 cm de profundidade no subleito natural. Além disso, foi verificado um baixo percentual de argila e silte (COUTINHO, 2011).

Tabela 3 - Classificação da textura, massa específica do solo, massa específica das partículas do solo e porosidade teórica para os solos do revestimento e subleito do pavimento permeável.

Profundidade (cm)	Classificação Textural	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	$\rho_p(\text{g/cm}^3)$	$\eta(\%)$
Revestimento	Areia franca	1,1	2,66	58,64
0 – 10	Areia franca	1,33	2,64	49,62
10 -20	Areia franca	1,48	2,68	44,78
20-30	Areia franca	1,46	2,62	44,27
30-40	Areia franca	1,4	2,64	46,97
40-50	Franco arenoso	1,35	2,58	47,67
50-60	Areia franca	1,4	2,64	46,97
60-70	Areia franca	1,7	2,6	34,62
70-80	Areia franca	1,58	2,675	40,93
80-90	Areia franca	1,47	2,61	43,60
90-100	Areia franca	1,55	2,60	40,38

Fonte: Coutinho (2011).

5.2.3 Propriedades hidráulicas do subleito do pavimento piloto

Utilizando os dados da Tabela 3 como entrada no Hydrus 1D, Coutinho (2011) obteve as características hidrodinâmica para o subleito heterogêneo (Tabela 4).

Para melhor compreensão da interação do pavimento com o solo suporte, neste trabalho optou-se por utilizar os parâmetros hidrodinâmicos determinados por Coutinho (2011) como dados de

entrada nas modelagens numéricas dos processos de transferência de água com o uso do Hydrus 1D para hipótese de configuração do subleito heterogêneo. Para as demais camadas constituintes do PP e para caracterização do subleito na configuração homogênea foram adotados os parâmetros hidráulicos apresentados na Tabela 5. Os valores utilizados para o subleito homogêneo são as médias das características hidrodinâmicas encontradas nos 100cm de profundidade.

Tabela 4. Propriedades hidrodinâmicas do solo heterogêneo estimadas pelo Hydrus 1-D a partir do software Rosetta.

Profundidade (cm)	θ_r	θ_s	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	N	$K_s(\text{cm/dia})$
0 – 10	0, 0545	0, 5305	0, 0304	1, 4084	227,82
10 -20	0, 0537	0, 5243	0, 0271	1, 4032	219,31
20-30	0, 0524	0, 5295	0, 0323	1, 4147	241,98
30-40	0, 0532	0, 5408	0, 0404	1, 4901	283,42
40-50	0, 0584	0, 5292	0, 0254	1, 4007	197,96
50-60	0, 0539	0, 5264	0, 0282	1, 4042	222,2
60-70	0, 0518	0, 525	0, 0299	1, 4073	235,48
70-80	0, 0518	0, 5355	0, 038	1, 4527	270,49
80-90	0, 0542	0, 5386	0, 0369	1, 4485	257,38
90-100	0, 0518	0, 5251	0, 03	1, 4074	235,60
Média	0,05357	0,53049	0,03	1, 42372	239, 164
Des. Pad.	0, 00198944	0, 00591	0, 00498	0, 0299	25, 4173013

Fonte: Coutinho (2011).

Tabela 5. Parâmetros Hidráulicos das camadas do pavimento permeável.

Camada	θ_r	θ_s	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	N	$K_s(\text{cm/dia})$
Revestimento	0,081	0,555	0,0441	1,5261	314,36
Areia	0,0508	0,5442	0,05764	2,4905	314,36
Brita	0,0339	0,43	0,0362	5,423	314,36
Areia	0,0508	0,5442	0,05764	2,4905	314,36
Solo natural	0,05357	0,53049	0,03	1,42472	77,68

Fonte: Coutinho (2011).

5.2.4 Ensaios de infiltração

Para caracterizar o comportamento hidráulico e hidrológico do pavimento permeável, Coutinho (2011) realizou ensaios de infiltração e coletou amostras de solo no PP segundo uma malha retangular de 1,0m x 0,7m, totalizando 52 pontos.

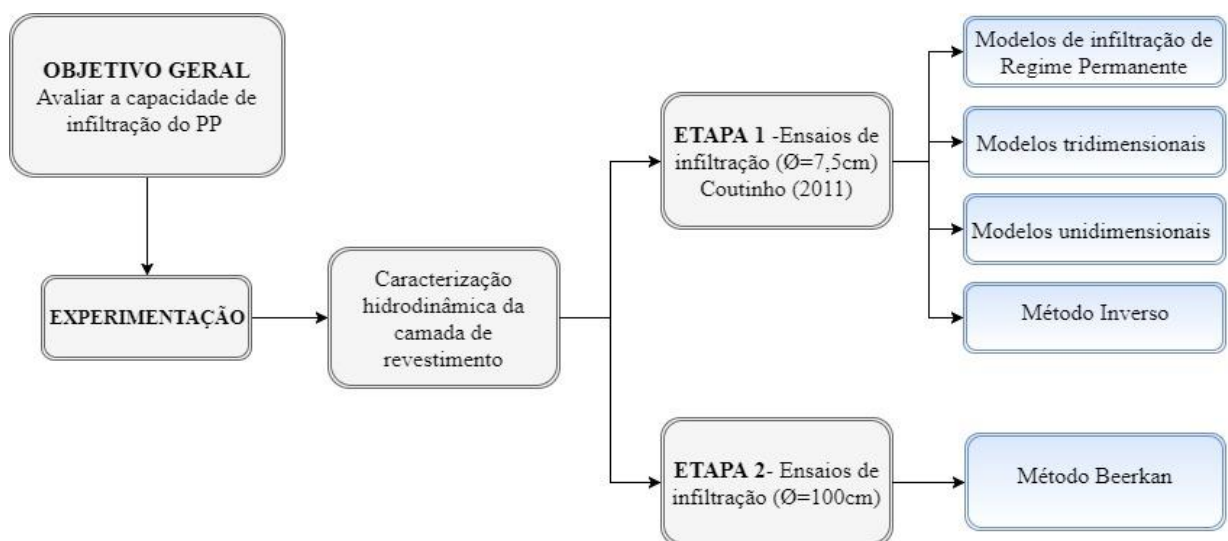
Os ensaios de infiltração foram realizados de acordo com a metodologia do Beerkan (LASSABATERE *et al.*, 2006), utilizando um infiltrômetro de anel simples de 75mm de diâmetro. Os volumes de água utilizados nos experimentos foram fixados em 50cm³. Para cada ponto, os procedimentos de ensaio seguiram até o estado estacionário ser atingido.

Para cada ponto, duas amostras se fizeram necessárias: uma antes da realização do experimento, para determinação da condição de umidade inicial; outra após o término do experimento, para determinar o teor de umidade final, a distribuição do tamanho das partículas e a densidade aparente.

5.3 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS DA PESQUISA PARA RESPONDER AOS OBJETIVOS

O fluxograma da Figura 23 apresenta as principais etapas realizadas durante o desenvolvimento desta pesquisa para obtenção dos resultados e discussões necessárias às respostas dos objetivos propostos.

Figura 23. Fluxograma da organização dos dados da pesquisa para responder aos objetivos.



5.3.1 Experimentação - Etapa 1

5.3.1.1 Modelos de infiltração para caracterização hidrodinâmica da camada de revestimento

Para a caracterização hidrodinâmica e avaliação da capacidade de infiltração do revestimento do pavimento foram utilizados os dados brutos oriundos dos cinquenta e dois ensaios de infiltração obtidos com a aplicação da metodologia Beerkan no sítio experimental existente no estacionamento do CTG (COUTINHO 2011). A determinação dos parâmetros hidráulicos de condutividade hidráulica saturada (K_s), sorvidade (S), entre outros, foi realizada através de modelos empíricos, analíticos e numéricos consolidados pela literatura técnica para verificação da aplicabilidade dos métodos a um dispositivo permeável em funcionamento, avaliação e comparação dos resultados por diferentes modelos, avaliação dos ajustes dos modelos aos dados experimentais e avaliação qualitativa da capacidade de drenagem do pavimento.

As Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8 apresentam as equações e os parâmetros determinados, respectivamente, para os modelos de infiltração de regime permanente, modelo de infiltração tridimensional para solução completa da curva de infiltração e modelos de infiltração unidimensionais para solução completa da curva de infiltração.

Tabela 6 - Modelos de Infiltração de regime permanente

Modelo de Infiltração de regime permanente	Equação	Parâmetros
	$I = i \cdot t + c = af \cdot K_s \cdot t + c$	Eq. 29
Wu 2 (1999)	$f = \frac{H + \left(\frac{1}{\alpha}\right)}{G^*}$	Eq. 30 K_{fs} (mm/h)
	$K_s = \frac{i}{af}$	Eq. 31
Bagarello (2013)	$K_{fs} = \frac{b1}{0,467 \cdot \left(\frac{2,92}{r \cdot \alpha^*} + 1\right)}$	Eq. 32 K_{fs} (mm/h)
	$\alpha^* = 0,0262 + 0,0035 \cdot \ln(b1)$	Eq. 33 α^* (cm ⁻¹)

Tabela 7 - Modelo de infiltração tridimensional para solução completa da curva de infiltração.

Modelos de Infiltração tridimensionais para solução completa/ regime transitório da curva de infiltração	Equação	Parâmetros
	$I = At + Bt^{0.5}$	Eq. 34
	$K = \frac{\Delta\theta \cdot [\sqrt{(H + G^*)^2 + 4G^*C} - (H + G^*)]}{2T_c}$	Eq. 35
	$G^* = d + \frac{r}{2}$	Eq. 36
Wu (1999)		K_{fs} (mm/h)
	$C = \frac{1}{4\Delta\theta} \cdot \left(\frac{B}{b}\right)^2 \cdot \frac{a}{A}$	Eq. 37
	$T_c = \frac{1}{4} \left(\frac{Ba}{bA}\right)^2 ;$	Eq. 38
		ϕ'_m (mm ² /s)
	$\alpha = \frac{K_s}{\phi_m} \approx \frac{K_s}{\phi'_m} = \lambda c^{-1}$	Eq. 39
	$\phi'_m = \frac{K_s^2 \cdot T_c}{\Delta\theta}$	Eq. 40

Para os cinco métodos de infiltração unidimensionais clássicos: Philip (1957), Stroosnijder (1976), Knight (1974), Brutsaert (1977) e Swartzendruber (1987); tendo em vista que os ensaios realizados no pavimento permeável utilizaram o infiltrômetro de anel simples cujo fenômeno da infiltração ocorre tridimensionalmente, para cada modelo unidimensional foi acrescida uma parcela para que o efeito de dispersão lateral da lâmina infiltrada fosse considerada na estimativa dos parâmetros.

A infiltração tridimensional foi devidamente modelada através da seguinte equação matemática:

$$I_{3D} = \text{Modelo unidimensional} + \frac{\gamma \cdot S^2}{r \cdot \Delta\theta} \quad \text{Eq. 41}$$

Onde S é a sorvidade do solo [L.T^{-1/2}], r o raio do infiltrômetro [L], $\Delta\theta$ é a variação da umidade volumétrica inicial e saturada [L³. L⁻³] e γ é uma constante, teoricamente igual à raiz quadrada

de 0,3 quando se desprezam os efeitos da gravidade; normalmente adotado como 0,75 (SMETTEM *et al.*, 1994).

Tabela 8 - Modelos de infiltração unidimensionais para solução completa da curva infiltração.

Modelos de Infiltração unidimensionais (dois ou três parâmetros) para solução completa da curva de infiltração	Equação	Parâmetros
Philip (1957)	$i = A \cdot t + S \cdot t^{0,5}$	Eq. 42 K_s (mm/h) S (mm/s ^{1/2})
The “Knight” soil, Philip (1974)	$i = K_s \cdot t + \frac{\pi S^2}{4K_s} \cdot \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{4K_s^2 \cdot t}{\pi S^2}\right)^{0,5} \right]$	Eq. 43 K_s (mm/h) S (mm/s ^{1/2})
Stroosnijder (1976)	$i = K_s \cdot t + \frac{3S^2}{4K_s} \cdot \left[-\exp\left(\frac{-4 \cdot K_s \cdot t^{0,5}}{3S}\right) \right]$	Eq. 44 K_s (mm/h) S (mm/s ^{1/2})
Brutsaert (1977)	$i = K_s \cdot t + \frac{S^2}{\beta \cdot K_s} \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + \beta \cdot K_s \sqrt{t}/S} \right]$	Eq. 45 K_s (mm/h) S (mm/s ^{1/2}) β
Swartzendruber (1987)	$i = K_s \cdot t + \frac{S}{\alpha} \cdot [1 - \exp(-\alpha \cdot t^{0,5})]$	Eq. 46 K_s (mm/h) S (mm/s ^{1/2}) α

Para determinação dos parâmetros K_s , S , α e β , por cada um dos modelos, foi utilizada a metodologia de otimização de uma função matemática, buscando-se determinar a solução mínima do problema descrito pela seguinte função objetivo:

$$F(v) = \sum_{i=1}^N [I_{(ti)} - \hat{I}_{(ti,v)}]^2 \quad \text{Eq. 47}$$

Sendo $I_{(ti)}$ o conjunto de valores medidos em tempos específicos t_i ($i = 1, 2, \dots, N$), correspondente à lâmina acumulada dos ensaios de infiltração; $\hat{I}_{(ti, v)}$ o conjunto de valores calculados pelo modelo com a otimização de um vetor de valores dos parâmetros $v = \{K_s, S, \alpha, \beta\}$, correspondente à lâmina acumulada calculada pelo modelo de infiltração corrente.

Os parâmetros de cada equação foram obtidos a partir da otimização da função objetivo com auxílio da ferramenta Solver de uma planilha eletrônica.

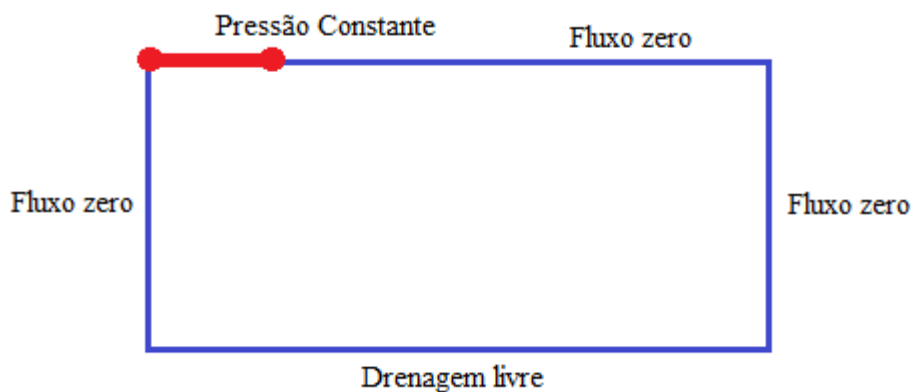
5.3.1.2 O método inverso para caracterização hidrodinâmica da camada de revestimento

O método inverso permite a obtenção dos parâmetros hidráulicos a partir da inversão numérica da equação de Richards (ANTONINO *et al.*, 2004). Nele os parâmetros das curvas $h(\theta)$ e $K(\theta)$ são determinados de forma otimizada, considerando como critério à minimização de uma função-objetivo.

A função objetivo tem a forma apresentada na Eq. 47 e possui como característica principal a representação dos desvios entre as variáveis medidas e calculadas no espaço-tempo. Cujas diferenças reside apenas no conjunto de valores calculados pelo modelo com a otimização de um vetor de valores dos parâmetros próprios dos resultados do método inverso $v = \{K_s, \alpha, n, c\}$.

O modelo bidimensional foi discretizado em elementos triangulares de aresta 5cm, formando uma estrutura numérica com 5722 nós, 240 elementos 1D, 11202 elementos 2D. Na Figura 24 é apresentado um esquema das condições de contorno utilizados no modelo.

Figura 24 Condições de contorno do modelo inserido no software Hydrus



5.3.2 Experimentação - Etapa 2

5.3.2.1 Ensaios de infiltração com infiltrômetro de 1m de diâmetro

Os ensaios experimentais de infiltração são bastante utilizados como forma simples e rápida de inferir a respeito da viabilidade de implantação de dispositivos de infiltração, bem como para obtenção dos parâmetros de dimensionamento dos mesmos ou da necessidade de manutenção e o desempenho hidráulico do dispositivo (DESCHENES *et al.*, 2004).

O infiltrômetro de anel simples consiste de um cilindro de metal de raio conhecido que é cravado no solo ou posicionado sob o dispositivo a ser ensaiado. Em seu interior são adicionados volumes conhecidos de água continuamente à medida que a lâmina interna desapareça. O tempo acumulado para infiltração total de cada adição volumétrica é anotado por quantas vezes forem necessárias, até que a relação entre o volume de água infiltrado e o tempo seja uma constante, indicativo que o regime permanente foi atingido (LIBARDI, 2005).

O infiltrômetro de anel simples fornece uma infiltração tridimensional, para esses casos as informações hidráulicas são obtidas a partir de modelos como o Beerkan (LASSABATÈRE *et al.*, 2006), Bagarello (BAGARELLO *et al.*, 2013) e Wu 2 (WU *et al.*, 1999).

Configuração experimental

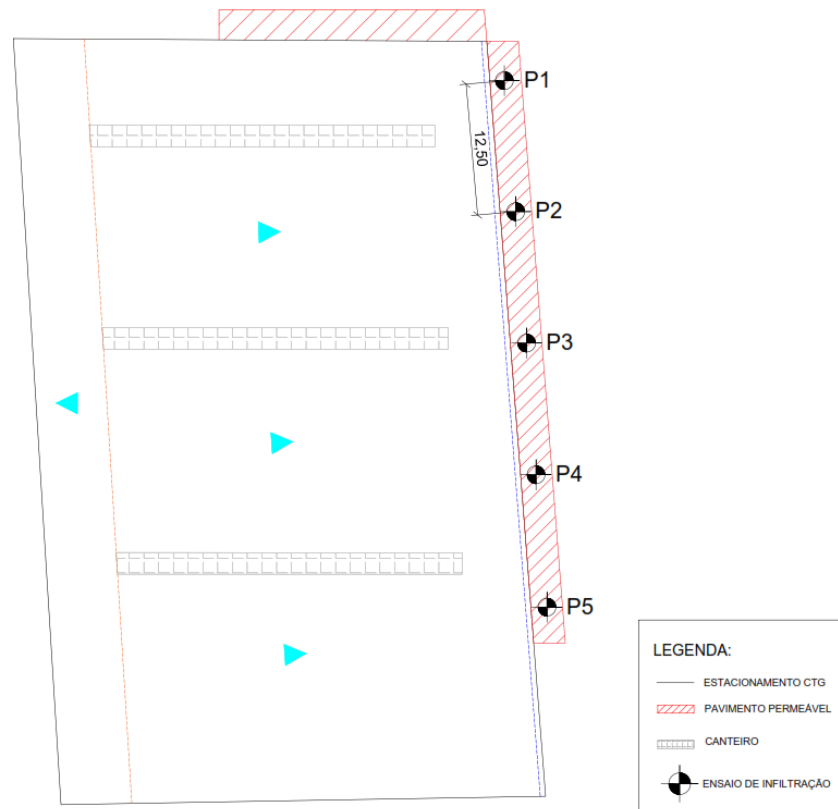
Para este trabalho, foi realizada, no dia 07/10/2016, a campanha de ensaios de infiltração com infiltrômetro de anel grande (100 cm de diâmetro) locados conforme Figura 25.

Optou-se por utilizar o anel de diâmetro grande, a fim de avaliar o desempenho do pavimento em escala real, isto é, verificando o comportamento e a capacidade de drenagem do pavimento numa representação mais fiel de funcionamento do sistema. O anel foi posicionado sobre o revestimento, abrangendo cerca de oito blocos por vez, possibilitando analisar e obter as propriedades hidráulicas do conjunto (Figura 26a). A fim de evitar perdas laterais, usou-se bentonita na fixação do anel ao pavimento para garantir a estanqueidade no experimento. Para cada ponto ensaiado foram necessárias, em média, de 6 a 10 adições de cargas hidráulicas antes de atingir o regime estacionário (Figura 26b).

Na utilização do método Beerkan são necessárias determinações conjuntas da distribuição do tamanho das partículas, das umidades inicial e final e da massa específica do solo. No final de cada ensaio, uma amostra deformada de solo foi coletada dentro do perímetro do anel para se obter a umidade gravimétrica final. Outra amostra indeformada do solo úmido foi coletada, utilizando um cilindro de volume conhecido para a determinação da massa específica do solo (SOUZA, 2005).

O tratamento dos dados de medições em campo forneceu as curvas experimentais da infiltração acumulada em função do tempo.

Figura 25 - Croqui de locação dos ensaios de infiltração – Estacionamento do CTG/UFPE.



Fonte: Autor.

Figura 26 - Ensaios de infiltração com infiltrômetro de anel simples – Estacionamento CTG/UFPE.



a) Fixação do infiltrômetro com bentonita b) Adição do volume constante de água

Fonte: Autor.

5.3.2.2 Método Beerkan

O método Beerkan, dentre os experimentais, destaca-se pela eficiência, baixo custo e, sobretudo, devido a sua aplicação ser simples e rápida. Além disso, este método traz a proposta de melhorar as perspectivas nas análises de variabilidade espacial das propriedades hidráulicas dos solos, a partir das quantidades e qualidades nas estimativas das propriedades hidráulicas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ (SOUZA, 2005).

Para obter as características hidráulicas, curvas de retenção da água e curvas de condutividade hidráulica, foi utilizado neste trabalho o método BEST em duas variações: Slope e Intercept.

O modelo de Haverkamp *et al.* (1994) é utilizado para representar matematicamente o fenômeno da infiltração. $\theta(h)$ e $K(\theta)$ são descritas, respectivamente, pelos modelos de Van Genuchten (1980) e de Brooks & Corey (1964), como:

$$\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right) = \left[1 + \left(\frac{h}{hg}\right)^n\right]^m \quad \text{Eq. 48}$$

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

$$K(\theta) = K_s \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta \quad \text{Eq. 49}$$

Sendo θ a umidade volumétrica, θ_s a umidade volumétrica saturada, h o potencial matricial, hg é o valor crítico de dessaturação de h , conhecido como potencial de entrada de ar; n e m são os parâmetros de forma, K_s a condutividade hidráulica saturada do solo e η o parâmetros de forma para a curva de condutividade hidráulica.

Para obter os cinco parâmetros desconhecidos presentes nas equações (m , n ou η , θ_s , K_s , hg), o método se vale das propriedades texturais e estruturais do solo. 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)

Haverkamp & 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 $\theta(h)$. A equação de $F(D)$ pode ser escrita como abaixo:

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M} \quad \text{Eq. 50}$$

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

Sendo D o diâmetro efetivo da partícula, D_g o parâmetro de escala do tamanho das partículas, e M e N os parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas. Os parâmetros M , N e D_g são obtidos pelo ajuste da Eq. 50 aos dados experimentais granulométricos.

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

$$Pm = \frac{MN}{1 + M} \cdot (1 + k)^{-1} \quad \text{Eq. 51}$$

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

$$k = \frac{2s - 1}{2s(1 - s)} \quad \text{Eq. 52}$$

Sendo s a dimensão fractal.

b) Parâmetros de normalização (θ_s , K_s , hg)

As umidades volumétricas, inicial (θ_0) e na saturação (θ_s), são 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 , hg) são obtidos por intermédio da minimização de $I(S, K_s)$, ou seja, otimização dos quadrados das diferenças entre lâminas de água infiltrada observadas e calculadas. A lâmina de água infiltrada é calculada pela equação proposta por Haverkamp *et al.* (1994), válida para períodos de tempo curtos e médios.

$$I(S, K_s) = \sum_{i=1}^{Nobs} (I_i - (S \cdot \sqrt{t_i} + a \cdot S^2 \cdot t_i + b_2 \cdot K_s \cdot t_i))^2 \quad \text{Eq. 53}$$

Com:

$$a = \frac{\gamma}{r\Delta\theta} \quad b_2 = \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} \cdot \left(1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta\right) \quad \text{Eq. 54}$$

Sendo: S a sorvidade, r o raio do cilindro, γ pode ser considerado igual a 0,75 e β igual a 0,6.

5.4 ANÁLISE QUALITATIVA DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS

A condutividade hidráulica saturada obtida por cada um dos métodos utilizados neste trabalho foi classificada qualitativamente através de até três critérios: classe hidrológica, grau de permeabilidade e indicador de permeabilidade.

5.4.1 Classificação hidrológica do pavimento permeável

O uso e ocupação do solo, bem como a seu tipo, formação e constituição influenciam consideravelmente na geração do escoamento superficial, sobretudo na previsão de comportamentos futuros. Nesse contexto, se fundamenta a necessidade de classificação do solo quanto ao seu potencial de hidrológico.

A metodologia do *Soil Conservation Service* (SCS), desenvolvido pelo *United States Department of Agriculture* (USDA), agrupa os solos em quatro grandes classes distintas do ponto de vista hidrológico quanto à capacidade de infiltração e geração de escoamento superficial. A identificação dos tipos de solo em função da condutividade hidráulica saturada e suas características são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9. 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 profundo do 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).

5.4.1.1 Grau de permeabilidade

Terzaghi e Peck (1967) *apud* Lambe e Whitman (1979) propuseram a classificação dos solos em grupos através da correlação entre a condutividade hidráulica e o seu grau de permeabilidade conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10. 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 e Peck (1967) *apud* Lambe e Whitman (1979).

5.4.1.2 Indicador de hidrodinâmico de manutenção

Com o objetivo de analisar pavimento permeável como um todo e verificar seu desempenho e necessidade de manutenção/restauração, calculou-se o indicador hidrodinâmico de manutenção (IHM). O IHM consiste em uma condutividade hidráulica calculada por média ponderada entre as condutividades hidráulicas obtidas através do modelo unidimensional e tridimensional e as lâminas infiltradas, conforme a equação a seguir:

$$IHM = \frac{K_{1D} \cdot L_{1D} + K_{3D} \cdot L_{3D}}{L_{1D} + L_{3D}} \quad \text{Eq. 55}$$

Onde:

IHM é o indicador hidrodinâmico de manutenção (mm/h);

K_{1D} é a condutividade hidráulica obtida no modelo unidimensional (mm/h);

K_{3D} é a condutividade hidráulica obtida no modelo tridimensional (mm/h);

L_{1D} é a lâmina infiltrada estimada obtida no modelo unidimensional (mm);

L_{3D} é a lâmina infiltrada estimada obtida no modelo tridimensional (mm);

Para facilitar a tomada de decisão da necessidade de intervenção da superfície permeável avaliada, utilizou-se o conceito de grau de permeabilidade e suas faixas de condutividade hidráulica saturada para comparação do IHM e a sugestão das ações de manutenção/recuperação para o PP, conforme a Tabela 11.

Tabela 11. Manutenção sugerida pelo resultado do IHM.

IHM (mm/h)	EXIGÊNCIA DE INTERVENÇÃO
3600,00	Desobstruído, sem necessidade de manutenção num futuro próximo
36,00	Medianamente obstruído, necessário planejamento de manutenção a curto prazo (1 a 3 anos)
0,3600	Parcialmente obstruído, necessidade de manutenção imediata
<0,0036	Totalmente obstruído, necessária intervenção de recuperação estrutural do sistema

Fonte: Autor.

5.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA QUALIDADE DOS AJUSTES

5.5.1 Estatística Descritiva dos parâmetros dos modelos de infiltração

5.5.1.1 Medidas de Assimetria

Denomina-se assimetria o grau de afastamento de uma distribuição de sua unidade de simetria. A fim de verificar a assimetria de uma distribuição aplica-se a diferença entre sua média e a moda, classificando-a da seguinte maneira:

- $Méd(x) - Mo(x) = 0$, Distribuição simétrica.
- $Méd(x) - Mo(x) > 0$, Distribuição assimétrica positiva.
- $Méd(x) - Mo(x) < 0$, Distribuição assimétrica negativa.

Complementarmente, ainda é possível quantificar a assimetria calculando-se o coeficiente de Pearson (AS):

$$AS = \frac{3 \cdot (\mu - Md)}{\sigma} \quad \text{Eq. 56}$$

Sendo μ a média da distribuição, Md a mediana e σ o desvio padrão da amostra.

O coeficiente de Pearson classifica a assimetria em:

- $|AS| < 0,15$, Distribuição simétrica.
- $0,15 \leq |AS| < 1$, Distribuição assimétrica moderada.
- $|AS| \geq 1$, Distribuição assimétrica forte.

5.5.2 Critérios estatísticos para análise da qualidade dos ajustes

Para cada um dos métodos de cálculo para determinação dos parâmetros hidráulicos foram obtidos coeficientes e critérios estatísticos a fim de determinar a qualidade dos ajustes aos modelos. O coeficiente de determinação (R^2) é uma forma de avaliar a variância entre os valores observados e os valores calculados que pode variar de 0 a 1. Quanto mais próximo a 1, melhor o modelo consegue explicar os dados coletados.

A razão de desvios (RD) é um coeficiente que descreve a razão entre a dispersão dos valores observados e os calculados teoricamente, também garantindo o melhor desempenho quando se

aproxima de 1. A eficiência de modelagem (EM) indica se o modelo fornece uma estimativa melhor que o valor médio dos dados experimentais, cujo valor ótimo é 1.

O coeficiente de massa residual (CMR) tende a zero quando na ausência de desvios sistemáticos entre valores observados e calculados, indicando se há superestimação (CMR>0) ou subestimação (CMR<0) dos valores estimados pelas distribuições teóricas de probabilidade. As equações para o cálculo dos coeficientes R², RD, EM e CMR são, respectivamente, descritas abaixo.

$$R^2 = \frac{[n \cdot (\sum Mi \cdot Ti) - \sum Mi \cdot \sum Ti]^2}{n \cdot [\sum Ti^2 - (\sum Ti)^2] \cdot [n \cdot \sum Mi^2 - (\sum Mi)^2]} \quad \text{Eq. 57}$$

$$RD = \frac{\sum (Mi - M')^2}{\sum (Ti - M')^2} \quad \text{Eq. 58}$$

$$EM = \frac{\sum (Mi - M')^2 - \sum (Ti - Mi)^2}{\sum (Mi - M')^2} \quad \text{Eq. 59}$$

$$CMR = \frac{\sum Mi - \sum Ti}{\sum Mi} \quad \text{Eq. 60}$$

Ti são valores calculados pelo modelo, Mi os valores experimentais, M' a média dos valores experimentais e N o número de determinações.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

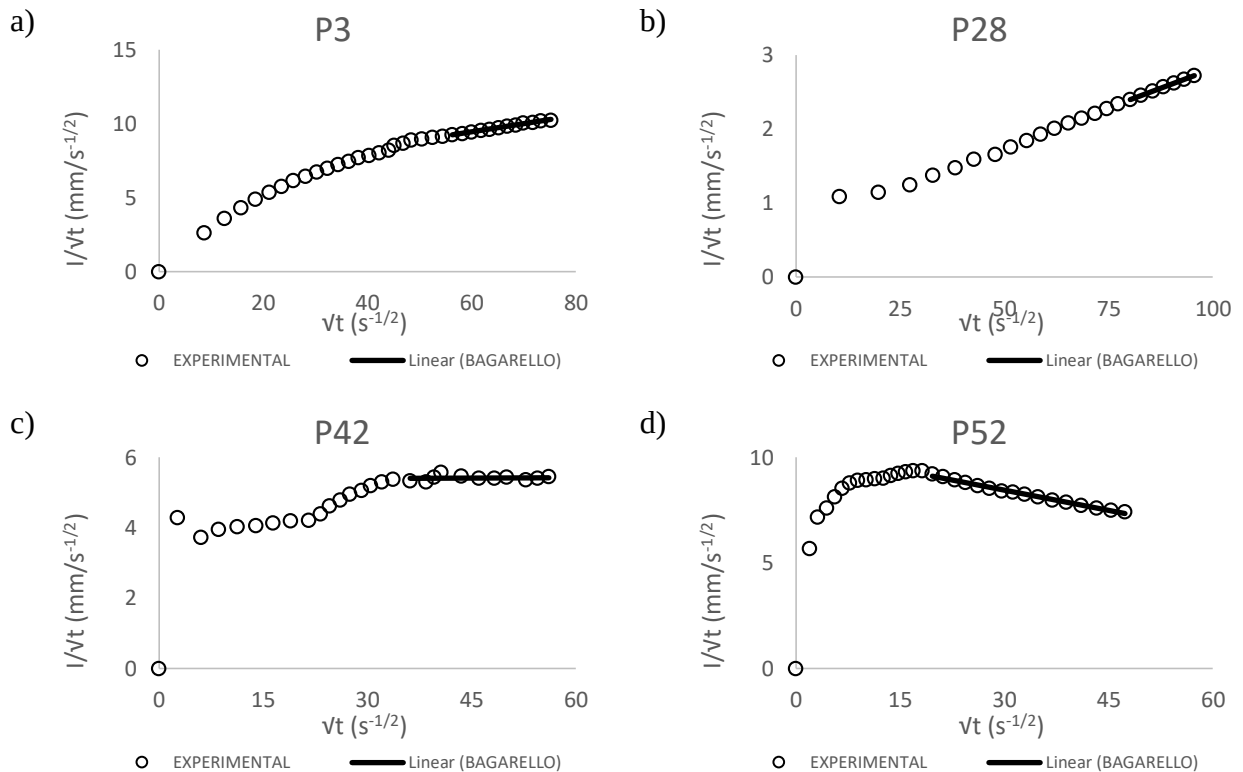
6.2 MODELOS DE INFILTRAÇÃO DE REGIME PERMANENTE

6.2.1 Método Bagarello (2013)

Para os 52 pontos ensaiados experimentalmente foram obtidas as curvas de infiltração acumulada x tempo, linearizadas através de regressão dos dados ($I/\sqrt{t}$ x $\sqrt{t}$). O regime permanente foi identificado pela variação constante, determinada como a parte horizontal da curva de taxa de infiltração, permitindo o ajuste linear e a utilização da metodologia para estimativa adequada de K_s e α^* .

Os casos mais comuns dos ajustes ao método Bagarello (2013) são apresentados na Figura 27, incluindo aqueles cuja metodologia não foi passível de aplicação.

Figura 27 - Curvas de infiltração x tempo com ajuste pelo método Bagarello (2013).



Os gráficos apresentados na Figura 27a e Figura 27b, pontos P3 e P28, respectivamente, apresentam bons ajustes ao modelo utilizado, com definição clara da fase de regime permanente. Enquanto que em alguns casos, como o retratado pela Figura 27c, o ajuste dos dados experimentais ao regime permanente de Bagarello é pouco representativo, o que pode ser do

próprio comportamento dos dados de infiltração coletados durante o ensaio de campo, muitas vezes interrompidos precipitadamente, isto é, antes da real saturação do solo ensaiado. Foram observados ainda ensaios cuja curva obtida apresentou coeficiente angular negativo, indicando que o mesmo não foi longo o suficiente para atingir o regime permanente. Para esses casos, não foi possível obter os parâmetros de caracterização hidráulica do solo (Figura 27d).

O resumo estatístico dos parâmetros obtidos pela metodologia de Bagarello (2013) é apresentado na Tabela 12 **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 12 - Resumo estatístico dos parâmetros hidráulicos obtidos pelo modelo em regime permanente de Bagarello (2013).

Estatística	K_s (mm/h)	α^* (cm⁻¹)
Mínimo	0.249	0.024
Máximo	202.807	0.191
Média	45.002	0.131
Desvio Padrão	40.709	0.039
CV	0.905	0.296

A análise estatística dos resultados de K_s apresenta valor médio de 45,002 mm/h e alta dispersão (σ =40,709 mm/h), com uma distribuição assimétrica positiva moderada, com coeficiente de Pearson de 0,9. O coeficiente de correlação (R²) de 0,9 indica que os desvios atingem, em relação à média, 90% do valor desta. A assimetria pode ser observada no gráfico da Figura 29, de amplitude moderada e, cujos "outliers" superestimam os valores de condutividade hidráulica.

O parâmetro α^* apresentou pouca dispersão dos valores obtidos, com média e desvio padrão, respectivamente, de 0,131 cm⁻¹ e 0,039 cm⁻¹.

Os resultados de K_s variaram entre 0,249 mm/h a 202,807 mm/h para os pontos ensaiados, apresentando alta variabilidade de condutividade hidráulica saturada, ainda que a classificação hidrológica do solo seja prioritariamente a mesma de acordo com a metodologias de classificação hidrológica. O revestimento ensaiado foi classificado majoritariamente (81,25%) como "classe A", caracterizado por gerar baixo escoamento superficial e alta capacidade de infiltração. Na classificação quanto ao GP, pouco mais de 40% do PP foi avaliado com GP "médio", enquanto que cerca de 56% com GP < 0,36 mm/h classificado como "Baixo" (Tabela 13).

Tabela 13 – Resumo da classificação hidrológica do revestimento pelo modelo em regime permanente de Bagarello (2013).

SCS			GP		
Critério	Qtde.	%	Critério	Qtde.	%
Classe A	39	81,25	Alto	0	0,00
Classe B	4	8,33	Médio	20	41,67
Classe C	0	0,00	Baixo	27	56,25
Classe D	5	10,42	Muito Baixo	1	2,08
			P. Impermeável	0	0,00

Não foi possível a obtenção dos parâmetros K_s e α^* para os ensaios alocados nos pontos P9, P43, P44 e P52, em virtude das curvas linearizadas de infiltração apresentarem inclinações negativas, indicando possíveis erros humanos na execução/leitura dos ensaios ou, ainda que os ensaios de infiltração foram interrompidos antes de adentrarem na fase de regime permanente. Para obtenção das percentagens de classificação hidrológica só foram utilizados os ensaios com resultados válidos.

6.2.2 Método Wu 2 (1999)

A metodologia Wu 2 (1999) assume que durante o ensaio de infiltração o estado permanente é normalmente atingido, permitindo a obtenção da condutividade hidráulica saturada pelo ajuste da parte final da curva de infiltração acumulada $\times$ tempo, através da equação linear Eq. 29.

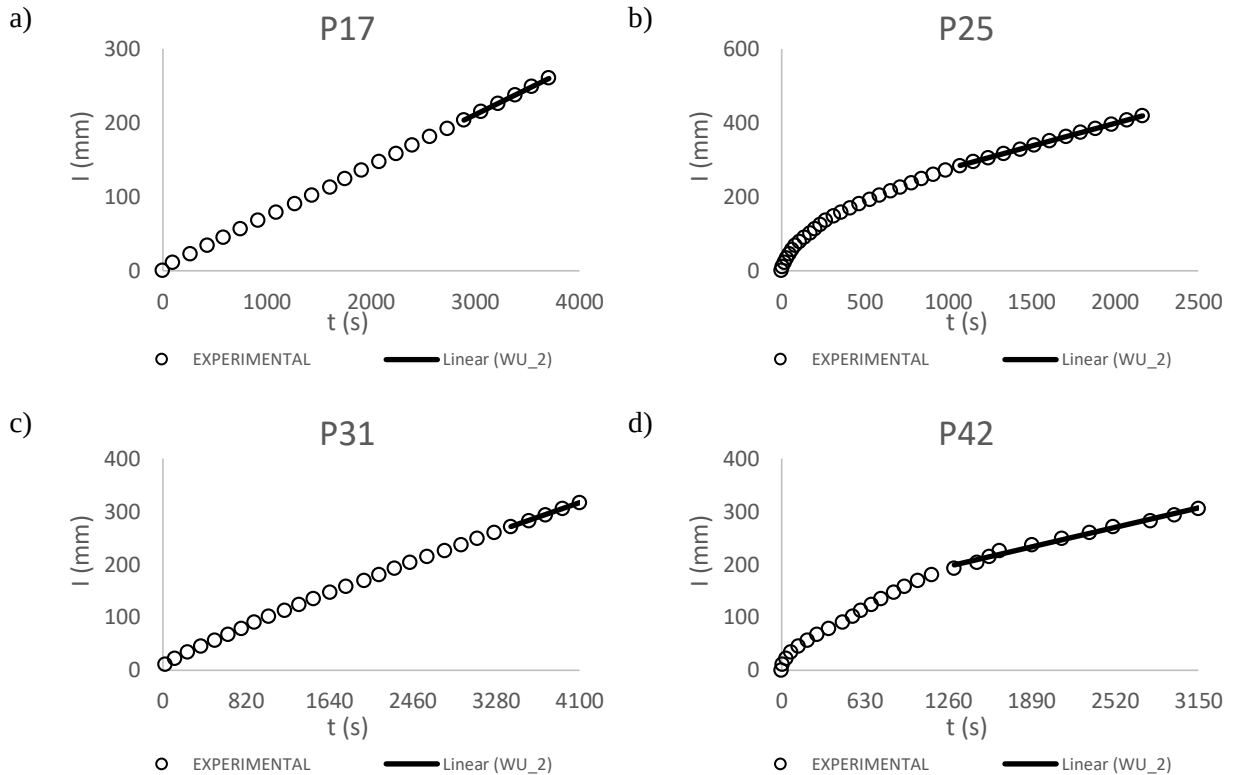
Para o uso desse modelo tridimensional de infiltração foram adotados os valores de α obtidos pelo método Wu (1999) para cada um dos pontos ensaiados. O parâmetro α é um fator que depende da textura do solo, e, Wu *et al.* (1999) recomendam adotar valores com a ordem de grandeza de $\alpha = 0,36 \text{ cm}^{-1}$ para areias, $\alpha = 0,12 \text{ cm}^{-1}$ para material franco arenoso e $\alpha = 0,04 \text{ cm}^{-1}$ para solos argilosos.

Para os 52 pontos ensaiados experimentalmente, após o ajuste linear, o regime permanente foi identificado por variação constante, permitindo a utilização da metodologia e a estimativa adequada de K_s . O início do regime permanente de cada ensaio foi considerado igual para utilização dos dois modelos tridimensionais, Bagarello e Wu2.

Para aqueles pontos cujo parâmetro α não foi obtido pela metodologia de Wu, adotou-se o valor tabelado de α para solos franco arenosos, em virtude de ser o valor α mais próximo dos calculados por Wu (1999), isto é, utilizou-se $\alpha = 0,12 \text{ cm}^{-1}$.

Os casos-comuns dos ensaios aos ajustes com o método Wu2 (1999) são apresentados na Figura 28.

Figura 28 - Curvas de infiltração x tempo ajustadas pelo método Wu 2 (1999).



A metodologia Wu 2 apresentou excelentes ajustes às curvas de infiltração acumulada x tempo para praticamente todos os pontos ensaiados. Ainda assim, é possível perceber ajustes ruins como o exemplificado na Figura 28d, cujo início do regime permanente não está bem definido, o que possivelmente está atrelado ao ensaio ter sido interrompido antes de se atingir o estado permanente ou a erros de leitura/execução durante a realização do ensaio.

O resumo estatístico dos parâmetros obtidos pela metodologia de Wu 2 (1999), inclusive o coeficiente α utilizado (obtido por Wu ou adotado), é apresentado na Tabela 14 **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

A análise estatística dos resultados de K_s apresentou valor médio de 43,847 mm/h e uma distribuição assimétrica positiva forte, indicando um $AS > 1,0$. A assimetria pode ser observada no gráfico da Figura 29, cujos "outliers" são majoritariamente compostos de valores que superestimam a condutividade hidráulica saturada. A análise dos resultados de K_s apresentou

valores entre 0,429 mm/h e 382,461 mm/h, e desvio padrão de 68,44 mm/h. O CV ratifica a heterogeneidade da amostra, indicando que o desvio supera em mais de 150% a condutividade hidráulica média.

Tabela 14 - Estatística do parâmetro hidráulico estimadas pelo modelo de Wu 2 (1999).

Estatística	K_s (mm/h)	α (cm⁻¹)*
Mínimo	0,429	0,003
Máximo	382,461	1,150
Média	44,798	0,125
Desvio Padrão	68,096	0,236
CV	1,520	1,884

Essa condição de variabilidade dos resultados pode ser decorrente dos parâmetros α utilizados, os quais foram obtidos dos produtos resultantes da metodologia Wu (1999) da infiltração tridimensional para solução completa (regime transitório da curva de infiltração) ou adotados por valores sugeridos na literatura técnica clássica, quando necessário.

A classificação do revestimento pela metodologia da SCS foi essencialmente a mesma, solo “classe A”, em virtude de a condutividade hidráulica saturada do solo ser superior a 7,6 mm/h. Na classificação pelo GP, 65,3% dos ensaios foram atribuídos o conceito “Baixo” para permeabilidade do PP, indicando a possível necessidade de intervenções para reestabelecimento das condições de infiltração do sistema. A classificação percentual dos resultados é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 – Resumo da classificação hidrológica do revestimento pelo modelo em regime permanente de Wu 2 (1999).

SCS			GP		
Critério	Qtde.	%	Critério	Qtde.	%
Classe A	39	79,59	Alto	0	0,00
Classe B	6	12,24	Médio	17	34,69
Classe C	3	6,12	Baixo	32	65,31
Classe D	1	2,04	Muito Baixo	0	0,00
			P. Impermeável	0	0,00

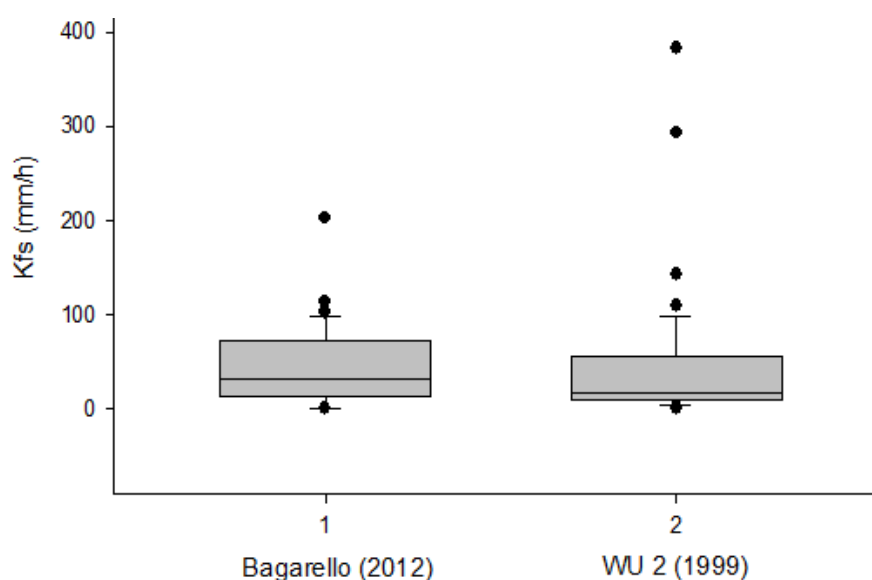
6.2.3 Análise das metodologias de infiltração em regime permanente

Foi possível observar que apesar da definição da fase de regime permanente ter sido a mesma para aplicação de ambas as metodologias, Bagarello (2013) e Wu 2 (1999), os valores obtidos do parâmetro hidráulico K_s para um mesmo ponto divergem consideravelmente entre si. Em alguns casos, a diferença obtida é superior a 100 mm/h.

Os valores de condutividade hidráulica saturada individuais calculadas por Bagarello (2013) foram, em geral, mais elevados em relação aos obtidos por Wu 2 (1999), ratificando-se inclusive pelo K_s característico, representado pelas medianas, respectivamente, 31,497 mm/h e 17,219 mm/h. A dispersão dos resultados obtidos, entretanto, é maior na metodologia de Wu 2 (1999), cuja condição de variabilidade dos resultados acredita-se ser decorrente dos parâmetros α utilizados como dados de entrada. A alta variabilidade dos resultados indica heterogeneidade da capacidade de infiltração do solo que pode decorrer de diversos fatores, como diferentes níveis de carregamento e compactação do pavimento e, sobretudo, da presença e quantidade de material depositado sobre o mesmo, folhas e outros tipos de matéria orgânica e sedimentos em geral.

A Figura 29 apresenta os gráficos box-plot para o parâmetro hidráulico K_s para os dois modelos de infiltração no regime permanente. A presença dos “outliers” em ambos os métodos ratifica a heterogeneidade da capacidade de infiltração entre as estimativas do parâmetro K_s para o sistema do PP.

Figura 29. Gráfico box-plot para o parâmetro K_s , métodos Bagarello e Wu2.



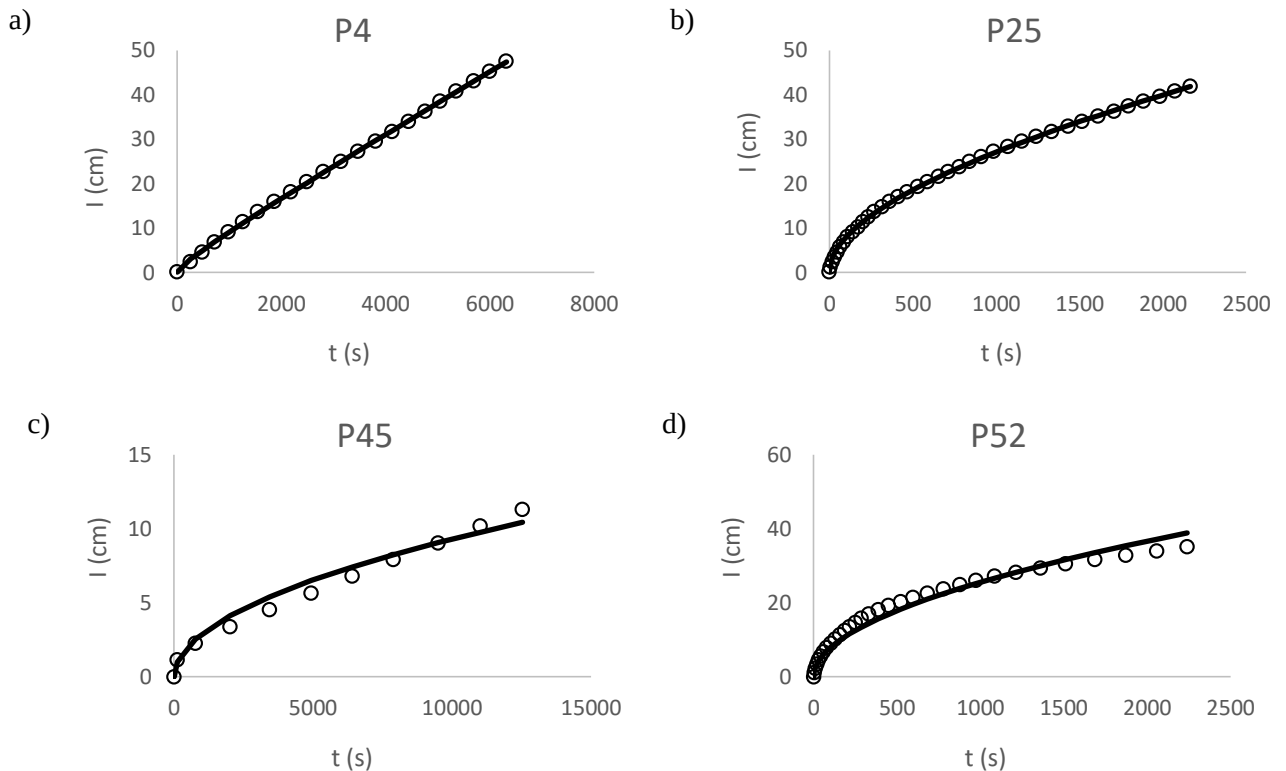
6.3 MODELOS DE INFILTRAÇÃO TRIDIMENSIONAL PARA SOLUÇÃO COMPLETA/ REGIME TRANSITÓRIO DA CURVA DE INFILTRAÇÃO

6.3.1 Método Wu (1999)

Determinados os coeficientes empíricos (Eq. 34), a sequência de equações (Eq. 35 a Eq. 40) apresentadas na Tabela 7 permite a obtenção das propriedades hidráulicas K_s e α . A condutividade hidráulica saturada de Wu (1999) considera toda a curva de infiltração acumulada, regime transitório e regime permanente, quando na sua determinação.

Na Figura 30 são apresentados os ajustes do modelo teórico aos dados experimentais.

Figura 30 - Curvas de infiltração x tempo ajustados pelo método Wu (1999).



O resumo estatístico dos resultados obtidos para os parâmetros K_s e α após a aplicação do método Wu (1999) são apresentados na Tabela 16. Os valores encontrados para α variam entre 0,003 e 1,150 cm^{-1} , com média de 0,125 cm^{-1} que, de acordo com o reportado na literatura, é compatível com o valor esperado para um solo classificado como franco arenoso (Wu *et al.*, 1999). O CV de 1,884 confirma a heterogeneidade da amostra.

Em relação à condutividade hidráulica saturada, a variabilidade dos resultados também foi considerada elevada, com valores mínimos na ordem de 0,009 mm/h e máxima de 153,099 mm/h. A heterogeneidade da capacidade de infiltração do revestimento é o principal motivo do alto alcance dos valores, cujo CV apresenta um desvio de Ks de 118,7% em relação à média.

Tabela 16 - Estatística dos parâmetros hidráulicos estimados pelo modelo de Wu (1999).

Estatística	K_s (mm/h)	α (cm⁻¹)
Mínimo	0.009	0.003
Máximo	153.099	1.150
Média	24.243	0.125
Desvio Padrão	28.781	0.236
CV	1.187	1.884

Ainda assim, o revestimento na sua classificação hidrológica foi, majoritariamente, considerado como “classe A” segundo a SCS. A permeabilidade do PP foi considerada “Baixa” (<0,36mm/h) em mais de 65% dos casos analisados. A classificação percentual dos resultados é apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 - Resumo da classificação hidrológica do revestimento pelo modelo de Wu (1999).

SCS			GP		
Critério	Qtde.	%	Critério	Qtde.	%
Classe A	34	69,39	Alto	0	0,00
Classe B	4	8,16	Médio	14	28,57
Classe C	5	10,20	Baixo	34	69,39
Classe D	6	12,24	Muito Baixo	1	2,04
			P. Impermeável	0	0,00

Para avaliação da qualidade do ajuste, os ensaios receberam tratamento estatístico, onde quatro critérios foram utilizados para análise dos dados calculados através do Método de Wu (1999), cujo resumo dos valores é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Resumo da análise estatística entre ajustes estimados pelo modelo de Wu (1999) e os valores experimentais.

Estatística	R²	RD	CMR	EM
Mínimo	0.980	0.856	-0.032	0.967
Máximo	1.000	1.142	0.035	1.000
Média	0.997	1.002	0.000	0.996
Desvio Padrão	0.004	0.052	0.010	0.007

A análise estatística geral dos ajustes obtidos entre os valores experimentais e calculados apresentam um coeficiente de correlação (R^2) médio próximo a unidade, indicando que o modelo utilizado consegue explicar satisfatoriamente os dados coletados em campo (Tabela 18). A razão de desvios média (RD) também se aproximou bastante da unidade, ratificando a qualidade dos ajustes pelo modelo utilizado. À exceção dos extremos, mínimo e máximo, cujos desvios são da ordem de 14,5%. No entanto, a dispersão entre os valores calculados e observados só são maiores que 5% em 7 casos. Com relação aos valores da eficiência de modelagem (EM), é possível inferir que a estimativa dos parâmetros hidráulicos através do método Wu (1999) foi bem-sucedida, com o critério estatístico EM médio tendendo a 1,0 e desvio padrão muito baixo. O coeficiente de massa residual médio (CMR) apresenta o valor nulo, mas a análise total dos ajustes mostra que os dados calculados possuem leve tendência a subestimativa ($CMR < 0$) em 34,7% dos casos.

A aplicação do método Wu (1999) forneceu bons ajustes de acordo com todos os critérios estatísticos utilizados nesse estudo, não apresentando diferenças significativas na capacidade de descrever os dados experimentais a partir do modelo teórico. Os resultados obtidos comprovam a eficácia desse modelo de infiltração tridimensional na determinação dos parâmetros a que se propõe, K_s e α .

6.4 MODELOS DE INFILTRAÇÃO UNIDIMENSIONAIS ACOPLADOS À PARCELA DE DISPERSÃO LATERAL PARA SOLUÇÃO COMPLETA DA CURVA DE INFILTRAÇÃO

A Tabela 19 apresenta o resumo dos resultados obtidos para os parâmetros K_s e S após a aplicação dos modelos de infiltração unidimensionais acoplados à parcela de dispersão lateral para solução completa da curva de infiltração.

Tabela 19 – Resumo estatístico dos parâmetros hidrodinâmicos Ks e S através dos modelos unidimensionais de infiltração acoplados à parcela de dispersão lateral.

Estatística	K _s (mm/h)				
	Philip (1957)	Stroosnijder (1976)	Knight soil Philip (1974)	Brutsaert (1977)	Swartzendruber (1987)
Mínimo	13,456	21,269	23,484	21,192	0,287
Máximo	472,307	619,204	557,175	696,999	408,311
Média	140,514	187,916	190,801	190,502	139,334
Desvio Padrão	105,587	133,729	135,635	139,065	98,238
CV (%)	75,1	71,2	71,1	73,0	70,5

S (mm/s ^{1/2})					
Média	2,480	2,881	2,925	3,017	2,702
Desvio Padrão	3,568	3,654	3,762	3,795	3,598
CV (%)	143,9	126,8	128,6	125,8	133,1

Os valores de condutividade hidráulica obtidos por todos os modelos unidimensionais são menos conservadores quando comparados os valores de K_s obtidos pelos modelos de infiltração em regime permanente e tridimensional, respectivamente, 44,5mm/h e 24mm/h. Acredita-se que os valores elevados de condutividade são provenientes da adição da parcela de dispersão lateral na estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos.

Os valores médios estimados pelos modelos de Philip (1957) e Swartzendruber (1987) foram muito próximos entre si, respectivamente, iguais a 140,5 mm/h e 139,3 mm/h. A proximidade dos resultados obtidos foi atrelada ao fato de o modelo de Swartzendruber (1987) ser derivado das séries temporais de infiltração propostas por Philip (1957). Apesar disso, o alcance de valores extremos, mínimos e máximos, foi mais elevado para Philip, inclusive na variabilidade da amostra, com desvio padrão de 105,6 mm/h e cuja variação em relação à média de 75,1% foi a maior dentre todos os modelos unidimensionais utilizados. Enquanto que os parâmetros K_s estimados por Swartzendruber apresentaram o menor desvio padrão entre os modelos unidimensionais, de 98,2mm/h e CV de 70,5%.

Para os modelos de Stroosnijer (1976), Knight soil Philip (1974) e Brutsaert (1977) as médias de condutividade hidráulica saturada foram próximas à 190 mm/h, desvios padrão na ordem de 135 mm/h e coeficientes de variação em torno de 71%.

Para os cinco modelos unidimensionais, a avaliação estatística da distribuição das amostras apresenta assimetria moderada positiva para os parâmetros K_s .

A análise dos resultados para condutividade ratifica a heterogeneidade da capacidade de infiltração do revestimento do pavimento permeável avaliado, independente do modelo escolhido para a estimativa da caracterização hidrodinâmica.

Em relação ao parâmetro sorvidade do solo (S), para todos os modelos unidimensionais, os valores médios possuem a mesma ordem de grandeza, variando entre 2,480mm/s^{-1/2} para Philip (1957), e 3,017 mm/s^{-1/2} para Brutsaert (1977). A variabilidade dos resultados para S , entretanto, foi maior do que para o parâmetro K_s , com desvio em relação à média em torno de 131%.

No Apêndice A são apresentadas as curvas ajustadas mais representativas dos modelos de infiltração unidimensionais acoplados à parcela de dispersão lateral.

A análise qualitativa dos parâmetros hidráulicos, realizada através da classificação hidrológica do revestimento, grau de permeabilidade e do Indicador Hidrodinâmico de Manutenção, é apresentada na Tabela 20.

Quanto à classificação do revestimento de acordo com a metodologia do SCS, a “classe A” foi obtida majoritariamente para todos os ensaios com resultados válidos. As superfícies enquadradas nessa classificação do SCS são caracterizadas por produzirem baixo escoamento superficial e possuírem alta capacidade de infiltração. O critério que define como “classe A” ($K_s \geq 7,6$ mm/h) é pouco restritivo em virtude de ser uma classificação criada para caracterizar camadas de solos, e nesse caso ter sido adaptada para o PP.

A permeabilidade do revestimento foi conceituada como “média” em mais de 80% de todos os casos analisados, de acordo com o de grau de permeabilidade ($0,36\text{mm/h} < GP < 36,0\text{mm/h}$). Pelo critério de GP, os valores de K_s estimados pelos modelos unidimensionais podem ser da ordem de 100 vezes superiores aos K_s estimados pelos modelos de infiltração tridimensionais (Wu, 1999) e em regime permanente (Wu2, 1999; Bagarello, 2012), e, portanto, há uma mudança na faixa de enquadramento da permeabilidade do PP, outrora designado como “Baixa”. Assim, foi possível observar que a classificação hidrológica utilizando o GP é mais criteriosa, uma vez que os conceitos de permeabilidade indicados pelas faixas de K_s podem retratar mais condições das superfícies avaliadas.

Tabela 20 – Resumo da análise qualitativa dos resultados de Ks, classificação hidrológica (SCS), grau de permeabilidade (GP) e indicador hidrodinâmico de manutenção (IHM)

Critério	Philip (1957)		Stroosnijder (1976)		Knight soil Philip (1974)		Brutsaert (1977)		Swartzendruber (1987)	
	Qtde.	%	Qtde.	%	Qtde.	%	Qtde.	%	Qtde.	%
SCS										
Classe A	48	100,0	47	100,0	47	100,0	48	100,0	49	98,0
Classe B	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Classe C	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Classe D	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	2,0
GP										
Alto	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Médio	41	85,4	42	89,4	42	89,4	42	87,5	44	88,0
Baixo	7	14,6	4	8,5	4	8,5	5	10,4	6	12,0
Muito Baixo	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
P. Impermeável	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
IHM										
Desobstruído	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Med. Obstruído	42	87,5	43	91,5	43	91,5	43	89,6	44	88,0
Parc. Obstruído	6	12,5	4	8,5	4	8,5	5	10,4	6	12,0
Tot. Obstruído	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0

Na análise realizada através do IHM, cujo objetivo é auxiliar na tomada de decisão para intervenção de manutenção e/ou restauração das condições de infiltração do pavimento permeável, os valores médios obtidos variaram entre 157,36mm/h (Swartzendruber, 1987) e 224,29 mm/h (Knight soil Philip, 1974). Para todos os modelos unidimensionais o IHM indicou uma condição “medianamente obstruída” para o revestimento do PP, correspondente a uma redução da sua capacidade de infiltração inicial e a necessidade da elaboração de um plano de manutenção da superfície a curto prazo, no máximo em até 3 anos.

Na Tabela 21 são apresentados os valores médios e desvios padrão dos critérios estatísticos utilizados para avaliar a qualidade dos ajustes aos dados experimentais.

De modo geral todos os modelos unidimensionais mostraram-se eficientes quanto à determinação dos parâmetros S e K_s. Os valores médios para o Coeficiente de Correlação (R²) foram muito próximos a 1, indicando que os modelos utilizados conseguem explicar satisfatoriamente os dados coletados em campo. Assim como os valores de Razão dos Desvios (RD), cujo desvios

médios entre os dados experimentais e calculados variaram entre de 0,5% (Philip, 1957) e 2% (Brutsaert, 1977). Os desvios máximos foram da ordem de 18,6% (Brutsaert, 1977).

Tabela 21 – Resumo da análise estatística entre ajustes estimados pelos modelos unidimensionais e os valores experimentais.

Critério	Philip (1957)		Stroosnijder (1976)		Knight soil Philip (1974)		Brutsaert (1977)		Swartzendruber (1987)	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Critérios estatísticos										
R²	0,9976	0,0039	0,9980	0,0032	0,9980	0,0033	0,9980	0,0034	0,9980	0,0031
RD	0,9951	0,0514	1,0180	0,0372	1,0180	0,0366	1,0200	0,0393	1,0120	0,0327
CMR	-0,002	0,0097	0,0020	0,0051	0,0020	0,0051	0,0020	0,0052	0,0010	0,0045
EM	0,9963	0,0063	0,9970	0,0042	0,9970	0,0042	0,9970	0,0045	0,9980	0,0039

Em relação aos valores da eficiência de modelagem (EM), é possível inferir que a estimativa dos parâmetros hidráulicos através dos modelos unidimensionais foi bem-sucedida, com todos os critérios estatísticos EM médios tendendo a 1,0 e desvios padrão muito baixo. Já em relação ao CMR, o comportamento do critério tendeu ao seu valor ótimo para todos os modelos. Apenas o modelo de Philip (1957) tendeu a superestimar a curva ajustada em mais de 56% dos ensaios analisados. Os demais modelos tenderam levemente à subestimativa dos parâmetros hidrodinâmicos K_s e S .

A aplicação dos modelos unidimensionais de infiltração acoplados à parcela de dispersão lateral forneceu bons ajustes de acordo com todos os critérios estatísticos utilizados nesse estudo, não apresentando diferenças significativas na capacidade de descrever os dados experimentais a partir dos modelos empíricos. Os resultados obtidos comprovam a eficácia desses modelos de infiltração na determinação dos parâmetros a que se propõem, K_s e S .

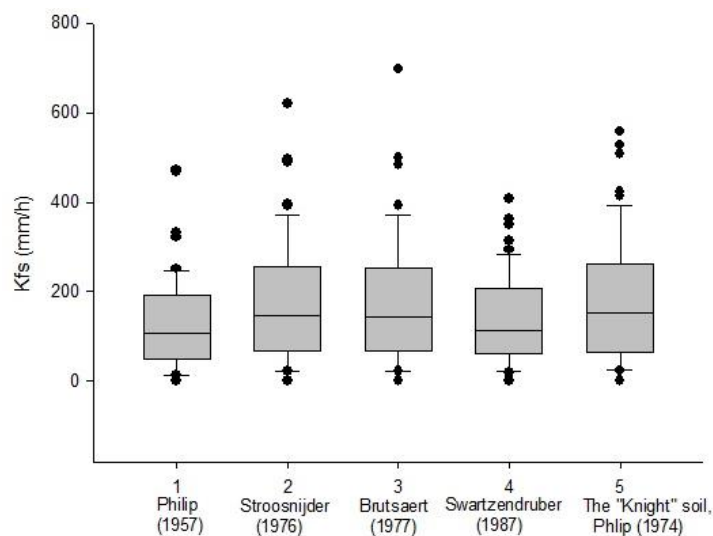
6.4.1 Análise das metodologias de infiltração unidimensionais acoplados à parcela de dispersão lateral para solução completa da curva de infiltração

Os resultados para condutividade hidráulica saturada estimados pelos modelos teóricos de infiltração unidimensionais foram plotados em box-plot paralelos a fim de permitir a comparação gráfica dos conjuntos de medidas com respeito à média, à dispersão e à distribuição (Figura 31).

Todos modelos apresentam basicamente a mesma ordem de grandeza para o parâmetro K_s médio, variando entre 139,334mm/h (Swartzendruber (1987)) e 190,801 mm/h (The “Knight” soil (Philip, 1974)). Em relação à dispersão dos dados, representada pela amplitude do gráfico, os modelos de Philip (1957) e Swartzendruber (1987) apresentam menores variabilidade da amostra, enquanto que as estimativas da condutividade hidráulica realizadas pelo método The “Knight” soil Philip (1974) estão sujeitas às maiores variações. Apesar disso, não há uma dependência significativa dos resultados de K_s em relação a escolha do modelo de infiltração utilizado.

Para todos os casos analisados, a distribuição empírica dos dados foi assimétrica positiva com presença de “outliers”, representados nos gráficos por pontos fora dos limites superior e inferior. Os “outliers” indicam a existência pontual de eventos extremos, como a obstrução parcial/total do PP, com redução brusca da permeabilidade e surgimento de “outliers” abaixo do gráfico; ou surgimento de caminhos preferenciais de drenagem da água infiltrada, resultando em aumento da velocidade de infiltração e surgimento de “outliers” acima do gráfico.

Figura 31 - Box-plot do parâmetro condutividade hidráulica saturada para os modelos teóricos de infiltração unidimensionais para solução completa da curva de infiltração

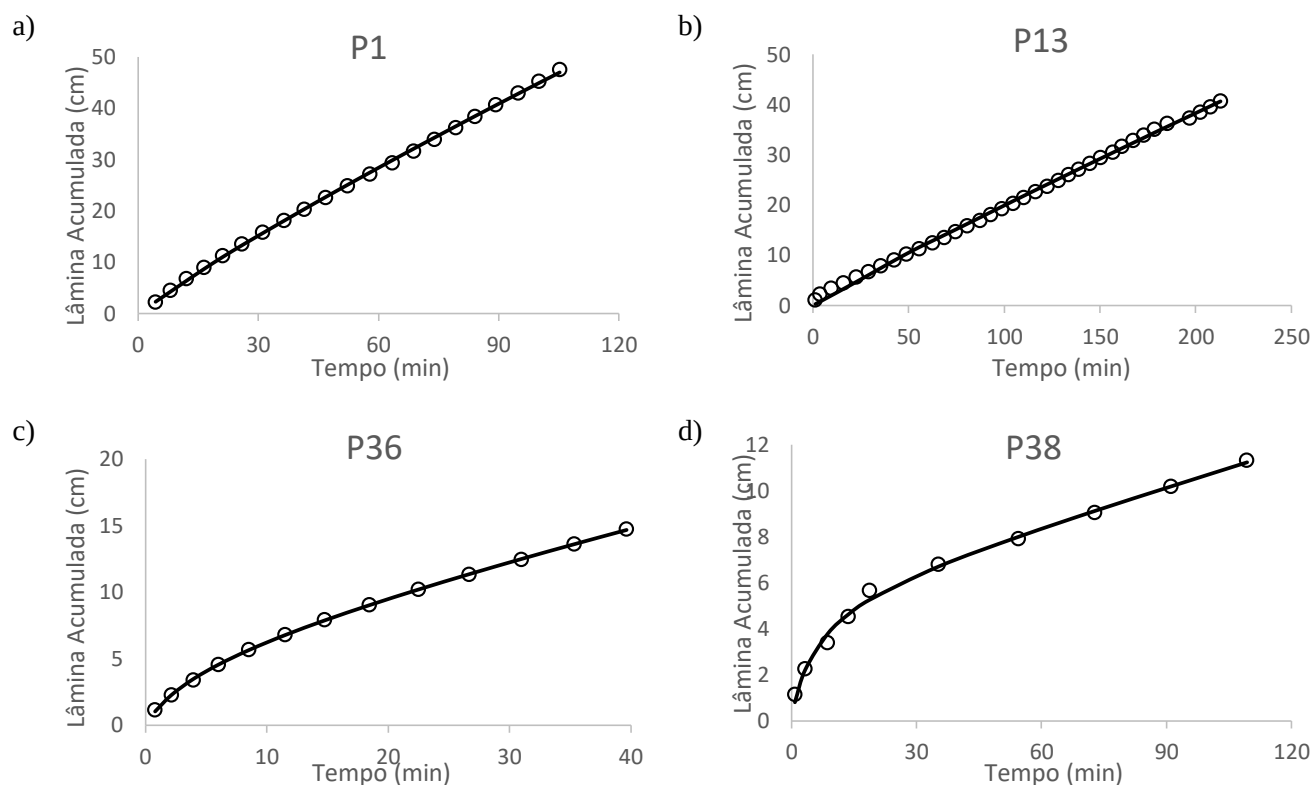


6.5 MÉTODO INVERSO

A partir do método inverso foi possível estimar simultaneamente os parâmetros da curva de retenção de água no solo e da curva de condutividade hidráulica e obter as propriedades hidráulicas K_s , N e α .

Na Figura 32 são apresentados os ajustes do método inverso aos dados experimentais.

Figura 32 - Curvas de infiltração x tempo com ajustadas pelo método Inverso.



Os resultados para o parâmetro K_s após a aplicação do método Inverso são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Estatística dos parâmetros hidráulicos obtidos pelo Método Inverso

Estatística	K_s (mm/h)	N	α
Mínimo	0.048	1.083	0.003
Máximo	2.074	10.860	0.310
Média	0.327	2.139	0.029
Desvio Padrão	0.375	2.958	0.045
CV	1.145	1.383	1.552

A condutividade hidráulica média do solo saturado foi estimada em 0,327 mm/h, com desvio padrão de 0,375 mm/h e coeficiente de variação de 1,145. A distribuição da amostra dos resultados foi considerada assimétrica e moderada.

A ordem de grandeza dos resultados obtidos para Ks a partir do Método Inverso é cerca de 100 vezes menor do que as condutividades hidráulicas estimadas através dos modelos de infiltração em regime permanente, tridimensionais e unidimensionais acoplados à parcela de dispersão lateral. A dispersão dos resultados, entretanto, se assemelha bastante aos dos demais modelos. Os resultados desse método ratificam a heterogeneidade da capacidade de infiltração no revestimento do pavimento permeável.

Os valores médios e desvio padrão dos resultados foram, respectivamente, 2,139 e 2,958 para o N, e 0,029 e 0,045 para o α . Os parâmetros N e α calculados pelo método inverso são compatíveis com os obtidos para uma areia siltosa (COUTINHO *et al.*, 2016) ou para o material franco siltoso (ANTONINO *et al.*, 2004). Os coeficientes de variação para N e α , entretanto, ambos maiores que a unidade, indicam a heterogeneidade da amostra.

Não foi possível a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos para os ensaios P6, P9, P11, P15, P20, P42 e P52, em virtude da não convergência da otimização.

A classificação hidrológica do PP é apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 - Resumo da classificação hidrológica do revestimento pelo Método Inverso.

SCS			GP		
Critério	Qtde.	%	Critério	Qtde.	%
Classe A	1	2,17	Alto	1	2,17
Classe B	0	0,00	Médio	0	0,00
Classe C	1	2,17	Baixo	13	28,26
Classe D	44	95,65	Muito Baixo	32	69,57
			P. Impermeável	0	0,00

Segundo o método SCS, o PP se enquadra na “classe hidrológica D” caracterizada por possuir muito baixa permeabilidade e alta capacidade de geração de escoamento superficial, comparada aos solos pouco profundos constituído por argilas expansivas. Esse resultado contrasta com as classificações obtidas a partir dos demais modelos utilizados nessa pesquisa, devido à redução na ordem de grandeza dos valores de condutividade. Da mesma forma, o critério de grau de permeabilidade característico do PP foi considerado “Muito Baixo” em mais de 69% dos casos analisados.

Não foram calculados os IHM para o método inverso, devido à dificuldade para obtenção dos parâmetros K_{s1D} e K_{s3D} separadamente.

O Método Inverso se mostrou eficiente quanto à determinação do parâmetro K_s , como pode ser observado a partir da análise estatística da qualidade dos ajustes, cujo resumo é apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Resumo da análise estatística entre ajustes estimados pelo Método Inverso e os valores experimentais.

Estatística	R²	RD	CMR	EM
Mínimo	0.995	0.874	-0.002	0.989
Máximo	1.000	1.019	0.045	1.000
Média	0.999	0.970	0.006	0.998
Desvio Padrão	0.001	0.031	0.008	0.002

É possível observar que os ajustes obtiveram valores de Coeficiente de Correlação (R^2) médio muito próximos a 1, indicando que o modelo utilizado consegue explicar satisfatoriamente os dados coletados em campo. O critério de Razão dos Desvios (RD), cujo desvio médio é da ordem de 3%, com o desvio máximo de 12,6%, também indica bom desempenho do Método Inverso na descrição dos dados experimentais.

Em relação aos valores da eficiência de modelagem (EM), é possível inferir que a estimativa dos parâmetros hidráulicos foi bem-sucedida, com o critério estatístico EM médio tendendo a 1,0 e desvio padrão muito baixo.

Para mais de 90% dos pontos analisados houve uma pequena subestimativa da curva ajustada, de acordo com o critério CMR.

A aplicação do método forneceu bons ajustes de acordo com todos os critérios estatísticos utilizados nesse estudo, não apresentando diferenças significativas na capacidade de descrever os dados experimentais a partir do modelo numérico. Os resultados obtidos comprovam a eficácia do Método Inverso para obtenção dos parâmetros hidráulicos da infiltração.

6.6 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS AJUSTES

Para avaliação qualitativa das metodologias utilizadas na obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos do solo, compararam-se os valores médios dos indicadores estatísticos R^2 , RD, CMR e EM através da classificação de posições, conforme Tabela 25.

Tabela 25. Avaliação da qualidade de ajuste dos métodos aplicados aos dados de campo

PARÂMETROS	WU	PH	ST	BR	SW	KN	IN
R^2	0.9975	0.9976	0.9980	0.9979	0.9983	0.9980	0.9988
RD	1.0022	0.9951	1.0177	1.0196	1.0120	1.0179	0.9703
CMR	-0.0003	-0.0019	0.0022	0.0024	0.0014	0.0022	0.0064
EM	0.9962	0.9963	0.9974	0.9972	0.9977	0.9973	0.9980
RANK (R^2)	7	6	3	5	2	4	1
RANK (RD)	1	2	4	6	3	5	7
RANK (CMR)	1	3	4	6	2	5	7
RANK (EM)	7	6	3	5	2	4	1
RANK (MÉDIO)	4	4.25	3.5	5.5	2.25	4.5	4

No rank dos indicadores estatísticos apenas dois modelos foram classificados em primeiro lugar: o modelo de Wu (1999), para os critérios RD e CMR, e o método inverso, para o R^2 e o EM.

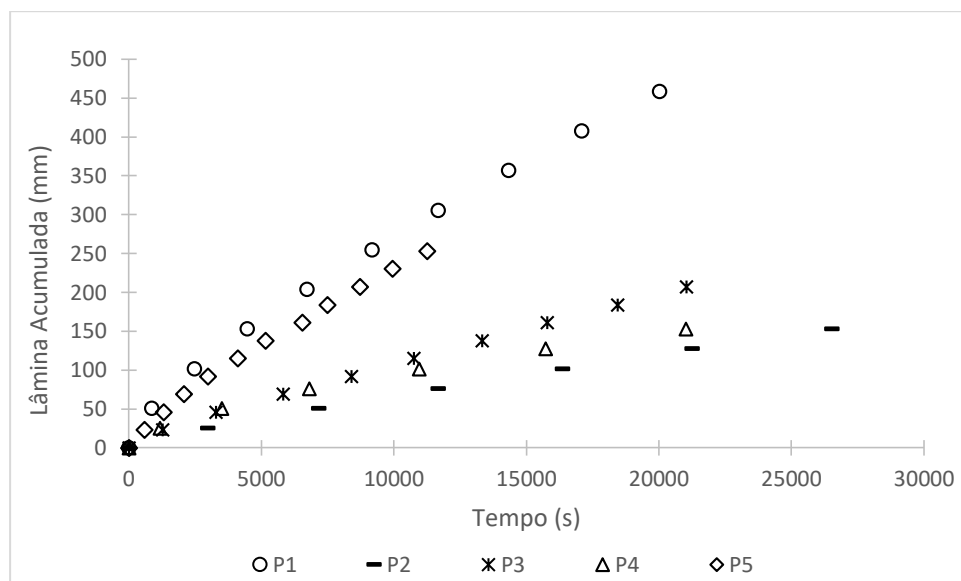
Os valores de Coeficiente de Correlação (R^2) médios variaram entre 0,9975 e 0,9988, muito próximos ao valor ótimo 1, indicando que os modelos avaliados explicam satisfatoriamente os dados coletados em campo. Os indicadores de Razão dos Desvios (RD) apresentaram pequenos desvios médio em relação ao valor ótimo, da ordem de no máximo 3%. Em relação aos valores da eficiência de modelagem (EM), é possível inferir que a estimativa dos parâmetros hidráulicos através de todos os modelos foi bem-sucedida, com o critério estatístico EM médio variando de 0,9962 a 0,9980. Em relação ao Coeficiente de Massa Residual (CMR), enquanto os modelos de Wu (1999) e Philip (1957) apresentaram tendência a superestimar a curva ajustada, todos os demais modelos avaliados apresentam tendência a subestimar os parâmetros hidráulicos.

Na análise geral, o rank médio dos critérios estatísticos apontou o modelo de Swartzendruber (1987) como aquele que exibiu a melhor capacidade de ajuste entre os dados experimentais e os dados calculados, com o menor rank médio (2,25) entre os métodos avaliados. A metodologia de Brutsaert (1977) apresentou o pior desempenho para descrição dos dados de campo, com rank médio de 5,5.

6.7 ANÁLISE HIDRODINÂMICA USANDO O MÉTODO BEERKAN/ INFILTRÔMETRO COM 1M DE DIÂMETRO

Na Figura 33 são apresentadas as lâminas infiltradas acumuladas para os ensaios de infiltração realizados na camada de revestimento do PP. Observa-se que no ponto P1 uma lâmina total de 458,37 mm infiltrou em 20030 segundos; para o ponto P2, a lâmina de 152,79mm infiltrou em 26533 segundos e para os pontos P3, P4 e P5, a lâmina total infiltrada foi, respectivamente, 207,23, 152,79 e 253,30mm, enquanto que os tempos totais em segundos para infiltração foram 21042, 21015 e 11245.

Figura 33 - Infiltração acumulada para os ensaios com infiltrômetro de 1m de diâmetro



Nas Figura 34, Figura 35, Figura 36, Figura 37 são apresentados resultados da aplicação dos métodos BEST SLOPE e BEST INTERCEPT para os dados de infiltração P1, P2, P3, P4 e P5. Cada aplicação do método fornece quatro gráficos, cujas funções são: apresentar a infiltração acumulada e os ajustes dos dados experimentais aos modelos transientes (*transient model*) e estacionários (*steady state model*); variação da taxa de infiltração ao longo do tempo; erro relativo entre os dados experimentais e simulados para infiltração acumulada; erro relativo entre os dados experimentais e simulados para a taxa de infiltração.

De maneira geral, é possível observar que, para todos os casos, o modelo transiente se ajusta melhor aos dados de infiltração acumulada frente ao modelo permanente (Figura 34). Isto se deve ao fato de que o modelo ao regime permanente admite que a infiltração seja governada desde o

início pela condutividade hidráulica saturada, resultando numa infiltração estimada com comportamento linear em função do tempo. Nesse caso, observa-se uma dificuldade em descrever os estágios iniciais da infiltração. Como esperado, o modelo permanente ainda tendeu a superestimar a infiltração, tendo em vista que considera o horizonte superior de condutividade da água pelo PP. As superestimativas foram maiores para os ensaios P1 e P4. Na comparação entre as variações dos métodos BEST, o Intercept apresentou ajustes dos dados experimentais ao modelo permanente consideravelmente melhores do que o Slope, inclusive para os ensaios citados, P1 e P4. Isso se deve às diferenças de algoritmos utilizados nas variações.

A teoria da infiltração descreve o fenômeno como um processo desacelerado, caracterizado pela rapidez inicial da infiltração e redução gradativa de sua velocidade com o tempo, até um valor praticamente constante, a condutividade hidráulica saturada. Nos gráficos da Figura 35 é possível visualizar a taxa de infiltração tanto para os dados experimentais, como para os dados simulados nos modelos transiente e estacionários. O modelo transiente apresentou melhor ajuste às taxas experimentais ao longo do tempo, enquanto que o modelo permanente se caracterizou por uma linha reta cujo valor tende à condutividade hidráulica saturada, com evidentes dificuldades em descrever os estágios iniciais das taxas de infiltração.

Os erros relativos para a infiltração acumulada e taxa de infiltração partem da leitura dos gráficos apresentados nas Figura 36 e Figura 37, respectivamente. É possível observar os erros de infiltração acumulada variam entre 1% e 22% para o método BEST Slope e entre 0% e 24% para o método BEST Intercept. A dinâmica dos erros relativos para infiltração acumulada pode ser caracterizada por valores iniciais do erro próximos aos 20% com tendência a redução dos erros ao longo do tempo aproximando-se de zero, para ambos os métodos analisados. Já os erros relativos para as taxas de infiltração variam entre 3% e 40% para o método BEST Slope e entre 0% e 44% para o método BEST Intercept. A dinâmica dos erros relativos para a taxa de infiltração, entretanto, não possui um padrão de variação para os casos analisados, e, a esta oscilação foi associada à dependência da taxa aos Δt medidos na experimentação.

Figura 34 - Resultados da aplicação do método BEST para os dados de infiltração do pavimento permeável: Ajuste ao modelo transiente e estacionário.

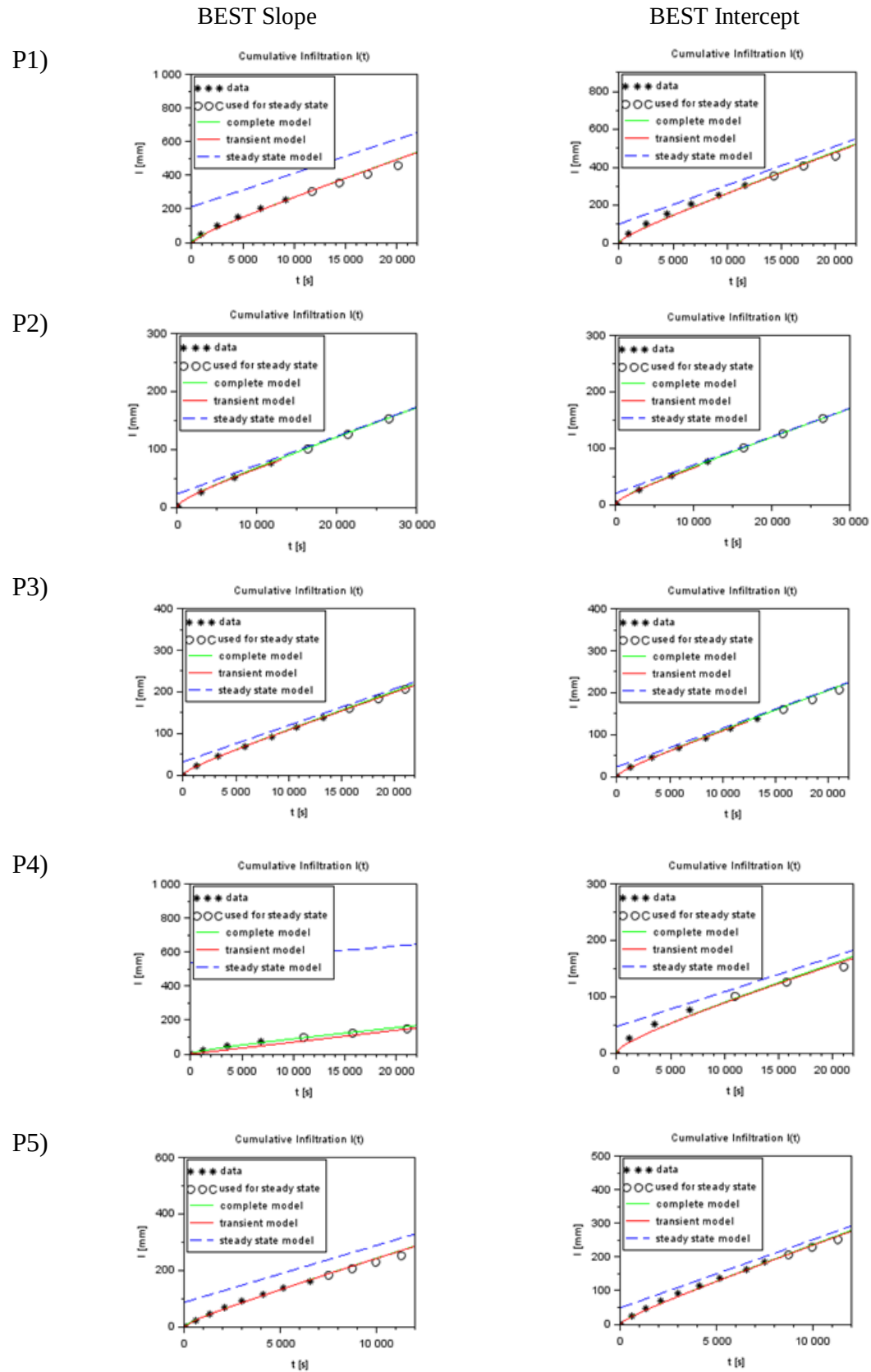


Figura 35 - Resultados da aplicação do método BEST para os dados de infiltração do pavimento permeável: Taxa de infiltração.

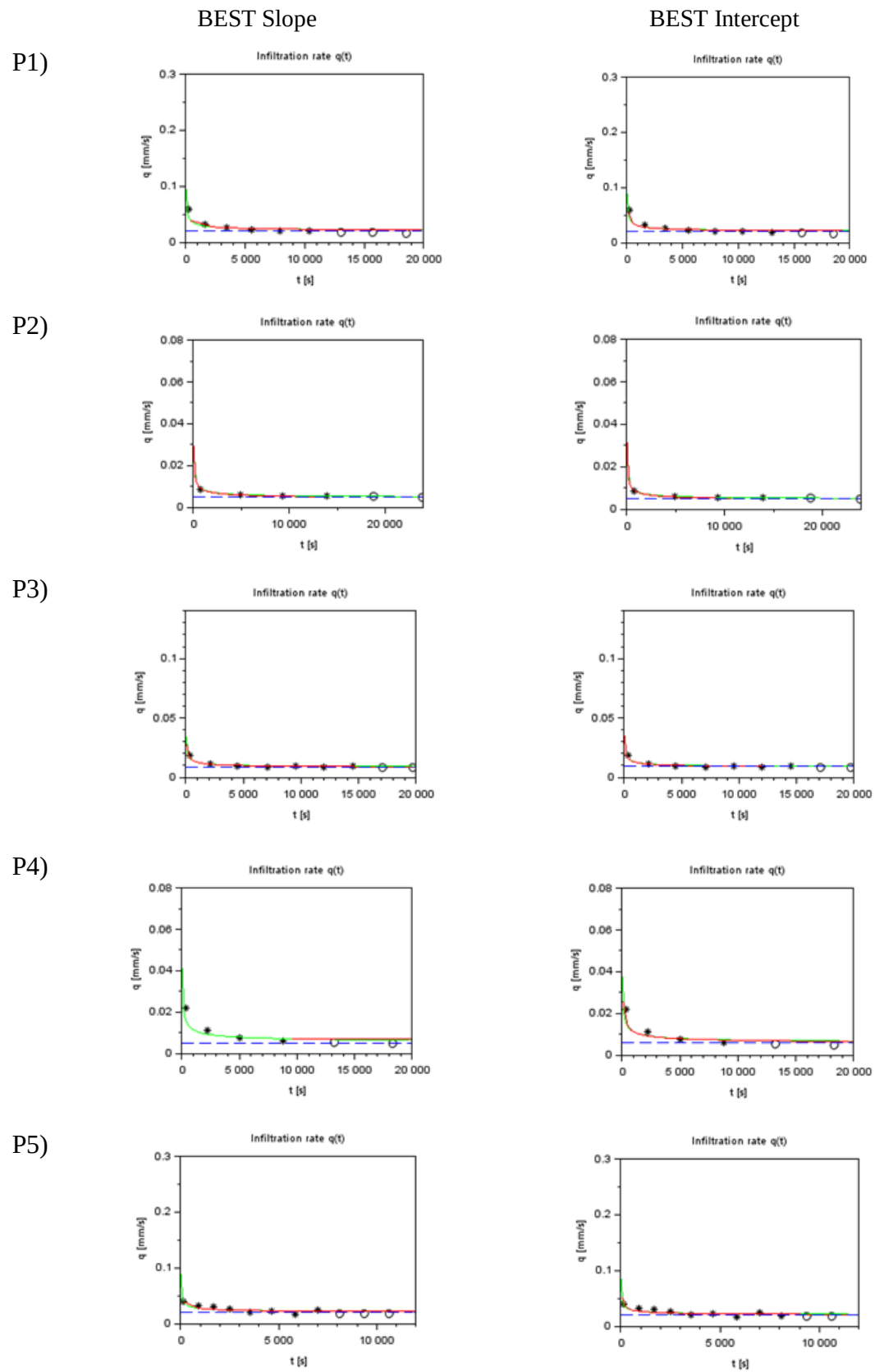


Figura 36 - Resultados da aplicação do método BEST para os dados de infiltração do pavimento permeável: Erro relativo para infiltração acumulada.

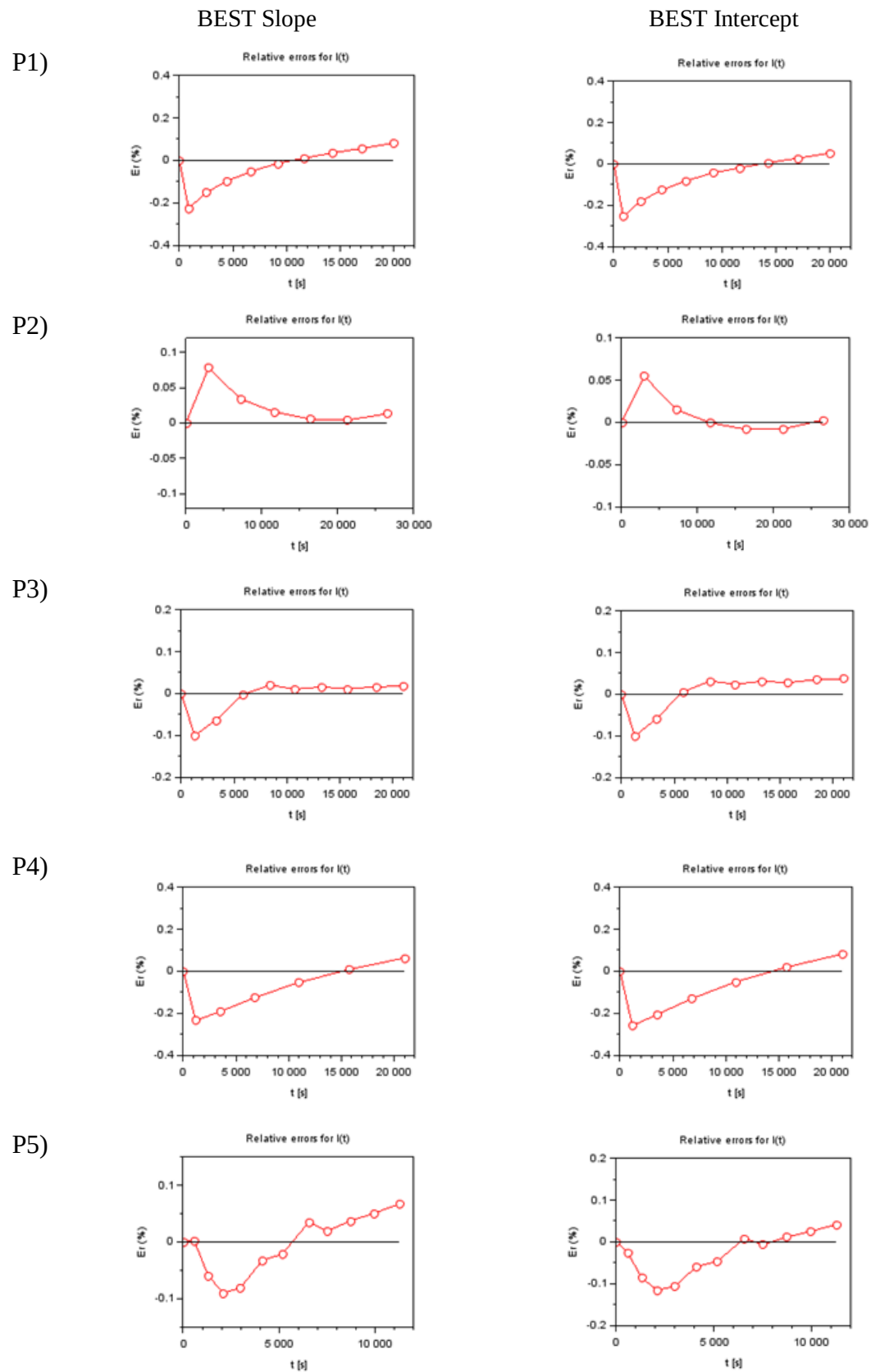
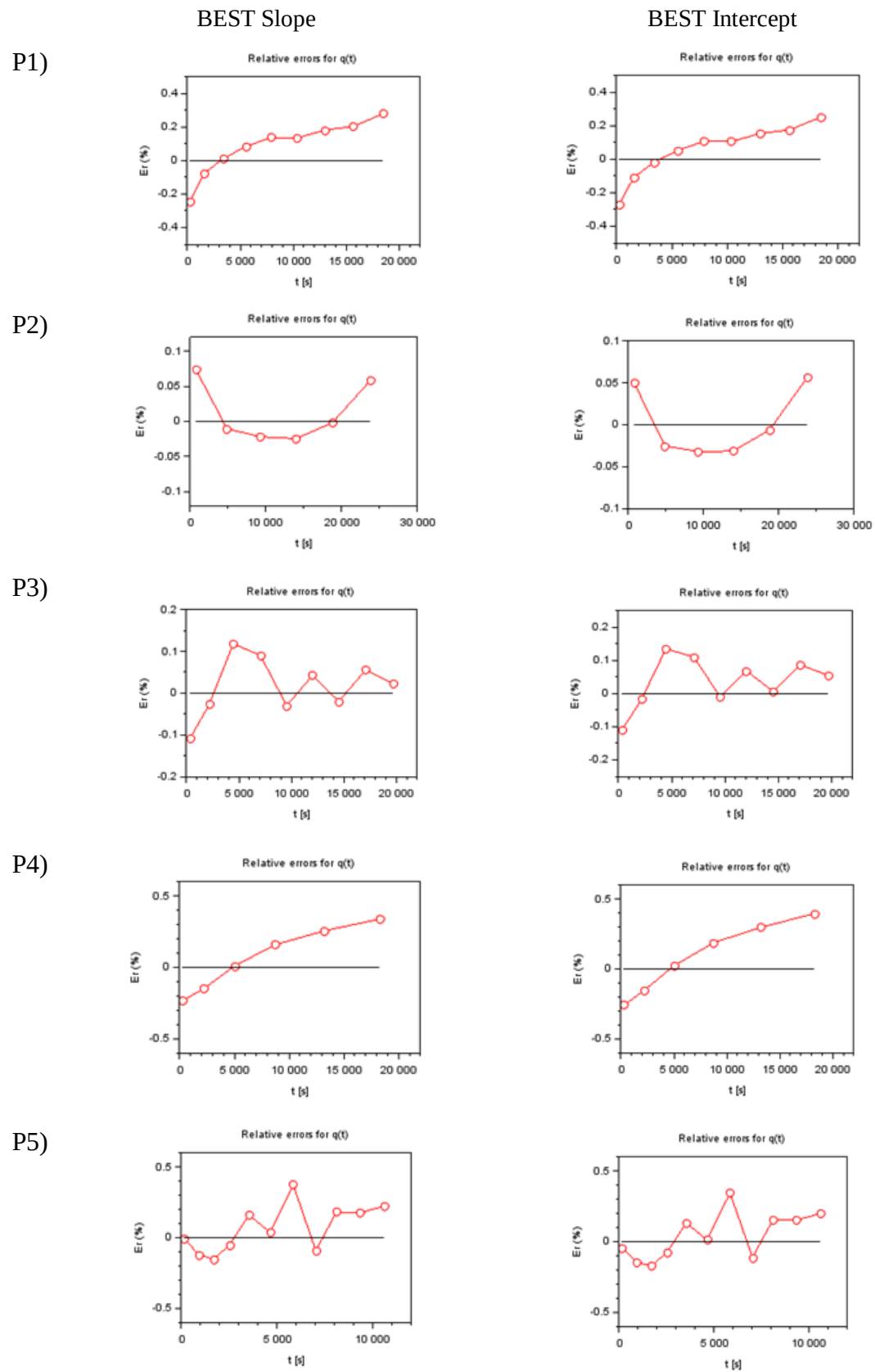


Figura 37 - Resultados da aplicação do método BEST para os dados de infiltração do pavimento permeável: Erro relativo para taxa de infiltração.



Nas Tabela 26 e Tabela 27 são apresentadas as propriedades hidráulicas dos solos obtidas a partir do método BEST Slope e Intercept, respectivamente.

O parâmetro h_g é estritamente dependente da estrutura do solo, enquanto os parâmetros n e η são diretamente dependentes da textura do mesmo. Os comprimentos médios dos poros (h_g) variaram entre 33,39mm e 793,88mm quando estimados pelo método Slope e entre 29,32mm e 146,95mm quando estimados pelo Intercept. Apesar de os valores de h_g – Intercept serem sempre inferiores, essa diferença foi relativamente pequena para todos os ensaios realizados, exceto para o ponto P4, cujos resultados diferem cerca de 11 vezes ao se permutar os algoritmos de cálculo.

Coutinho *et al.* (2016) classificaram as 52 amostras em função da textura do solo em: silte (1,92%), silte arenoso (17,31%), areia siltosa (76,92%) e areia (3,85%). Em contraste com a variabilidade dos resultados obtidos neste trabalho, o parâmetro h_g apresentou a mesma ordem de grandeza para todas as 52 estimativas, com valores médios variando entre o mínimo de 65,59 para o silte arenoso e, o máximo de 141,90 para o silte.

Para os parâmetros de forma (n e η), não houve variação de resultados entre os métodos calculados (Slope e Intercept) para nenhum ensaio. Além disso, a própria variação foi estreita, sendo a média dos valores bastante representativa para expressar esses parâmetros do PP, respectivamente, 2,302 e 9,636.

De acordo com Souza *et al.* (2008) para os parâmetros que dependem da textura do solo, como é o caso do n , quanto maior o teor de areia na classe textural da amostra, maior o valor de n obtido. Enquanto que com os valores de η ocorre justamente o inverso, quanto maior percentual de areia no solo, menores os valores de η . Esta relação inversa entre n e η se deve às conjunturas matemáticas de cálculo para os dois parâmetros. Os resultados de n obtidos por Souza *et al.* (2008) foram de 2,31 e 2,54, respectivamente, para classes texturais do Neossolo Flúvico referente a mostras de areia franca e areia pura. A ordem de grandeza dos resultados para n obtidos neste trabalho são coerentes com a classificação de material franco-arenoso.

Na comparação para os resultados de η , a ordem de grandeza dos valores de Souza *et al.* (2008) também é coerente com os obtidos, sobretudo para a areia franca, cujo $\eta = 9,54$ é praticamente igual à média de η do PP estudado. Observa-se, no entanto, que o parâmetro η não concorda satisfatoriamente com os resultados encontrados por Santos & Silva (2012), 1,5 vezes menores com relação à classe arenosa. Essas diferenças podem ser provenientes da variação percentual de areia grossa dos solos.

Furtunato *et al.* (2013) estudaram 102 amostras de solo de variadas classes texturais, desde uma areia pura até um material muito argiloso, e obtiveram, estatisticamente, valores médios para n e η , respectivamente iguais a 2,22 e 13,16, com distribuição normal. Comparativamente semelhante às médias dos parâmetros para o PP obtidas por Coutinho *et al* (2016), bem como com as do presente trabalho.

Tabela 26 - Parâmetros do Método BEST - Slope

ENSAIO	θ_r	θ_s	hg (mm)	n	η	S (mm/s ^{-1/2})	Ks (mm/h)
P1	0,000	0,500	-309,900	2,292	9,857	0,780	6,596
P2	0,000	0,500	-33,290	2,284	10,054	0,294	8,666
P3	0,000	0,500	-46,690	2,304	9,576	0,305	6,760
P4	0,000	0,500	-793,880	2,313	9,382	0,402	0,694
P5	0,000	0,500	-128,550	2,317	9,309	0,499	6,624
Média	0,000	0,500	-262,462	2,302	9,636	0,456	5,868

Tabela 27 - Parâmetros do Método BEST – Intercept

ENSAIO	θ_r	θ_s	hg (mm)	n	η	S (mm/s ^{-1/2})	Ks (mm/h)
P1	0,000	0,500	-146,952	2,292	9,857	0,749	12,833
P2	0,000	0,500	-29,328	2,284	10,054	0,286	9,285
P3	0,000	0,500	-33,652	2,304	9,576	0,300	9,095
P4	0,000	0,500	-69,674	2,313	9,382	0,376	6,911
P5	0,000	0,500	-72,538	2,317	9,309	0,483	11,025
Média	0,000	0,500	-70,429	2,302	9,636	0,439	9,830

Em relação à condutividade hidráulica saturada (Ks), os valores obtidos pelo método BEST Intercept para todos os ensaios foram mais altos se comparados aos valores obtidos pelo método BEST Slope, mas coerentes quanto a ordem de grandeza apresentada. O Ks variou entre 0,694mm/h e 12,833mm/h, com médias de 5,868mm/h para o Slope e 9,830mm/h para o Intercept.

Os valores de sorvidade do PP são coerentes com os valores obtidos para as diferentes classes texturais analisadas no trabalho de Souza *et al* (2008), exceto para a areia do Neossolo Flúvico, cujo $S=2,48 \text{ mm/s}^{-1/2}$ é da ordem de 5 vezes maior que os aqui apresentados. Os resultados de S

e K_s para todas as classes texturais estudadas por Santos & Silva (2012) também foram consideravelmente mais elevados.

A classificação hidrológica em ambos os casos é compatível com a textura granular arenosa do solo estudado (Tabela 28). Comparando os ensaios individuais, caracterizados pelo método do SCS e grau de permeabilidade, pode-se observar que os valores de K_s e S são ligeiramente maiores para os solos com maior teor de areia grossa.

Tabela 28 - Classificação hidrológica pelo método do SCS e Grau de permeabilidade dos ensaios.

ENSAIOS	SLOPE		INTERCEPT	
	SCS	GP	SCS	GP
P1	B	B	A	B
P2	A	B	A	B
P3	B	B	A	B
P4	D	B	B	B
P5	B	B	A	B

A classificação hidrológica pelo método SCS elencou as classes “A” e “B” para os ensaios do PP, que se resumem em solos com baixa produção de escoamento superficial e boa capacidade de infiltração, arenosos e relativamente profundos. Com exceção do ensaio P4 no método BEST - Slope, cujo K_s obtido, 8 vezes menor que a média, foi enquadrado na classe “D”, caracterizado por solos argilosos, pouco profundos e baixa permeabilidade. Quanto ao grau de permeabilidade (GP), por se tratar de um critério mais rigoroso que o anterior, todos os ensaios de ambos os métodos BEST foram conceituados como “baixo” GP, o que sugere a necessidade de manutenção do sistema para recuperação de sua capacidade de infiltração.

Nas Tabela 29 e Tabela 30 são apresentadas as propriedades hidráulicas dos solos (α e n) obtidas a partir do método BEST Slope e Intercept, com o modelo da retenção de van Genuchten (1980) e o modelo de condutividade ajustado por Mualem.

Os valores de α variaram entre $0,056\text{mm}^{-1}$ e $1,064\text{mm}^{-1}$ quando estimados pelo Slope e entre $0,034\text{mm}^{-1}$ e $0,192\text{mm}^{-1}$ quando estimados pelo Intercept, com valores médios de $0,349\text{mm}^{-1}$ e $0,088\text{mm}^{-1}$, respectivamente. Apesar dos parâmetros α – intercept serem sempre inferiores, essa diferença foi relativamente pequena, exceto para o ponto P4, cujos resultados diferem entre si de 12 vezes ao se permutar os algoritmos de cálculo.

Para o parâmetro de forma (n), praticamente não houve variação de resultados entre os métodos calculados (slope e intercept) para cada ponto. Além disso, a própria variação dos resultados foi estreita, sendo a média dos valores bastante representativa para expressar esses parâmetros do PP, respectivamente, 1,316 e 1,310.

Os resultados da condutividade hidráulica saturada não sofreram alteração de valor para o modelo de ajuste proposto.

Tabela 29 - Parâmetros do Método BEST – Slope ajustado por Mualem (1976)

ENSAIO	θ_r	θ_s	α (mm ⁻¹)	n	Ks (mm/s)
P1	0,000	0,498	0,422	1,313	6,596
P2	0,000	0,498	0,039	1,285	8,666
P3	0,000	0,498	0,056	1,310	6,760
P4	0,000	0,498	1,064	1,339	0,694
P5	0,000	0,498	0,167	1,333	6,624
Média	0,000	0,498	0,349	1,316	5,868

Tabela 30 - Parâmetros do Método BEST – Intercept ajustado por Mualem (1976)

ENSAIO	θ_r	θ_s	α (mm ⁻¹)	n	Ks (mm/s)
P1	0,000	0,498	0,192	1,307	12,833
P2	0,000	0,498	0,034	1,284	9,285
P3	0,000	0,498	0,039	1,306	9,095
P4	0,000	0,498	0,086	1,323	6,911
P5	0,000	0,498	0,090	1,328	11,025
Média	0,000	0,498	0,088	1,310	9,830

7 CONCLUSÕES

Os modelos propostos para caracterização hidrodinâmica do revestimento do pavimento permeável foram considerados suficientemente adequados na estimativa dos parâmetros de condutividade hidráulica saturada e sorvidade. Em comparação direta, os modelos de infiltração unidimensionais para solução completa da curva de infiltração resultaram em condutividades médias da ordem de 3 vezes superiores às estimadas por métodos de infiltração em regime permanente ou de infiltração tridimensional para solução completa/regime transitório da curva de infiltração. A justificativa mais provável para a superestimativa do K_s foi atribuída à adição da parcela de dispersão lateral aos modelos unidimensionais para determinação dos parâmetros. As condutividades hidráulicas saturadas resultantes do Método Inverso diferem bastante dos valores outrora obtidos, com ordem de grandeza de 10^{-2} mm/h. Os altos valores dos desvios padrão de K_s para todos os modelos de infiltração demonstra a grande variabilidade da capacidade de infiltração do pavimento, o que era esperado diante das condições de uso diário do estacionamento e na ausência de ações de manutenção.

A aplicação dos modelos forneceu bons ajustes de acordo com todos os critérios estatísticos utilizados nesse estudo, não apresentando diferenças significativas na capacidade de descrever os dados experimentais a partir dos modelos empíricos e numérico. O ranqueamento dos critérios estatísticos para avaliação da qualidade dos ajustes permitiu definir o modelo de Swartzendruber (1987) como aquele com melhor capacidade de ajuste entre os dados experimentais e os calculados. Enquanto que a metodologia de Brutsaert (1977) apresentou o pior desempenho para descrição dos dados de campo.

Na segunda parte da fase experimental desse trabalho as infiltrações acumuladas foram tratadas utilizando o método BEST, cujos os parâmetros hidráulicos foram estimados com sucesso. O algoritmo BEST Slope apresentou, quando na descrição da infiltração acumulada, erros relativos e taxas de infiltração levemente inferiores aos obtidas pelo BEST Intercept. De maneira geral, foi possível observar que, para todos os casos, o modelo transiente apresentou melhor ajuste aos dados de infiltração acumulada frente ao modelo permanente, o que está associado ao fato de que o segundo modelo admite que a infiltração seja governada pela condutividade hidráulica saturada desde o início, resultando numa infiltração estimada com comportamento linear em função do tempo. Além disso, o modelo permanente apresentou tendência a superestimar a infiltração, sobretudo para os ensaios P1 e P4.

Para os parâmetros de forma (n e η), não houve variação de resultados entre os métodos calculados, enquanto que para o hg , o range de valores obtidos pelo Slope foi cerca de 6 vezes superior aos determinados pelo Intercept, essa diferença chegando a 11 vezes especificamente para o ensaio P4. A ordem de grandeza dos resultados para n e η são coerentes com a classificação de material franco-arenoso de acordo com a literatura técnica. As condutividades hidráulicas saturadas médias determinadas pelo BEST Slope e Intercept foram compatíveis com a textura granular fraco-arenosa esperada, de acordo com a classificação hidrológica. A exceção do ensaio P4, cujo K_s foi notoriamente inferior, designando uma região pontual de muito baixa permeabilidade.

Os resultados dos ensaios com infiltrômetro de 1m de diâmetro indicaram que o PP possui boa capacidade de infiltração de água quando analisado sob a perspectiva de funcionamento do sistema de blocos vazados atuando conjuntamente, confirmando o desempenho esperado para aplicação como técnica compensatória alternativa aos pavimentos clássicos impermeáveis. É passível, entretanto, a necessidade de manutenção do mesmo para recuperação da capacidade de infiltração inicial, sobretudo nas proximidades do ensaio P4.

Para 8 dos 9 métodos de infiltração utilizados para estimativa do K_s a classificação hidrológica do pavimento permeável pela metodologia do SCS foi enquadrada preponderantemente como “Grupo A”, cujo potencial hidrológico é característico de superfícies com baixa geração de escoamentos superficiais e alta capacidade de infiltração. Em contraste, a condutividade hidráulica média calculada pelo Método Inverso classificou o revestimento como “Grupo D”, caracterizado por baixa permeabilidade. O mesmo contexto descreve a avaliação qualitativa com o uso do critério grau de permeabilidade, no qual o conceito de “GP Médio” foi obtido na frequência de 88% dos casos estudados, enquanto que o conceito “GP Muito Baixo” caracterizou apenas os resultados referentes ao Método Inverso. A análise dos resultados individuais permitiu, também, identificar a existência de pontos isolados de baixíssima permeabilidade, decorrentes da colmatação parcial e/ou total do revestimento.

Apesar de ambos os critérios de classificação utilizarem a condutividade hidráulica saturada para a determinação do comportamento da superfície permeável, as faixas de valores estabelecidas diferem bastante entre si, com ordens de grandeza para K_s mais rigorosos na avaliação pelo critério de grau de permeabilidade. Nenhum deles se propõe a definir objetivamente a condição atual de colmatação da superfície e a necessidade de reestabelecimento da sua permeabilidade.

Os IHMs médios calculados para todos os modelos unidimensionais acoplados à parcela de dispersão lateral enquadraram-se na mesma faixa de exigência de intervenção ($36,0 \text{ mm/h} \leq \text{IHM} < 3600,0 \text{ mm/h}$). De acordo com o indicador IHM, o pavimento permeável encontra-se medianamente obstruído com sua capacidade atual de infiltração reduzida, sendo recomendável a elaboração do plano de manutenções e realização de intervenções entre 1 a 3 anos sem prejuízos relevantes ao desempenho do sistema.

REFERÊNCIAS

- ACIOLI, L.A., 2005. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 184p.
- ANA, 2016. **Sistema de monitoramento hidrológico**. Agência Nacional de Águas – ANA. Disponível em <<http://mapas-hidro.ana.gov.br/Usuario/mapa.aspx>>. Acessado em dezembro de 2016.
- ANTONINO, A.C.D., SOARES, W.A., SILVA, E.B., LIMA, J.R.S., NETTO, A.M., LIRA, C.A.B.O., 2004. **Utilização do método inverso para a caracterização hidrodinâmica de um neossolo flúvico**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH) – Vol. 9, n.3, 81-87.
- ARAÚJO, P.R., TUCCI, C.E.M., GOLDENFUM, J.A., 2000. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH) – Vol. 5, n.3, 21-29.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2015. NBR 16416: **Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro.
- AZZOUT, Y., BARRAUD, S., CRES, F.S., ALFAKIH, E., 1994. **Techniques alternatives em assainissement pluvial**. Paris: Technique et Documentation – Lavoisier. 372p.
- BAGARELLO, V., CASTELLINI, M., DRI PRIMA, S., GIORDANO, G., IOVINO, M., 2013. **Testing a simplified approach to determine field saturated soil hydraulic conductivity**. Procedia Environmental Sciences 19, 599-608.
- BALADÈS, J.D., LEGRET, M., MADIEC, H., 1995. **Permeable pavements: pollution management tools**. Water Sci. Technol. 32, 49-56.
- BRATTEBO, B.O., BOOTH, D.B., 2003. **Long-term stowmwater quantity and quality performance of permeable pavement systems**. Water Research 37, 4369-4376.
- BROOKS, R.H., COREY, A.T., 1964. **Hidraulic properties of porous media**. Hydrology Paper, v.3, Colorado State Univ. Fort Collins.
- BRUNETTI, ŠIMUNEK, J., PIRO, P., 2016. **A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement**. Journal of Hydrology 540, 1146-1161.
- BRUNETTI, G., ŠIMUNEK, J., TURCO, M., PIRO, P., 2017. **On the use of surrogate-based modeling for the numerical analysis of Low Impact Development techniques**. Journal Hydrology 548, 263-277.
- BRUNO, L.O., AMORIM, R.S.S., SILVEIRA, R., 2013. **Estudo da redução do escoamento superficial direto em superfícies permeáveis**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). Vol. 18, n.2, 237-247.
- BRUTSAERT, W., 1977. **Vertical infiltration in dry soil**. Water Resour. Res. 13, 363-368.
- BURDINE, N.T., 1953. **Relative permeability calculations from pore size distribution data**. Transactions of the Society of Petroleum Engineers of AIME, v. 198, p.71-78.
- CANHOLI, A.P., 2015. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo. Editora Oficina de Textos – 2 ed., 384p.

- CARDOSO, M.R.D., MARCUZZO, F.F.N., BARROS, J.R., 2014. **Classificação climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal**. Acta Geografia, v.8, n.16.
- CARY, L., PETELET-GIRAUND, E., MONTENEGRO, S., HIRATA, R., MARTINS, V., AUROUET, A., PAUWELS, H., KLOPPMANN, W., AQUILINA, L., others. 2013. **Goundwater salinization in a coastal multilayer aquifer: preliminary results on origins and mechanisms-example of Recife (Brazil)**. Procedia Earth and Planetary Science 7, 118-122.
- CASTRO, A.S., GOLDENFUM, J.A., SILVEIRA, A.L., MARQUES, D.M., 2013. **Avaliação da evolução do comportamento quantitativo de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), Vol. 18, n.1, 263-273.
- CHANDRAPPA, A.K., BILIGIRI, K.P., 2016a. **Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art-review**. Construction and Building Materials 111, 262-274.
- CHANDRAPPA, A.K., BILIGIRI, K.P., 2016b. **Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach**. Construction and Building Materials 123, 627-637.
- CMAA – CONCRETE MASONRY ASSOCIATION OF AUSTRALIA. **Permeable Interlocking Concrete Pavements – Design and Construction Guide**. 2010, 30p.
- COLLINS, K.A., HUNT, W.F., HATHAWAY, J.M., 2008. **Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern North Carolina**. J. Hydrol. Eng. 13, 1146-1157.
- COUTINHO, A.P., 2011. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da Cidade do Recife**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, CTG - UFPE. p. 153.
- COUTINHO, A.P., LASSABATERE, L., MONTENEGRO, S., ANTONINO, A.C.D., JARAMILLO, R.A., CABRAL, J.J.S.P., 2016. **Hydraulic characterization and hydrological behavior of a pilot permeable pavement in an urban centre, Brazil**. Hydrol. Process 30, 4242-4254.
- DIETZ, M.E., 2007. **Low impact development practices: a review of current research and recommendations for future directions**. Water Air Soil Poll. 186, 351-363.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT, 2006. **Manual de Drenagem de Rodovias – 2 ed**. Rio de Janeiro, 304p.
- DRAKE, J., BRADFORD, A., 2013. **Assessing the potencial for restoration of surface permeability for permeable pavements through maintenance**. Water Sci. Technol. 68. 1950-1958.
- DRAKE, J., BRADFORD, A., VAN SETERS, T., 2014. **Hydrologic performance of three partial-infiltration permeable pavements in a cold climate over low permeability soil**. J. Hydrol. Eng. 19, 04014016.
- EISENBERG, B., LINDOW, K., SMITH, D., 2013. **Permeable Pavements: Recommended Design Guidelines**. Permeable Pavement Technical Committee of the Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers. 262p.

- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2006. **Centro Nacional de pesquisa de solos**. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. Ed. Rio de Janeiro, 306 p.
- FASSMAN, E.A., BLACKBOURN, S., 2010. **Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils**. J. Hydrol. Eng. 15, 475-485.
- FIELD, R., MASTERS, H., SINGER, M., 1982. **Status of porous pavement research**. Water Res. - Vol.16, pp. 849-858.
- FUENTES, C., VAUCLIN, M., PARLANGE, J.Y., HAVERKAMP, R., (1998). **Soil water conductivity of a fractal soil**. In: Baveye, P., Parlange, J.Y., Stewart, B.A. (eds). Fractal in soil science. Boca Raton: CRC. Cap 11, p. 333-340.
- FURTUNATO, O.M., MONTENEGRO, S.M.G.L., ANTONINO, A.C.D., OLIVEIRA, L.M.M., SOUZA, E.S., MOURA, A.E.S.S., 2013. **Variabilidade especial de atributos físico-hídricos de solos em uma bacia experimental no Estado de Pernambuco**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.18, n.2, p. 135-147.
- GALLI, J., 1992. **Analysis of urban BMP performance and longevity in Prince George's Country**, Maryland, 92711. Prince George's Country Department of Environmental Resources.
- GILBERT, J.K., CLAUSEN, J.C., 2006. **Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut**. Water Res. 40, 826-832.
- GREEN, W.A., AMPT, G.A., 1911. **Studies on soils physics:1. The flow of air and water through soils**. J. Agric. Sci. (Cambridge) 4, 1-24.
- HAVERKAMP, R., PARLANGE, J.Y., 1986. **Predicting the water retention curve from particle distribution: I Sandy soils without organic matter**. Soil Sci. 142, 325-335.
- HAVERKAMP, R., PARLANGE, J.Y., STARR, J.L., SCHMITZ, G., FUENTES, C., 1990. **Infiltration under ponded conditions: 3. A predictive equation based on physical parameters**. Soil Sci. 149, 292-300.
- HAVERKAMP, R., ROSS, P.J., SMETTEM, K.R.J., PARLANGE, J.Y., 1994. **Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation**. Water Resources Research, 30, 2931-2935.
- HORTON, L.D., 1940. **An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity**. Soil Sci. Soc. Am. Proc., Madison, v.5, 399-417.
- IBGE, 2010. **Economia, Produto Interno Bruto dos Municípios. Diretoria de pesquisas, coordenação de contas nacionais**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acessado em 16/01/2017.
- JABUR, A.S., DORNELLES, F., SILVEIRA, A.L.L., GOLDENFUM, J.A., OKAWA, C.M.P., GASPARINI, R.R., 2015. **Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). Vol. 20, n.4, 937-945.
- JUNIOR, L.L.C, BARBASSA, A.P., 2006. **Parâmetros de projeto de microrreservatório, de pavimentos permeáveis e de previsão de enchentes urbanas**. Revista Eng. Sanit. Ambient. Vol. 11, n.1, 46-54.
- KAYHANIAN, M., ANDERSON, D., HARVEY, J.T., JONES, D., MUHUNTHAN, B., 2012. **Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots**. Journal of Environmental Management 95, 114-123.

- KELEMIT, D., STENBECK, P., 2012. **Investigation of existing infiltration strips in Växjö (translated from Swedish: Utredning av funktion hos befintliga infiltrationsstråk i Växjö).** Linné University, Växjö, Sweden. MSc Thesis.
- KIA, A., WONG, H.S., CHEESEMAM, C.R., 2017. **Clogging in permeable concrete: A review.** Journal of Environmental Management 193, 221-233.
- KOSTIAKOV, A.N., 1932. **On the dynamics of the coefficients of waterpercolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamicpoint of view for purpose of amelioration.** Transactions of the 6th communication of the Int. Society of Soil Sciences, Part. A: 17-21.
- KUANG, X., SANSALONE, J., YING, G., RANIERI, V., 2011. **Pore-structure models of hydraulic conductivity for permeable pavement.** Journal of Hydrology 399, 148-157.
- KUMAR, K., KOZAK, J., HUNDAL, L., COX, A., ZHANG, H., 2016. **In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot – A four-year study.** Journal of Environmental Management 167, 8-14.
- LAMBE, T., WHITMAN, R., 1979. **Soil mechanics, SI version.** New York: John Wiley & Sons.
- LASSABATERE, L., ANGULO-JARAMILLO, R., SORIA UGALDE, J.M., CUENCA, R., BRAUD, I., HAVERKAMP, R., 2006. **Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments-BEST.** Soil Sci. Soc. Am. J. 70, 521-532.
- LI, H., KAYHANIAN, M., HARVEY, J.T., 2013. **Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods.** Journal of Environmental Management 118, 144-152.
- LIBARDI, P.L., 2005. **Dinâmica da água no solo.** São Paulo, Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, 335p.
- LU, N., LIKOS, W.J., 2004. **Rate of capillary rise in soil.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering. ASCE. Vol. 130, n.6, 646-650.L
- LUCKE, T., WHITE, R., NICHOLS, P., BORGWARDT, S., 2015. **A simple field test to evaluate the maintenance requirements of permeable interlocking concrete pavements.** Water 2015, 7(6), 2542-2554.
- MARCHIONI, M., SILVA, C. O., 2011. **Pavimento intertravado permeável: melhores práticas.** São Paulo. Editora Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). 24p.
- MARTIN III, W.D., KAYE, N.B., PUTMAN, B.J., 2014. **Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete.** Construction and Building Materials 59, 78-84.
- MUALEM, Y., 1976. **A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.** Water Resources Research, Washington, Vol. 12, p.513-522.
- NNADI, E.O., NEWMAN, A.P., COUPE, S.J., MBANASO, F.U., 2015. **Stormwater harvesting for irrigation purposes: An investigation of chemical quality of water recycled in pervious pavement system.** Journal of Environmental Management 147, 246-256.
- NOZI, T., MASE, T., MURATA, K., 1999. **Maintenance and management aspecto f stormwater infiltration system.** In: Proceedings of the 8th International Conference on Urban Drainage, Sydney, Australia.

- PAGE, J.L., WINSTON, R.J., MAYES, D.B., PERRIN, C., HUNT, W.F., 2015. **Hydrologic mitigation of impervious cover in the municipal right-of-way through innovative stormwater control measures.** J. Hydrol. 527, 923-932.
- PARLANGE, J.-Y., LISLE, I., BRADDOCK, R.D., SMITH, R.E., 1982. **The three-parameter infiltration equation.** Soil Sci. 133, 337-341.
- PEDRON, F.A., DALMOLIN, R.S.D., AZEVEDO, A.C., KAMINSKI, J., 2004. **Solos Urbanos.** Ciência Rural, v.34, n.5, 1647-1653.
- PHILIP, J.R., 1957. **The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution.** Soil Sci. 83, 345-357.
- POLETO, C., 2011. **SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems): Uma contextualização histórica.** Revista Thema. 08(01).
- PRATT, C.J., MANTLE, J.D.G., SCHOFIELD, P.A., 1989. **Urban stormwater reduction and quality improvement through the use of permeable pavements.** Water Sci. Technol. 21, 769-778.
- RANGELOV, M., NASSIRI, S., CHEN, Z., RUSSELL, M., UHLMAYER, J., 2017. **Quality evaluation tests for pervious concrete pavements' placement.** International Journal of Pavement Research and Technology 10, 245-253.
- RAWLS, W.J., AHUJA, L.R., BRAKENSIEK, D.L., SHIRMOHAMMADI, A., 1993. **Infiltration and soil water movement, in Handbook of Hydrology.** Ed. David R. Maidment, Mc-Graw-Hill, Inc., USA, p.5.1-5.51.
- REICHARDT, K.R.L., TIMM, L.C., 2004. **Solo, planta e atmosfera. Conceitos, processos e aplicações.** Barueri, São Paulo, Ed. Manole.
- RICHARDS, L.A., 1931. **Capillary conduction of liquids in porous mediums.** Physics, v.1, p.318-333.
- SANTOS, C.A.G., SILVA, J.F.C.B.C., 2012. **Caracterização hidrodinâmica dos solos da bacia experimental do riacho Guaraíra utilizando o método Beerkan.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.17, n.4, p.149-160.
- SCIENCE DIRECT. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em 17/07/2017.
- SHACKEL, B., MYERS, B., PEARSON, A., 2010. **Experience in the application of permeable interlocking concrete paving in Australia.** Concrete in Australia, Vol 36 No 2. Pp 45-50.
- SILVA, J.P., 2003. **Sedimentologia, batimetria, qualidade da água e vulnerabilidade do Rio Capibaribe na Cidade do Recife – PE.** Dissertação de mestrado em geociências – Universidade Federal de Pernambuco. 101 p.
- SMETTEM, K.R.J., PARLANGE, J.Y., ROSS, P.J., HAVERKAMP, R., 1994. **Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 1. A capillary-based theory.** Water Resour. Res. 30, 2925-2929.
- SOUZA, E.S., 2005. **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 de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Energéticas e Nucleares, DEN – UFPE, 213 pg.

- SOUZA, E.S., ANTONINO, A.C.D., ÂNGULO-JARAMILO, R., NETTO, A.M., 2008. **Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.12, n.2, p. 128-135. Campina Grande – PB.
- STROOSNIJDER, L., 1976. **Infiltratie en Herverdeling van water in gronde.** Versl. Landbouwk. Onderz. 847.
- SWARTZENRUBER, D., 1987. **A quasi-solution of Richards' equation for the downward infiltration of water into soil.** Water Resour. Res. 23, 809-817.
- TERZAGHI, K., PECK, R., MESRI, G., 1996. **Soil mechanics in engineering practice.** 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York.
- VALIANTZAS, J.D., 2010. **New linearized two-parameter infiltration equation for direct determination of conductivity and sorptivity.** Journal of Hydrology 384, 1-13.
- VALINSKI, N.A., CHANDLER, D.G., 2015. **Infiltration performance of engineered surfaces commonly used for distributed stormwater management.** Journal of Environmental Management 160, 297-305.
- VAN GENUNTCHEN, M. TH., 1980. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** Soil Science Society of American Journal, Madison, v.44, p.892-898.
- VIRGILIS, A.L.C., 2009. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheia.** Dissertação de Mestrado - EPUSP, 191p.
- WINSTON, R. J., AL-RUBAEI, A. M., BLECKEN, G. T., VIKLANDER, M., 2016. **Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate – the effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling.** J. Environ. Man. 169, 132-144.
- WU, L., PAN, L., MITCHELL, J., SANDEN, B., 1999. **Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrometers.** Soil Sci. Soc. Am. J. 63, 788-792.
- ZATARÁIN, F., FUENTES, C., HAVERKAMP, R., ANTONINO, A.C.D., 2003. **Predicción de la forma de la característica de umadade des suelo a partir de la curva granulométrica.** In: Congreso Nacional de Irrigacion, 13, 2003. Zacatecas: ANEI, 2003. Desarrollo y transferencia de tecnología de riego y drenaje, v.2, p.212-219.

APÊNDICE A

Nas Figuras a seguir apresentados os ajustes do modelo empírico unidimensional acoplado à parcela de dispersão lateral aos dados experimentais.

Figura 38 - Curvas de infiltração x tempo ajustadas pelo método Phillip (1957).

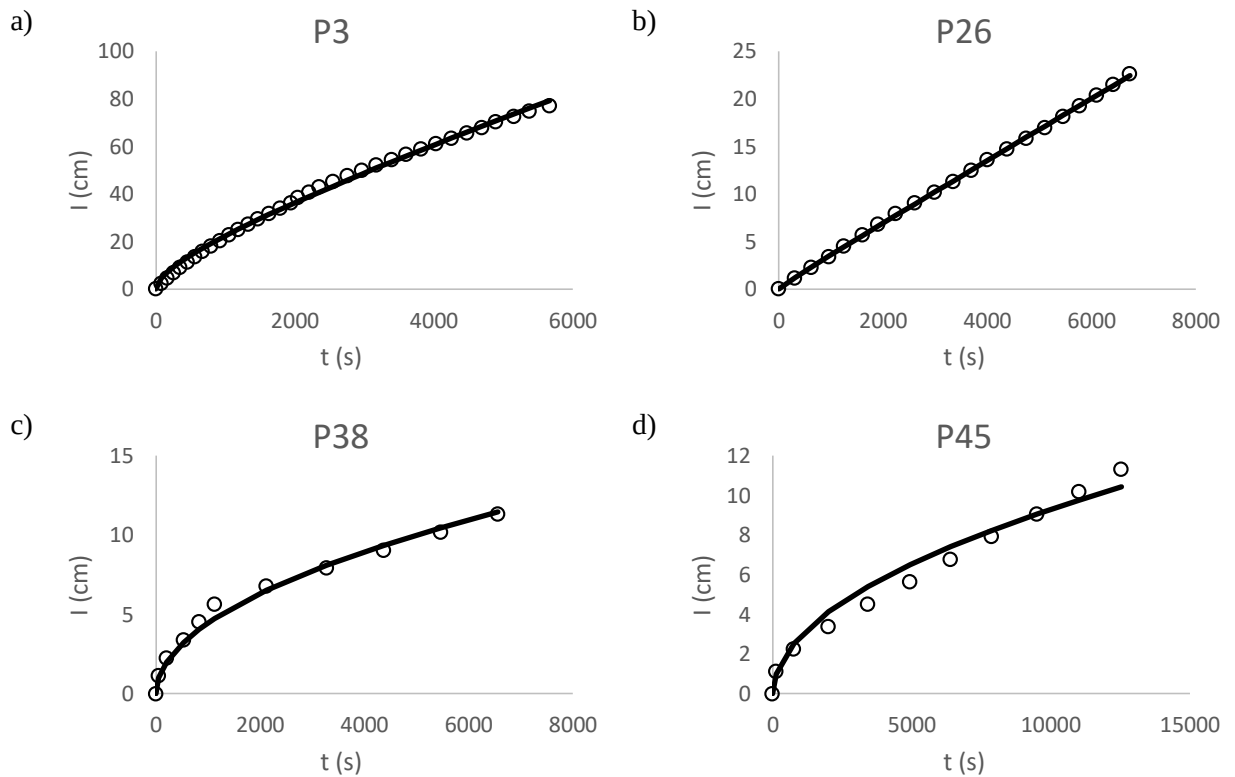
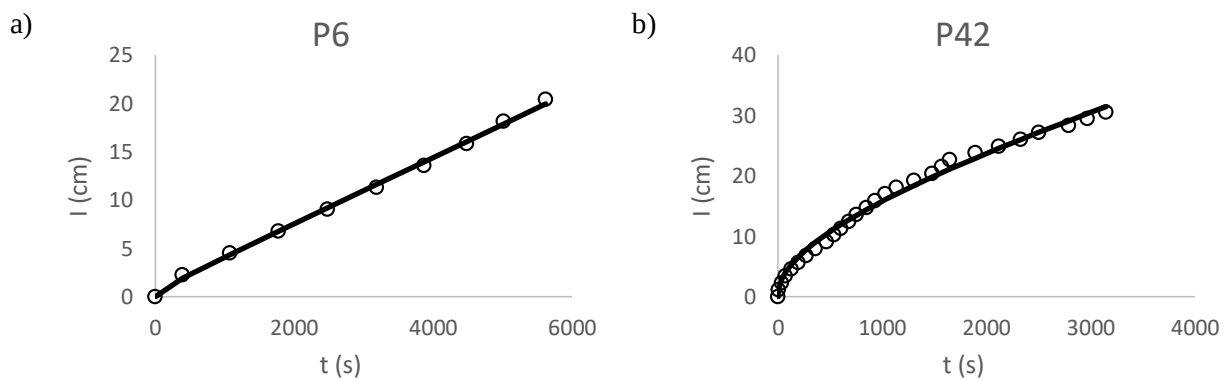


Figura 39 - Curvas de infiltração x tempo com ajuste pelo método Stroosnijder (1976).



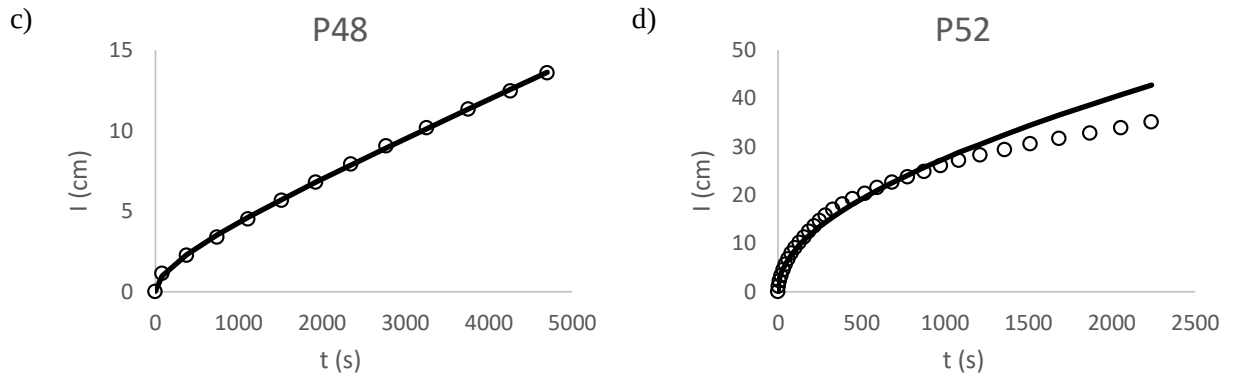


Figura 40 - Curvas de infiltração x tempo ajustadas pelo método The “Knight” soil (Philip 1974).

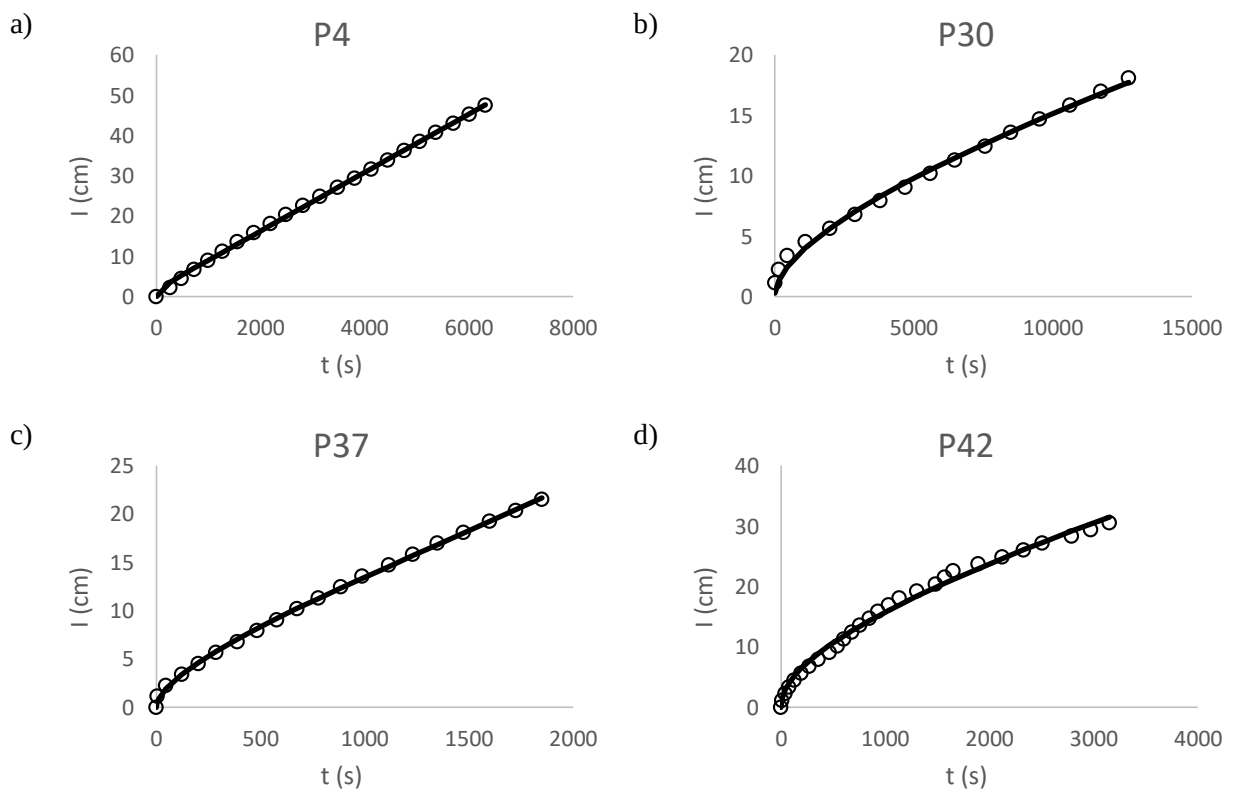


Figura 41 - Curvas de infiltração x tempo ajustadas pelo método Brutsaert (1977).

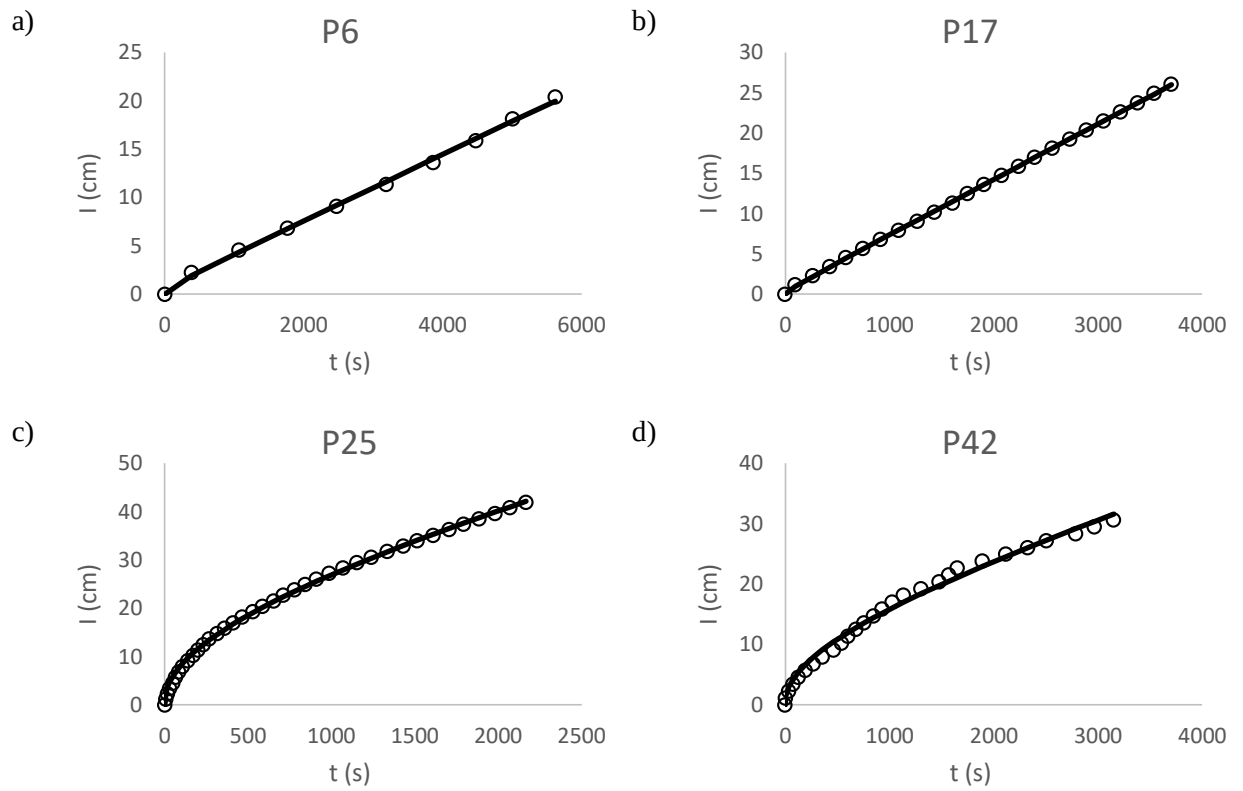


Figura 42 - Curvas de infiltração x tempo com ajustadas pelo método Swartzendruber (1987).

