

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Vinícius Pellizzari**

**AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA NA RESTAURAÇÃO DA  
CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DA CAMADA SUPERIOR  
DE PAVIMENTOS POROSOS**

Porto Alegre  
dezembro 2013

**VINÍCIUS PELLIZZARI**

**AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA NA RESTAURAÇÃO DA  
CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DA CAMADA SUPERIOR  
DE PAVIMENTOS POROSOS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientador: Joel Avruch Goldenfum**  
**Coorientador: Fernando Dornelles**

Porto Alegre  
dezembro 2013

**VINÍCIUS PELLIZZARI**

**AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA NA RESTAURAÇÃO DA  
CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DA CAMADA SUPERIOR  
DE PAVIMENTOS POROSOS**

Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina de Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 20 de dezembro de 2013

Prof. Joel Avruch Goldenfum  
Dr. em Hidrologia pelo Imperial  
College/University of London  
Orientador

Prof. Fernando Dornelles  
Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento  
Ambiental pela UFRGS  
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Joel Avruch Goldenfum (UFRGS)**  
Dr. pelo Imperial College/  
University of London

**Prof. Fernando Dornelles (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul

**Prof. André Luiz Lopes da Silveira (UFRGS)**  
Dr. pela Université de Montpellier II, França

**Eng. Fernando Papisch Druck (ABCP)**  
Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha família, principalmente a meus pais e meus irmãos, que sempre me apoiaram e incentivaram especialmente durante o período deste Curso de Graduação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família, principalmente a minha mãe Cleusa e seu esposo Paulo, meu pai Neori e sua esposa Eloá e a meus irmãos Gustavo, Ivan e Emanuel, pelo carinho e por estarem sempre me apoiando, não só no período de graduação, mas em toda minha vida.

Agradeço aos meus amigos, que são minha segunda família e reabastecem minhas energias sempre que preciso.

Agradeço ao Prof. Joel Avruch Goldenfum e ao Prof. Fernando Dornelles, pela dedicação, conhecimentos transmitidos e tempo dedicado a este trabalho e ao período de iniciação científica.

Agradeço a Pós-doutora Andrea Sartori Jabur pelo apoio durante a realização do trabalho.

Agradeço a Prof. Carin Maria Schmitt, pelo empenho e dedicação que contribuíram muito para este trabalho e, também, pela paciência nos atendimentos.

Escolha um trabalho de que gostas e não terás que  
trabalhar nem um dia em tua vida.

*Confúcio*

## RESUMO

Este trabalho versa sobre a avaliação da eficácia na restauração da capacidade de infiltração da camada superior de um pavimento poroso localizado no estacionamento de veículos leves do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A camada superficial do pavimento encontrava-se colmatada e foi restaurada através de uma manutenção corretiva, utilizando métodos usualmente adotados como manutenção preventiva para este tipo de dispositivo. A revisão da literatura aborda os impactos da urbanização no que concernem as inundações, bem como suas medidas de controle e as principais características dos pavimentos poroso e seus usos. A partir desta revisão, adotaram-se critérios para a escolha de métodos para manutenção e ensaio através de testes de infiltração na estrutura de asfalto poroso. Primeiramente, foram analisados os dados obtidos anteriormente em trabalhos realizados sobre a mesma estrutura abordada neste trabalho a título de comparação dos índices de infiltração do pavimento poroso. Foram buscados também, dados na bibliografia quanto à classificação de permeabilidade das estruturas e solos. Na segunda parte do trabalho, foi feita a manutenção do pavimento supracitado através do uso de jatos de ar e de água, ainda foi realizada varrição antes de cada ensaio. Os testes de infiltração foram feitos após a etapa de limpeza com jato de ar e, também, após a limpeza com jato de água, sendo três testes após cada etapa, totalizando seis testes de infiltração, que foram feitos de acordo com a norma americana ASTM C1701 – *Standard Test Methods for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete*. Os dados então foram analisados e comparados com os obtidos anteriormente às etapas de manutenção e com os indicados pela bibliografia, quando foi verificada a eficácia da manutenção efetuada. Percebeu-se então que a manutenção é eficaz na recuperação de um grande percentual da capacidade de infiltração e que, por apresentar baixos custos, deve ser considerada sua execução conforme a periodicidade apresentada pela bibliografia. Com o uso da manutenção preventiva as estruturas de pavimento poroso podem ter seu tempo de colmatção postergado, garantindo um bom desempenho quanto à capacidade de infiltração e diminuição do escoamento superficial nas áreas implantadas.

Palavras-chave: Manutenção de Pavimentos Porosos. Medidas de Controle Estrutural.  
Pavimentos Porosos. Drenagem Urbana.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa .....	17
Figura 2 – Alteração do ciclo hidrológico após urbanização .....	19
Figura 3 – Hidrograma tipo com separação de escoamento .....	20
Figura 4 – Alteração no hidrograma devido à urbanização/ loteamentos .....	21
Figura 5 – Seção típica de estrutura em asfalto poroso .....	28
Figura 6 – Pavimento permeável com superfície colmatada .....	30
Figura 7 – Localização do experimento .....	36
Figura 8 – Seção transversal da estrutura .....	37
Figura 9 – Primeira etapa da manutenção .....	38
Figura 10 – Segunda etapa da manutenção .....	38
Figura 11 – Sequência de atividades – teste de infiltração .....	39
Figura 12 – Capacidade de infiltração do pavimento poroso .....	43
Figura 13 – Localização das vagas .....	44
Figura 14 – Análise individual dos testes .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de permeabilidade .....	40
Tabela 2 – Dados dos testes de infiltração .....	42
Tabela 3 – Teste de infiltração – vaga 01 .....	45
Tabela 4 – Teste de infiltração – vaga 05 .....	46
Tabela 5 – Teste de infiltração – vaga 08 .....	46

## LISTA DE SÍMBOLOS

I – taxa de infiltração (mm/h)

K – 4.583.666.000 (Sistema Internacional) (para converter as unidades)

M – massa de água infiltrada (kg)

D – diâmetro interno do anel cilíndrico (mm)

t – tempo de infiltração (s)

imáx – intensidade máxima da chuva (mm/h)

Tr – período de retorno do projeto (anos)

td – tempo de duração da chuva (minutos)

tc – tempo de concentração (minutos)

L – comprimento da rede contribuinte (metros)

I<sub>m</sub> – declividade média (m/m).

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	15
2.2 OBJETIVO DO TRABALHO .....	15
2.3 HIPÓTESES .....	15
2.4 PRESSUPOSTO .....	15
2.5 DELIMITAÇÕES .....	16
2.6 LIMITAÇÕES .....	16
2.7 DELINEAMENTO .....	16
<b>3 INUNDAÇÕES: URBANIZAÇÃO E MEDIDAS DE CONTROLE</b> .....	18
3.1 URBANIZAÇÃO: ASPECTOS GERAIS E IMPACTOS .....	18
<b>3.1.1 Ciclo hidrológico e balanço hídrico</b> .....	19
<b>3.1.2 Escoamento superficial e o hidrograma</b> .....	20
3.2 MEDIDAS DE CONTROLE .....	21
<b>3.2.1 Medidas de controle estruturais</b> .....	22
<b>3.2.2 Medidas de controle não estruturais</b> .....	23
<b>3.2.3 Medidas de controle não convencionais</b> .....	23
3.2.3.1 Contenção a jusante .....	24
3.2.3.2 Contenção na fonte .....	25
<b>4 PAVIMENTOS POROSOS</b> .....	27
4.1 CARACTERÍSTICAS .....	27
4.2 VANTAGENS E LIMITAÇÕES .....	28
4.3 MANUTENÇÃO .....	29
4.4 VIABILIDADE FINANCEIRA .....	30
4.5 BREVE HISTÓRICO .....	32
4.6 TESTE DE INFILTRAÇÃO .....	33
<b>5 DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DO EXPERIMENTO</b> .....	36
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO .....	36
5.2 MANUTENÇÃO CORRETIVA .....	37
5.3 TESTE DE INFILTRAÇÃO .....	39
5.4 DADOS DE ESTUDOS ANTERIORES E BIBLIOGRAFIA .....	40
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	42
6.1 ANÁLISE GERAL DO PAVIMENTO .....	42

6.2 ANÁLISE INDIVIDUAL (POR VAGA) .....	44
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	48
REFERÊNCIAS .....	50



## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento nas áreas urbanas aconteceu, na maioria das vezes, sem um planejamento de ocupação, principalmente no que concerne à questão do impacto ao meio. Uma das consequências dessa urbanização é o aumento significativo das superfícies impermeabilizadas e, por conseguinte, do escoamento superficial. Isso afeta diretamente o ciclo hidrológico natural da região e leva à diminuição dos tempos de pico dos hidrogramas locais, ocasionando alagamentos mais frequentes.

Percebeu-se, ao longo dos anos, que era necessário uma drenagem eficiente para que não ocorressem alagamentos frequentes, que acarretassem em prejuízos para a população que ocupava estas áreas. As soluções propostas tradicionalmente acabavam por canalizar os escoamentos de montante para jusante de rios e córregos, apenas transferindo os problemas de alagamento.

Para que o impacto da ocupação urbana seja minimizado, têm-se adotado algumas medidas de controle que visam reduzir os alagamentos causados pelas precipitações ou, até mesmo, evitá-los. Estas medidas podem ser classificadas em dois grupos: as estruturais e as não estruturais. A respeito desta classificação, Tucci (1993b, p. 624) considera que “As medidas estruturais são aquelas que modificam o sistema fluvial evitando os prejuízos decorrentes das enchentes, enquanto que as medidas não estruturais são aquelas em que os prejuízos são reduzidos pela melhor convivência do homem com as enchentes.”.

Os pavimentos permeáveis, mais especificamente os compostos por camada superficial de asfalto poroso, classificam-se como medidas estruturais. Segundo corrobora Canholi (c2005, p. 43), “[...] os pavimentos porosos são constituídos normalmente de concreto ou asfalto convencionais, dos quais foram retiradas as partículas mais finas.”. A implantação desse tipo de sistema contribui diretamente na diminuição do escoamento superficial em áreas nas quais houve a impermeabilização do solo durante a urbanização. A eficácia está relacionada com alguns cuidados que precisam ser observados, tais como:

- a) manutenção, que se faz necessária, visto que com o passar do tempo ocorre a colmatação, que nada mais é do que o entupimento dos poros drenantes do pavimento, dificultando assim a infiltração da água;

- b) limitação estrutural, pois a camada de reservação de água normalmente é formada por material granular, com baixa compactação, reduzindo assim a capacidade de suporte de esforços mecânicos, ficando o trânsito sobre este dispositivo de controle do escoamento pluvial limitado a veículos leves;
- c) localização, somente podendo ser implantadas em regiões com o nível do lençol freático mínimo entre 0,6 m e 1,2 m de profundidade do fundo do reservatório.

A utilização desta técnica tem crescido nos últimos anos e, paralelamente, as pesquisas estão avançando significativamente para verificar se estas medidas surtem efeito importante no controle da drenagem urbana. Os principais estudos e aplicações foram realizados na América do Norte e Europa, principalmente na França, onde foi lançado em 1978 um Programa de Pesquisa para explorar estas novas soluções na área de drenagem urbana (AZZOUT et al., c1994).

No Brasil, há estudos experimentais e teóricos nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e no Distrito Federal. Porto Alegre foi pioneira nestas pesquisas, que começaram em 1999, no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com simuladores de chuva em módulos de 1 m<sup>2</sup> para estimar a geração de escoamento superficial para diversos tipos de cobertura do solo (ARAÚJO, 1999). Em abril de 2003, foi implantado um módulo experimental de estacionamento com pavimento permeável com 264 m<sup>2</sup>, instrumentado para monitoramento do balanço de massa, sendo medida a precipitação, as vazões do escoamento superficial e o armazenamento no reservatório sob o pavimento permeável. Também foram avaliados alguns parâmetros qualitativos da água de escoamento superficial e infiltrado (ACIOLI, 2005). Os estudos foram complementados com novos dados, a partir de 2008, com medições de vazão e de qualidade da água infiltrada, permitindo a avaliação da evolução da capacidade dos dispositivos em amortecer os escoamentos e seu impacto sobre a qualidade das águas escoadas e infiltradas (CASTRO, 2011). Durante a mais recente pesquisa, realizada em 2012, verificou-se que os equipamentos de monitoramento não apresentavam condições de uso e foi proposto que novos testes de infiltração fossem feitos pelos métodos determinados pela norma americana ASTM C1701 e pelo infiltrômetro de anel duplo, determinando assim a máxima capacidade de infiltração dos pavimentos em pontos diversos (trabalho não publicado)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Informação obtida no Relatório Final de Pós-Doutorado, que foi elaborado no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por Andrea Sartori Jabur, sob supervisão de André Luiz Lopes da Silveira, finalizado em janeiro de 2013.

As manutenções preventivas, recomendadas para o pavimento supracitado, não foram realizadas propositalmente nesse estudo experimental, para que assim se pudesse chegar a maior semelhança com a realidade brasileira, que se caracteriza por não valorizar as ações preventivas e de manutenção. Durante o estudo realizado entre 2008 e 2011, a estrutura apresentou fortes sinais de colmatação no revestimento de asfalto poroso (CASTRO, 2011, p. 74), fato este novamente citado no último estudo realizado, durante o ano de 2012 (trabalho não publicado)<sup>2</sup>. Desta forma, no presente trabalho foi realizada a limpeza dos poros da camada superficial, e para isto foi adotado o sistema de manutenção preventiva tradicional, ou seja, por meio de varrição, jatos de ar e de água. Com a medição de novos dados foi possível avaliar a eficácia deste tipo de manutenção corretiva.

Nesse trabalho, as diretrizes de pesquisa são apresentadas no capítulo 2 e o impacto da urbanização nas inundações bem como suas medidas de controle são apresentados no capítulo 3. No capítulo 4, é detalhado o uso de pavimento poroso através de apresentação de suas características, vantagens, limitações, manutenções, viabilidade financeira, histórico, bem como as características do teste de infiltração utilizado durante o experimento. Nos capítulos subsequentes são apresentados os métodos, materiais e discussão dos resultados obtidos, bem como a comparação com dados anteriores da mesma estrutura e na bibliografia. O último capítulo apresenta as considerações finais do trabalho.

---

<sup>2</sup>Informação obtida no Relatório Final de Pós-Doutorado, que foi elaborado no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por Andrea Sartori Jabur, sob supervisão de André Luiz Lopes da Silveira, finalizado em janeiro de 2013.

## 2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual o resultado, quanto à restauração da capacidade de infiltração, do pavimento poroso implantado no estacionamento do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que se apresenta colmatado, através de uma manutenção corretiva, utilizando métodos usualmente adotados como manutenção preventiva para esse tipo de dispositivo?

### 2.2 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo do trabalho é a verificação da eficácia da restauração da capacidade de infiltração da camada superior do pavimento poroso estudado, que se apresenta colmatado, utilizando-se para isso, manutenção corretiva, através de métodos usualmente adotados como manutenção preventiva para esse tipo de dispositivo.

### 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que se pode restaurar a capacidade de infiltração da camada superior de um pavimento poroso, que se apresenta colmatado, utilizando-se as técnicas de manutenção preventivas tradicionais.

### 2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que a camada superior do pavimento poroso encontra-se colmatada e que a norma ASTM C1701 – *Standard Test Methods for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete* é aplicável aos testes de infiltração na camada de asfalto poroso.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao pavimento com revestimento de asfalto poroso localizado no estacionamento de veículos leves do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.

## 2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) uso apenas da norma ASTM C1701 – *Standard Test Methods for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete*, visto que não existe norma brasileira para ensaios de infiltração em estruturas de concreto asfáltico;
- b) adoção como manutenção corretiva a varrição e aplicação de jato de ar e jato de água;
- c) o ensaio utilizado não é para demonstrar o desempenho real do pavimento, mas para servir como base, como índice para verificação da máxima capacidade de infiltração.

## 2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, representadas na figura 1 e descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) análise de dados em estudos anteriores;
- c) avaliação dos métodos de manutenção para definição dos aplicáveis ao estudo;
- d) execução da limpeza através de jato de ar (etapa 1);
- e) testes de infiltração após a primeira etapa da manutenção;
- f) execução da limpeza através de jato de água (etapa 2);
- g) testes de infiltração após a segunda etapa de manutenção;
- h) análise dos resultados;
- i) conclusões.

O trabalho iniciou com a pesquisa bibliográfica para entendimento geral e compreensão do assunto a ser abordado, além do conhecimento do experimento já implantado, sendo que esta pesquisa foi desenvolvida de forma contínua durante toda a execução do trabalho. Para esta

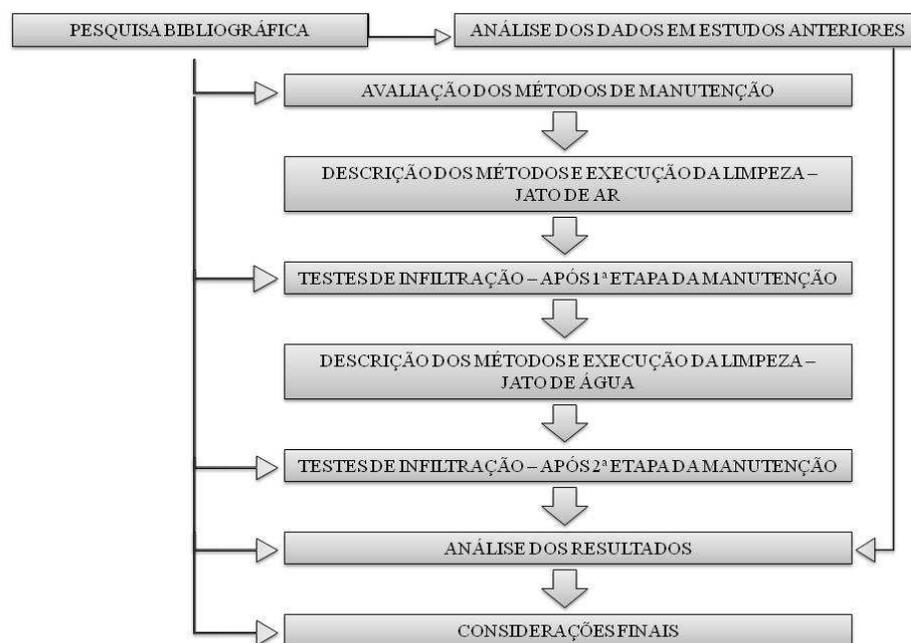
etapa foram utilizados livros, normas, artigos científicos, trabalhos de conclusão de cursos de graduação, teses e dissertações.

A segunda etapa da realização do trabalho centrou-se na análise dos dados obtidos anteriormente em estudos realizados sobre a mesma estrutura abordada neste trabalho, a título de comparação dos índices de infiltração do pavimento poroso em momentos diferentes ao longo de sua vida. Após, analisaram-se os métodos de manutenção a serem executados, constituindo-se na compreensão de cada passo do processo. Nesta etapa foram escolhidos os métodos e determinados os momentos e pontos que seriam realizados os testes de infiltração.

Após esta análise preliminar, iniciaram-se as etapas de manutenção, realizando-se primeiramente a limpeza com jatos de ar, e posteriormente a limpeza com jato de água, além de varrição das áreas de testes antes de cada ensaio. Foram realizados três testes de infiltração após cada etapa de limpeza.

A etapa de análise de resultados ocorreu após a execução dos últimos testes de infiltração, conforme os procedimentos recomendado pela norma ASTM C1701 – *Standard Test Methods for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete*, que foram comparados com os resultados verificados anteriormente à manutenção. Por fim foram adicionadas as conclusões finais e avaliação do alcance dos objetivos propostos.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborada pelo autor)

### **3 INUNDAÇÕES: URBANIZAÇÃO E MEDIDAS DE CONTROLE**

As inundações estão diretamente ligadas à deficiência na rede de drenagem, que na maioria dos casos foi dimensionada para uma realidade aquém do que acontece em grandes centros, sem planejamento do crescimento populacional. As medidas de controle visam minimizar os impactos da urbanização desordenada, diminuindo o impacto nas redes de drenagens existentes, buscando uma maior proximidade com as características originais, reduzindo o escoamento superficial e seus impactos nos hidrogramas locais. Nos próximos itens são descritos os aspectos gerais e os impactos da urbanização bem como as medidas de controle.

#### **3.1 URBANIZAÇÃO: ASPECTOS GERAIS E IMPACTOS NA DRENAGEM**

O desenvolvimento dos grandes centros aconteceu, na maioria dos casos, de forma desordenada e sem planejamento. A crescente ocupação dos meios urbanos traz como consequência a diminuição de áreas verdes e o aumento das superfícies impermeabilizadas. Contribuindo desta forma, para um aumento significativo do escoamento superficial e uma diminuição dos tempos de pico dos hidrogramas locais.

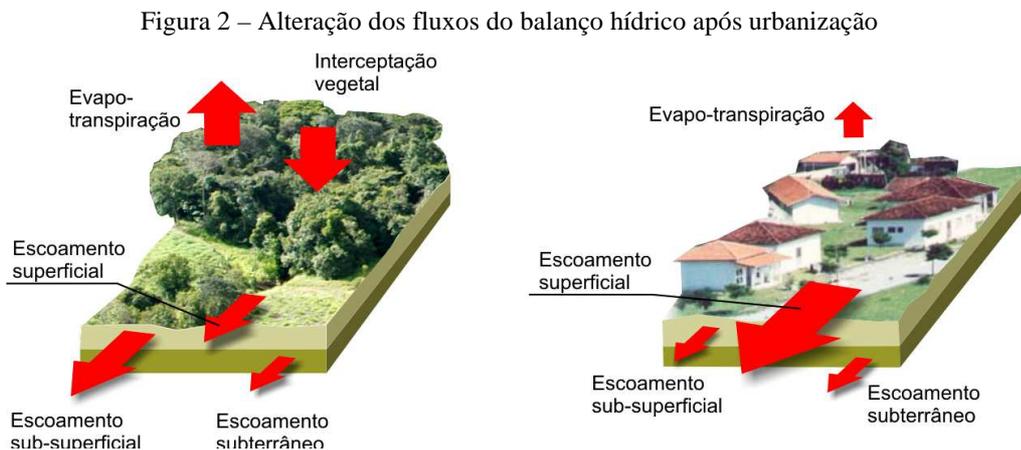
Righetto et al. (2009, p. 20) lembram que a expansão territorial, devido à urbanização, sem legislação e fiscalização efetiva quanto ao uso do solo e sua ocupação, acabam intensificando os problemas de alagamentos, principalmente pelo aumento do grau de impermeabilização da área de drenagem. Castro (2011, p. 1) enfatiza também que o crescimento das cidades provoca uma diminuição das áreas de coberturas vegetais, trazendo alterações ao ciclo hidrológico, principalmente nas quantidades envolvidas nos processos do mesmo (CASTRO, 2011, p. 1).

As alterações supracitadas acabam por afetar diretamente a ocorrência de alagamentos nestas áreas, trazendo prejuízos significativos para a população. Nos próximos itens são abordados os conceitos referentes a ciclo hidrológico, balanço hídrico, escoamento superficial e hidrograma, relacionando-os com os efeitos da urbanização.

### 3.1.1 Ciclo hidrológico e balanço hídrico

O ciclo hidrológico é o processo envolvendo a sucessão de fases que a água percorre ao passar pela atmosfera, sendo esse um processo global, enquanto o balanço hídrico é o resultado de entradas e saídas de água no interior de uma determinada região hidrológica, bem definida (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, c2002). A variação nos volumes dos processos do ciclo hidrológico demonstra claramente as alterações no balanço hídrico e as bacias urbanas sofrem essa alteração devido à impermeabilização e canalização do escoamento (TUCCI, 2007, p. 95).

Segundo Tucci (2007, p. 87), os fenômenos hidrológicos são processos naturais. A ocorrência de precipitação sobre uma superfície é passível de sofrer uma interceptação da vegetação existente, infiltrar ou evaporar de volta para a atmosfera. Essa parcela que infiltra no solo pode retornar para a superfície ou percolar, alimentando os aquíferos. O excedente na superfície, que se classifica como escoamento superficial, se direciona naturalmente para riachos e rios, chegando por consequência ao oceano. A substituição das áreas de infiltração por áreas impermeabilizadas provoca um aumento no escoamento superficial e, conseqüentemente, na ocorrência de alagamentos, conforme é apresentado na figura 2.



(fonte: TUCCI, 2007, p. 88)<sup>3</sup>

A recuperação do balanço hídrico natural, nos meios urbanos, busca uma melhoria nas condições de ocupação e a aproximação e convivência da população com as águas urbanas. A restauração das características hidrológicas nestas áreas traz benefícios na qualidade de vida,

<sup>3</sup> A figura 2 foi adaptada por Tucci (2007), a partir de Schueler (1987, p. 1.3): ambas as obras constam nas referências bibliográficas deste trabalho.

diminuindo os prejuízos decorrentes dos alagamentos, controlando doenças de veiculação hídrica e ocasionando a valorização econômica e social do meio ambiente urbano.

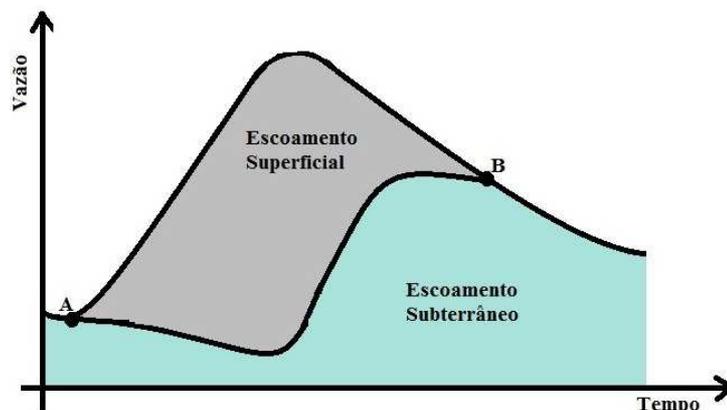
### 3.1.2 escoamento superficial e o hidrograma

O escoamento superficial acontece devido à ação da gravidade, levando a água que vence o atrito com a superfície do solo, de regiões mais altas para as mais baixas. São pequenos filetes de água que vão se moldando ao longo do relevo da região, e a presença de vegetação ao longo desse caminho percorrido pelo escoamento contribui para obstaculizar e aumentar a infiltração durante o percurso (SILVEIRA, 1993, p. 37).

Definindo hidrograma, Tucci (1993a, p. 391), descreve-o como “[...] a denominação dada ao gráfico que relaciona a vazão no tempo. A distribuição da vazão no tempo é resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico entre a ocorrência da precipitação e a vazão na bacia hidrográfica.”.

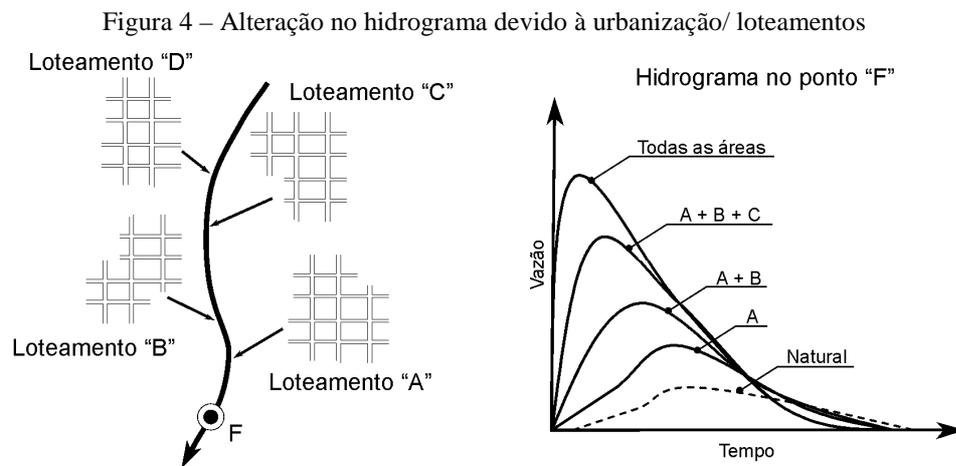
Tucci (1993a, p. 391-394) descreve que o escoamento superficial afeta o hidrograma principalmente durante a ascensão, período em que ocorre a elevação da vazão até o pico, refletindo o efeito da precipitação na bacia hidrográfica. Após atingir o máximo, observa-se a fase de recessão, quando se percebe um ponto de inflexão, caracterizado pelo fim do escoamento superficial e predomínio do escoamento subterrâneo ao longo da bacia. A figura 3 apresenta um hidrograma tipo, mostrando o ponto A, em que inicia o escoamento superficial, e o ponto B, ponto de inflexão da curva, no qual permanece apenas o escoamento subterrâneo, bem como a divisão desses escoamentos.

Figura 3 – Hidrograma tipo com separação de escoamento



(fonte: elaborada pelo autor)

A ocupação territorial urbana desordenada desencadeou uma série de problemas relacionados à drenagem, ocasionados tanto por eventos hidrológicos de alta intensidade como também pela alteração da cobertura da bacia, tornando-a menos permeável. Esta urbanização traz como consequência o aumento do escoamento superficial e dos picos dos hidrogramas, bem como a redução do tempo de ocorrência deste novo pico. A figura 4 apresenta os impactos causados pela ocupação urbana no hidrograma, sendo que, ao passo que a bacia é urbanizada, nota-se um aumento significativo no volume escoado total.



(fonte: TUCCI, 2007, p. 186)

### 3.2 MEDIDAS DE CONTROLE

Tradicionalmente as obras de Engenharia realizadas para resolver os problemas de alagamentos nos centros urbanos, visavam canalizar os escoamentos, buscando eliminar rapidamente os volumes de água. Estas medidas apenas transferiam os problemas para as regiões mais baixas, que acabavam sofrendo ainda mais com os alagamentos. Baptista et al. (2005, p. 22) lembram que os sistemas clássicos são constituídos de dispositivos de microdrenagem – bocas de lobo e condutos – que captam a água em áreas urbanas e destinam os efluentes até pontos de deságue – rios e córregos – ou até sistemas de macrodrenagem, como canais abertos e galerias.

Tucci (2007, p. 209) destaca que o uso de soluções tradicionais acaba gerando os seguintes impactos:

- a) transferindo para jusante o aumento do escoamento superficial com maior velocidade, já que o tempo de deslocamento é menor que nas condições pré-

existentes. Dessa forma, acaba provocando inundações nos troncos principais ou na macrodrenagem;

- b) erosão das margens e modificação da morfologia dos rios;
- c) deterioração da qualidade da água;
- d) alteração na ecologia.

Nas últimas décadas, houve uma grande expansão das regiões metropolitanas brasileiras e, com esse desenvolvimento, surgiu um novo paradigma no que concerne ao planejamento urbano. Este novo modelo demanda por um desenvolvimento sustentável tem produzido impacto relevante na concepção de projetos de sistemas de drenagem (RIGHETTO et al., 2009, p. 53-54). Ao longo destes anos, buscaram-se novas medidas que visavam modernizar o sistema de drenagem urbana, procurando minimizar os impactos nos balanços hídricos, aumentando assim, a aproximação com as características hidrológicas originais.

Durante o planejamento para a implantação das medidas de controle, deve-se buscar a integração com o sistema tradicional existente. Tucci (1993b, p. 626) enfatiza que o uso destas medidas inclui obras de engenharia e ações de cunho social, econômico e administrativo, em que se deve buscar uma combinação de diversas medidas diferentes para obter-se um eficiente planejamento de proteção contra inundações e seus efeitos.

Estas medidas podem ser classificadas de acordo com a sua natureza de implantação em estruturais e não estruturais. Podem, ainda, ser classificadas como medidas não convencionais, um conceito recente, que diferem dos tradicionais e cuja utilização não se encontra ainda disseminada (CANHOLI, c2005, p. 31). Estes tipos de medidas são detalhados nos próximos itens.

### **3.2.1 Medidas de controle estruturais**

As medidas estruturais são obras de Engenharia que visam à correção ou prevenção de novos problemas decorrentes de cheias e alteram a relação da precipitação com a vazão nos locais de sua implantação. Sobre essas medidas, Tucci (2007, p. 143-144) afirma que tendem a reduzir ou retardar os picos de cheias e controlar a erosão dentro da bacia, atuando principalmente sobre alagamentos mais frequentes, ou seja, as com tempos de retorno menores.

Righetto et al. (2009, p. 21, 37) relacionam estas medidas às obras de captação, armazenamento e transporte das águas pluviais e enfatizam que estas estruturas propiciam também a infiltração localizada, além de deter e transportar os escoamentos gerados na bacia. Citam como exemplo, as bacias de retenção, valas de infiltração, bacia de infiltração, pavimentos porosos e filtros orgânicos e de areia.

Ainda sobre as técnicas estruturais, Tucci (2007, p. 143-144) comenta que podem ser classificadas como extensivas ou intensivas, sendo as primeiras que agem na bacia e as segundas que agem nos rios. Considerando as afirmações de Baptista et al. (2005, p. 42), pode-se ainda classificar este tipo de medida pela sua forma de utilização: bacias, obras lineares ou pontuais.

### **3.2.2 Medidas de controle não estruturais**

As medidas não estruturais buscam reduzir os danos e consequências de inundações, não por meio de obras de Engenharia, mas sim por normas, regulamentos e programas de ocupação do solo e conscientização da população (CANHOLI, c2005, p. 25), sem alterar a relação da precipitação com a vazão apenas melhorando a convivência da população com as inundações. Este tipo de medida, quando utilizada em conjunto com as estruturais, ou até mesmo sem, acaba por minimizar significativamente os prejuízos decorrentes das inundações e alagamentos, com custos menores de implantação (TUCCI, 1993b, p. 629).

Righetto et al. (2009, p. 21) enfatizam que estas medidas alcançam seus objetivos de forma excelente, mas exigem esforços de conscientização popular, legislação, fiscalização e ocupação dos espaços urbanos em zonas de risco de inundação e alagamento. Os autores indicam ainda que as referidas ações visam otimizar o espaço urbano de forma a aumentar o bem estar da população, a qualidade de vida e a estética urbana.

### **3.2.3 Medidas de controle não convencionais**

Canholi (c2005, p. 31) compreende que dentre as medidas estruturais, podem-se utilizar soluções que diferem das tradicionais que empregam apenas canalização, associando estes sistemas e buscando uma adequação ou otimização. Estas soluções são classificadas como medidas não convencionais e, neste contexto, destacam-se as que visam melhorar o processo

de infiltração, retendo o escoamento em reservatórios ou retardando o fluxo nas calhas dos córregos ou rios.

As tecnologias alternativas às tradicionais consideram os impactos da urbanização de forma global, utilizando a bacia hidrográfica onde está localizada como unidade de estudo e buscando compensar os efeitos da urbanização. O uso destas técnicas possibilita a continuidade do desenvolvimento urbano sem gerar custos excessivos, combinando o sistema de drenagem com questões urbanísticas (BAPTISTA et al., 2005, p. 23-25).

A detenção destes escoamentos por meio de obras e dispositivos aplicados para favorecer a reservação, pode ser de contenção a jusante ou de contenção na fonte. Sua finalidade principal é reduzir os picos das cheias, amortecendo as ondas de cheia através do armazenamento de parte do volume escoado (CANHOLI, c2005, p. 35). Isso é detalhado a seguir.

#### 3.2.3.1 Contenção a jusante

Segundo Canholi (c2005, p. 37, 52-53), as medidas de contenção a jusante referem-se às obras para reservação a jusante das áreas que recebem precipitação, representados pelos reservatórios destinados a controlar os deflúvios provenientes das partes altas da bacia beneficiando, assim, as partes baixas. É comumente utilizado, no Brasil, em rios médios e grandes, principalmente no uso em obras de geração de energia elétrica, obtendo-se inclusive o amortecimento dos picos das enchentes. O autor ressalta ainda que o uso destas estruturas visa controlar, também, os escoamentos das bacias e sub-bacias de drenagem em áreas urbanas.

A utilização deste método pode ser considerada como um conceito multidisciplinar, tendo um aspecto paisagístico importante, na integração da drenagem urbana com projetos arquitetônicos e viabilização de uso social das áreas reservadas (CANHOLI, c2005, p. 54). Batista et al. (2005, p. 115-116) mostram que a implantação de sistemas de detenção teve uma intensificação de emprego nas principais áreas metropolitanas a partir dos anos 1990, utilizando inclusive no emprego de usos múltiplos, reservado ao amortecimento de cheias, mas que paralelamente podem ser utilizados em períodos de baixo escoamento como áreas de lazer, de desenvolvimento de fauna e flora e áreas destinadas à prática de atividades esportivas.

### 3.2.3.2 Contenção na fonte

As medidas de contenção na fonte aumentam o controle do escoamento pluvial, que normalmente é afastado para jusante bem como os riscos de alagamento do sistema. Araújo (1999, p. 4), afirma que estes métodos têm sido os mais modernos para minimizar as enchentes e que, através de seus dispositivos de infiltração e reservação, pode-se conseguir restaurar as condições de pré-desenvolvimento urbano, ou seja, as anteriores às modificações e interferências humanas.

Righetto et al. (2009, p. 28-29) afirmam que estes sistemas proporcionam melhor qualidade de vida à população diretamente afetada, reduzindo a um nível aceitável os riscos de inundação e ressaltam alguns aspectos que devem ser observados na implantação de sistemas de controle não convencionais de contenção na fonte:

- a) disponibilidade de espaço físico para implantação dos dispositivos, aspecto importante especialmente no caso de áreas densamente urbanizadas;
- b) definição dos dispositivos mais adequados em função dos tipos de poluentes presentes no escoamento, com a verificação continuada da eficiência de funcionamento;
- c) o comportamento do lençol freático na estação chuvosa – informação importante no caso de sistemas de infiltração; tem influência direta na capacidade de armazenamento;
- d) levantamento do perfil litológico do local; solos com alta capacidade de percolação são necessários ao funcionamento de sistemas de infiltração da água no solo;
- e) análise dos custos de implantação e manutenção da estrutura; considerar a disponibilidade de material no local, facilidade de manutenção, eficiência de remoção de poluentes; disponibilidade e treinamento de pessoal técnico.

Canholi (c2005, p. 37, 49-51) ainda classifica estas medidas de acordo com o tipo de implantação, utilizando as seguintes definições:

- a) disposição no local: estruturas, obras e dispositivos que facilitam a infiltração e percolação;
- b) controle de entrada: dispositivos que restringem a entrada na rede de drenagem, promovendo a reservação, podendo atuar como um retardador no fluxo ou como acumulador de água para posterior uso;
- c) detenção no local: pequenos reservatórios ou bacias, isolados, para armazenamento temporário.

A descrição detalhada é feita apenas para a contenção na fonte com disposição no local, que é a classificação do pavimento poroso estudado. Urbonas e Stahre (1993, p. 2, tradução nossa) definem a técnica de disposição no local como sendo “[...] o termo utilizado para definir as instalações de armazenamento que permitem a infiltração ou percolação das águas pluviais.”. E ainda enfatizam que o uso desta prática é eficiente para eventos de chuva de pequena magnitude.

As estruturas de controle na fonte, com disposição no local, buscam a utilização de sistemas de drenagem urbana mais sustentáveis e, conseqüentemente, a racionalização do balanço hídrico, tornando-o próximo ao original e melhorando assim a qualidade de vida e a preservação ambiental destas áreas (CASTRO, 2011, p. 12). Este sistema busca a infiltração das águas provenientes do escoamento superficial, diminuindo assim o seu fluxo para as galerias de drenagem. Além disso, aumenta a percolação, alimentando os lençóis freáticos destas regiões. Canholi (2005, p. 37-38) afirma que o uso destes dispositivos teve sua aplicação crescente nos últimos anos, principalmente por tratar do controle diretamente em lotes residenciais e áreas de circulação, e também pelo possível uso dessas águas reservadas durante a contenção.

Diversos tipos de sistemas têm sido adotados nos últimos anos e os principais são: superfícies de infiltração, valetas de infiltração, microrreservatórios, bacias de retenção e retenção e pavimentos permeáveis/ porosos. Neste trabalho são estudados os pavimentos porosos que são detalhados no próximo capítulo.

## 4 PAVIMENTOS POROSOS

Os pavimentos porosos são estruturas permeáveis e classificadas como medidas de controle estruturais, com contenção direta na fonte. São obras de Engenharia que minimizam o impacto da urbanização e da impermeabilização do solo e, agem diretamente na origem do contato da água resultante de precipitações com a superfície. Nos próximos itens, são detalhadas as características, vantagens, limitações, métodos de manutenção, viabilidade financeira, histórico de implantação e método utilizado para execução dos testes de infiltração.

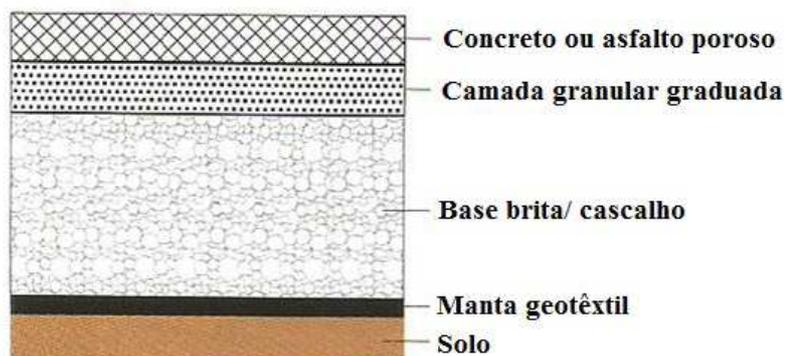
### 4.1 CARACTERÍSTICAS

Baptista et al. (2005, p. 218) definem que os pavimentos porosos podem ser de detenção ou de infiltração. Sendo, respectivamente, os que desempenham papel de reservatório temporário sem função de infiltração ou que desempenham o papel de reserva temporária e posterior infiltração das águas pluviais.

A implantação de pavimentos porosos é uma alternativa na qual o escoamento superficial, que ocorre nas áreas impermeabilizadas após a urbanização, é interceptado por poros drenantes. Esses poros facilitam a infiltração, através de uma superfície permeável, para um reservatório que está localizado abaixo da camada de pavimentação, para posterior infiltração na camada do subleito.

Canholi (c2005, p. 43-44) indica que os pavimentos porosos são constituídos da mesma forma que os pavimentos tradicionais dos quais são retirados os finos de sua composição, sendo construídos acima de camadas permeáveis, normalmente de bases granulares mal graduadas. Nas interfaces entre as camadas, devem ser colocadas mantas geotêxteis, de forma a evitar a passagem de finos e entupimento dos poros drenantes (colmatação). A figura 5 apresenta um corte típico deste tipo de estrutura.

Figura 5 – Seção típica de estrutura em asfalto poroso



(fonte: CANHOLI, c2005, p. 44)

## 4.2 VANTAGENS E LIMITAÇÕES

Há uma grande versatilidade de emprego deste tipo de estrutura, sendo destacado o uso em estacionamentos, praças, vias para pedestres, passeios e áreas externas de zonas comerciais e edifícios. As vantagens de uso de pavimentos porosos, são destacadas por Batista et al. (2005, p. 220-222), conforme segue:

- a) recarga de reservas subterrâneas de água;
- b) redução dos volumes de escoamento;
- c) textura e permeabilidade elevada, aumentando o contato entre os pneus e a superfície do pavimento, melhorando assim a aderência;
- d) redução do ruído relativo ao contato pneu-pavimento;
- e) melhoria na qualidade da água infiltrada ou lançada após infiltração.

Tucci (2007, p. 202) ainda ressalta que a implantação de pavimentos porosos causa uma redução dos condutos, dos custos do sistema de drenagem pluvial e da lâmina d'água, em áreas de estacionamentos e passeios, o que resulta em maior conforto aos transeuntes. Goldenfum et al. (c2010, p. 57), enfatizam ainda, sobre o mesmo ponto, que o uso desses pavimentos permeáveis em países em desenvolvimento deve ser limitado a caminhos e áreas de estacionamento de centros de compras, onde a manutenção pode ser assegurada mais facilmente, reduzindo assim, o risco de colmatação prematura da camada superficial.

Devem-se considerar algumas desvantagens da implantação deste tipo de estrutura, sendo a principal delas a possibilidade de contaminação do aquífero, além do aumento de custos com manutenções preventivas e corretivas (TUCCI, 2007, p. 202). Para a implementação das

estruturas de pavimentos porosos, é necessário observar algumas limitações durante o projeto e quando este é colocado em prática.

Castro (2011, p. 24) enfatiza que a escolha deste tipo de pavimento depende principalmente das condições do local onde será instalado, principalmente no que se refere às características geotécnicas do subleito e a profundidade do nível do lençol freático. Schueler (1987, p. 7.11-7.12) descreve algumas limitações que devem ser observadas na implantação deste tipo de pavimento:

- a) solos: não podem ser implantados em locais onde o subleito é formado por argilas e/ ou siltes e onde os solos tem baixa capacidade de infiltração;
- b) proximidade com reservatórios de água: nos pontos onde houver águas para consumo (potável), só pode ser implantado a, no mínimo, 30 metros para evitar que haja contaminação em caso da má qualidade da água infiltrada;
- c) profundidade do reservatório: devem ser dimensionados com material granular com baixa compactação, sendo que a totalidade da água deve ser completamente drenada em no máximo 72 horas. Ainda pode haver um aumento na profundidade da camada granular devido à baixa condição de infiltração do subleito;
- d) declividade: não é recomendado em locais onde a declividade é superior a 5%;
- e) profundidade do lençol freático: o maior nível do lençol deve estar entre 0,60 m e 1,2 m do fundo do reservatório;
- f) intensidade de tráfego: só pode ser implantado em lotes de estacionamento ou estradas de acesso, onde o tráfego é de predomínio de veículos leves.

### 4.3 MANUTENÇÃO

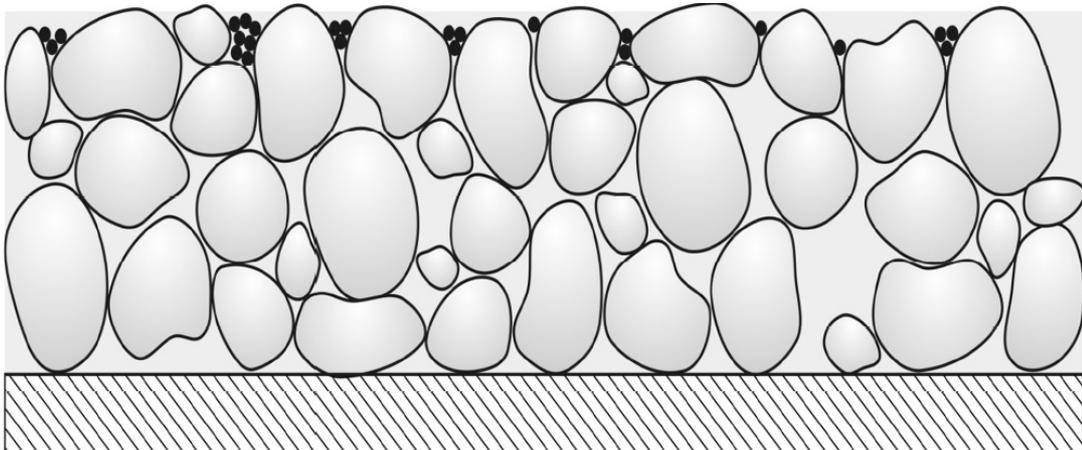
As manutenções devem ser efetivas para evitar principalmente a colmatação da estrutura, Baptista et al. (2005, p. 71) afirmam que esse fenômeno é causado pela deposição de partículas nos vazios da camada superior do meio poroso, conforme apresentado na figura 6. Consideram que a vida útil do pavimento está diretamente ligada a sua colmatação, podendo o sistema a longo prazo perder sua função inicial.

A efetividade na implantação de pavimentos porosos está diretamente ligada à manutenção preventiva ou corretiva. Schueler (1987, p. 7.21) classifica as manutenções como rotineira e não rotineira, conforme segue:

- a) manutenção rotineira, que é indicada para prevenir ou consertar problemas relativos à camada de asfalto poroso, podendo ser,

- limpeza a vácuo: deve-se limpar o pavimento no mínimo 04 (quatro) vezes ao ano, através de jatos de ar e seguidos por jatos de água de alta pressão, para manter os poros abertos;
  - inspeções: o pavimento deve ser inspecionado várias vezes nos primeiros meses após a implantação e posteriormente devem ser feitas inspeções anuais. Devem ser inspecionados também, após acontecimentos de chuvas de grande intensidade;
  - reparações: buracos e rachaduras devem ser consertados, com pavimentos convencionais (não porosos) desde que a área acumulada de reparos não ultrapasse 10% do total;
  - alívio do entupimento da superfície: os poros entupidos podem ser aliviados, executando-se furos de aproximadamente 1,27cm na superfície do pavimento. Em caso de entupimento em uma parte do lote, pode-se instalar tubos de passagem direcionados para o reservatório granular.
- b) manutenção não rotineira: um problema mais grave acontece quando ocorre o entupimento do subsolo ou do filtro que fica entre o reservatório e o subsolo. Nestes casos não existe outra opção se não a substituição completa da estrutura ainda podendo ser considerada a instalação de um sistema de drenagem na parte superior, tornando assim a estrutura em um sistema de infiltração parcial.

Figura 6 – Pavimento permeável com superfície colmatada



(fonte: CASTRO, 2011, p. 25)

#### 4.4 VIABILIDADE FINANCEIRA

Atualmente os custos de implantação de pavimentos permeáveis são similares aos de pavimentos tradicionais. O uso de pavimentos porosos diminui o volume de água a ser escoado no sistema de drenagem tradicional, reduzindo assim o diâmetro necessário nestas tubulações, podendo assim, se destacar como um projeto de viabilidade econômica atraente.

Schueler (1987, p. 7.14-7.15) destaca alguns custos extras que podem onerar este tipo de implantação:

- a) profundidade adicional no reservatório granular: a profundidade é determinada a partir do volume de chuva, do grau de drenagem da área e da taxa de infiltração do subleito, deve-se levar em conta o volume a ser escavado de solo e o preenchimento desta profundidade com material granular;
- b) filtros geotêxteis: o reservatório granular deve ser coberto totalmente por filtros geotêxteis, para evitar a entrada de partículas finas, o que pode resultar em uma quantidade grande de material, que pode levar a um alto custo;
- c) controle de sedimentos e erosão: deve-se conter os sedimentos no lado externo do pavimento, o que implica em construção de estruturas no perímetro da área e também na implantação de bacia de captação de sedimentos;

Batista et al. (2005, p. 224-225) destacam que nas estruturas porosas, além dos custos de limpeza e conservação comuns a qualquer pavimentação, ainda devem ser somadas as inspeções periódicas de limpeza, conforme especificadas anteriormente. Em casos de colmatação da estrutura, pode ser necessária a reconstrução do pavimento, aumentando significativamente estes custos.

Canholi (2005, p. 176-181) destaca ainda que o custo de riscos é útil para comparar as diversas soluções propostas com diferentes graus de atendimento, que no caso da drenagem urbana, estão diretamente ligadas ao período de retorno da precipitação do projeto. Alguns custos, porém, são considerados intangíveis, por ser difícil a sua quantificação de valor de mercado, como por exemplo, vidas humanas, saúde pública, meio ambiente e estresses causados tanto pelas inundações quanto pelas expectativas de futuras inundações. Assim como alguns benefícios que também não podem ser mensurados, como melhoria na qualidade de vida, continuidade de atividades comunitárias, valorização de imóveis, dentre vários outros aspectos.

O normal, em áreas nas quais há expectativa de ocorrência de inundações, é que se concentrem atividades menos nobres, nas quais a rentabilidade também é inferior, estabelecendo assim, áreas com menor valor no mercado imobiliário. A quantificação de todos estes custos e benefícios é de extrema dificuldade, mas não podem ser ignorados, pois não são menos importantes frente às demais despesas da implantação.

## 4.5 BREVE HISTÓRICO

No cenário mundial há relatos de estudos de pavimentos porosos a partir de 1970, principalmente na França, onde as empresas que faziam a manutenção e conservação perceberam que os revestimentos porosos apresentavam melhor segurança e conforto ao dirigir, para os usuários, frente aos pavimentos tradicionais. Por volta de 1977, iniciaram os estudos franceses com experimentos nesta área, com forte aumento após o lançamento de um Programa de Pesquisa pelo Ministério dos Equipamentos da França. Também podem ser encontrados estudos nos Estados Unidos, Japão e Suécia (AZZOUT et al., c1994, p. 65-67).

No Brasil, alguns trabalhos também têm sido desenvolvidos buscando o estudo desta técnica, estando concentrados principalmente na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). O trabalho apresentado por Araújo (1999) utilizou um simulador de chuva para parcelas com 1 m<sup>2</sup> de área para comparar valores de escoamento superficial em diferentes tipos de superfícies. Variando as taxas de permeabilidade e tipos de cobertura das superfícies, o autor verificou que durante a simulação de chuva em pavimentos permeáveis, praticamente não houve a ocorrência de escoamento superficial.

Em 2004, Acioli (2005) propõe em seu experimento a construção de um estacionamento de 264 m<sup>2</sup>, nas dependências do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, na UFRGS, dividido em duas partes com mesmas áreas, sendo uma parte de asfalto poroso e outra de revestimento de blocos vazados, preenchidos com grama e areia. O experimento foi instrumentado para monitoramento do balanço de massa, sendo medida a precipitação, as vazões do escoamento superficial e o armazenamento no reservatório sob o pavimento permeável. Também foram avaliados alguns parâmetros qualitativos da água de escoamento superficial e infiltrado. Os resultados obtidos foram satisfatórios, apresentando baixos valores de escoamento para as duas superfícies, e os armazenamentos máximos e tempos de esvaziamentos ficaram abaixo dos previstos, o que mostra o bom desempenho hidráulico dos pavimentos.

Entre 2008 e 2011, Castro (2011) efetuou novas medidas quali-quantitativas nos pavimentos implantados, no IPH da UFRGS, e verificou que o pavimento de blocos vazados continuava fazendo o controle adequado de volume escoado superficialmente, enquanto que a capacidade de infiltração da camada de asfalto poroso já estava com grande comprometimento, sugerindo assim, uma análise mais profunda das camadas da estrutura de pavimento poroso.

Em 2012, verificou-se que os equipamentos de monitoramento não apresentavam condições de uso e foi proposto que os testes de infiltração fossem feitos pelos métodos determinados pela norma americana ASTM C1701 e pelo infiltrômetro de anel duplo, determinando assim a máxima capacidade de infiltração dos pavimentos em pontos diversos, além de testes destrutivos para verificação das camadas que compõem a estrutura de pavimento poroso e as condições da manta geotêxtil. Desta forma foi possível realizar estes testes, independente da ocorrência de eventos de chuva, o que não era possível com o uso das instrumentações. Foi verificado então, que a manta geotêxtil e as camadas de brita se encontram em boas condições e que a superfície de asfalto poroso encontra-se colmatada. Ainda no estudo supracitado, os testes feitos a partir da norma americana apresentaram maior praticidade e menores vazamentos pelas bordas inferiores dos cilindros e, ainda, a autor propõem que seja efetuada limpeza da camada superior do pavimento poroso e novos testes de infiltração, na tentativa de melhorar a capacidade da mesma (trabalho não publicado)<sup>4</sup>.

A continuidade da pesquisa no experimento supracitado se deu durante a execução deste trabalho, fazendo uso da normatização americana C1701 que foi utilizada durante os estudos de 2012 – que apresentou melhor rendimento perante os demais testes de mesma similaridade – conforme relatado anteriormente, a mesma é detalhada no próximo item.

#### 4.6 TESTE DE INFILTRAÇÃO

Conforme relatado anteriormente, na última verificação no experimento do estacionamento de veículos leves do IPH/ UFRGS, utilizou-se o teste de infiltração em estruturas de concreto permeável de acordo com a norma americana ASTM C1701. Este teste apresentou melhores condições comparadas a procedimentos semelhantes e foi o utilizado durante o desenvolvimento deste trabalho.

A norma C1701 aborda o procedimento de campo que determina a taxa de infiltração de água em superfícies de concreto permeável, e ressalta também que os resultados obtidos neste teste, devem ser analisados independentemente, por tratar de pontos específicos localizados em um ambiente com pavimento permeável. Esses resultados podem ser utilizados durante um determinado período a título de comparação de valores de taxa de infiltração ou para

---

<sup>4</sup> Informação obtida no Relatório Final de Pós-Doutorado, que foi elaborado no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por Andrea Sartori Jabur, sob supervisão de André Luiz Lopes da Silveira, finalizado em janeiro de 2013.

verificação de necessidade de manutenção (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009, p. 1).

A *American Society for Testing and Materials* (2009, p. 1-2) determina que para determinação da taxa de infiltração de um pavimento permeável como um todo, deve ser feita a média dos resultados obtidos em diversos locais distintos. Ainda sobre este assunto, determina que para locais com área de até 2.500 m<sup>2</sup> devem ser realizados três testes, com distâncias mínimas de 1 m entre os mesmos.

O ensaio consiste em um anel de infiltração que é temporariamente selado à superfície de um pavimento permeável. Depois de pré-umedecimento do local de ensaio, uma determinada massa de água é introduzida no anel e o tempo para a água infiltrar no pavimento é registrado (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009, p. 1).

Para a realização dos testes, a *American Society for Testing and Materials* (2009, p. 1-2) determina que sejam utilizados os seguintes equipamentos:

- a) anel cilíndrico, aberto em ambas as extremidades, que deve ser estanque à superfície a ser analisada, com diâmetro de 300 mm e altura mínima de 50 mm, internamente o anel deve ser demarcado para controle da lâmina d'água que deve ser mantida durante a execução do teste;
- b) reservatório de água, tendo um volume mínimo de 20 L, a partir do qual a água pode ser facilmente vertida a uma taxa controlada ao anel cilíndrico;
- c) cronômetro, com discretização mínima do tempo de 1 s.

O local onde os testes são realizados deve estar com um período mínimo de 24 horas da última precipitação registrada, devendo ainda ser limpo, sob a forma de varrição para retirada de detritos não assentados na superfície. A superfície inferior do anel cilíndrico deve ser vedada com material que possibilite a impermeabilização da ligação anel-pavimento para que seja garantida vedação estanque aferindo a qualidade dos dados (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009, p. 2).

Após a limpeza da superfície e fixação do anel cilíndrico, deve-se colocar, 3,6 L de água sob a forma de lâmina d'água no interior do cilindro, mantendo-se uma carga hidráulica entre 10 e 15 mm, e cronometrar o tempo total de infiltração. Esta etapa, conhecida como pré-molhagem, determina a quantidade de água total que deve ser utilizada durante o ensaio. Caso o tempo de pré-molhagem seja inferior a 30 s, utiliza-se 18 L de água, e em caso de superior,

utiliza-se novamente 3,6 L (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009, p. 1).

Após a etapa de pré-umedecimento, com um intervalo máximo de 2 minutos entre as etapas, a *American Society for Testing and Materials* (2009, p. 2) determina que seja executado o procedimento de ensaio, que é similar ao período de pré-molhagem, sendo importante manter a lâmina d'água entre 10 e 15 mm durante toda a execução do teste. O coeficiente de infiltração do pavimento é determinado através da fórmula 1:

$$I = \frac{K.M}{(D^2.t)} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

I = taxa de infiltração (mm/h);

K = 4.583.666.000 (Sistema Internacional) (para converter as unidades);

M = massa de água infiltrada (kg);

D = diâmetro interno do anel cilíndrico (mm);

t = tempo de infiltração (s).

## 5 DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DO EXPERIMENTO

A pesquisa aplicada consiste no estudo de um dispositivo experimental de medida de controle estrutural de controle direto na fonte localizado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A composição do experimento é um módulo experimental de pavimento permeável com a camada superior composta por asfalto poroso. Os materiais utilizados e os métodos considerados são apresentados nos próximos itens.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento consiste em um estacionamento de veículos leves, localizado IPH/ UFRGS, conforme figura 7. A área total de implantação da estrutura é de 132 m<sup>2</sup>, com capacidade para oito automóveis.

Figura 7 – Localização do experimento

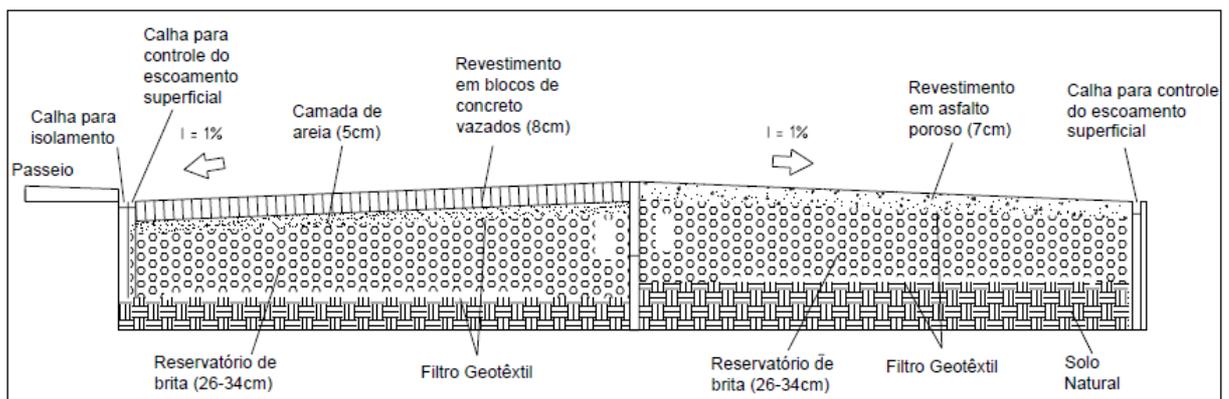


(fonte: ACIOLI, 2005, p. 40)

Segundo Acioli (2005), o módulo experimental iniciou em abril de 2003 e teve seu término em fevereiro de 2004, utilizando para sua camada superior asfalto poroso pré-misturado a frio, com espessura de 7 cm. A camada de reservação, de material granular composto por brita basáltica, tem altura variando entre 26 cm e 34 cm e granulometria uniforme visando uma maior porosidade ao material. Na interface entre as camadas foi utilizado material do tipo filtro geotêxtil para evitar a migração de material fino entre as camadas.

Ainda sobre a instalação do experimento, Acioli (2005) enfatiza que a área de contribuição de escoamento superficial foi isolada. Foram implantadas calhas nas partes mais baixas do estacionamento e na cobertura da passarela adjacente impedindo assim, a contribuição de água no experimento e, indicando, que a entrada de água é proveniente apenas da chuva incidente sobre o pavimento. Estas características aparecem na seção transversal apresentada na figura 8.

Figura 8 – Seção transversal da estrutura



(fonte: ACIOLI, 2005, p. 40)

## 5.2 MANUTENÇÃO CORRETIVA

A manutenção corretiva adotada na pesquisa consistiu na utilização dos métodos tradicionais de manutenção preventiva indicada para este tipo de estrutura, sendo: jato de ar, jato de água de alta pressão e varrição. Os procedimentos foram divididos em duas etapas distintas, sendo a primeira de limpeza com jato de ar e a segunda etapa de limpeza através de jato de água de alta pressão e posterior varrição.

A primeira etapa foi realizada no dia 6 de maio de 2013, às 13 horas e contou com o auxílio de um funcionário da UFRGS que realizou a manutenção através da utilização de um

soprador de ar da marca Stihl, modelo BR 420, que tem potência de 2,6 kW, velocidade máxima do ar de 78 m/s e volume de ar de 1.260 m<sup>3</sup>/h (figura 9). A duração desta atividade de manutenção foi de aproximadamente 45 minutos e teve seu término às 13h45min.

Figura 9 – Primeira etapa da manutenção



(fonte: foto do autor)

A segunda etapa foi realizada no dia 7 de maio de 2013, às 9 horas e contou com o auxílio do mesmo funcionário da UFRGS da primeira etapa que realizou a manutenção através da utilização de jato de água de alta pressão da marca *Kärcher*, modelo HD 585S, que tem potência de 1,7 kW e vazão de 400 L/h (figura 10). A duração desta atividade de manutenção foi de aproximadamente 60 minutos e teve seu término às 10 horas. A varrição foi feita com o uso de escova de lavar doméstica com cerdas de polipropileno somente nos locais dos testes de infiltração, pouco antes da realização dos mesmos.

Figura 10 – Segunda etapa da manutenção



(fonte: foto do autor)

### 5.3 TESTE DE INFILTRAÇÃO

Os testes de infiltração foram executados conforme as recomendações da norma americana ASTM C1701 – *Standard Test Methods for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete* (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009). Para a realização dos testes foram utilizados os seguintes materiais e ferramentas: cilindro aberto em ambas as extremidades com 300 mm de diâmetro interno, reservatório de água com capacidade total de 20 L, recipiente plástico de material transparente graduado com capacidade de 1 L, escova com cerdas de polipropileno, massa de calafetar, cronômetro e água.

A primeira etapa realizada foi de limpeza do pavimento utilizando escova com cerdas de polipropileno para a retirada dos sedimentos e sujeiras depositadas no pavimento. Após esta limpeza, aplicou-se a massa de calafetar na superfície inferior do cilindro (primeira etapa da figura 11) e sendo este pressionado na superfície do pavimento, para que a massa se moldasse nas imperfeições presentes na camada do pavimento. Ainda foi aplicada massa, nos bordos internos e externos, além daquela já colocada no cilindro, para obter uma vedação completa e evitando vazamentos laterais, conforme apresentado na segunda etapa da figura 11.

Figura 11 – Sequência de atividades – teste de infiltração



(fonte: fotos do autor)

Após a instalação do cilindro, foi realizada uma pré-molhagem, conforme estabelecido na Norma e descrito no item 4.6 deste trabalho e apresentado na terceira etapa da figura 11. O tempo de infiltração, medido por um cronômetro, era iniciado assim que a água atingia a superfície do pavimento permeável e finalizado quando não houvesse mais água na superfície.

O teste oficial foi realizado considerando o tempo da etapa de pré-molhagem para determinação da carga hidráulica necessária, sempre mantendo uma lâmina d'água entre 10 e 15 mm durante toda a execução dos testes. Foi realizado um total de seis testes de infiltração, localizados sob as vagas de numeração 1, 5 e 8, sendo três testes após a primeira etapa da manutenção e os três testes restantes após a segunda etapa.

#### 5.4 DADOS DE ESTUDOS ANTERIORES E BIBLIOGRAFIA

Os dados a serem analisados foram obtidos anteriormente à manutenção efetuada no pavimento, a partir de testes realizados no ano de 2012 (trabalho não publicado<sup>5</sup>), quando foi utilizado o mesmo procedimento para os testes de infiltração. Para título de comparação com valores obtidos na bibliografia, foram utilizados os coeficientes de permeabilidade dos solos apresentados na tabela 1, na qual se considera que o pavimento permeável deve ter permeabilidade similar de uma areia, com permeabilidade alta, para garantir um bom fluxo de água entre seus poros, desta forma, considera-se como  $10^{-5}$  m/s o coeficiente de permeabilidade mínimo (MARCHIONI et al., 2013, p. 4).

Tabela 1 – Coeficientes de permeabilidade

	Grau de permeabilidade	Tipos de solos	Coeficiente de permeabilidade (m/s)
Solos permeáveis	Alta	Pedregulhos	$> 10^{-3}$
	Alta	Areias	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
	Baixa	Siltes e Argilas	$10^{-5}$ a $10^{-7}$
Solos impermeáveis	Muito baixa	Argilas	$10^{-7}$ a $10^{-9}$
	Baixíssima	Argilas	$< 10^{-9}$

(fonte: ORTIGÃO, c1995, p. 92)

<sup>5</sup> Informação obtida no Relatório Final de Pós-Doutorado, que foi elaborado no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por Andrea Sartori Jabur, sob supervisão de André Luiz Lopes da Silveira, finalizado em janeiro de 2013.

Para analisar e comparar o módulo experimental com as suas condições de projeto, utilizou-se os dados de implantação para cálculo de capacidade de infiltração da camada superior da estrutura. Para a determinação da precipitação máxima pontual suportada pela camada superior da estrutura de pavimento poroso, utilizou-se a curva IDF (intensidade - duração - frequência), que representa o posto IPH (fórmula 2) (DEPARTAMENTO DE ESGOTOS PLUVIAIS, 2005).

$$i_{m\acute{a}x} = \frac{509,859 \times Tr^{0,196}}{(td + 10)^{0,72}} \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

$i_{m\acute{a}x}$  = intensidade máxima da chuva (mm/h);

Tr = período de retorno do projeto (anos);

td = tempo de duração da chuva (minutos).

Ainda considerou-se que o tempo de duração da chuva é igual ao tempo de concentração da bacia contribuinte, que no caso do experimento supracitado é somente o tempo de concentração do próprio pavimento visto que ele foi isolado de contribuições externas. Sua duração pode ser calculada a partir da equação de Kirpich (fórmula 3), visto que não há grandes declividades ao longo do experimento, sua área é menor que 0,5 km<sup>2</sup> e o valor de L é inferior a 10 km (DEPARTAMENTO DE ESGOTOS PLUVIAIS, 2005).

$$tc = 0,01947 \frac{L^{0,77}}{I_m^{0,385}} \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

tc = tempo de concentração (minutos);

L = comprimento da rede contribuinte (metros);

$I_m$  = declividade média (m/m).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram feitas duas análises separadas do experimento, a primeira do pavimento como um todo, utilizando-se a média dos valores encontrados. A segunda análise foi feita individualmente em cada uma das vagas em que foram efetuadas as manutenções e testes de infiltração. Os resultados e análises são apresentados nos próximos itens.

### 6.1 ANÁLISE GERAL DO PAVIMENTO

Os resultados obtidos no estudo anterior, bem como os obtidos nos testes após as manutenções supracitadas são apresentados na tabela 2. As comparações com a bibliografia e com o projeto são feitas na sequência.

Tabela 2 – Dados dos testes de infiltração

Localização	Data	Tempo i	Tempo f	Tempo f (s)	I (m/s)	I (mm/h)	I médio (mm/h)
Anterior à manutenção (estudo anterior)							
Vaga 01	24/10/2012	46min 34s	1h 35min 20s	5720	$8,90E^{-06}$	32,054	
Vaga 05	24/10/2012	22min 37s	37min 24s	2244	$2,27E^{-05}$	81,705	61
Vaga 08	06/11/2012	28min 25s	44min 10s	2650	$1,92E^{-05}$	69,187	
Após primeira etapa - Jato de Ar (presente estudo)							
Vaga 01	06/05/2013	DESCARTADO POR VAZAMENTOS LATERAIS					
Vaga 05	06/05/2013	25min 40s	49min 46s	2986	$1,71E^{-05}$	61,402	90
Vaga 08	06/05/2013	18min 38s	25min 40s	1540	$3,31E^{-05}$	119,05	
Após segunda etapa - Jato de Água (presente estudo)							
Vaga 01	01/10/2013	33min 39s	46min 55s	2815	$1,81E^{-05}$	65,132	
Vaga 05	13/05/2013	14min 27s	14min 34s	874	$5,83E^{-05}$	209,77	189
Vaga 08	13/05/2013	13min 17s	10min 30s	630	$8,08E^{-05}$	291,02	

(fonte: elaborada pelo autor<sup>6</sup>)

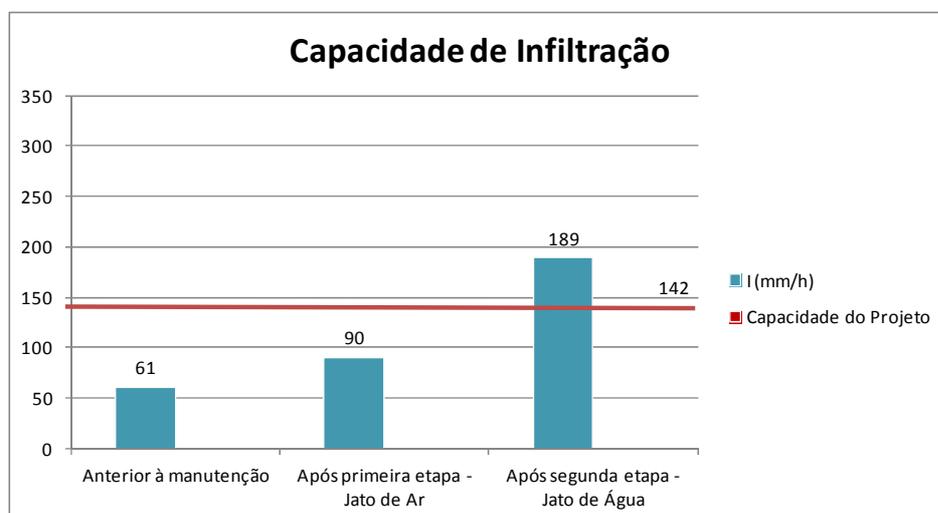
<sup>6</sup> Os dados anteriores à manutenção foram obtidos no Relatório Final de Pós-Doutorado, que foi elaborado no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFRGS, por Andrea Sartori Jabur, sob supervisão de André Luiz Lopes da Silveira, finalizado em janeiro de 2013.

A partir dos testes efetuados e da análise dos dados, percebe-se um aumento na capacidade de infiltração do pavimento de asfalto poroso. Antes da manutenção os dados indicavam uma capacidade de infiltração média de 61 mm/h; após a primeira etapa de manutenção (jato de ar), o valor médio dessa capacidade foi estimado como 90mm/h e, a capacidade atual média, após a limpeza com jato de água, ficou em 189 mm/h.

Buscou-se então o cálculo do valor mínimo aceitável da capacidade de infiltração da camada superior do pavimento, de acordo com as diretrizes do projeto, para que esta não seja um limitante na estrutura. O tempo de concentração estimado a partir da equação de Kirpich foi de 33 segundos, mas adotou-se um valor mais conservador, igual a 60 segundos, valor inclusive embasado ainda pelo fato de que este valor está na faixa limite de utilização das curvas IDF, e que mesmo assim deve estar na região de extrapolação já que raramente tem-se dados com discretização de 1 minuto.

Utilizando-se este valor de duração, e o Tr de projeto igual a 10 anos, calculou-se, a partir da equação IDF do posto IPH, uma intensidade máxima de chuva de 142 mm/h. Para que a camada superior não seja um limitante para toda a estrutura, sua capacidade de infiltração não pode ser inferior a este valor de 142 mm/h. Este resultado somente foi superado após a segunda etapa da limpeza (jato de água). A figura 12 apresenta uma comparação desses valores. Frente à bibliografia, o pavimento obteve um coeficiente de permeabilidade na ordem de  $7 \times 10^{-5}$  m/s, o que permite classificá-lo como pavimento permeável, visto que superou o valor de  $10^{-5}$ , indicado para esta classificação.

Figura 12 – Capacidade de infiltração do pavimento poroso

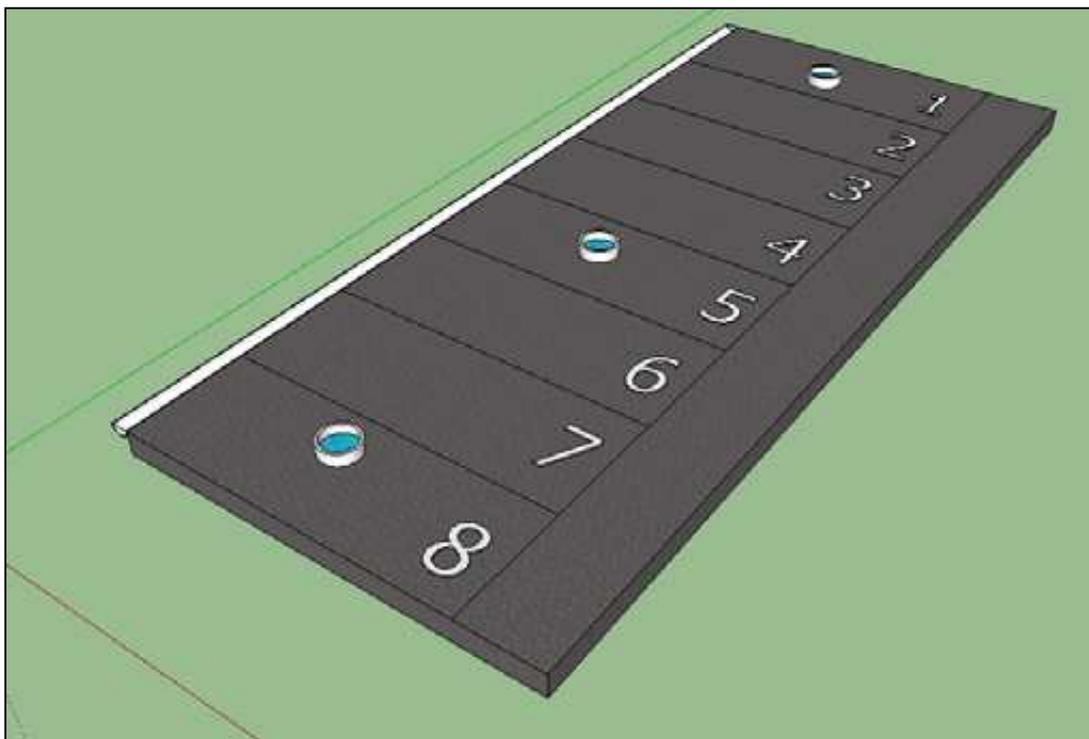


(fonte: elaborada pelo autor)

## 6.2 ANÁLISE INDIVIDUAL (POR VAGA)

A segunda etapa da análise foi a comparação dos resultados realizada por vaga, sendo as vagas 1, 5 e 8, apresentadas na figura 13, as que foram utilizadas para os testes de infiltração. Os resultados são apresentados na sequência.

Figura 13 – Localização das vagas



(fonte: trabalho não publicado<sup>7</sup>)

Para a vaga 1, foram realizadas inspeções visuais antes da manutenção e após cada etapa de manutenção, bem como testes de infiltração em cada uma das etapas. A inspeção visual demonstrou que a vaga 1 é a que mais acumula material granular e fino sobre o pavimento e onde se identifica com facilidade os pontos de maior colmatação em toda a área do pavimento, o que foi confirmado com os resultados dos testes de infiltração.

O teste de infiltração feito após a limpeza com jato de ar precisou ser descartado pelo excesso de vazamento pelo bordo inferior do cilindro. O teste após a segunda etapa da limpeza (jato de água), em sua primeira tentativa, no dia 13 de maio de 2013, também precisou ser descartado

<sup>7</sup> Imagem obtida no Relatório Final de Pós-Doutorado, que foi elaborado no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por Andrea Sartori Jabur, sob supervisão de André Luiz Lopes da Silveira, finalizado em janeiro de 2013.

por vazamentos laterais. Foi realizada nova tentativa de teste, no dia 1 de outubro de 2013, quando se colocou uma camada extra de massa de calafetar para garantir a estanqueidade do experimento e assim foi possível efetuar o estudo de forma adequada. Depois de realizada as duas etapas de manutenção, a vaga 1 apresentou valor abaixo do coeficiente esperado de projeto mas, comparado à bibliografia, pode-se classificá-lo neste ponto como pavimento permeável por atingir valores superiores a  $10^{-5}$  m/s. Os resultados dos testes são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Testes de infiltração – vaga 1

Etapa	Data	Tempo i	Tempo f	Tempo f (s)	I (mm/h)	I (m/s)
Anterior (estudo anterior)	24/10/2012	46min 34s	1h 35min 20s	5720	32,054	$8,90 \times 10^{-06}$
Após 1ª etapa (presente estudo)	06/05/2013	DESCARTADO POR VAZAMENTOS LATERAIS				
Após 2ª etapa (presente estudo)	01/10/2013	33min 39s	46min 55s	2815	65,132	$1,81 \times 10^{-05}$

(fonte: elaborada pelo autor<sup>8</sup>)

Na vaga 5, também foram realizadas inspeções visuais antes da manutenção e após cada etapa de manutenção, bem como testes de infiltração em cada uma das etapas. A inspeção visual demonstrou que as colmatações eram verificadas em quatro pontos específicos que coincidiam com a localização das rodas dos veículos quando estacionados, os testes foram feitos entre estes locais.

O teste de infiltração feito após a limpeza com jato de ar, bem como após a limpeza com jato de água foram considerados de boas condições e resultados visto que os vazamentos não foram de grandes proporções. Os valores dos testes são apresentados na tabela 4.

O resultado obtido no teste de infiltração, depois de realizada as duas etapas de manutenção, apresentou valor acima do coeficiente esperado de projeto e ainda, comparado à bibliografia, atingiu valores superiores a  $10^{-5}$  m/s, classificando-se assim como pavimento permeável. Neste caso específico acredita-se que o decréscimo apresentado entre a etapa anterior à

<sup>8</sup> Os dados anteriores à manutenção foram obtidos no Relatório Final de Pós-Doutorado, que foi elaborado no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por Andrea Sartori Jabur, sob supervisão de André Luiz Lopes da Silveira, finalizado em janeiro de 2013.

manutenção e após a primeira etapa se deve pela incompatibilidade de localização dos testes, que, apesar de estarem localizados na mesma vaga, apresentaram valores bem distintos, demonstrando assim a alta variabilidade espacial que se têm neste tipo de estrutura.

Tabela 4 – Testes de infiltração – vaga 5

Etapa	Data	Tempo i	Tempo f	Tempo f (s)	I (mm/h)	I (m/s)
Anterior (estudo anterior)	24/10/2012	22min 37s	37min 24s	2244	81,705	$2,27 \times 10^{-05}$
Após 1ª etapa (presente estudo)	06/05/2013	25min 40s	49min 46s	2986	61,402	$1,71 \times 10^{-05}$
Após 2ª etapa (presente estudo)	13/05/2013	13min 17s	10min 30s	630	291,02	$8,08 \times 10^{-05}$

(fonte: elaborada pelo autor<sup>9</sup>)

Na vaga 8, como nos outros casos, foram realizadas inspeções visuais antes da manutenção e após cada etapa de manutenção, bem como testes de infiltração em cada uma das etapas. A inspeção visual demonstrou que as colmatações eram verificadas em quatro pontos específicos, semelhantes aos da vaga 5. O teste de infiltração feito após a limpeza com jato de ar, bem como após a limpeza com jato de água foram considerados de boas condições. Os valores dos testes são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Testes de infiltração – vaga 8

Etapa	Data	Tempo i	Tempo f	Tempo f (s)	I (mm/h)	I (m/s)
Anterior (estudo anterior)	06/11/2012	28min 25s	44min 10s	2650	69,187	$1,92 \times 10^{-05}$
Após 1ª etapa (presente estudo)	06/05/2013	18min 38s	25min 40s	1540	119,05	$3,31 \times 10^{-05}$
Após 2ª etapa (presente estudo)	13/05/2013	13min 17s	10min 30s	630	291,02	$8,08 \times 10^{-05}$

(fonte: elaborada pelo autor<sup>10</sup>)

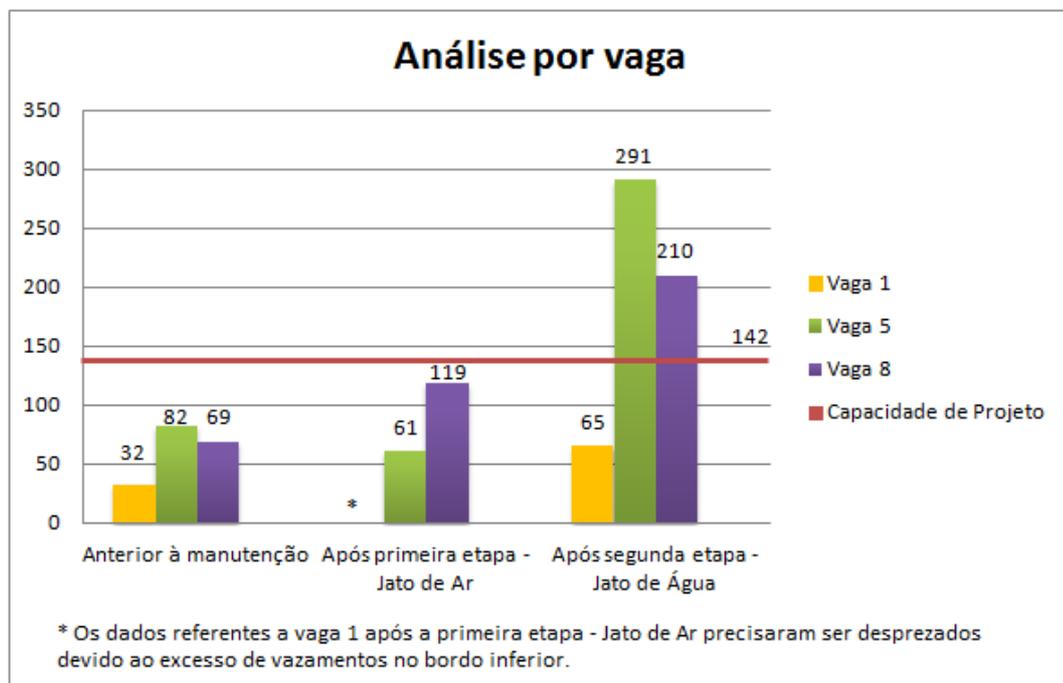
<sup>9</sup> Os dados anteriores à manutenção foram obtidos no Relatório Final de Pós-Doutorado, que foi elaborado no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por Andrea Sartori Jabur, sob supervisão de André Luiz Lopes da Silveira, finalizado em janeiro de 2013.

<sup>10</sup> idem

O estudo na vaga 8 demonstrou, na inspeção visual, colmatação em pontos específicos (abaixo dos pneus dos veículos quando estacionados), sendo esta a vaga na qual se verificou os pontos com menor acúmulo de material fino. O resultado obtido no teste de infiltração, depois de realizada as duas etapas de manutenção, apresentou valor acima do coeficiente esperado de projeto sendo que, comparado à bibliografia, pode-se classificá-lo como pavimento permeável por atingir valores superiores a  $10^{-5}$  m/s.

Percebeu-se uma grande heterogeneidade quanto aos resultados dos testes ao longo de todo o pavimento, durante todas as etapas analisadas, apresentando variabilidade elevada nos resultados, que é apresentada na figura 14. Com isso, pode-se considerar que o uso da média dos valores encontrados é o que nos remete a uma melhor análise, podendo-se assim considerar este valor como o mais próximo com a realidade do pavimento como um todo. Desta forma, os testes devem ser feitos em pontos bem distintos do pavimento, considerando-se as extremidades e o meio como locais indicados, por apresentarem características bem distintas quanto ao acúmulo de material e colmatação da estrutura.

Figura 14 – Análise individual dos testes



(fonte: elaborada pelo autor)

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os pavimentos porosos são estruturas destinadas a contribuir para a diminuição do escoamento superficial nas áreas urbanizadas e melhorar a convivência do homem com os alagamentos, diminuindo sua probabilidade de ocorrência devido à sua capacidade de infiltração. O presente estudo buscou analisar um pavimento com estrutura em asfalto poroso, construído a mais de 10 anos, onde não haviam sido feitas as manutenções preventivas conforme previsto nas bibliografias que tratam do assunto. As manutenções não foram efetuadas propositalmente para que se pudesse chegar numa maior proximidade brasileira, que é de não realizar este tipo de procedimento.

Foram efetuados testes de infiltração, de acordo com a norma americana ASTM C1701, para avaliar a capacidade de infiltração da camada superior do pavimento. Esses testes foram efetuados de forma satisfatória. Deve-se apenas atentar para a completa vedação do bordo inferior do cilindro, para garantir que a água utilizada no teste infiltre totalmente no pavimento e não escoe superficialmente. A massa de calafetar apresentou bom desempenho como material de vedação.

Os resultados dos ensaios indicaram que os valores médios de capacidade de infiltração do revestimento poroso evoluíram de 61 mm/h (condição anterior à manutenção, quando o revestimento se encontrava colmatado) para 189 mm/h (após a manutenção). Esses resultados mostram que, com o uso de técnicas simples de manutenção, conseguiu-se recuperar as condições de funcionamento de um pavimento permeável que apresentava seu revestimento comprometido por colmatção, no início do presente estudo. Ainda pode-se considerar que a inspeção visual, demonstra coerência com os resultados obtidos nos testes. Os valores encontrados permitem que a estrutura seja assim classificada como pavimento permeável e que sua camada superior não seja um limitante quanto a sua capacidade de suprir a demanda, evitando assim a geração de escoamento superficial, de acordo com a chuva considerada em projeto.

Apesar de conseguir atingir valores aceitáveis quanto à capacidade de infiltração do pavimento, considera-se que, devido ao baixo custo para a realização da manutenção preventiva, idealmente deveriam fazê-la em conformidade com a bibliografia especializada,

para assim garantir que a camada superior não seja um limitante, diminuindo a capacidade de infiltração da estrutura como um todo, e assim assegurar um funcionamento adequado da estrutura durante todo decorrer de sua vida útil.

Sugere-se, ainda, que seja dada continuidade a pesquisa neste pavimento, fazendo-se testes de infiltração após grandes eventos de precipitação e inicialmente numa janela de tempo de 4 meses. Utilizando-se estes dados, deve-se avaliar o tempo efetivo de qualidade da manutenção, buscando sempre manter a capacidade acima de 142 mm/h, que é a capacidade de projeto para a camada superior, podendo assim prever a periodicidade necessária para a realização de novas manutenções.

## REFERÊNCIAS

- ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle de escoamento superficial na fonte**. 2005. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/5843>><sup>11</sup>. Acesso em: 10 abr. 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Glossário de termos hidrológicos**. Brasília, DF, c2002. Programa Computacional. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/gestaorechidricos/tecnologiacapacitacao/docs/Glossario/Instalar/GHT.EXE>>. Acesso em: 14 jun. 13.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1701**: standard test methods for infiltration rate of in place pervious concrete. West Conshohocken, PA, USA, 2009.
- ARAÚJO, P. R. de. **Análise experimental da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial**. 1999. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.; CRES, F. N.; ALFAKIH, E. **Techniques alternatives en assainissement pluvial**: choix, conception, réalisation et entretien. Paris: Lavoisier - Tec & Doc, c1994.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2005.
- CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 1. ed. (1. reimpres.) São Paulo: Oficina de Textos, c2005 (reimpr. 2009).
- CASTRO, A. S. **Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle qualitativo do escoamento superficial urbano**. 2011. 142 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/55975>><sup>12</sup>. Acesso em: 10 abr. 2013.
- DEPARTAMENTO DE ESGOTOS PLUVIAIS (Porto Alegre). **Caderno de encargos**. Porto Alegre, 2005. CE-DEP/2005. Disponível em: <[http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu\\_doc/ce-dep-2005\\_1.pdf](http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu_doc/ce-dep-2005_1.pdf)>. Acesso em: 20 out. 2013.

---

<sup>11</sup> estando no site <<http://hdl.handle.net/10183/5843>>, localize na parte final da página a indicação <visualizar/abrir>: selecione para abrir o documento.

<sup>12</sup> estando no site <<http://hdl.handle.net/10183/55975>>, localize na parte final da página a indicação <visualizar/abrir>: selecione para abrir o documento.

GOLDENFUM, J. A.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. Stormwater management in the humid tropics. In: PARKINSON, J. N.; GOLDENFUM, J. A.; TUCCI, C. E. M. (Ed.). **Integrated urban water management: humid tropics**. Paris: Unesco; Taylor & Francis, c2010. p 49-68.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O.; MAYOR, A. V. **Conceitos e Requisitos para pavimentos de concreto permeável**. São Paulo: ABCP, 2013. Prática Recomendada PR-3. Disponível em: <[http://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/07/PR3\\_Conceitos\\_Requisitos\\_Pav\\_Concreto\\_Permeavel.pdf](http://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/07/PR3_Conceitos_Requisitos_Pav_Concreto_Permeavel.pdf)>. Acesso em: 15 ago. 2013.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, c1995.

RIGHETTO, A. M.; MOREIRA, L. F. F.; SALES, T. E. A. Manejo de águas pluviais urbanas. In: RIGHETTO, A. M. (Coord.). **Manejo de águas pluviais urbanas**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p. 19-73.

SCHUELER, T. R. **Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban bmps**. Washington: Metropolitan Washington Council of Governments, 1987.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 1 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; ABRH; EDUSP, 1993. p 35-51.

TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: \_\_\_\_\_ (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 1 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; ABRH; EDUSP, 1993a. p 391-441.

\_\_\_\_\_. Controle de enchentes. In: \_\_\_\_\_ (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 1 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; ABRH; EDUSP, 1993b. p 621-658.

\_\_\_\_\_. **Inundações urbanas**. 1 ed. Porto Alegre: ABRH; RHAMA, 2007.

URBONAS, B.; STAHRÉ, P. **Stormwater: best management practices and detection for water quality, drainage and CSO management**. New Jersey: Prentice Hall, 1993.