



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JULIANA MARIA MARTINS MATOS

MODELAGEM DA INFILTRAÇÃO DE UM PAVIMENTO
PERMEÁVEL

RECIFE, 2017

JULIANA MARIA MARTINS MATOS

MODELAGEM DA INFILTRAÇÃO DE UM PAVIMENTO PERMEÁVEL

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho

RECIFE, 2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

M433m Matos, Juliana Maria Martins
Modelagem da infiltração de um pavimento permeável I / Juliana Maria Martins
Matos. – 2017.
68 f.: il., fig. tab.

Orientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de
Engenharia Civil, 2017.

Inclui referências e apêndice.

1. Engenharia Civil. 2. Blocos intertravados. 3. Capacidade de infiltração.
4. Condutividade hidráulica. 5. Modelo tridimensional. 6. Modelo unidimensional.
7. Método BEST. 8. Indicador de manutenção hidrodinâmico. I. Coutinho, Artur
Paiva (Orientador). II. Título

624 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-2017/ 247



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO(S): Juliana Maria Martins Matos

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Artur Paiva Coutinho

Avaliador 1: Alfredo Ribeiro Neto

Avaliador 2: Severino Martins dos Santos Neto

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

Modelagem da Infiltração em um Pavimento Permeável

LOCAL:

DATA: 21/07/2017 **HORÁRIO DE INÍCIO:** 8:00.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: 8,93 (deixar 'Exame Final', quando for o caso).

1) (X) aprovado(s) (nota > = 7,0), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 = < nota < 7,0**, será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () reprovado(s). (nota <3,0)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 21 de julho de 2017

Orientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato:

Coordenação do Curso de Engenharia Civil-Dcivil

Rua Acadêmico Hélio Ramos s/nº. Cidade Universitária. Recife-PE CEP: 50740-530.
Fones: (081)2126.8220/8221 Fone/fax: (081)2126.8219.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, na certeza de que sem Ele nada seria possível.

Agradeço à toda minha família: minhas avós, tios, primos, meu irmão, Felipe Martins Matos, que é um exemplo de profissional para mim e sempre me incentiva a buscar mais conhecimento e, em especial, aos meus pais, Wilson Pacífico de Godoy Matos e Amélia Cortez Martins, por todo amor e carinho recebido e por sempre me ensinarem o valor do estudo.

Agradeço ao meu professor orientador Artur Paiva Coutinho, por todo tempo que dedicou para me ajudar na realização deste trabalho, assim como ao pessoal do DEN (Departamento de Energia Nuclear) que também contribuíram para este trabalho.

Agradeço a todos os professores que tive ao longo da faculdade e do colégio, que participaram de forma ativa na minha formação.

Agradeço aos meus amigos da faculdade, por tornarem esta jornada mais leve.

Agradeço aos meus amigos do colégio, em especial, ao grupo do Twix Gigante, por sempre estarem por perto, me apoiando.

Agradeço ao meu amigo e namorado, George, por toda a compreensão e por sempre estar ao meu lado.

E por último, mas não menos importante, agradeço aos meus amigos do Grupo Jovem Ágape, por cada palavra e gesto de amor recebido.

*“ O que faço é apenas uma gota no oceano, mas sem ela, o oceano será menor”
Santa Teresa de Calcutá*

RESUMO

O aumento populacional nas grandes cidades e conseqüente impermeabilização do solo natural trouxe diversos impactos negativos para o meio urbano como, por exemplo, a redução da infiltração e do armazenamento da água no solo urbano. Dessa forma, os pavimentos permeáveis surgem como uma alternativa para compensar os efeitos causados pela urbanização. Este trabalho tem o objetivo de avaliar a capacidade de infiltração de blocos intertravados de concreto instalados em um estacionamento na cidade de Recife/PE utilizando modelos unidimensionais e tridimensionais para determinação dos parâmetros hidráulicos e propor um indicador hidrodinâmico de manutenção (IHM). O modelo unidimensional foi estimado pela equação de dois termos de Philip (1957) e o modelo tridimensional a partir do algoritmo BEST (Lassabatère et al., 2006). Os dois modelos apresentaram ótimo desempenho nos ajustes para estimativa da lâmina infiltrada. O pavimento apresentou classificação no grupo A conforme classificação hidrológica do SCS (Soil Conservation Service) proposta por Rawls et al. (1992) Porém, conforme classificação de Terzaghi e Peck (1967), o grau de permeabilidade do pavimento foi considerado baixo indicando preliminarmente uma necessidade de manutenção. O IHM permitiu avaliar a permeabilidade do pavimento de maneira geral e obteve uma média de 23,75 mm/h.

Palavras-chave: Blocos intertravados. Capacidade de infiltração. Condutividade hidráulica. Modelo unidimensional. Modelo tridimensional. Método BEST. Indicador de manutenção hidrodinâmico.

ABSTRACT

The population increase in the big cities and consequent waterproofing of the natural soil brought several negative impacts to the urban environment as the reduction of infiltration and the storage of water in the urban soil. In this sense, permeable pavements come up as an alternative to offset the effects caused by urbanization. This paper aims to assess the infiltration capacity of concrete interlocking blocks installed in a parking lot in the city of Recife/PE using one-dimensional and three-dimensional models to determine the hydraulic parameters and propose a hydrodynamic maintenance indicator (HMI). The one-dimensional model was estimated from the equation of two terms of Philip (1957) and the three-dimensional model from the BEST algorithm (Lassabatère et al., 2006). The two models presented excellent performance in the adjustments for estimating the infiltrated water line. The pavement presented classification in group A according to the hydrological classification of the SCS (Soil Conservation Service) proposed by Rawls et al. (1992). However, according to Terzaghi and Peck (1967) classification, the degree of permeability of the floor was deemed low, pointing to a preliminary need for maintenance. The HMI allowed to evaluate the permeability of the pavement in general and obtained an average of 23.75 mm/h.

Keywords: Interlocked blocks. Infiltration capacity. Hydraulic conductivity. One-dimensional model. Three-dimensional model. BEST method. Hydrodynamic maintenance indicator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Dispositivo de microdrenagem.....	15
Figura 2 - Dispositivo de macrodrenagem.	16
Figura 3- Comparação entre os hidrogramas de uma área urbanizada e não urbanizada.	17
Figura 4- Classificação das técnicas compensatórias para o manejo de águas pluviais .	18
Figura 5- Aplicação de pavimento permeável.	19
Figura 6- Esquema do sistema de infiltração total.	20
Figura 7- Esquema do sistema de infiltração parcial.	21
Figura 8- Esquema do sistema sem infiltração.	22
Figura 9- Asfalto poroso.	23
Figura 10- Concreto poroso.	23
Figura 11- Bloco intertravado de concreto.....	23
Figura 12- Anéis de plástico.	24
Figura 13- Esquema para análise estrutural e hidrológica.	25
Figura 14- Teste do infiltrômetro de anel simples.	27
Figura 15- Ensaio do SWIFT.	29
Figura 16 - Fotografia para contagem dos blocos molhados no ensaio.	30
Figura 17 – Mapa de situação do estacionamento.	34
Figura 18– Alagamento devido à forte chuva na região metropolitana do Recife.....	35
Figura 19- Precipitação média mensal para a cidade do Recife (1994- 2016).....	35
Figura 20- Perfil síntese da planície do Recife.	36
Figura 21- Modelagem adotada em cada trecho.	37
Quadro 1- Critérios adotados para determinação dos parâmetros do modelo unidimensional.	39
Quadro 2 – Classificação hidrológica.	46
Quadro 3 – Grau de Permeabilidade.	47
Figura 22- Resultado gráfico dos ajustes unidimensionais e tridimensionais.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classes de obstrução do pavimento associado a taxa de infiltração.	27
Tabela 2 - Manutenção sugerida pelo resultado do SWIFT.....	30
Tabela 3- Valores ideais para cada critério estatístico	44
Tabela 4- critérios de interpretação do índice “c”	45
Tabela 5- Parâmetros hidráulicos 1D, Classificação hidrológica e grau de permeabilidade	49
Tabela 6- Resultados Estatísticos 1D.....	50
Tabela 7- Parâmetros hidráulicos 3D, classificação hidrológica e grau de permeabilidade	51
Tabela 8- Resultados Estatísticos 3D.....	52
Tabela 9 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 21	56
Tabela 10 – IHM, classificação hidrológica e grau de permeabilidade.	57
Tabela 11 - Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 01	64
Tabela 12 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 02	64
Tabela 13 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 03	64
Tabela 14 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 04	64
Tabela 15 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 05	65
Tabela 16 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 07	65
Tabela 17 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 08	65
Tabela 18 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 09	65
Tabela 19 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 11	66
Tabela 20 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 13	66
Tabela 21 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 21	66
Tabela 22 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 22	67
Tabela 23 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 30	67
Tabela 24 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 31	67
Tabela 25 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 32	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa e motivação	13
1.2 Objetivos gerais e específicos	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Drenagem urbana	15
2.1.1 Microdrenagem.....	15
2.1.2 Macrodrenagem	15
2.2 Técnicas compensatórias para a drenagem urbana	16
2.3 Pavimento permeável	18
2.3.1 Vantagens do pavimento permeável.....	19
2.3.2 Sistemas de pavimento permeável.....	20
2.3.3 Camadas do pavimento permeável	22
2.3.4 Análise estrutural e hidrológica do projeto.....	24
2.3.5 Manutenção.....	26
2.3.5.1 <i>Ensaio de Infiltração</i>	26
2.3.6 Pesquisas recentes referentes às técnicas do pavimento permeável	30
2.3.6.1 <i>Pesquisas Brasileiras</i>	30
2.3.6.2 <i>Pesquisas Internacionais</i>	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Características da área de estudo	34
3.1.1 Características Climáticas.....	34
3.1.2 Características Geotécnicas	36
3.2 Problemática do trabalho	37
3.3 Ensaio de infiltração	37
3.4 Determinação dos parâmetros do modelo unidimensional	38
3.5 Determinação dos parâmetros do modelo tridimensional	39
3.5.1 Determinação dos parâmetros de forma (m, n e η).....	39
3.5.2 Determinação dos parâmetros de normalização (θ_s , K_s e h_g)	40
3.6 Análise estatística da qualidade do ajuste	43
3.7 Análise qualitativa	46

3.7.1 Classificação hidrológica.....	46
3.7.2 Grau de permeabilidade.....	46
3.8 Proporção da condutividade hidráulica e da sorvidade na infiltração.....	47
3.9 Proposição de indicador.....	47
4 RESULTADOS.....	49
4.1 Caracterização hidrodinâmica.....	49
4.2 Importância da gravidade e da capilaridade no processo de infiltração.....	56
4.3 Indicador hidrodinâmico de manutenção.....	56
5 CONCLUSÃO.....	59
<u>REFERÊNCIAS.....</u>	60
<u>APÊNDICE.....</u>	64

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o aumento populacional tem sido acompanhado pelo elevado processo de urbanização nas grandes cidades brasileiras. O principal efeito da urbanização é o aumento do uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas. Assim, ações como compactação do solo, retirada da vegetação natural, impermeabilização das superfícies com concreto, asfalto e outros materiais se tornam cada vez mais rotineiras.

Os principais impactos dessas alterações são notados a partir das mudanças em componentes do ciclo hidrológico no meio ambiente urbano. De maneira notória, para uma precipitação pluviométrica atuando sobre a bacia urbana, fenômenos como o escoamento superficial direto e a infiltração da água no solo são fortemente afetados. Com o desenvolvimento do processo de impermeabilização na bacia urbana, o escoamento superficial cresce em volume e magnitude da vazão e o tempo de concentração diminui. Além disso, a infiltração e o armazenamento da água no solo diminuem, gerando consequências de disponibilidade de água no solo urbano e impactos negativos na recarga natural dos aquíferos.

Várias tecnologias que possuem o armazenamento de água e a infiltração como princípio de funcionamento estão sendo cada vez mais utilizadas na drenagem urbana. Estas técnicas possuem o objetivo de reestabelecer as condições naturais dos processos de transferência de água no meio urbano. Essas técnicas têm sido denominadas “Técnicas compensatórias para a drenagem urbana” ou “Técnicas Alternativas”. O termo “compensatória” significa que estão sendo compensados os efeitos negativos da urbanização, principalmente a impermeabilização das superfícies.

Algumas das Técnicas compensatórias para a drenagem urbana que possuem a infiltração como princípio básico de funcionamento são: Pavimentos permeáveis, jardins de chuva, telhados verdes, trincheiras de infiltração, valas de infiltração. Outras técnicas apresentam o armazenamento de água como principal princípio de funcionamento: reservatórios para aproveitamento de água de chuva, reservatório de detenção, retenção.

Dentre essas técnicas, os pavimentos permeáveis são bastante usados como uma alternativa para melhoria da infiltração em calçadas, estacionamentos e vias de baixo tráfego. Concreto poroso, asfalto poroso ou blocos intertravados são alguns dos tipos mais comuns de pavimentos permeáveis, também chamados de pavimentos ecológicos.

Os pavimentos permeáveis (PP) são compostos de uma camada de revestimento, uma camada de filtro para os poluentes oriundos da água de escoamento e uma camada de reservatório que possui o objetivo de armazenar e infiltrar a água pluvial, ou para os casos em que o solo não permita infiltração, apenas armazenar e liberar gradualmente o volume retido para a rede de drenagem convencional.

O bom funcionamento hidráulico de um PP é altamente dependente das condições de infiltração da camada de revestimento. Desse modo, é necessário a existência de metodologias que permitam avaliar essa capacidade e velocidade de infiltração para que medidas de manutenção preventiva sejam usadas nessas tecnologias.

Nesse contexto, a infiltrometria fornece uma série de metodologias que possibilitam a obtenção de parâmetros hidráulicos e de indicadores da capacidade de infiltração de meios porosos como os solos. Este trabalho busca adaptar essas metodologias já consolidadas nos estudos de caracterização hidráulica de solos para a compreensão da capacidade de infiltração de um meio poroso como o revestimento de um PP e propor um indicador de manutenção do pavimento.

1.1 Justificativa e motivação

Vários trabalhos como teses e dissertações a respeito da eficiência de pavimentos permeáveis têm sido desenvolvidos. No entanto, a maioria desses estudos trata da análise dos pavimentos permeáveis em escala piloto.

Nesse sentido, existe uma carência de trabalhos técnicos que avaliem o desempenho desse tipo de tecnologia em condições reais de uso e aplicação no meio urbano. Este trabalho de conclusão de curso avalia um caso real de aplicação de pavimento permeável em prédio comercial nas condições reais de clima e geologia da cidade do Recife. Espera-se contribuir com a literatura técnica científica a partir de modelagem de ensaios de infiltração e da proposição de um indicador que permita tomar decisões quanto a necessidade de manutenção.

1.2 Objetivos gerais e específicos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a capacidade de infiltração de um pavimento permeável instalado em condições reais de funcionamento.

Como objetivo específico, pode-se listar:

- Determinar parâmetros hidráulicos da camada de revestimento de um pavimento permeável usando modelos unidimensionais e tridimensionais;
- Propor um indicador de manutenção baseado nos parâmetros hidrodinâmicos;
- Realizar análise estatística do desempenho dos modelos unidimensionais e tridimensionais na descrição do fenômeno de infiltração.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Drenagem urbana

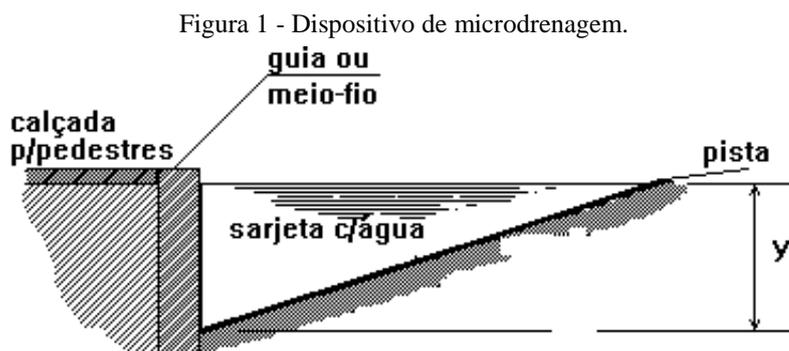
A drenagem urbana tem o objetivo de conduzir as águas pluviais para pontos mais distantes possíveis das cidades, a fim de evitar inundações na zona urbana e prevenir contaminações por doenças hídricas. A drenagem faz parte do conjunto de operações de infraestrutura que compõem o saneamento básico de uma cidade. Por isso, ela se tornou indispensável na infraestrutura urbana.

O sistema de drenagem pode ser dividido em dois tipos: microdrenagem e macrodrenagem. As enchentes ocorrem, principalmente, quando há algum tipo de falha nesses subsistemas.

2.1.1 Microdrenagem

De acordo com Tucci (2003), a microdrenagem se refere à rede primária da coleta das águas pluviais. Logo, esse subsistema fica responsável pela captação e encaminhamento da água para a macrodrenagem.

São geralmente obras que possuem um risco moderado e o tempo de retorno varia entre 2 e 10 anos. Alguns dos dispositivos utilizados na microdrenagem urbana são sarjetas, meios-fios e bueiros (Figura 1).



Fonte: <http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/Dren01.html>

2.1.2 Macrodrenagem

A macrodrenagem recebe as águas do sistema de microdrenagem e é responsável pelo destino final das águas pluviais. Segundo Tucci (2003), para efeito de projeto, o risco associado

e o volume de precipitação devem ser considerados superiores aos utilizados na microdrenagem. O tempo de retorno adotado no projeto é de 20, 50 ou 100 anos.

Alguns exemplos dos dispositivos da macrodrenagem urbana são galerias de grande porte, barragens e canais. Na Figura 2 pode-se ver um exemplo de um dispositivo de macrodrenagem.

Figura 2 - Dispositivo de macrodrenagem.



Fonte: <https://andradetalis.files.wordpress.com/2011/12/canal-dsc04605yg0.jpg>

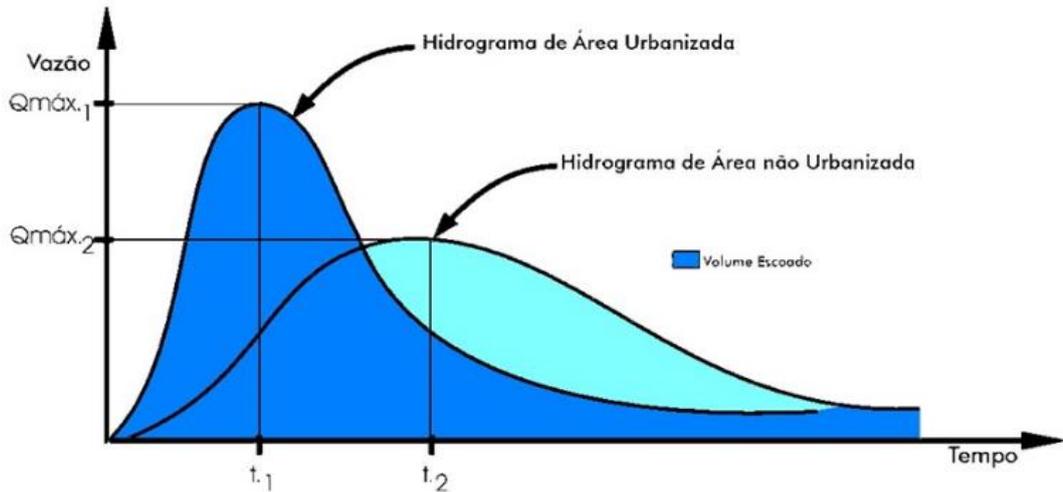
2.2 Técnicas compensatórias para a drenagem urbana

O sistema de drenagem tradicional tem o objetivo de conduzir a água o mais rápido possível para jusante. Porém, esta técnica eleva o pico de vazão nos centros urbanos, aumentando o escoamento pela superfície e dificultando a infiltração e o armazenamento da água no lençol freático.

Com o objetivo de reverter ou minimizar os efeitos causados pela drenagem convencional, foram criadas diversas técnicas, conhecidas como “técnicas compensatórias”. Em sua maioria, elas são capazes de armazenar e infiltrar as águas pluviais, e em alguns casos são capazes de promover a evapotranspiração, como, por exemplo, os telhados verdes. Dessa forma, é possível reduzir a vazão de pico dos centros urbanos, de forma que o hidrograma dessa

área se assemelhe às características do hidrograma de uma área não urbanizada, como mostra a Figura 3.

Figura 3- Comparação entre os hidrogramas de uma área urbanizada e não urbanizada.



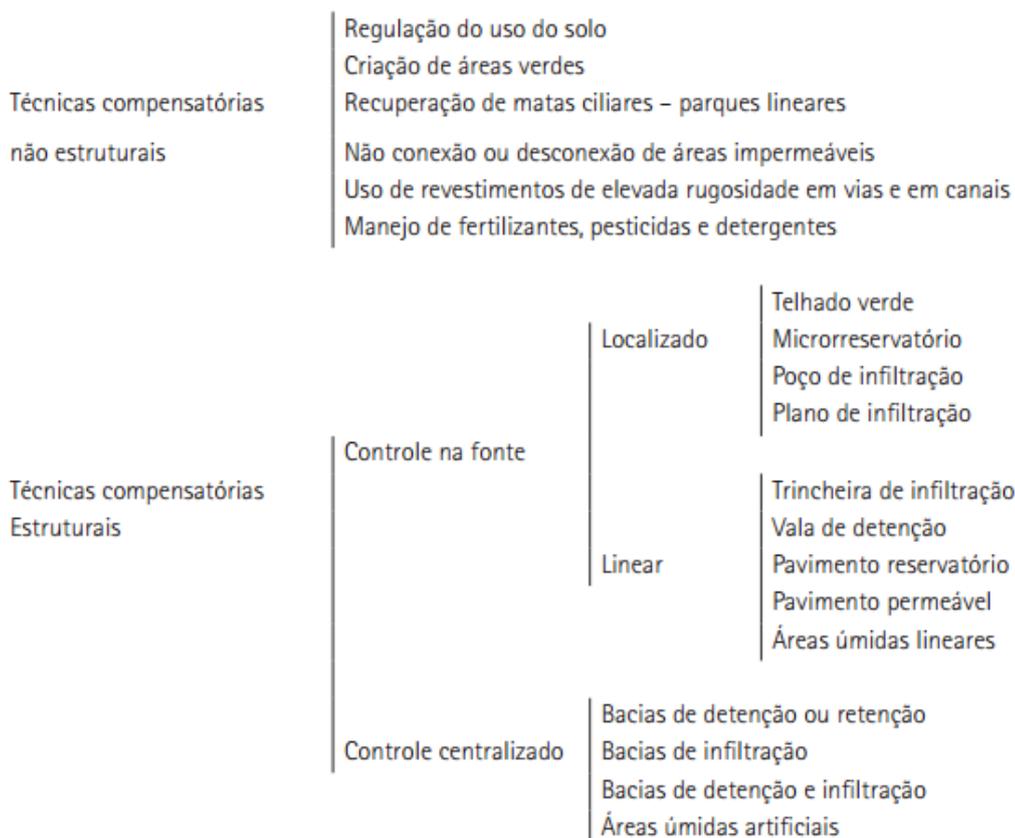
Fonte: <http://fontehidrica.blogspot.com.br/2011/11/impactos-da-urbanizacao-em-bacias.html>

Segundo Righetto et al. (2009), as técnicas compensatórias podem ser classificadas de acordo com a sua maneira de influenciar os escoamentos superficiais (estrutural ou não-estrutural) e conforme a sua localização na bacia hidrográfica (controle na fonte ou controle centralizado). A Figura 4 ilustra as classificações e alguns exemplos de técnicas compensatórias.

De acordo com Righetto et al. (2009), é importante que as áreas destinadas para as técnicas compensatórias possam ter múltiplos usos, pois auxiliam na aceitação dessas técnicas pela população. Além disso, justifica-se melhor o uso do solo, que possui um elevado valor econômico em áreas urbanas, para fins de manejo pluviais. Como exemplo, pode-se citar o aproveitamento de uma área destinada ao amortecimento de cheias associada a um parque.

Um dos exemplos de técnicas compensatórias que tem sido cada vez mais utilizado é o pavimento permeável. Além de auxiliar no armazenamento e na infiltração das águas pluviais para o lençol freático, ele permite o uso múltiplo do solo (utilizado como técnica compensatória e como via para pedestres ou automóveis).

Figura 4- Classificação das técnicas compensatórias para o manejo de águas pluviais



Fonte: Righetto et al. (2009. p.155)

2.3 Pavimento permeável

O pavimento é uma estrutura construída após a terraplenagem e tem a função de resistir e distribuir ao subleito os esforços gerados pelo tráfego, proporcionando maior conforto e segurança ao usuário. Nos pavimentos tradicionais, busca-se conferir a impermeabilidade máxima possível ao revestimento com o objetivo de evitar a sua rápida degradação devido às pressões hidrodinâmicas geradas pelo tráfego pesado.

Os pavimentos permeáveis, diferente dos tradicionais, possuem elevada porosidade e permeabilidade a fim de permitir a infiltração e armazenamento da água nas camadas inferiores ao revestimento. Eles surgiram como uma técnica alternativa para devolver ao solo a sua capacidade de infiltração.

Devido ao elevado teor de vazios, o PP não é capaz de suportar as cargas geradas pelo tráfego pesado. Dessa forma, eles são comumente aplicados em calçadas, estacionamentos, pátios e jardins, ciclovias, quadras, decks de piscina ou em ruas com baixo tráfego ou até mesmo em áreas internas que ficam constantemente molhadas, como áreas de piscina e de estufa.

O uso do pavimento permeável é restrito em alguns casos. Como já foi visto, ele deve ser evitado em áreas com tráfego pesado devido à redução da sua capacidade de carga ocasionada pelo elevado teor de vazios presente em sua estrutura. Além disso, ele não é indicado em áreas que tenham uma acumulação elevada de poluentes ou deposição de sedimentos ou matéria orgânica, já que o PP será rapidamente colmatado e perderá sua função hidráulica. A Figura 5 ilustra uma das aplicações do pavimento poroso.

Figura 5- Aplicação de pavimento permeável.



Fonte: http://www.lafarge.com.br/wps/portal/br/3_A_3_A_5-Hydromedia

2.3.1 Vantagens do pavimento permeável

Segundo a American Society of Civil Engineers (ASCE) (2013), algumas vantagens do pavimento permeável são:

- Redução do volume de água escoado na superfície, diminuindo o risco de inundação a jusante;
- Recarga e manutenção dos aquíferos subterrâneos a depender do tipo de solo que for aplicado;
- Melhoria da qualidade da água, pois as camadas do pavimento funcionam como um filtro retendo os poluentes, que poderiam contaminar o lençol freático ou o sistema de drenagem;
- Redução ou eliminação da infraestrutura do sistema tradicional de drenagem, que pode gerar uma economia significativa no custo do projeto e da manutenção.

A Concrete Masonry Association of Australia (CMAA) (2010) cita também outros benefícios do pavimento permeável:

- Otimização do uso da terra combinando duas funções: pavimento estrutural e infiltração e/ou armazenamento da água pluvial;
- Redução de instalações para a retenção da água, utilizando o próprio pavimento para realizar esta função;
- Reuso da água para fins não potáveis, visto que está livre de resíduos e sedimentos.

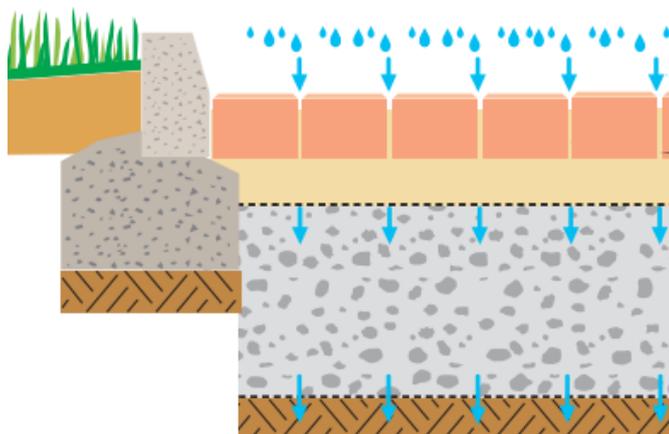
O PP é capaz de combinar diversas funções como controle do escoamento superficial, melhoria da qualidade e reaproveitamento da água. Assim, com uma única construção, pode-se ter um eficiente uso da terra, pois não será necessário outro local para construção de bacias de retenção ou de estações de tratamento de água.

2.3.2 Sistemas de pavimento permeável

Conforme a ASCE (2013), há três tipos de sistemas de pavimentos permeáveis: infiltração total, infiltração parcial e sem infiltração.

- Sistema de infiltração total: são ideais para locais em que o solo natural apresenta uma boa permeabilidade. Neste sistema, a água precipitada infiltra totalmente no solo e recarrega o lençol freático. O uso de tubulação e galerias não se faz necessário, o que torna este sistema uma solução mais econômica. Um esquema do funcionamento desse dispositivo é apresentado na Figura 6.

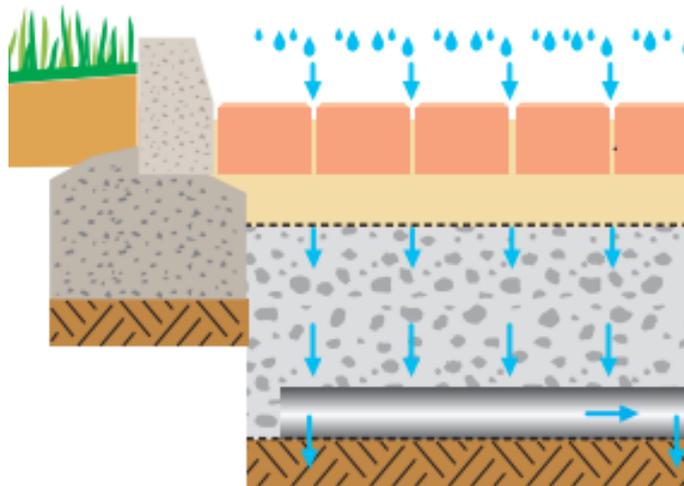
Figura 6- Esquema do sistema de infiltração total.



Fonte: adaptado de INTERPAVE (2008. p.05)

- Sistema de infiltração parcial: são geralmente utilizados em solos que apresentam baixa permeabilidade. Neste sistema, uma parte da água infiltra para o solo natural e a outra parte é drenada através de tubos perfurados para outros reservatórios, rios ou para rede de drenagem. No caso em que a água é encaminhada para a rede de drenagem, essa descarga deve ser feita de maneira controlada para não sobrecarregar o sistema de drenagem. Um esquema de como ocorre a infiltração parcial é apresentado na Figura 7.

Figura 7- Esquema do sistema de infiltração parcial.



Fonte: adaptado de INTERPAVE (2008. p.05)

- Sistema sem infiltração: são ideais para solos contaminados, pois evita que os poluentes atinjam o lençol freático. Neste sistema, é colocado uma camada de material impermeável para garantir que não ocorrerá a infiltração da água para o subsolo. Toda a água fica armazenada em uma camada de reservatório do pavimento e em seguida é escoada de forma controlada por tubos perfurados para outros reservatórios, rios ou para a rede de drenagem. Na Figura 8 é apresentado um esquema de como ocorre o sistema sem infiltração.

adicionados ao asfalto para proporcionar uma melhor durabilidade e evitar a redução da drenagem (ASCE,2013).

Figura 9- Asfalto poroso.



Fonte: ASCE (2013. p.1-5)

- Concreto poroso (Figura 10): os finos também são removidos a fim de aumentar o número de vazios presentes no concreto. Apresentam uma aparência mais grosseira se comparado com o concreto convencional (ASCE,2013).

Figura 10- Concreto poroso.



Fonte: ASCE (2013. p.1-5)

- Bloco intertravado de concreto (Figura 11): os espaços vazios entre os blocos de concreto são preenchidos com brita a fim de permitir a infiltração da água para o solo. Os blocos, porém, não são permeáveis (ASCE,2013).

Figura 11- Bloco intertravado de concreto.



Fonte: ASCE (2013. p.1-5)

- Anéis de plástico (Figura 12): esse tipo de revestimento consiste em anéis modulares de plástico ou de concreto que são ligados por uma estrutura em grade. Em seguida, os espaços vazios são preenchidos com areia ou brita para permitir a infiltração da água no solo (ASCE,2013).

Figura 12- Anéis de plástico.



Fonte: ASCE (2013. p.1-5)

Após a camada de revestimento, tem-se uma camada de base composta normalmente por material granular, geralmente a brita. Esta camada tem a função de suportar a carga gerada pelo tráfego e reter a água pluvial, funcionando também como uma camada de armazenamento.

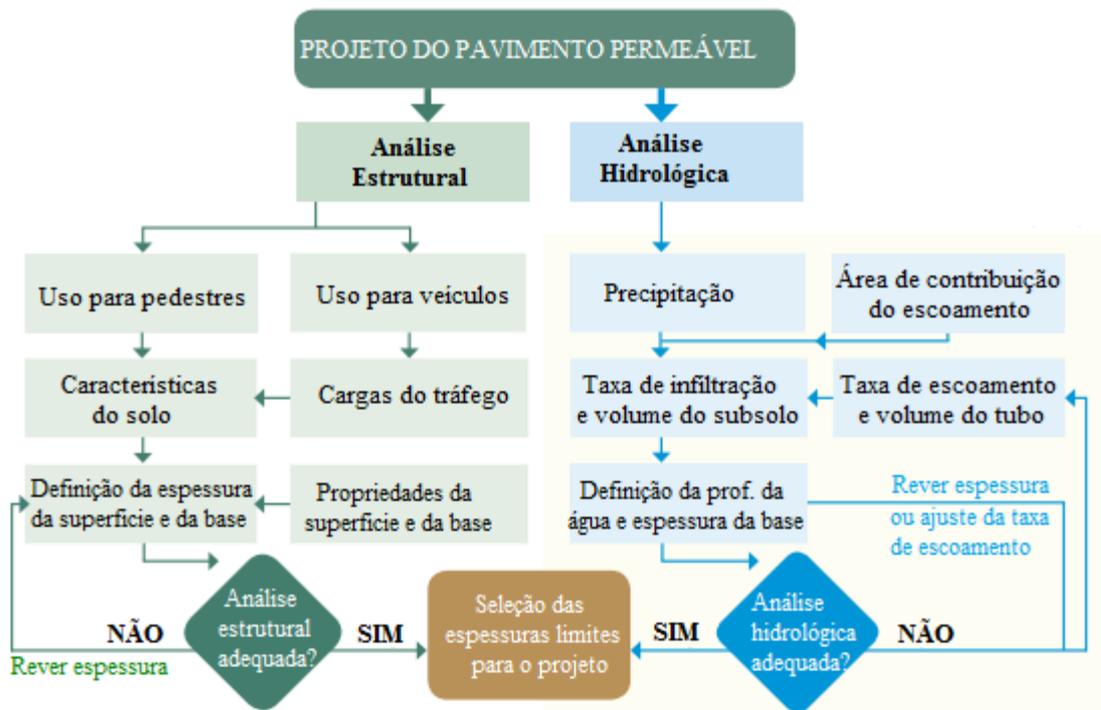
Em alguns casos utiliza-se também um filtro geotêxtil ou uma geomembrana com o objetivo de impedir a passagem de material de uma camada para outra do pavimento.

Para todos os tipos de pavimento, a capacidade estrutural deles pode ser elevada com o aumento da espessura das camadas ou modificação do material de sub-base. O material de cada camada deve ser escolhido em função da espessura e das solicitações mecânicas que o pavimento está submetido.

2.3.4 Análise estrutural e hidrológica do projeto

Para a definição das espessuras das camadas do pavimento permeável é preciso atender aos requisitos estruturais e hidráulicos do projeto. O PP deve ser capaz de suportar as cargas estruturais e o peso do solo saturado, mas também armazenar temporariamente o volume de água infiltrado (ASCE, 2013). O processo de análise, levando-se em consideração os aspectos estrutural, hidráulico e hidrológico do projeto de um PP é apresentado na Figura 13.

Figura 13- Esquema para análise estrutural e hidrológica.



Fonte: adaptado de ASCE (2013. p.1-24)

Para o projeto hidráulico deve-se levar em consideração algumas variáveis, como o histórico de precipitações da região e a área de contribuição do escoamento superficial, que irão fornecer o volume total de água a ser infiltrado pelo pavimento. Leva-se em consideração também a taxa de infiltração do solo e a taxa de infiltração da superfície do pavimento permeável, a fim de se determinar a capacidade de infiltração da superfície e do solo. A partir destes dados é possível determinar a espessura e a capacidade da camada de armazenamento.

Para o projeto estrutural, alguns dos fatores importantes são o tipo de tráfego previsto e as suas cargas, o tipo do solo e suas propriedades físicas, como a sua capacidade de carga e compactação. Além disso, é fundamental determinar também a frequência em que o subsolo fica saturado e o tempo que a água precisa para ser drenada. A partir destes dados, determina-se a espessura das camadas necessárias para suportar o tráfego.

Ao se obter a espessura necessária para o projeto hidráulico e estrutural, adota-se a espessura de maior valor para a execução do pavimento permeável. Logo, o PP será capaz de suportar devidamente as cargas do tráfego e armazenar o volume de água pluvial previsto.

2.3.5 Manutenção

A retenção de poluentes é uma importante função do PP, porém esse processo pode reduzir a capacidade de infiltração do pavimento devido ao aumento das partículas que podem preencher os vazios. Outras razões que podem causar a redução dessa capacidade são as más práticas de construção, falta de manutenção e condições adversas do ambiente, como a deterioração do solo ou excessiva decomposição das folhas das árvores próximo ao pavimento.

Para que o pavimento continue trabalhando adequadamente, a ASCE (2013) recomenda que sejam realizadas limpezas com aspiradores pelo menos 2 vezes por ano. Porém, a CMAA (2010), afirma que, através de experiências realizadas na Austrália e na Europa mostraram que os pavimentos porosos têm mantido sua capacidade de infiltração por mais de 10 anos, mesmo sem ter uma limpeza periódica.

Para auxiliar na manutenção do PP, a ASCE (2013) recomenda ainda que as fontes de sedimentos que possam preencher os vazios sejam bloqueadas, como por exemplo, evitar a erosão de alguma vegetação que se localize próxima ao pavimento. Outra medida que pode ser adotada na manutenção é o uso de sinalização para indicar a presença do PP a fim de evitar que ocorram certas atividades, como a deposição de solo na área do pavimento e colocação de cobertura vegetal.

Ao contrário do sistema convencional de drenagem em que a inspeção se torna complicada por conta das tubulações enterradas, o pavimento permeável é muito mais simples, visto que, qualquer problema se torna aparente na superfície com uma inspeção visual. Outra forma de se monitorar o funcionamento do pavimento permeável e verificar a necessidade de manutenção é através da realização dos ensaios de infiltração e determinação da sua capacidade de infiltração. A capacidade de infiltração pode ser avaliada pela classificação hidrológica do SCS (soil Conservation Test), proposto por Rawls et al. (1992) e pelo grau de permeabilidade proposto por Terzaghi e Peck (1967).

2.3.5.1 Ensaios de Infiltração

O monitoramento das mudanças ocorridas na taxa de infiltração ao longo do tempo é uma forma comum de se avaliar a performance a longo prazo do PP. Se a taxa de infiltração for pequena, pode-se verificar que o preenchimento dos vazios está ocorrendo e indicar a necessidade de uma manutenção no pavimento. De acordo com Lucke e Beecham apud Lucke

et al. (2015), a taxa de infiltração pode ser relacionada com a classificação do pavimento conforme a Tabela 1.

Tabela 1- Classes de obstrução do pavimento associado a taxa de infiltração.

Taxa média de infiltração (mm/h)	Classe de obstrução
> 2000	Desobstruído
30-2000	Medianamente obstruído
< 30	Totalmente obstruído

Fonte: adaptado de Lucke et al. (2015. p. 2544)

Um ensaio tradicional para a obtenção da taxa de infiltração do pavimento é o infiltrômetro de anel simples (Figura 14). Para a realização deste teste, deve-se inicialmente identificar as áreas que recebem uma contribuição de água externa e que, conseqüentemente, estão sujeitas a uma maior chance de colmatção.

Figura 14- Teste do infiltrômetro de anel simples.



Fonte: Lucke et al. (2015. p. 2545)

Conforme Lucke et al. (2015), o infiltrômetro de anel simples consiste nos seguintes passos:

- 1- Um anel de 300mm de diâmetro é selado no pavimento permeável para impedir o escoamento lateral da água.
- 2- A superfície do ensaio passa por uma etapa inicial, conhecida como pre-molhagem, antes da coleta dos dados.
- 3- Na pre-molhagem, 3,6 kg de água devem ser despejados no anel a uma taxa constante, mantendo o nível da água entre 10 e 15 mm da base.

- 4- O tempo que a água leva para infiltrar totalmente no solo, isto é, desde o momento que a água entra em contato com a superfície até o momento em que não há mais água na superfície, deve ser registrado.
- 5- O tempo decorrido para a realização da pre-molhagem deve ser anotado com uma precisão de 0,1 s.
- 6- Finalizada a etapa inicial, os passos 2 e 3 devem ser repetidos. Caso o tempo registrado para a etapa inicial for superior a 30 s, deve-se utilizar 3,6 kg de água, caso contrário, 18 kg de água.
- 7- A massa da água e o tempo decorrido para a realização do ensaio devem ser devidamente registrados.
- 8- Calcula-se a infiltração pela seguinte equação:

$$I = \frac{K \cdot M}{D^2 \cdot T} \quad (1)$$

Onde:

I é a taxa de infiltração (mm/h);

M é a massa de água infiltrada (kg);

D é o diâmetro interno do anel (mm);

T é o tempo necessário para a água infiltrar na superfície do pavimento (s) e

K é uma constante cujo valor corresponde a $4,58 \times 10^9$.

Outro ensaio desenvolvido pela Universidade de Sunshine Coast na Austrália pode ser utilizado para avaliar a necessidade de manutenção em blocos intertravados de concreto. Trata-se de um ensaio mais simples e que pode ser realizado de forma mais rápida, o que auxilia a avaliação em grandes áreas.

Este método, também conhecido como SWIFT (Stormwater Infiltration Field Test), utiliza um balde de 20 L com um furo na base de 40 mm de diâmetro. Um exemplo da realização deste teste pode ser visto na Figura 15.

Figura 15- Ensaio do SWIFT.

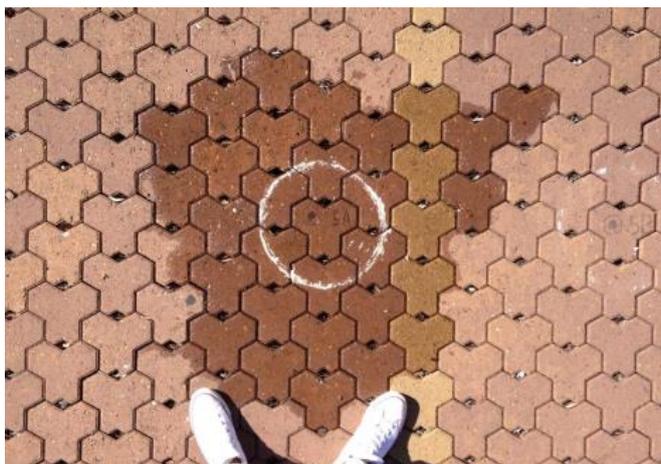


Fonte: Lucke et al. (2015, p. 2546)

Como este ensaio consiste na contagem do número de blocos molhados, não é necessária uma pre-molhagem no ensaio como no infiltrômetro de anel simples. Se o teste precisar ser repetido exatamente no mesmo local, recomenda-se aguardar um intervalo de 24h para realização de um novo ensaio. Conforme Lucke et al. (2015), o SWIFT envolve os seguintes passos:

- 1- Coloca-se o balde acima de um bloco, de forma que o buraco na base do balde fique exatamente no centro do bloco;
- 2- Coloca-se uma tampa no buraco, a fim de impedir qualquer tipo de vazamento e, então, preenche-se o balde com 6L de água;
- 3- Remove-se a tampa para permitir que a água atinja a superfície do pavimento. Em seguida, remove-se o balde;
- 4- Conta-se e registra a quantidade de blocos que estão molhados em toda sua superfície (pode-se também registrar este passo com fotografias para uma análise posterior, como pode ser visto na Figura 16);
- 5- Estima-se a taxa de bloqueio do pavimento e as recomendações de manutenção conforme a Tabela 2.

Figura 16 - Fotografia para contagem dos blocos molhados no ensaio.



Fonte: Lucke et al. (2015, p. 2548)

Tabela 2 - Manutenção sugerida pelo resultado do SWIFT.

Número de blocos totalmente molhados	Classe de obstrução	Exigências para manutenção
menor que 29	Desobstruído	Não é necessária nenhuma manutenção para um futuro próximo
entre 20 e 133	Medianamente obstruído	Planejar uma manutenção no prazo de 1 a 3 anos
mais de 133	Totalmente obstruído	Manutenção imediata

Fonte: adaptado de Lucke et al. (2015, p. 2551)

2.3.6 Pesquisas recentes referentes às técnicas do pavimento permeável

2.3.6.1 Pesquisas Brasileiras

Araújo et. al. (2000) foram um dos pioneiros no Brasil a realizarem experimentos com pavimentos permeáveis. Os autores analisaram a eficiência dos pavimentos permeáveis (blocos de concreto vazados e concreto poroso) na redução do escoamento superficial, comparando-o com o terreno natural (solo compactado), pavimento impermeável (concreto) e pavimentos semipermeáveis (bloco de concreto industrializado e paralelepípedo de granito). Os experimentos foram realizados com um simulador de chuvas com intensidade de 111,9 mm/h por 10 minutos sobre uma área de 1 m² do material estudado. No pavimento de concreto praticamente todo o volume de água escoou superficialmente e o coeficiente de escoamento foi 44% superior ao do solo compactado. Já na superfície semipermeável com o bloco de concreto, o coeficiente de escoamento foi 22% superior ao solo compactado e no paralelepípedo, o

coeficiente foi 11% inferior ao do solo natural. Os pavimentos permeáveis obtiveram os menores resultados no coeficiente de escoamento. O bloco de concreto vazado escoou superficialmente apenas 0,5 mm de água e o concreto poroso apresentou coeficiente de escoamento menor que 0,01.

Acioli (2005) realizou o dimensionamento de dois tipos de revestimentos permeáveis e um ano de monitoramento do controle do escoamento superficial. Os revestimentos adotados foram blocos vazados com gramineas e asfalto poroso e abaixo deles foi instalado um reservatório de brita para o armazenamento da água infiltrada. Após um ano de coleta de dados, obteve-se que a média do coeficiente de escoamento dos blocos vazados foi de 2,27% e do asfalto poroso foi de 5,08%.

Castro et. al. (2012) avaliaram a evolução do escoamento superficial dos pavimentos permeáveis instalados por Acioli (2005) após três anos de uso e sem manutenção utilizando a mesma metodologia empregada no primeiro ano de monitoramento. Os autores chegaram à conclusão que o revestimento de bloco vazado, mesmo apresentando os coeficientes de escoamento superiores ao primeiro ano de funcionamento, continuou fazendo um controle adequado no volume de escoamento superficial. Já o revestimento de asfalto poroso apresentou valores até 455% superiores ao maior escoamento superficial da primeira etapa, além de um grande comprometimento na sua capacidade de infiltração.

Bruno et al. (2013) realizaram experimentos para avaliar o escoamento superficial em cinco tipos de revestimentos comumente utilizados em áreas urbanas: gramado, solo exposto, blocos de concreto vazados, blocos de concreto maciços e concreto convencional. Os ensaios foram realizados em condições reais de campo com um simulador de chuva com intensidade de 79mm/h e 121mm/h. A lâmina infiltrada foi obtida a partir da diferença entre o volume aplicado pelo simulador de chuvas e o volume escoado superficialmente recolhido no reservatório. Das alternativas avaliadas, a superfície gramada apresentou os melhores resultados chegando a escoar todo o volume precipitado na intensidade pluviométrica de 79mm/h. Os blocos vazados e maciços também se mostraram eficientes na redução do escoamento superficial. Já o solo exposto apresentou escoamento superficial 75,8% maior do que a superfície gramada na aplicação da intensidade pluviométrica de 121mm/h. O concreto convencional apresentou a menor taxa de infiltração e em ambas intensidades pluviométricas, mais de 90% do volume precipitado escoou superficialmente.

Jabur et al. (2015) analisaram a capacidade de infiltração de dois tipos de revestimentos permeáveis após 9 anos da sua instalação. Estes pavimentos foram os mesmos estudados por Castro et al. (2012) e a falta de manutenção foi proposital a fim de avaliar as condições reais de uso no Brasil. Foram realizados dois ensaios para avaliar a capacidade de infiltração destes pavimentos: o da Norma Americana ASTM C1701 e do infiltrômetro de anéis concêntricos. A diferença percentual entre as capacidades do asfalto poroso e do bloco vazado foi de 44,06% para o ensaio da Norma Americana e de 98,35% para o teste do infiltrômetro com anéis concêntricos. Em ambos ensaios, os resultados convergiram para a mesma conclusão: somente o bloco vazado, mesmo com a redução da capacidade de infiltração ao longo dos anos, manteve suas características de pavimento permeável.

Coutinho et al. (2016) estudaram a caracterização hidráulica e o comportamento hidrológico de blocos vazados de concreto em um estacionamento na cidade do Recife. Os blocos foram preenchidos com solo natural local e grama. Os ensaios de infiltração em campo foram realizados com o método do Beerkan em 52 pontos e após cada ensaio foi retirada uma amostra do solo. Para obter as características hidráulicas, curva de retenção da água e curva de condutividade hidráulica foi utilizado o método BEST em suas três variações: Slope, Intercept e Steady. O HYDRUS 1D também foi utilizado a fim de avaliar a eficiência hidrológica do pavimento permeável, em que foi simulado o escoamento superficial, a infiltração, a evaporação e a capacidade de armazenamento da água ao longo de um ano. As amostras do solo foram classificadas em quatro tipos: silte, areia siltosa, silte arenoso e areia. Os resultados do BEST estavam de acordo com os resultados habituais. Para solos com granulometria mais fina, as curvas de retenção de água e de condutividade hidráulica foram mais suaves, ao contrário do que aconteceu com os solos com granulometria mais grossa. As taxas médias de infiltração foram avaliadas em torno de 14,5 mm/min com um desvio padrão em torno de 70 mm/min. A partir da simulação do ciclo hidrológico de um ano, pode-se observar que, para todos os tipos do solo, a capacidade de armazenamento da água no pavimento permeável não sofreu evolução ao longo do ano. Além disso, a evaporação na superfície não variou de forma significativa com o tipo do solo. Porém, a infiltração na areia e no silte obteve valores maiores e o escoamento superficial, valores menores, ao contrário do que ocorreu com a areia siltosa e o silte arenoso, que apresentaram valores menores para infiltração e maiores para o escoamento superficial.

2.3.6.2 Pesquisas Internacionais

Martin III et al. (2014) estudou o impacto da distribuição da porosidade vertical na permeabilidade dos pavimentos permeáveis. Foram preparados quatro tipos de misturas em cilindros, em que se variou o tamanho do maior agregado e a sua graduação. Para medir a porosidade foi realizado o ensaio de acordo com a norma americana ASTM D7063. A permeabilidade foi calculada a partir da condutividade hidráulica, que foi medida com base na norma americana ASTM D5856. A distribuição da porosidade vertical foi medida utilizando uma técnica de análise de imagens desenvolvida pelo próprio autor e, a partir desta distribuição, obteve-se a distribuição da permeabilidade vertical. A permeabilidade foi estimada a partir de três dados: a porosidade média, a porosidade mínima e a permeabilidade efetiva, obtida a partir da distribuição da permeabilidade vertical. A terceira opção foi a que melhor se aproximou da permeabilidade experimental enquanto a porosidade média obteve a pior aproximação. Dessa forma, concluiu-se que a distribuição da porosidade vertical tem grande impacto na permeabilidade dos solos e deve ser considerada na determinação da relação permeabilidade-porosidade dos pavimentos.

Kumar et al. (2016) avaliaram durante quatro anos a capacidade de infiltração da água em três tipos de pavimentos permeáveis (asfalto poroso, concreto poroso e bloco poroso), instalados em um estacionamento em Chicago, EUA. O método da ASTM C1701 foi utilizado para medir a taxa de infiltração. Logo que foram construídos, os três tipos de pavimento apresentavam elevadas taxas de infiltração, sendo o concreto com a maior taxa de infiltração e o bloco com a menor. Após um ano de uso, as taxas do asfalto e do bloco praticamente não diminuíram, porém, o concreto obteve a maior queda da capacidade de infiltração. No segundo ano, o concreto e o asfalto possuíam taxas de infiltração muito próximas e maiores que a do bloco. No terceiro ano, a capacidade de infiltração do bloco diminuiu significativamente e no quarto ano, as capacidades do asfalto e do concreto tiveram uma queda significativa. A partir do terceiro ano de uso, observou-se também uma queda maior da infiltração na área de circulação dos carros quando comparado com a área das vagas. Apesar da redução da capacidade de infiltração durante os quatro anos, os pavimentos ainda infiltram de 4 a 5 vezes mais a intensidade de precipitação média da região, auxiliando, assim, na redução do escoamento superficial e recarga do lençol freático.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Características da área de estudo

O pavimento permeável foi instalado no Centro de Tecnologia e Geociência da Universidade Federal de Pernambuco, localizado na cidade do Recife – PE (Figura 17). Os blocos foram aplicados em uma parte do estacionamento dos professores do centro.

Figura 17 – Mapa de situação do estacionamento.



Fonte: Google Earth

3.1.1 Características Climáticas

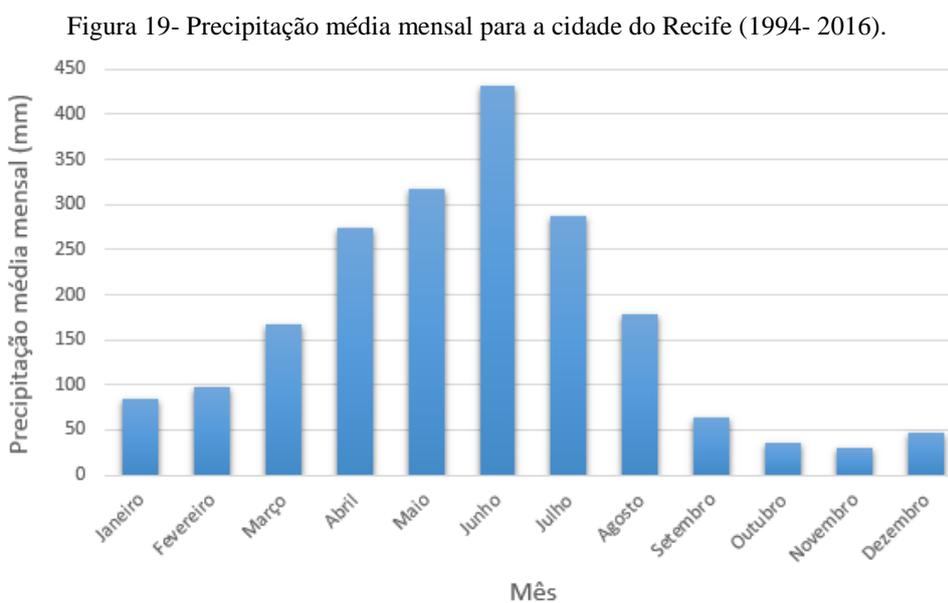
Segundo a classificação climática de Köppen, a área de estudo se localiza numa região com o tipo de clima As', ou seja, apresenta clima tropical com chuvas nas estações do inverno e do outono. Dessa forma, 70% da precipitação ocorre nos meses de março a agosto, ocasionando muitos alagamentos em diversos pontos da cidade no período do inverno (Figura 18).

Figura 18– Alagamento devido à forte chuva na região metropolitana do Recife.



Fonte: <http://noticias.ne10.uol.com.br/jc-transito/noticia/2016/05/30/ruas-amanhecem-alagadas-no-grande-recife-e-populacao-sofre-para-sair-de-casa-617520.php>

De acordo com a estação pluviométrica do Recife (Várzea), no período entre 1994 e 2016, a média anual da precipitação pluviométrica na cidade foi de 2160,4 mm, com mínimo de 1255,4 mm e máximo de 3482,0 mm anuais. Nos meses de abril a julho, ocorrem os maiores totais pluviométricos mensais (Figura 19).



Fonte dos dados: APAC/Posto Recife (Várzea).

3.1.2 Características Geotécnicas

De acordo com Gusmão (2002) é possível identificar um perfil síntese do subsolo da cidade do Recife. Tal perfil estaria caracterizado por diversas camadas de sedimentos de diferentes tipos de solo que foram depositados ao longo dos anos em ambientes fortemente influenciados pela maré, rios ou lagos.

Na Figura 20 pode-se observar o perfil síntese do subsolo na planície do Recife, dividido em três níveis: superficial, intermediário e basal e os diferentes tipos de solo que podem aparecer em cada um desses níveis.

Figura 20- Perfil síntese da planície do Recife.

NÍVEL DO PERFIL	PROF.(m)	FÁCIES DE MATERIAIS NO NÍVEL	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA
SUPERFICIAL	0	Aterro	----
	a	Argilas orgânicas. Turfa	Muito mole a mole
	15	Areias médias, finas, siltosas	Fofa a mediana
		Arenito	Compacto
INTERMEDIÁRIO		Areias siltosas	Fofa a mediana
	10	Areias siltosas com pedregulho	Compacta
	a	Areias, siltes e conchas	Fofa
	40	Argilas arenosas, siltosas	Molé a rija
		Argilas siltosas orgânicas	Muito mole a mole
BASAL	>40	Areia grossa, média e fina	Compacta
		Argila arenosa	Dura

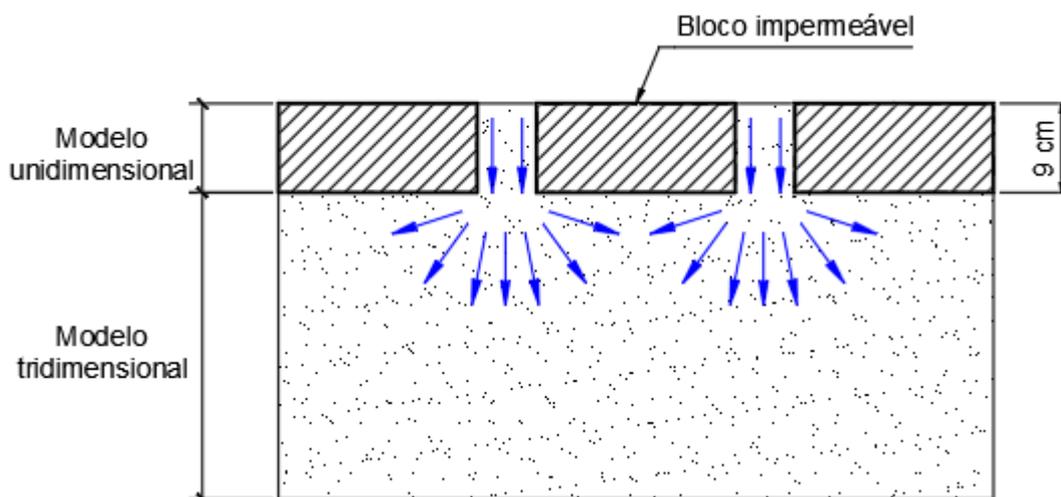
Fonte: Gusmão (2002. p.114)

3.2 Problemática do trabalho

A camada de revestimento do pavimento permeável aplicado no estacionamento é composta por blocos de concreto impermeáveis. O espaço entre os blocos é preenchido por material granular, por onde a água infiltra no solo.

Dessa forma, a modelagem da infiltração do pavimento foi dividida em duas partes: modelo unidimensional e modelo tridimensional. A primeira parte levou em consideração apenas a camada de revestimento do pavimento, ou seja, os primeiros 9 cm, em que se avaliou a infiltração como um modelo unidimensional. A segunda parte da análise levou em consideração as camadas abaixo do revestimento, em que se avaliou a infiltração como um modelo tridimensional. Na Figura 21 pode ser visto um esquema da seção transversal e a modelagem adotada em cada trecho do pavimento permeável.

Figura 21- Modelagem adotada em cada trecho.



Fonte: Elaborado pela autora

3.3 Ensaio de infiltração

O ensaio de infiltração foi realizado com o uso do infiltrômetro de anel simples a partir da metodologia Beerkan, descrita por Souza (2005). Para este trabalho, foram utilizados os dados de ensaio realizados por Coutinho et al. (2016). Os pontos escolhidos para a realização do ensaio foram escolhidos de maneira uniforme na superfície do pavimento.

Nessa metodologia, o infiltrômetro de anel simples é inicialmente cravado a 1cm de profundidade do solo com o objetivo de se evitar perdas laterais de água durante o processo de infiltração. Com o infiltrômetro de anel simples já cravado no local onde será realizado o ensaio, é coletada, próximo ao anel, uma amostra de solo para determinação da umidade inicial. Essa

amostra é colocada em uma lata de alumínio a qual deve ser bem vedada e lacrada para que mantenha as condições iniciais de umidade em que o solo se encontra no momento inicial da realização do ensaio.

Logo após a coleta do solo, são vertidos volumes definidos de água dentro do cilindro utilizando beakers. O tempo de medição é iniciado após ser despejado o primeiro Becker anotando-se o tempo necessário para a infiltração de toda a água, repetindo-se esse processo até que o registro do tempo entre as medidas se torne constante.

Atingindo então o mesmo intervalo de tempo entre medidas, de forma rápida para que o solo não perca umidade, é retirado o infiltrômetro de anel simples e coletada mais uma amostra de onde o infiltrômetro estava cravado. Com as amostras retiradas no início e no fim do ensaio pode-se determinar a umidade final e inicial do solo em estudo. Para classificação e determinação da curva granulométrica do solo é recolhida, próximo ao ponto de instalação do infiltrômetro, uma amostra deformada do solo.

3.4 Determinação dos parâmetros do modelo unidimensional

Os parâmetros do modelo unidimensional foram determinados pela equação de dois termos de Philip (1957), conforme descrita a seguir:

$$I(t) = K_s \cdot t + S \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

Onde:

I é a lâmina de água infiltrada (mm);

K_s é a condutividade hidráulica (mm/s);

t é o tempo (s) e

S é a sorvidade (mm/s^{0,5})

A partir da equação 02, calculou-se a condutividade hidráulica e a sorvidade com o auxílio da função Solver do Excel 2013. Para isto, foram definidas as variáveis de decisão, as restrições e a função objetivo conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1- Critérios adotados para determinação dos parâmetros do modelo unidimensional.

Variáveis de Decisão	K_s, S
Restrições	$K_s > 0$
Função Objetivo	$\min \Sigma(I_{exp} - I(t))^2$

Fonte: Elaborado pela autora

Com o ensaio de infiltração, obteve-se o tempo e a lâmina infiltrada experimental. A partir da menor diferença quadrática entre a lâmina infiltrada experimental e a estimada, determinou-se os valores da condutividade hidráulica e da sorvidade do solo. Adotou-se apenas uma restrição, visto que, uma condutividade igual a zero indicaria um pavimento impermeável, porém no ensaio realizado houve uma lâmina de água infiltrada. Assim, caso $K_s = 0$, o parâmetro não teria sido bem estimado e não haveria significado físico para este resultado.

3.5 Determinação dos parâmetros do modelo tridimensional

Os parâmetros do modelo tridimensional foram determinados utilizando o algoritmo e a análise de dados do BEST (Lassabatère et al., 2006).

3.5.1 Determinação dos parâmetros de forma (m, n e η)

Assumindo a similaridade de forma entre a curva de distribuição do tamanho das partículas $F(D)$ e da curva de retenção da água no solo $\theta(h)$, Haverkamp & Parlange (1986) apresentaram a seguinte equação para expressar $F(D)$:

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M} \quad \text{em que} \quad M = 1 - \frac{2}{N} \quad (3)$$

Onde

D é o diâmetro da partícula (mm);

D_g é o parâmetro de escala do tamanho das partículas (mm) e

M e N são os parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas.

Os parâmetros de forma da curva de retenção m e n são obtidos a partir do índice de forma do meio p_m pelas seguintes relações:

$$m = \frac{1}{p_m} \left(\sqrt{1 + p_m^2} - 1 \right) \quad (4a)$$

$$n = \frac{2}{1 - m} \quad (4b)$$

p_m é estimado a partir de M e N por (Zataráin et al., 2003):

$$p_m = \frac{M N}{1 + M} (1 + \kappa)^{-1} \quad (5)$$

sendo κ um coeficiente definido por Fuentes et al. (1998):

$$\kappa = \frac{2s - 1}{2s(1 - s)} \quad (6)$$

e s a dimensão fractal relativa. A dependência de s ($s = D_f/E$, na qual D_f é a dimensão fractal do solo e $E = 3$, a dimensão de Euclides) com respeito à porosidade total do solo (ϕ) é definida por (Fuentes, 1992):

$$(1 - \phi)^s + \phi^{2s} = 1 \quad \text{com} \quad \frac{1}{2} < s < 1 \quad (7)$$

No caso da equação da curva de condutividade hidráulica de Brooks & Corey (1964), o seu parâmetro de forma, η , pode ser expresso como função do produto dos parâmetros de forma da curva de retenção e do fator de tortuosidade (p):

$$\eta = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad (8)$$

sendo $p = 1$ para o modelo de Burdine (1953).

3.5.2 Determinação dos parâmetros de normalização (θ_s , K_s e h_g)

O primeiro parâmetro de normalização, θ_s , foi estimado a partir da umidade gravimétrica saturada e da massa específica do solo; os outros parâmetros de normalização são obtidos a partir da modelagem dos experimentos de infiltração. Para uma fonte de água circular com dado potencial de pressão da água sobre uma superfície de solo uniforme e com um conteúdo de água inicial uniforme (θ_0), a infiltração acumulada tridimensional $I(t)$ e a taxa de

infiltração $q(t)$ podem ser aproximadas pelas equações para o regime de fluxo transitório (Eq. 9a e b) e estacionário (Eq. 9c e d) (Haverkamp et al., 1994):

$$I(t) = S\sqrt{t} + [aS^2 + bK_s]t \quad (9a)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [aS^2 + bK_s] \quad (9b)$$

$$I_{+\infty}(t) = [aS^2 + K_s] \cdot t + c \frac{S^2}{K_s} \quad (9c)$$

$$q_{+\infty}(t) = q_{+\infty} = aS^2 + K_s \quad (9d)$$

Com:

$$a = \frac{\gamma}{r\Delta\theta} \quad (10a)$$

$$b = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} \cdot \left(1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right) \quad (10b)$$

$$c = \frac{a}{2 \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right] \cdot (1-\beta)} \cdot \ln\left(\frac{1}{\beta}\right) \quad (10c)$$

Onde

S é a sorvidade ($\text{mm/s}^{0,5}$);

r é o raio do cilindro (mm);

λ é igual a 0,75 e

β é igual a 0,6.

Para determinação de K_s e S , o BEST utiliza equações equivalentes às Eqs. (9a) e (9b), obtidas pela substituição de K_s em função da sorvidade S e da taxa de infiltração no regime estacionário $q_{+\infty}$, (Eq. 9d) nas Eqs. (9a) e (9b):

$$I(t) = S\sqrt{t} + [a(1-b) \cdot S^2 + bq_{+\infty}]t \quad (11a)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [a(1-b) \cdot S^2 + bq_{+\infty}] \quad (11b)$$

O ajuste da Eq. (11) aos dados experimentais da infiltração acumulada ($I_{\text{exp}}(t)$), é obtido pela minimização da clássica função objeto, dada por:

$$f_1(S, K_s, k) = \sum_{i=1}^k [I_{\text{exp}}(t_i) - I(t_i)]^2 \quad (12)$$

na qual k é o número considerado de pontos no regime transitório. O algoritmo usado na minimização de $f_1(S, K_s, k)$ é o de Marquardt (1963) e o desempenho dos ajustes é analisado pelos valores correspondentes ao erro quadrático médio (EQM):

$$\text{EQM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [I_{\text{exp}}(t_i) - I(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^k (I_{\text{exp}}(t_i))^2}} \quad (13)$$

Inicialmente, o BEST estima um valor máximo para a sorvidade, S_{MAX} , a partir do ajuste dos dados experimentais com a Eq. (11), caso em que se assume um fluxo de água dependente apenas da capilaridade, considerando-se b igual a zero.

Como as Eqs. (9a), (9b) e (11) são válidas apenas para o regime transitório, é possível que os ajustes não sejam feitos para todos os valores de k . A sorvidade é, então, estimada para valores de k de no mínimo cinco pontos para um máximo de N_{tot} . S_{MAX} é considerada o valor máximo de toda a sequência de pontos. Para se obter valores positivos de K_s , levam-se em consideração as seguintes condições: S_{MAX}^2 deve ser menor que a taxa de infiltração no regime estacionário ($q_{+\infty}$) dividido pelo coeficiente a (Eq. 10a); assim, a sorvidade máxima S_{MAX} é definida por:

$$S_{\text{MAX}} = \underset{N_{\text{obs}}=1}{\text{MAX}} \underset{N_{\text{tot}}=1}{\text{MIN}} \left[S_{N_{\text{obs}}} (b=0), \sqrt{\frac{q_{+\infty}}{a}} \right] \quad (14)$$

Para obtenção de K_s , considera-se o valor verdadeiro de b (Eq. 10b). O ajuste é executado minimizando a função objeto definida pela Eq. (12). Como os ajustes pela Eq. (11) nem sempre são válidos para todos os pontos ($0 \dots k$), o BEST ajusta os dados para um mínimo de cinco pontos a um máximo de N_{tot} . Para cada subconjunto de dados que contém os k

primeiros pontos, o BEST estima a sorvidade $S(k)$, a condutividade hidráulica $K_s(k)$ em função de $S(k)$ e da Eq. (9d) para um tempo máximo $t_{\max}(k)$ definido como:

$$t_{\max} = \frac{1}{4(1-b)^2} \cdot t_{\text{grav}} \quad (15)$$

sendo t_{grav} o tempo gravimétrico definido por Philip (1969). O $t_{\max}(k)$ é o tempo máximo para o qual as expressões para o regime transitório são consideradas válidas; logo, o tempo mais longo do subconjunto de dados t_k é comparado com $t_{\max}(k)$. Os valores de $S(k)$ e $K_s(k)$ são considerados válidos para t_k menores que $t_{\max}(k)$. Dos valores que cumprirem esta condição, serão escolhidos aqueles correspondentes ao maior k .

Após a determinação de θ_s e K_s , o parâmetro h_g é obtido pela seguinte equação (Lassabatère et al., 2006):

$$h_g = \frac{S^2}{c_p (\theta_s - \theta_0) \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^\eta \right]} \cdot K_s \quad (16)$$

na qual c_p é um parâmetro que depende apenas dos parâmetros de formas n , m e η dos modelos (de Condappa et al., 2002; Lassabatère et al., 2006):

$$c_p = \Gamma\left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot \left[\frac{\Gamma\left(n\eta + \frac{1}{n}\right)}{\Gamma(n\eta)} + \frac{\Gamma\left(n\eta + m - \frac{1}{n}\right)}{\Gamma(n\eta + m)} \right] \quad (17)$$

sendo Γ a função gama clássica.

3.6 Análise estatística da qualidade do ajuste

Para avaliar o desempenho dos modelos unidimensionais e tridimensionais foram utilizados quatro critérios estatísticos: a razão dos desvios (RD), o coeficiente de massa residual (CMR), o erro quadrático médio (EQM) e a eficiência da modelagem (EM), além do coeficiente de determinação R^2 (LOAGUE & GREEN, 1991 apud ANTONINO et al., 2004).

O RD descreve a razão entre o espalhamento dos valores experimentais e os valores estimados pelo modelo. O CMR indica se houve uma subestimativa ou superestimativa dos valores do modelo em relação aos dados experimentais. O EQM indica o grau de desvio entre

os dados experimentais e os valores estimados pelo modelo. E o EM indica se o modelo fornece uma estimativa melhor que o valor médio dos dados experimentais. Na Tabela 3 são apresentados os valores ideais para cada critério estatístico e as suas equações são apresentadas a seguir:

$$RD = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{M})^2} \quad (18)$$

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^N M_i - \sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N M_i} \quad (19)$$

$$EQM = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{100}{\bar{M}} \quad (20)$$

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 - \sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad (21)$$

Onde:

M_i é o valor experimental da infiltração;

T_i é o valor da infiltração estimado pelo modelo;

\bar{M} é a média dos valores experimentais e

N é a quantidade de determinações.

Tabela 3– Valores ideais para cada critério estatístico

Critério Estatístico	Valor Ideal
Razão dos Desvios	1
Coefficiente de Massa Residual	0
Erro Quadrático Médio	0
Eficiência da Modelagem	1

Fonte: Loague & Green, 1991 apud Antonino et al., 2004

Além dos quatro critérios anteriormente citados, adotou-se também o índice de desempenho (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997) apud Oliveira (2007) para avaliar o desempenho dos modelos. O índice “c” é definido pela seguinte equação:

$$c = r.d \quad (22)$$

Onde:

c é o índice de desempenho;

r é o coeficiente de correlação e

d é o índice de concordância adimensional, variando de 0 a 1.

O coeficiente de correlação e o índice de concordância são definidos pelas seguintes equações:

$$r = \sqrt{R^2} \quad (23)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|T_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \quad (24)$$

Na Tabela 4 são apresentados os critérios de interpretação para o índice de desempenho dos modelos.

Tabela 4- critérios de interpretação do índice “c”

Valor de "c"	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo & Sentelhas (1997) apud Oliveira (2007)

3.7 Análise qualitativa

A análise qualitativa dos resultados foi feita com o objetivo de classificar a condutividade hidráulica do pavimento com base em dois critérios: classificação hidrológica e o grau de permeabilidade.

3.7.1 Classificação hidrológica

De acordo com Rawls et al. (1992), os solos podem se subdividir do ponto de vista hidrológico em quatro grupos em função da sua condutividade hidráulica. No Quadro 2, é apresentado a classificação do SCS (Soil Conservation Service) proposta pelos autores citados.

Quadro 2 – Classificação hidrológica.

Classificação Hidrológica	Condutividade Hidráulica Saturada
Grupo A	Superior a 7,6 mm/h
Grupo B	Maior que 3,8mm/h e menor que 7,6 mm/h
Grupo C	Maior que 1,3 mm/h e menor que 3,8 mm/h
Grupo D	Maior que 0 e menor que 1,3mm/h

Fonte: Rawls et al., 1992

De acordo com Tucci (1993), os solos presentes no grupo A apresentam uma taxa de infiltração elevada e baixo escoamento superficial. Já os solos presentes no grupo B são solos que apresentam uma permeabilidade superior à média, porém são menos permeáveis que os solos classificados no primeiro grupo. O grupo C representa o grupo dos solos que tem escoamento superficial acima da média e uma infiltração abaixo da média. E, por fim, os solos do grupo D são solos que possuem pouca capacidade de infiltração, gerando um maior escoamento na superfície.

3.7.2 Grau de permeabilidade

A classificação dos solos quanto ao grau de permeabilidade foi proposta por Terzaghi e Peck (1967) apud Lambe e Whitman (1979). No Quadro 3 é apresentado os critérios de avaliação destes autores.

Quadro 3 – Grau de Permeabilidade.

Grau de permeabilidade	Condutividade Hidráulica Saturada (mm/h)
Alto	Superior a 3600 mm/h
Médio	Maior que 3600 mm/h e menor que 36 mm/h
Baixo	Maior que 36 mm/h e menor que 0,36 mm/h
Muito baixo	Maior que 0,36 mm/h e menor que 0,0036 mm/h
Praticamente Impermeável	Menor que 0,0036 mm/h

Fonte: adaptado de Terzaghi e Peck (1967) apud Lambe e Whitman (1979)

Terzaghi e Peck (1967) apud Lambe e Whitman (1979) dividem os solos em cinco subgrupos a partir dos valores da condutividade hidráulica: permeabilidade alta, média, baixa, muito baixa e praticamente impermeável.

3.8 Proporção da condutividade hidráulica e da sorvidade na infiltração

A partir dos resultados obtidos no modelo unidimensional, foram calculados, baseados na equação 02, a influência da condutividade hidráulica e da sorvidade na infiltração. A condutividade hidráulica é um parâmetro relacionado com os efeitos da gravidade no processo de infiltração e a sorvidade representa os efeitos da capilaridade neste processo. Desta forma, poderá se determinar a importância da gravidade e da capilaridade na infiltração ao longo do tempo no modelo unidimensional.

Para cada ponto, em função do tempo, foi definido o valor de $(K_s.t)$ e o valor de $(S.\sqrt{t})$ e, em seguida, estes valores foram divididos pela lâmina infiltrada estimada em cada tempo. Logo, pode-se determinar a proporção que a gravidade e a capilaridade influenciam na infiltração em função do tempo.

3.9 Proposição de indicador

Com o objetivo de se determinar a condutividade hidráulica do pavimento de maneira geral, foi proposto o indicador hidrodinâmico de manutenção (IHM). Este valor foi determinado conforme a equação a seguir:

$$IHM = \frac{K_{1D} \cdot L_{1D} + K_{3D} \cdot L_{3D}}{L_{1D} + L_{3D}} \quad (25)$$

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 no modelo unidimensional (mm) e

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

A partir de uma proporção entre as condutividades hidráulicas obtidas no modelo unidimensional e tridimensional e as lâminas infiltradas, pode-se determinar a condutividade hidráulica do pavimento como um todo, a fim de melhor avaliar o desempenho do PP e verificar a necessidade de manutenção.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização hidrodinâmica

Os resultados obtidos dos parâmetros hidráulicos para o modelo unidimensional são apresentados na Tabela 5, assim como a classificação hidrológica (RAWLS et al., 1992) e o grau de permeabilidade (TERZAGHI e PECK, 1967 apud LAMBE e WHITMAN, 1979) de cada ponto.

Tabela 5- Parâmetros hidráulicos 1D, Classificação hidrológica e grau de permeabilidade

Ponto	Ks (mm/h)	S (mm/s ^{0.5})	Classificação Hidrológica	Grau de Permeabilidade
P01	51,30	0,000	Grupo A	Médio
P02	3,97	0,025	Grupo B	Baixo
P03	8,19	0,007	Grupo A	Baixo
P04	3,33	0,000	Grupo C	Baixo
P05	13,56	0,013	Grupo A	Baixo
P07	1,31	0,014	Grupo C	Baixo
P08	0,60	0,007	Grupo D	Baixo
P09	8,51	0,029	Grupo A	Baixo
P11	3,54	0,017	Grupo C	Baixo
P13	0,49	0,011	Grupo D	Baixo
P21	2,35	0,009	Grupo C	Baixo
P22	1,36	0,007	Grupo C	Baixo
P30	0,02	0,013	Grupo D	Muito Baixo
P31	1,89	0,014	Grupo C	Baixo
P32	0,35	0,008	Grupo D	Muito Baixo
Mínimo	0,02	0,00	-	-
Máximo	51,30	0,03	-	-
Média	2,35	0,01	-	-

Fonte: Elaborado pela autora

Os valores da condutividade hidráulica (K_s) variaram de 0,02 a 51,30 mm/h. Pode-se observar que no ponto 01 a condutividade hidráulica foi muito maior que a dos outros pontos, o segundo maior valor para a condutividade hidráulica foi de 13,56 mm/h, no ponto 05. Dessa forma, o valor máximo se distanciou bastante do valor médio da condutividade hidráulica que foi de 2,35 mm/h. Já a sorvidade (S) não apresentou grande variação nos seus resultados, com uma média de 0,01 mm/s^{0,5}.

Quanto a classificação hidrológica, poucos pontos estão classificados nos grupos A e B, ou seja, solos que possuem boa infiltração e baixo escoamento superficial, conforme Tucci (1993). A classificação predominante no trecho unidimensional foi dos grupos C e D, ou seja, solos que geralmente apresentam escoamento superficial superior à média e baixa capacidade

de infiltração (TUCCI, 1993). Todos os pontos obtiveram o grau de permeabilidade classificados como baixo, com exceção do ponto 01 e dos pontos 30 e 32, que apresentaram permeabilidade média e muito baixa, respectivamente.

A análise estatística entre os valores obtidos no ensaio e os estimados é apresentada na Tabela 6. De forma geral, todos os pontos apresentaram um bom ajuste (R^2 próximo de 1). Porém, nem todos os parâmetros apresentaram resultados próximos aos seus valores ótimos.

Tabela 6- Resultados Estatísticos 1D

Ponto	R^2	RD	CMR	EQM	EM	índice c
P01	0,9888	1,1372	-0,0262	8,9047	0,9841	0,9902
P02	0,9992	0,9925	0,0021	1,9762	0,9992	0,9994
P03	0,9999	1,0020	-0,0005	0,8460	0,9999	0,9999
P04	0,9991	1,0096	-0,0021	2,1778	0,9991	0,9993
P05	0,9997	0,9993	0,0003	1,2876	0,9997	0,9998
P07	0,9998	0,9964	0,0009	0,9977	0,9998	0,9999
P08	1,0000	0,9991	0,0002	0,2796	1,0000	1,0000
P09	1,0000	0,9994	0,0002	0,4253	1,0000	1,0000
P11	0,9999	1,0021	-0,0005	0,8254	0,9999	0,9999
P13	0,9974	0,9832	0,0042	3,4069	0,9972	0,9980
P21	1,0000	0,9995	0,0001	0,2790	1,0000	1,0000
P22	0,9995	1,0071	-0,0014	1,4895	0,9995	0,9996
P30	0,9901	0,8546	0,0538	9,9609	0,9762	0,9896
P31	0,9978	0,9759	0,0057	3,2158	0,9975	0,9983
P32	0,9987	0,9800	0,0045	2,4631	0,9985	0,9990
Média	0,9995	0,9993	0,0002	1,4895	0,9995	0,9996

Fonte: Elaborado pela autora

A média da razão dos desvios de todos os pontos apresentou valor próximo ao valor ideal, porém, nos pontos 01 e 30, a RD se distanciou aproximadamente 10% do valor esperado ($RD = 1$). Analisando-se o coeficiente de massa residual, observa-se que a maioria dos pontos foi subestimada pelo modelo ($CMR > 0$) e a média deles foi de 0,0002, mostrando uma boa aproximação deste critério estatístico de forma geral. O erro quadrático médio apresentou os piores ajustes, em que a média desse critério se distanciou quase 150% do seu valor ideal. Os pontos 08 e 21 obtiveram EQM mais próximo de zero, valor ideal para este parâmetro, e os pontos 01 e 30, os valores mais distantes do ideal. A eficiência de modelagem apresentou valores satisfatórios ($EM = 1$), em que a média deste critério ficou muito próxima de 1. Os pontos 08, 09 e 21, apresentaram o valor ideal da EM e os pontos 01 e 30, os valores mais distantes do ideal.

A partir dos valores do índice “c”, pode-se concluir que o método de cálculo unidimensional apresentou ótimo desempenho na modelagem de todos os pontos, com uma média de 99,96 %.

Os parâmetros hidráulicos obtidos para o modelo tridimensional, a classificação hidrológica (RAWLS et al., 1992) e o grau de permeabilidade (TERZAGHI e PECK, 1967 apud LAMBE e WHITMAN, 1979) de cada ponto estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7- Parâmetros hidráulicos 3D, classificação hidrológica e grau de permeabilidade

Ponto	Ks (mm/h)	S (mm/s ^{0.5})	Classificação Hidrológica	Grau de Permeabilidade
P01	69,54	4,52	Grupo A	Médio
P02	26,51	1,79	Grupo A	Baixo
P03	56,71	1,60	Grupo A	Médio
P04	70,91	1,05	Grupo A	Médio
P05	33,02	2,52	Grupo A	Baixo
P07	49,07	0,96	Grupo A	Médio
P08	8,49	0,58	Grupo A	Baixo
P09	91,42	2,36	Grupo A	Médio
P11	5,46	1,45	Grupo B	Baixo
P13	35,23	0,58	Grupo A	Baixo
P21	5,85	0,94	Grupo B	Baixo
P22	17,73	0,77	Grupo A	Baixo
P30	3,09	0,43	Grupo C	Baixo
P31	36,10	1,00	Grupo A	Médio
P32	20,83	0,51	Grupo A	Baixo
Mínimo	3,09	0,43	-	-
Máximo	91,42	4,52	-	-
Média	33,02	1,00	-	-

Fonte: Elaborado pela autora

Os valores da condutividade hidráulica variaram de 3,09 a 91,42 mm/h. O ponto 09 apresentou o máximo valor da condutividade e o ponto 30, o menor valor. A média dos pontos foi de 33,02 mm/h. A sorvidade apresentou uma média de 1,0 mm/s^{0.5}.

As classificações hidrológicas dos pontos foram predominantemente no grupo A, ou seja, de acordo com Tucci (1993) são solos que possuem alta taxa de infiltração e baixo escoamento superficial, apenas os pontos 11 e 21 apresentaram classificação no grupo B, com permeabilidade inferior ao grupo A, porém superior à média, e o ponto 30, que foi classificado no grupo C e apresenta escoamento superficial acima da média e menor capacidade de

infiltração (TUCCI, 1993). Quanto à classificação do grau de permeabilidade, os pontos variaram de permeabilidade baixa a média, porém a maioria apresentou permeabilidade baixa.

A análise estatística entre os valores obtidos no ensaio e os estimados é apresentada na Tabela 8. Apesar de todos os pontos apresentarem um bom ajuste ($R^2 = 1$), nem todos os parâmetros estatísticos obtiveram resultados próximos aos seus valores ótimos em todos os pontos.

Tabela 8- Resultados Estatísticos 3D

Ponto	R ²	RD	CMR	EQM	EM	índice c
P01	0,9938	0,9584	-0,0329	5,0355	0,9885	0,9941
P02	0,9989	0,9148	-0,0073	2,9557	0,9966	0,9986
P03	0,9967	0,6086	-0,1559	19,6247	0,8296	0,9651
P04	0,9998	0,9315	-0,0440	4,7022	0,9904	0,9976
P05	0,9985	0,6838	-0,1500	17,0973	0,8691	0,9720
P07	1,0000	0,8982	-0,0547	5,9438	0,9844	0,9963
P08	0,9991	0,8914	-0,0516	5,9665	0,9837	0,9957
P09	0,9962	0,9375	-0,0080	3,6104	0,9947	0,9968
P11	0,9923	0,6544	-0,1627	19,2423	0,8304	0,9616
P13	0,9998	0,7012	-0,1851	18,6175	0,7712	0,9507
P21	0,9970	0,8171	-0,0875	9,6892	0,9380	0,9844
P22	0,9979	0,9163	-0,0312	4,0389	0,9892	0,9964
P30	0,9985	0,9467	-0,0655	6,5266	0,9836	0,9952
P31	0,9994	0,7859	-0,0792	9,1800	0,9475	0,9880
P32	0,9992	0,9093	-0,0747	7,5395	0,9697	0,9923
Média	0,9985	0,8982	-0,0655	6,5266	0,9836	0,9941

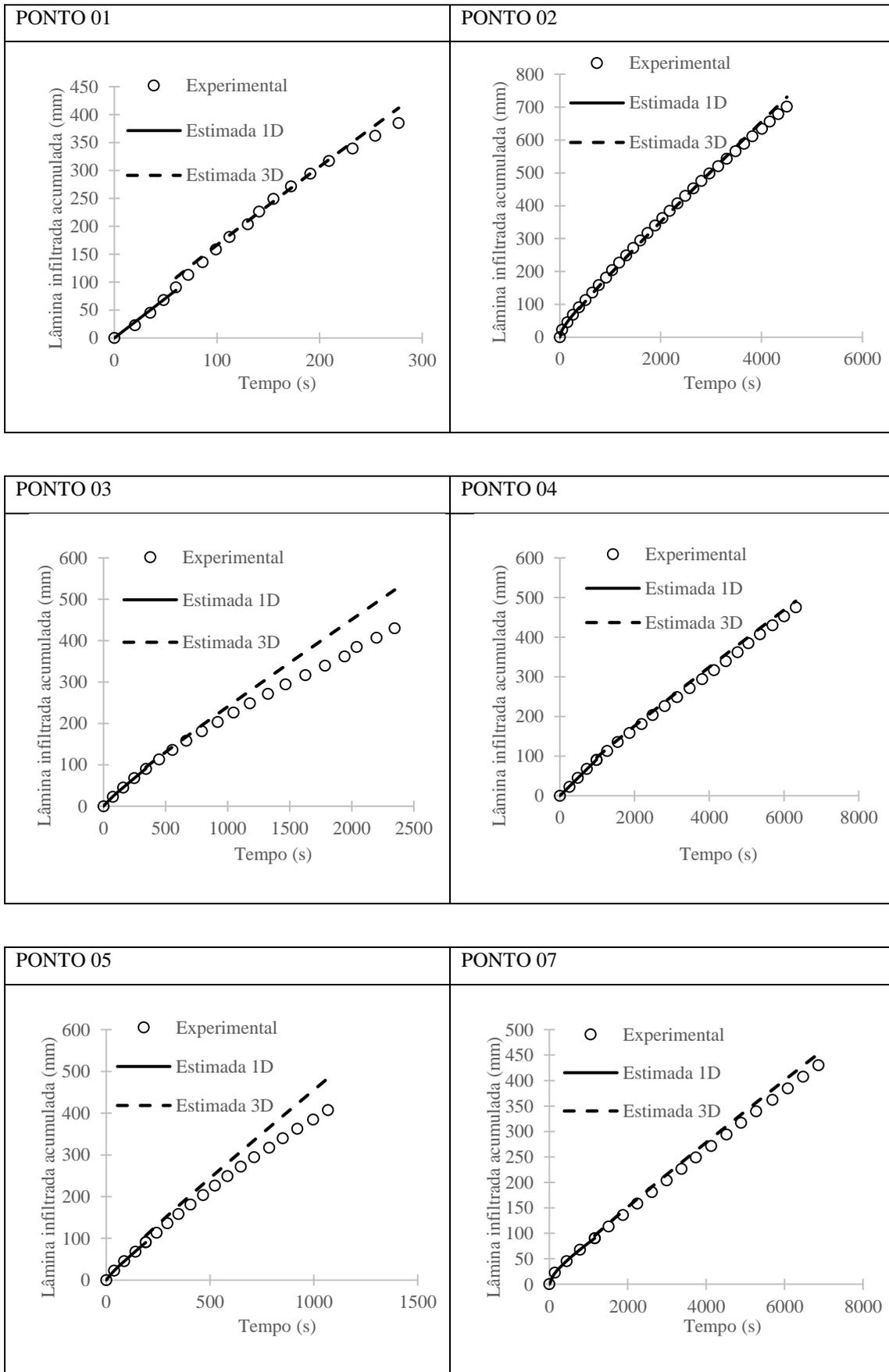
Fonte: Elaborado pela autora

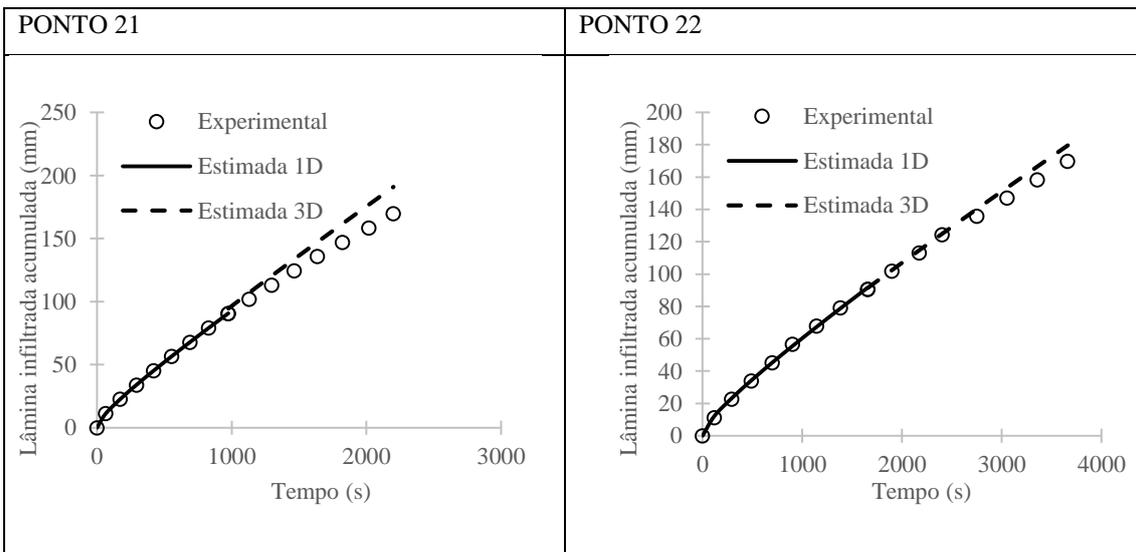
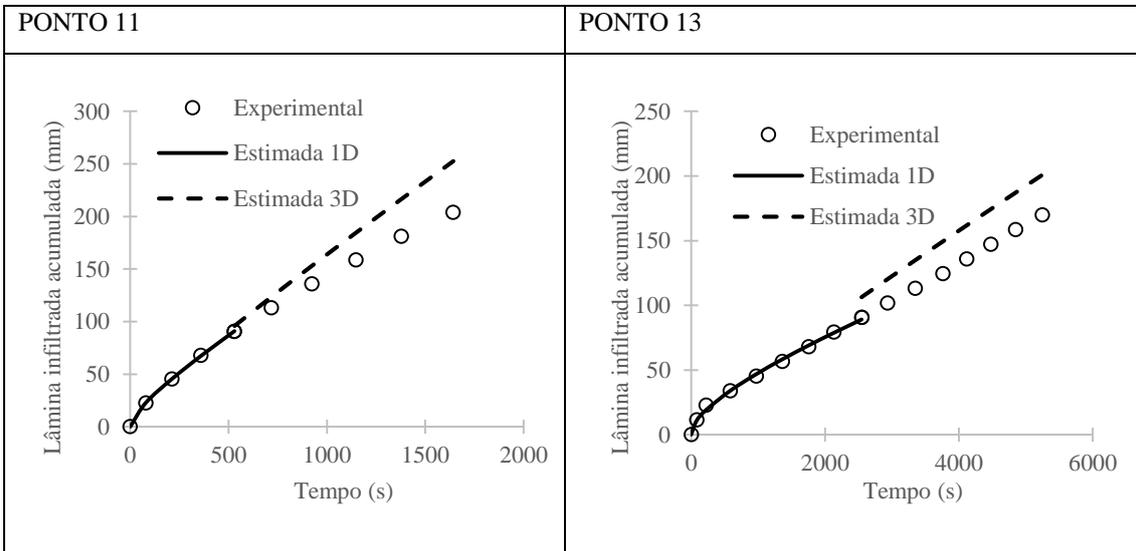
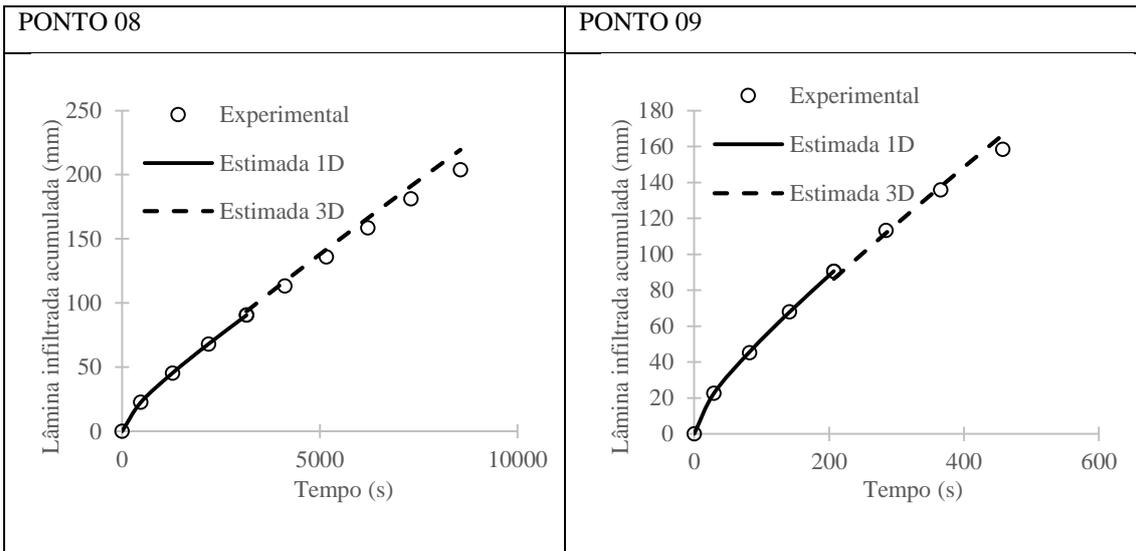
A média da razão dos desvios foi de 0,8982, valor distante quase 10% do valor ideal para este critério ($RD = 1$). Os pontos 03, 05 e 11 apresentaram os valores mais distantes de 1. Analisando-se o coeficiente de massa residual, observa-se que todos os pontos foram superestimados com uma média de 6% pelo modelo ($CMR < 0$). O erro quadrático médio apresentou os piores ajustes. Os pontos 03, 05, 11 e 13 obtiveram os valores de EQM mais distantes do ideal ($EQM = 0$). De maneira geral, a eficiência de modelagem apresentou valores satisfatórios ($EM = 1$), com uma média de 0,9836, porém o ponto 13 apresentou o pior valor do EM, seguido dos pontos 03, 11 e 05.

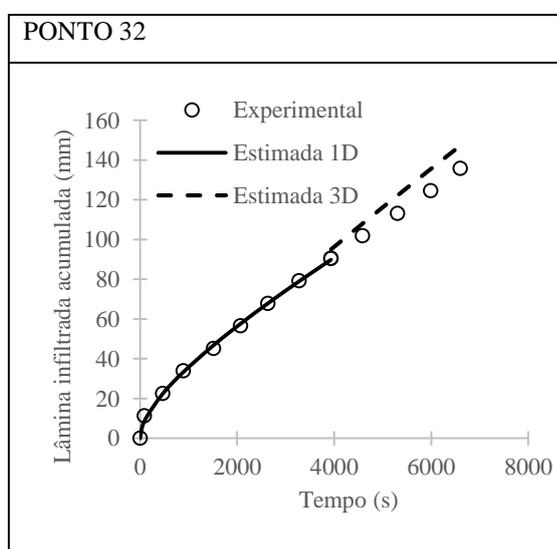
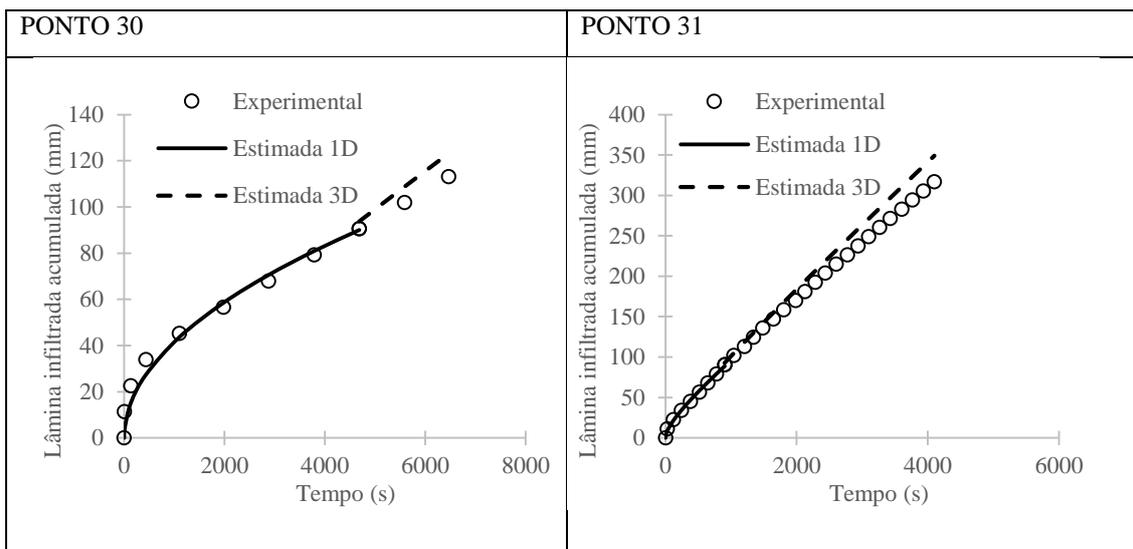
Para todos os pontos, os valores do índice “c” indicaram um ótimo desempenho com uma média de 0,9941 no modelo de cálculo tridimensional.

Os resultados gráficos dos ajustes de cada ponto são apresentados na Figura 22.

Figura 22- Resultado gráfico dos ajustes unidimensionais e tridimensionais







Fonte: Elaborado pela autora

A análise gráfica confirma o que já se verificou na análise estatística do modelo tridimensional, em que os pontos 03, 05, 11 e 13 obtiveram os piores ajustes. Esta diferença pode ter ocorrido por diversos motivos, uma das hipóteses é que o programa geralmente analisa todos os dados da curva de infiltração e, neste trabalho, foram colocados apenas a parte final da curva para serem avaliadas pelo BEST, podendo ter de fato uma divergência entre os dados estimados e experimentais em alguns pontos. Outra hipótese é que se supõe que a infiltração esteja no regime transitório na parte final da curva dependendo, portanto, da condutividade hidráulica e da sorvidade, porém a sorvidade neste caso é de difícil determinação, o que pode gerar uma diferença entre os dados experimentais e os estimados pelo modelo.

4.2 Importância da gravidade e da capilaridade no processo de infiltração

No modelo unidimensional foram comparados os efeitos da gravidade e da capilaridade, representados respectivamente pela condutividade hidráulica e pela sorvidade do solo. Um exemplo do ponto 21 de como elas variaram ao longo do tempo pode ser visto na Tabela 9

Tabela 9 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 21

Tempo (s)	I (cm)	$K_s \cdot T$	$S \cdot \sqrt{T}$	$(K_s \cdot T)/I$	$(S \cdot \sqrt{T})/I$
0	0	0	0	-	-
64	1,11	0,42	0,70	0,37	0,63
173	2,27	1,13	1,14	0,50	0,50
294	3,41	1,92	1,49	0,56	0,44
421	4,53	2,74	1,79	0,61	0,39
554	5,66	3,61	2,05	0,64	0,36
690	6,78	4,50	2,29	0,66	0,34
828	7,90	5,40	2,50	0,68	0,32
975	9,07	6,35	2,72	0,70	0,30

Fonte: Elaborado pela autora

Pode-se verificar que a umidade do solo aumenta com o tempo e conseqüentemente, os efeitos da capilaridade na infiltração vão diminuindo, dessa forma, os efeitos da gravidade no processo de infiltração aumentam com o tempo. No ponto 21, no início da infiltração, a sorvidade comandava 63% da infiltração contra 37 % dos efeitos da gravidade. No final, a gravidade já representava 70% da infiltração, enquanto a capilaridade representava apenas 30%. A mesma relação entre a condutividade hidráulica e a sorvidade ao longo do tempo pode ser observada para todos os pontos no modelo unidimensional. As tabelas comparativas de todos os pontos estão apresentadas no Apêndice A.

4.3 Indicador hidrodinâmico de manutenção

O indicador hidrodinâmico de manutenção foi calculado para cada ponto e os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 10. Nesta tabela também estão apresentadas a classificação hidrológica (RAWLS et al., 1992) e o grau de permeabilidade (TERZAGHI e PECK, 1967 apud LAMBE e WHITMAN, 1979) de cada ponto em relação ao valor obtido do indicador.

Tabela 10 – IHM, classificação hidrológica e grau de permeabilidade.

Ponto	IHM (mm/h)	Classificação Hidrológica	Grau de Permeabilidade
P01	65,54	Grupo A	Médio
P02	23,75	Grupo A	Baixo
P03	48,21	Grupo A	Médio
P04	58,20	Grupo A	Médio
P05	29,27	Grupo A	Baixo
P07	39,44	Grupo A	Médio
P08	5,20	Grupo B	Baixo
P09	47,36	Grupo A	Médio
P11	4,75	Grupo B	Baixo
P13	18,37	Grupo A	Baixo
P21	4,15	Grupo B	Baixo
P22	9,38	Grupo A	Baixo
P30	0,78	Grupo D	Baixo
P31	27,30	Grupo A	Baixo
P32	7,88	Grupo A	Baixo
Mínimo	0,78	-	-
Máximo	65,54	-	-
Média	23,75	-	-

Fonte: Elaborado pela autora

O indicador hidrodinâmico de manutenção do pavimento variou de 0,78 mm/h a 65,54 mm/h., apresentando uma média de 23,75 mm/h. Os resultados de K_s obtidos na Tabela 5 diferem do valor de IHM, obtidos na Tabela 10, visto que o primeiro, leva em consideração apenas a infiltração na camada superficial do pavimento, estimados por um modelo unidimensional. Já na segunda tabela, a condutividade hidráulica é calculada por uma ponderação e leva em consideração, não só a superfície, mas também a camada abaixo do revestimento. Dessa forma, o indicador hidrodinâmico de manutenção permite uma avaliação global da permeabilidade do pavimento e a necessidade de manutenção.

As classificações hidrológicas do pavimento foram predominantemente no grupo A, ou seja, solo com alta capacidade de infiltração e baixo escoamento superficial, conforme Tucci (1993). Alguns pontos, porém, foram classificados no grupo B, e representam solos com permeabilidade superior à média, porém inferior ao solo do grupo A (TUCCI, 1993). O ponto 30 obteve a pior classificação em termos de infiltração, gerando o maior escoamento superficial (grupo D) de acordo com Tucci (1993). Já a permeabilidade foi de maneira geral considerada baixa para o pavimento permeável, e somente alguns pontos obtiveram grau de permeabilidade médio.

Nas Tabelas 5, 7 e 10, observou-se que na maioria dos casos, não há uma convergência dos resultados nas classificações hidrológicas propostas por Rawls et al. (1992) e no grau de permeabilidade proposto por Terzaghi e Peck (1967) apud Lambe e Whitman (1979). Pode-se citar, por exemplo, na Tabela 10, o ponto 2 que apresentou grau de permeabilidade baixo e classificação hidrológica no grupo A, ou seja, elevada taxa de infiltração e baixo escoamento superficial. Tal divergência ocorre, pois, as classificações qualitativas possuem limites distintos para avaliação. Ou seja, o método de classificação proposto por Rawls et al. (1992) apresenta um critério menos rigoroso de avaliação do que o proposto por Terzaghi e Peck (1967) apud Lambe e Whitman (1979), que possui critérios mais elevados.

Ambos os métodos de classificação anteriormente citados podem ser utilizados como critérios para manutenção. Dessa forma, fica a cargo do gestor decidir qual método seria mais adequado para se levar em consideração para definir a necessidade ou não de manutenção. Porém, é importante atentar que a classificação do grau de permeabilidade proposto por Terzaghi e Peck (1967) apud Lambe e Whitman (1979) possui critérios mais rigorosos e, portanto, indicará manutenções mais frequentes, o que pode auxiliar no prolongamento da vida útil dos pavimentos.

5 CONCLUSÃO

O modelo unidimensional foi considerado adequado para a estimativa da infiltração na camada de revestimento do pavimento permeável e o índice “c” indicou um ótimo desempenho no ajuste do modelo. O valor médio obtido da condutividade hidráulica na camada superficial pelo modelo 1D foi de 2,35 mm/h e a maior parte dos pontos indicou a presença de uma baixa taxa de infiltração e elevado escoamento superficial (TUCCI, 1993). Preliminarmente se verifica a necessidade de manutenção da camada de revestimento do pavimento.

O modelo tridimensional, apesar de apresentar alguns pontos que não obtiveram valores ótimos na análise estatística, pode ser considerado de maneira geral adequado para a estimativa da infiltração nos blocos, com índice “c” indicando um ótimo desempenho no ajuste. O valor médio da condutividade hidráulica foi de 33,02 mm/h e a maior parte dos pontos indicou solos que possuem alta taxa de infiltração e baixo escoamento superficial (TUCCI, 1993).

Além disso, verificou-se a importância dos efeitos da capilaridade e da gravidade na infiltração ao longo do tempo no modelo unidimensional. A sorvidade sofreu uma queda na influência da infiltração e a condutividade hidráulica aumentou, se tornando mais significativa no processo de infiltração ao longo do tempo.

O indicador hidrodinâmico de manutenção permitiu uma avaliação global da permeabilidade do pavimento. A média obtida pelo indicador foi de 23,75 mm/h e apresentou, de maneira geral, solos com alta capacidade de infiltração e baixo escoamento superficial (TUCCI, 1993), porém a maior parte dos pontos obteve grau de permeabilidade baixo, conforme classificação proposta por Terzaghi e Peck (1967) apud Lambe e Whitman (1979), o que indica a necessidade de manutenção do pavimento.

REFERÊNCIAS

ACIOLI, L.A. **Estudo Experimental de Pavimentos Permeáveis para o Controle do Escoamento Superficial na Fonte**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. 162p.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). **Permeable Pavements: Recommended Design Guidelines**. 2013.

ANTONINO, A. C. D. et al. Utilização do Método Inverso para a Caracterização Hidrodinâmica de um Neossolo Flúvico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 3, p. 81-87, 2004.

ARAÚJO, P. R. et al. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 21-29, 2000.

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

BRUNO, L. O. et al. Estudo da Redução do Escoamento Superficial Direto em Superfícies Permeáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, p. 237-247, 2013.

BURDINE, N.T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. **American Institute Mining and Metallurgy Engineering**, Littleton, v.198, p.71–77, 1953.

CASTRO, A.S. et al. Avaliação da Evolução do Comportamento Quantitativo de Pavimentos Permeáveis no Controle do Escoamento Superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 1, p. 263-273, 2013.

CONCRETE MASONRY ASSOCIATION OF AUSTRALIA (CMAA). **Permeable Interlocking Concrete Pavements- Design and Construction Guide**. 2010.

COUTINHO, A. P. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013. 132 p.

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

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

FUENTES, C. **Approche fractale des transferts hydriques dans les sols non-saturés**. Grenoble: Université Joseph Fourier, 1992. 444p. Tese Doutorado.

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

GUSMÃO FILHO, J.A. **Fundações do conhecimento geológico às práticas da engenharia**. Editora Universitária da UFPE. Recife, 2002. 349p.

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

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

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

INTERPAVE. **Understanding Permeable Paving: Guidance for designers, developers, planners and local authorities**. 2008.

JABUR, A.S. et al. Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 937-945, 2015.

KUMAR, K. et al. In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot – A four-year study. **Journal of Environmental Management**, v. 167, p. 8-14, 2016.

LAMBE T.; WHITMAN R. **Soil mechanics**, SI version. New York: John Wiley & Sons. 1979.

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

LUCKE, T. et al. **A Simple Field Test to Evaluate the Maintenance Requirements of Permeable Interlocking Concrete Pavements**. 2015.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. **Pavimento intertravado – Melhores Práticas**. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). São Paulo, 2010. 24p.

MARTIN III, W. D. et al. Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v.59, p.78-84, 2014.

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

OLIVEIRA, L. M. M. **Avaliação da Evapotranspiração de referência (ET_o) na bacia experimental do riacho gameleira – PE, utilizando lisímetro de pesagem hidráulica e métodos indiretos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2007. 89 p.

PHILIP, J. R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. **Soil Science**, v.84, p. 257-264, 1957.

PHILIP, J. R. The theory of infiltration. *Advances in Hydrosience*. New York. **Academic Press**, v.5, p.215-296, 1969.

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

RIGHETTO, A.M. (coordenador). **Manejo de Águas Pluviais Urbanas. Projeto PROSAB**. Editora ABES. Rio de Janeiro, 2009. 396p.

SOUZA, E.D.(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.; ANGULO-JARAMILLO, R.; MACIEL NETO, A. Caracterização hidrodinâmica de solos: aplicação do método Beerkan. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, p.128-135, 2008.

SUZUKI, C.A; AZEVEDO, A.M.; KABBACH JÚNIOR, F.I. **Drenagem subsuperficial de pavimentos**. Editora oficina de textos. 2013. 240p.

TERZAGHI K., PECK R., MESRI G. (1996). **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Editora Universidade/UFRGS. Porto Alegre, 1993. p. 5-27.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J.C. **Inundações Urbanas na América do Sul**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Porto Alegre, 2003.

VALIANTZAS, J. D. New linearized two-parameter infiltration equation for direct determination of conductivity and sorptivity. **Journal of Hydrology**, v.384, p.1-13, 2010.

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

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

ZATARÁIN, F.; FUENTES, C.; HAVERKAMP, R.; ANTONIO, A.C.D. **Predicción de la forma de la característica de humedad del suelo a partir de la curva granulométrica**. In: Congreso Nacional de Irrigación, 13, 2003, Zacatecas. Resumos ... Zacatecas: ANEI, 2003. Desarrollo y transferencia de tecnología de riego y drenaje, v.2, p.212-219.

APÊNDICE

As tabelas a seguir mostram a relação entre a condutividade hidráulica e a sorvidade ao longo do tempo para todos os pontos no modelo unidimensional.

Tabela 11 - Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 01

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . √T	(Ks . T)/I	(S . √T)/I
0	0	0	0	-	-
20	2,850090379	2,850090379	0	1	0
35	4,987658163	4,987658163	0	1	0
48	6,840216909	6,840216909	0	1	0
60	8,550271136	8,550271136	0	1	0

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 12 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 02

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . √T	(Ks . T)/I	(S . √T)/I
0	0	0	0	-	-
44	2,11587851	0,485031209	1,630847301	0,23	0,77
149	4,64358948	1,642492049	3,001097431	0,35	0,65
260	6,830458523	2,866093508	3,964365015	0,42	0,58
381	8,998914954	4,199929332	4,798985622	0,47	0,53

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 13 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 03

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . √T	(Ks . T)/I	(S . √T)/I
0	0	0	0	-	-
75	2,319296619	1,705356569	0,61394005	0,74	0,26
158	4,483712572	3,592617838	0,891094734	0,80	0,20
248	6,755449182	5,639045721	1,116403461	0,83	0,17
342	9,087443145	7,776425954	1,311017192	0,86	0,14

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 14 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 04

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . √T	(Ks . T)/I	(S . √T)/I
0	0	0	0	-	-
261	2,417504511	2,417504511	0	1	0
482	4,464510246	4,464510246	0	1	0
720	6,668977962	6,668977962	0	1	0
986	9,13279482	9,13279482	0	1	0

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 15 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 05

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . \sqrt{T}	(Ks . T)/I	(S . \sqrt{T})/I
0	0	0	0	-	-
38	2,255115003	1,431220285	0,823894718	0,63	0,37
86	4,478527869	3,239077487	1,239450382	0,72	0,28
141	6,897626391	5,310580532	1,587045859	0,77	0,23
190	8,99838602	7,156101426	1,842284595	0,80	0,20

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 16 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 07

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . \sqrt{T}	(Ks . T)/I	(S . \sqrt{T})/I
0	0	0	0	-	-
140	2,190030064	0,507709689	1,682320374	0,23	0,77
442	4,592117855	1,602912019	2,989205836	0,35	0,65
780	6,799596045	2,828668269	3,970927777	0,42	0,58
1157	9,032137148	4,195857932	4,836279216	0,46	0,54

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 17 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 08

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . \sqrt{T}	(Ks . T)/I	(S . \sqrt{T})/I
0	0	0	0	-	-
469	2,245352198	0,784726609	1,460625589	0,35	0,65
1273	4,536365944	2,129972225	2,406393718	0,47	0,53
2184	6,806195517	3,654249285	3,151946232	0,54	0,46
3144	9,042270862	5,260512707	3,781758155	0,58	0,42

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 18 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 09

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . \sqrt{T}	(Ks . T)/I	(S . \sqrt{T})/I
0	0	0	0	-	-
29	2,244017324	0,685749939	1,558267385	0,31	0,69
82	4,55931038	1,939017069	2,620293311	0,43	0,57
141	6,770158617	3,334163496	3,43599512	0,49	0,51
207	9,058044206	4,894835771	4,163208435	0,54	0,46

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 19 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 11

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . \sqrt{T}	(Ks . T)/I	(S . \sqrt{T})/I
0	0	0	0	-	-
80	2,294029143	0,786515545	1,507513598	0,34	0,66
212	4,538320534	2,084266193	2,454054341	0,46	0,54
359	6,722963127	3,529488506	3,193474621	0,52	0,48
530	9,090866093	5,210665483	3,88020061	0,57	0,43

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 20 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 13

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . \sqrt{T}	(Ks . T)/I	(S . \sqrt{T})/I
0	0	0	0	-	-
82	1,084087796	0,112182723	0,971905073	0,10	0,90
224	1,912803155	0,306450365	1,60635279	0,16	0,84
584	3,392681407	0,798959881	2,593721526	0,24	0,76
974	4,682138491	1,332511856	3,349626635	0,28	0,72
1361	5,821510989	1,861959585	3,959551404	0,32	0,68
1758	6,905231587	2,405088134	4,500143453	0,35	0,65
2132	7,87251373	2,916750797	4,955762933	0,37	0,63
2548	8,903593886	3,485872904	5,417720982	0,39	0,61

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 21 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 21

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . \sqrt{T}	(Ks . T)/I	(S . \sqrt{T})/I
0	0	0	0	-	-
64	1,11	0,42	0,70	0,37	0,63
173	2,27	1,13	1,14	0,50	0,50
294	3,41	1,92	1,49	0,56	0,44
421	4,53	2,74	1,79	0,61	0,39
554	5,66	3,61	2,05	0,64	0,36
690	6,78	4,50	2,29	0,66	0,34
828	7,90	5,40	2,50	0,68	0,32
975	9,07	6,35	2,72	0,70	0,30

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 22 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 22

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . \sqrt{T}	(Ks . T)/I	(S . \sqrt{T})/I
0	0	0	0	-	-
117	1,211538891	0,443059443	0,768479447	0,37	0,63
291	2,313921478	1,101968359	1,211953118	0,48	0,52
489	3,422824824	1,851761264	1,57106356	0,54	0,46
698	4,520221278	2,643209329	1,877011949	0,58	0,42
902	5,549468615	3,415723231	2,133745385	0,62	0,38
1143	6,730291532	4,328349947	2,401941585	0,64	0,36
1383	7,879296919	5,237189831	2,642107087	0,66	0,34
1658	9,171456659	6,278568865	2,892887794	0,68	0,32

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 23 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 30

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . \sqrt{T}	(Ks . T)/I	(S . \sqrt{T})/I
0	0	0	0	-	-
8	0,361940875	0,000338975	0,3616019	0,00	1,00
134	1,485597394	0,005677838	1,479919556	0,00	1,00
435	2,684862719	0,018431789	2,66643093	0,01	0,99
1101	4,288736523	0,046651493	4,242085029	0,01	0,99
1978	5,769706912	0,083811675	5,685895237	0,01	0,99
2877	6,97924337	0,121904038	6,857339332	0,02	0,98
3790	8,031143825	0,160589609	7,870554216	0,02	0,98
4685	8,94916639	0,198512485	8,750653905	0,02	0,98

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 24 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 31

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . \sqrt{T}	(Ks . T)/I	(S . \sqrt{T})/I
0	0	0	0	-	-
26	0,836710513	0,136733764	0,699976749	0,16	0,84
118	2,111767964	0,620560928	1,491207036	0,29	0,71
244	3,427524929	1,283193783	2,144331146	0,37	0,63
377	4,648071625	1,982639575	2,66543205	0,43	0,57
515	5,823685198	2,708380321	3,115304877	0,47	0,53
645	6,878445807	3,39204914	3,486396667	0,49	0,51
776	7,905064275	4,08097695	3,824087325	0,52	0,48
904	8,881571464	4,754127787	4,127443678	0,54	0,46

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 25 – Comparação entre gravidade e capilaridade no ponto 32

Tempo (s)	I (cm)	Ks . T	S . \sqrt{T}	(Ks . T)/I	(S . \sqrt{T})/I
0	0	0	0	-	-
90	0,874873328	0,086253289	0,788620039	0,10	0,90
463	2,232423368	0,443725254	1,788698114	0,20	0,80
890	3,332891381	0,852949192	2,479942189	0,26	0,74
1513	4,683462643	1,450013627	3,233449016	0,31	0,69
2069	5,764042463	1,98286728	3,781175184	0,34	0,66
2633	6,788907897	2,523387891	4,265520005	0,37	0,63
3276	7,897554674	3,139619724	4,75793495	0,40	0,60
3934	8,984139518	3,770227104	5,213912414	0,42	0,58

Fonte: Elaborado pela autora