

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

USO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS E
COBERTURAS VERDES NO CONTROLE QUALI-
QUANTITATIVO DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL URBANO

ANDRÉA SOUZA CASTRO

Porto Alegre, 07 de Outubro de 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

USO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS E COBERTURAS
VERDES NO CONTROLE QUALI-QUANTITATIVO DO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL URBANO

ANDRÉA SOUZA CASTRO

Tese submetida ao programa Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título em Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Joel Avruch Goldenfum

Banca Examinadora:

André Luiz Lopes da Silveira	IPH/UFRGS
Maria do Carmo Cauduro Gastaldini	PPGEC/UFSM
Vladimir C. Borges de Souza	PPGRHS/UFAL

Porto Alegre, Outubro de 2011.

*Nossa alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento
envolvido, não na vitória propriamente dita”.*

(Gandhi)

APRESENTAÇÃO

O presente trabalho refere-se à tese de doutorado desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande dos Sul, sob orientação do Prof. Dr. Joel Avruch Goldenfum.

O estudo foi subvencionado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) através do PROSAB (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico) Águas Urbanas, referente ao edital 5, tema 1.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por me dar saúde e força para superar os obstáculos durante toda esta caminhada;

À toda a minha família principalmente ao Maicon e aos meus pais, Dalva e Kley, que sempre me apoiaram em todas os momentos de dificuldade;

Ao professor Joel Avruch Goldenfum por sua dedicada orientação;

Aos professores André Silveira e David da Motta Marques, pelo apoio nesta pesquisa;

À bolsista do projeto PROSAB, Daiane Marques Lino, pelo apoio em todas as análises químicas da água; aos estagiários Marcelo Pasquetti e Luciana Merten que auxiliaram na fase inicial desta pesquisa; ao bolsista Ivanir Avila pelo auxílio na coleta e transporte das amostras, além de colaborar muito na manutenção dos experimentos; à bolsista Cristiane pelo apoio nas análises químicas; à técnica de laboratório, Mara, pela auxílio no laboratório;

Às amigas Herenice Moreira e Beatriz Stoll pela amizade e incentivo;

Aos colegas do IPH, Andrea Sanches, Fernando Dornelles, Lúcia Ribeiro, Vanessa Gazulha, Viviane Trevisan, Simone Oliveira, Viviane Juliano, Eliete Canterle, pelas conversas de incentivo e apoio em vários momentos da pesquisa;

Ao meu sogro e sogra Jaime e Clara, que sempre me deram apoio nos momentos de dificuldade;

À empresa Ecotelhado, que montou a estrutura do experimento e forneceu as ecotelhas;

A todos os professores e funcionários do IPH, pela disposição em auxiliar quando solicitados, em especial à funcionária Nadir Solari que sempre me apoiou em relação aos assuntos referentes à secretaria do curso;

Às amigas da Faculdade Dom Bosco de Porto Alegre, Isabel Damim e Luciane Salvi que me apoiaram na fase final da tese;

Ao Pe. Dr. Marcos Sandrini pelo incentivo;

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), que concedeu bolsa de doutorado;

À FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), que concedeu recursos ao Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), edital 5, tema 4 (Manejo de Águas Pluviais Urbanas), possibilitando o desenvolvimento deste trabalho;

À FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul), pela concessão de bolsa de iniciação científica.

RESUMO

Este trabalho procurou avaliar a eficiência do uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle do escoamento superficial e a influência dos mesmos na qualidade das águas que drenam destas estruturas.

Os pavimentos permeáveis foram avaliados em um estacionamento construído no ano de 2003, com 264m² de área, dividido em dois tipos de revestimento: asfalto poroso e blocos vazados cobertos por gramíneas. Nos anos de 2003 e 2004 foi efetuado um ano de monitoramento quantitativo dessa estrutura (primeira etapa de monitoramento), sem efetuar análises qualitativas. O presente estudo apresenta resultados de uma segunda etapa de monitoramento, efetuada em 2007, 2008 e 2009, incluindo análises qualitativas e quantitativas. Para os dezessete eventos estudados no segundo estágio do monitoramento, os resultados da análise quantitativa mostraram que somente o pavimento com revestimento de blocos vazados continuava fazendo o controle adequado do volume de escoamento superficial, embora com valores de escoamento um pouco superiores aos encontrados no passado, principalmente no revestimento de asfalto poroso. De uma maneira geral, a qualidade da água que infiltrou no pavimento nos dois revestimentos para os eventos analisados está dentro dos parâmetros esperados, se comparadas as resoluções nº 357 e 430 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). O tipo de revestimento parece não influenciar na qualidade da água que infiltra no solo, já que os valores encontrados no asfalto poroso e nos blocos vazados são muito próximos.

Já para o experimento com coberturas verdes, os resultados indicaram que o uso pode proporcionar uma melhor distribuição do escoamento superficial ao longo do tempo, através da diminuição da velocidade de liberação do excesso de água retida nos poros do substrato. Os dados demonstraram também uma redução no volume de água escoado, já que o telhado verde é composto por plantas que têm a capacidade de reter água. As análises físico-químicas indicaram pouca diferença entre os módulos terraço e telhado sem cobertura vegetal. A presença da cobertura da vegetal aumenta os valores de sólidos totais, de fósforo total, de nitrogênio, de nitrato, de turbidez, de DBO₅, além de tornar o pH alcalino com valores próximos a 8. Se compararmos os valores obtidos nas análises da qualidade com os padrões das resoluções nº 357 e 430 do CONAMA, EPA (Guia para Reuso da Água) de 1992 e a resolução CONSEMA 128/06 RS (Rio Grande do Sul), foi possível constatar que a água possui uma boa qualidade mesmo não sendo desprezada a primeira parcela que geralmente é a mais poluída.

ABSTRACT

This study attempted to evaluate the efficiency of using permeable pavements and green roofs to control surface runoff, and their influence on the quality of the waters draining from these structures.

The permeable pavements were from an approximately 264m² parking lot built in 2003. There were two types of pervious materials: porous asphalt and grass-covered concrete garden blocks. The structure was designed in 2003 and 2004; monitoring devices were detailed, and the results of a one-year quantitative study of this structure (first stage of monitoring) were presented, but no qualitative studies were performed. The present study describes results of a second stage of monitoring, performed in 2007, 2008 and 2009, including qualitative and quantitative analyses. Quantitative analysis results for the seventeen observed events show that, in the second stage of monitoring, only the pavement with concrete garden blocks still controlled the surface runoff volume adequately, although the runoff values are slightly superior to those found in the past in the same experimental device. The surface runoff coefficient values found in the second stage of monitoring were shown to be higher than in the first stage, especially in the porous asphalt cover. In general, the quality of the water that infiltrated the pavement in the two pervious materials for the analyzed events is within the expected standards, with some of them presenting higher quality analyses than the standards of CONAMA (National Council of the Environment) Resolutions n° 357 and n° 430. The type of cover appears not to influence the quality of water that infiltrates into the soil, since the values found in the porous asphalt and in the concrete garden blocks are very close.

On the other hand, for the green roof experiment, results showed that they may provide a better distribution of surface runoff over time by reducing the rate of release of the excess water retained in the substrate pores. Moreover, data also showed that the water volume drained diminished, since the green roof consists of plants that can retain water. The physicochemical analyses showed that there is little difference between the terrace and non-green roof modules. The presence of green cover increases the amounts of total solids, total phosphorus, nitrogen, nitrate, turbidity, BOD₅, and makes the pH alkaline with values close to 8. Comparing the values obtained in quality analyses with the standards of CONAMA Resolutions n° 357 and n° 430, EPA (Guidelines for Water Reuse) for 1992, and CONSEMA Resolution 128/06 RS (State of Rio Grande do Sul), the water quality is good even if the first-flush is not discarded.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	4
3	MEDIDAS DE CONTROLE NA FONTE E QUALIDADE DAS ÁGUAS PLUVIAIS.....	5
3.1	Impactos da Urbanização e Drenagem Urbana.....	5
3.2	Controle do volume do escoamento superficial através de estruturas de controle na fonte.....	12
3.3	Poluição das águas pluviais.....	13
3.4	Influência das estruturas de controle na fonte na qualidade das águas pluviais	18
3.5	Pavimentos Permeáveis.....	21
3.6	Telhados Verdes.....	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.1	Pavimento Permeável.....	39
4.1.1	Descrição do módulo experimental.....	39
4.1.2	Análise do comportamento hidráulico do pavimento	45
4.1.3	Análise da qualidade da água no pavimento permeável	47
4.2	Cobertura Verde.....	53
4.2.1	Descrição do módulo experimental.....	53
4.2.2	Análise do balanço hídrico da Cobertura Verde	56
4.2.3	Análise da qualidade da água no Ecotelhado.....	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1	Pavimentos Permeáveis.....	61
5.1.1	Análise do Comportamento Hidrológico – Pavimento Permeável.....	61
5.1.2	Análise de Qualidade de Água – Pavimento Permeável.....	77
5.1.3	Síntese dos resultados – Pavimento permeável.....	94

5.2	Cobertura Verde	95
5.2.1	Análise do Comportamento Hidrológico – Cobertura Verde	95
5.2.2	Análise de Qualidade de Água – Cobertura Verde	113
5.2.3	Síntese dos resultados – Cobertura Verde	128
6	CONCLUSÕES	130
7	RECOMENDAÇÕES	133
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Ciclo da contaminação das águas urbanas.	6
Figura 3.2: Ambiente natural com alta permeabilidade.....	7
Figura 3.3: Ambiente com um alto grau de impermeabilidade	7
Figura 3.4: Influência da urbanização no hidrograma de uma bacia.	8
Figura 3.5: Tipos de pavimentos permeáveis de acordo com o revestimento utilizado e a função de infiltração e armazenamento.	23
Figura 3.6: Pavimento permeável com superfície colmatada.....	25
Figura 3.7: Pavimento permeável com sinais de colmatção superficial.	26
Figura 4.1: Planta baixa do pavimento permeável com suas principais dimensões	40
Figura 4.2: Pavimento permeável instalado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS...41	
Figura 4.3: Determinação do volume de armazenamento através da máxima diferença entre a curva de entrada e a de saída da estrutura de controle.....	42
Figura 4.4: Seção transversal do pavimento permeável.....	43
Figura 4.5: Reservatório para análise de qualidade de água dos pavimentos permeáveis.....	48
Figura 4.6: Garrafas de amostragem de escoamento superficial	49
Figura 4.8: Amostradores utilizados na coleta escoamento superficial.....	51
Figura 4.9: Cobertura verde instalada no IPH/UFRGS.	53
Figura 4.10: Colocação das membranas em um telhado verde.....	54
Figura 4.11: Instalação do telhado verde no Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS.	54
Figura 4.12: Cobertura verde instalada no IPH/UFRGS.	56
Figura 4.13: Coleta de amostra de água no reservatório da cobertura verde.	59

Figura 5.1: Comparação dos valores de escoamento superficial para os revestimento de asfalto poroso e blocos vazados durante o período de estudo (segunda etapa de monitoramento do dispositivo).	68
Figura 5.2: Comparação dos valores de armazenamento máximo no reservatório para os revestimentos de asfalto poroso e blocos vazados durante o período de estudo.	71
Figura 5.3: Curva de armazenamento e precipitação para o revestimento de blocos vazados, evento do dia 28 de maio de 2008	72
Figura 5.4: Curva de armazenamento e precipitação para o revestimento de blocos vazados, evento do dia 27 julho de 2008.	72
Figura 5.5: Curva de armazenamento e precipitação para o revestimento de blocos vazados, evento do dia 05 de setembro de 2008.	73
Figura 5.6: Curva de armazenamento e precipitação para o revestimento de blocos vazados, evento do dia 06 de agosto de 2009.	73
Figura 5.7: Acúmulo de água Pavimento permeável após evento de chuva - Agosto de 2010.	74
Figura 5.8: Comparação dos valores de pH nos revestimentos asfalto poroso, blocos vazados e escoamento superficial.	83
Figura 5.9: Comparação dos valores de turbidez da água dos revestimentos asfalto poros, blocos vazados e nas amostras de escoamento superficial.	85
Figura 5.10: Comparação dos valores cor da água dos revestimentos asfalto poroso, blocos vazados e nas amostras de escoamento superficial.	86
Figura 5.11: Comparação dos valores de nitrogênio total dos revestimentos asfalto poroso, blocos vazados e nas amostras de escoamento superficial.	90
Figura 5.12: Comparação entre os escoamentos superficiais do terraço com e sem cobertura vegetal e a precipitação acumulada.	98

Figura 5.13: Comparação entre os escoamentos superficiais do terraço com e sem cobertura vegetal e a precipitação acumulada.....	99
Figura 5.14: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado com e sem cobertura vegetal e a precipitação acumulada.....	100
Figura 5.15: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado com e sem cobertura vegetal e a precipitação acumulada.....	101
Figura 5.16: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado com cobertura vegetal e a intensidade média da precipitação nas primeiras três horas após o início da chuva.	102
Figura 5.17: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado e terraço com cobertura vegetal, precipitação acumulada no período e a intensidade média da precipitação nas primeiras três horas após o início da chuva.	103
Figura 5.18: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado e terraço com cobertura vegetal e a intensidade média da precipitação nas primeiras seis horas após o início da chuva.	105
Figura 5.19: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado e terraço com cobertura vegetal, precipitação acumulada no período e a intensidade média da precipitação nas primeiras seis horas após o início da chuva.....	106
Figura 5.20: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado e terraço com cobertura vegetal e a intensidade média da precipitação nas primeiras doze horas após o início da chuva.	108
Figura 5.21: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado e terraço com cobertura vegetal e a intensidade média da precipitação nas primeiras doze horas após o início da chuva.	110
Figura 5.22: Comparação entre os percentuais de escoamentos superficiais do telhado e terraço com cobertura vegetal e sem cobertura vegetal.	111

Figura 5.23: Comparação do parâmetro pH para os quatro módulos experimentais.....	118
Figura 5.24: Comparação do parâmetro temperatura para os quatro módulos experimentais.	119
Figura 5.25: Comparação do parâmetro turbidez para os quatro módulos experimentais.....	120
Figura 5.26: Comparação do parâmetro cor para os quatro módulos experimentais.....	121
Figura 5.27: Comparação dos sólidos totais para os quatro módulos experimentais.	122
Figura 5.28: Comparação dos valores de DBO para os quatro módulos experimentais.....	123
Figura 5.29: Comparação dos valores de DQO para os quatro módulos experimentais.	123
Figura 5.30: Comparação dos valores de nitrogênio total, nitrogênio amoniacal e nitrato para os quatro módulos experimentais.....	124
Figura 5.31: Comparação do valores de fósforo total e ortofosfato para os quatro módulos experimentais.....	125
Figura 5.32: Comparação dos valores de metais pesados (chumbo, cádmio e cromo) para os quatro módulos experimentais.....	126
Figura 5.33: Comparação dos valores de metais pesados (chumbo, cádmio e cromo) para os quatro módulos experimentais.....	126
Figura 5.34: Comparação dos valores de coliformes totais e termotolerantes nos quatro módulos experimentais para evento do dia 12/01/2010.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Comparação entre cargas poluidoras do escoamento pluvial e esgoto doméstico.	14
Tabela 3.2 - Eficiência das estruturas de infiltração na remoção de poluentes	19
Tabela 5.1: Coeficientes de escoamento superficial dos Pavimentos Permeáveis – Primeira etapa do monitoramento.....	62
Tabela 5.2: Resumo dos dados de armazenamento para os eventos analisados - Primeira etapa do monitoramento.	63
Tabela 5.3 Resumo dos eventos de chuva para o lado com revestimento de Asfalto Poroso – segunda etapa de monitoramento.....	65
Tabela 5.4: Resumo dos eventos de chuva para o lado com revestimento de Blocos Vazados – segunda etapa de monitoramento.....	66
Tabela 5.5: Defasagem entre o início do armazenamento e o início precipitação.....	69
Tabela 5.6: Análises químicas da água para 8 eventos chuvosos – revestimento asfalto Poroso.	78
Tabela 5.7: Análises químicas da água para 8 eventos chuvosos – revestimento Blocos Vazados.....	79
Tabela 5.8: Média das Análises químicas da água para 4 eventos chuvosos – escoamento superficial.....	80
Tabela 5.9: Comparação de padrões de qualidade da água para os pavimentos permeáveis e escoamento superficial.....	82
Tabela 5.10: Características da precipitação para os 19 eventos estudados.	95
Tabela 5.11: Início do escoamento superficial (h:min) e tempo (h:min:seg) para o início do escoamento após iniciada a precipitação.	96

Tabela 5.12: Volumes escoados nos 4 módulos experimentais após 3 horas do início da precipitação.....	97
Tabela 5.13: Volumes escoados nos 4 módulos experimentais até 6 horas do início da precipitação.....	104
Tabela 5.14: Volumes escoados nos 4 módulos experimentais até 12 horas do início da precipitação.....	107
Tabela 5.15: Volumes escoados nos 4 módulos experimentais após 24 horas do início da precipitação.....	109
Tabela 5.16: Resultados das análises físico-químicas para o módulo terraço sem cobertura vegetal.....	114
Tabela 5.17: Resultados das análises físico-químicas para o módulo terraço com cobertura vegetal.....	115
Tabela 5.18: Resultados das análises físico-químicas para o módulo telhado sem cobertura vegetal.....	116
Tabela 5.19: Resultados das análises físico-químicas para o módulo telhado com cobertura vegetal.....	117

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área superficial do pavimento
B	Lado menor do reservatório
C	Carbono
Cd	Cádmio
cfu	Unidades formadoras de colônia
CO ₂	Dióxido de carbono
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Fe	Ferro
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
$h_i(t)$	Leitura fornecida pelo sensor i no instante t
HNO ₃	Ácido nítrico
K	Potássio
k	Carga no vertedor
L	Comprimento do reservatório na direção da declividade
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
mg	Miligramas
mg/L	Miligrama por litro
Mn	Manganês
n.d	Não disponível
NMP/100mL	Número mais provável
NO ₂	Dióxido de nitrogênio

NO ₃	Nitrato
NO _x	Óxidos de nitrogênio
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
P	Fósforo
Pb	Chumbo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PO ₄	Ortofosfato
Q _e	Vazão de entrada do volume de controle
Q _s	Vazão de saída do volume de controle
Q _{sup}	Vazão do escoamento superficial das calhas
R ²	Coefficiente de correlação entre duas variáveis
S	Armazenamento
s.a	Sem armazenamento no reservatório
SD (s.d)	Sem dados
SO ₂	Dióxido de enxofre
uC	Unidades de Cor
uH	Unidade Hazen
Zn	Zinco
α	Nível de significância
ΔS	Varição do armazenamento d'água no reservatório no instante
Δt (dt)	Intervalo de tempo

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BMP's	Best Management Practices
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CV	Cobertura Vegetal
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	Environmental Protection Agency
EVA	Etileno-acetado de vinila
FAPERGS	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul
HPA's	Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
IQA	Índices de qualidade de águas
IVA	Índices de Qualidade das Águas para Proteção da Vida Aquática e de Comunidades Aquáticas
LID	Low Impact Development
LIUDD	Low Impact Urban Design and Development
MS	Ministério da Saúde
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
PVC	Policloreto de Vinila
RS	Rio Grande do Sul
SUDS	Sustainable Urban Drainage System

UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNT	Unidade de Turbidez
WSUD	Water Sensitive Urban Design

1 INTRODUÇÃO

A urbanização que ocorre com o crescimento das cidades provoca uma diminuição na cobertura vegetal, modificando o ciclo hidrológico, através de alterações nas quantidades de água envolvidas nos processos constituintes do ciclo.

O ambiente impermeabilizado passa a direcionar maior parcela de água pluvial a um escoamento superficial, dada a redução da interceptação vegetal, infiltração e evapotranspiração pela substituição da sua proteção natural. A consequência deste processo é um aumento nos volumes escoados, ao mesmo tempo em que ocorre a redução do tempo de concentração, provocando assim hidrogramas de cheias cada vez mais críticos. Do ponto de vista da qualidade, a urbanização causa uma deterioração importante das águas de escoamento pluvial, em decorrência do acúmulo de poluentes sobre as superfícies urbanas.

Dentro desse contexto, partindo para uma nova visão de planejamento da drenagem urbana, surgem as técnicas alternativas ou compensatórias. Essas novas técnicas buscam compensar os efeitos da ocupação urbana sobre os processos do ciclo hidrológico. São alternativas de infiltração que procuram favorecer os processos hidrológicos alterados durante a urbanização, objetivando a reconstituição das condições de pré-ocupação. Essas estruturas buscam compensar os efeitos da urbanização na, ou seja, antes que a água atinja a rede de drenagem. Além de atuarem na diminuição das vazões máximas, as estruturas de infiltração podem ajudar também na remoção e no controle de poluentes do escoamento superficial, bem como na recarga das águas subterrâneas.

No Brasil, verifica-se ainda o predomínio de técnicas convencionais de drenagem, com a transferência do escoamento para pontos de jusante na bacia. Algumas cidades como Porto Alegre e São Paulo, têm tentado mudar esta concepção através de técnicas compensatórias, mais integradas ao espaço como um todo, ou seja, tecnicamente efetivas, bem integradas com o urbanismo, e com o mínimo impacto ao meio ambiente.

Dentre as diversas estruturas existentes, o presente trabalho estudou pavimentos permeáveis e telhados verdes. As diferentes medidas de controle de escoamento urbano podem ser utilizadas individualmente ou combinadas de diferentes formas e em diferentes escalas.

Os pavimentos permeáveis são dispositivos de controle na fonte, que atuam no controle da produção do escoamento superficial, permitindo que a água proveniente da chuva passe através deles, reduzindo desse modo o escoamento superficial além da possibilidade de filtração de alguns poluentes, os quais são lavados durante um evento chuvoso (Andrade Filho *et al.*, 2000 e EPA, 1999a).

No que se refere à qualidade, a literatura internacional apresenta diversos pesquisadores (Balades *et al.*, 1998; Pagotto *et al.*, 2000; Brattebo e Booth, 2003) que têm trabalhado na tentativa de se aferir a influência e o risco de poluição das águas subterrâneas e do solo no entorno de dispositivos de infiltração. Apesar de alguns autores, tais como Brattebo e Booth (2003) e Pagotto *et al.* (2000) terem encontrado resultados positivos para utilização de pavimentos permeáveis no que diz respeito ao controle do escoamento superficial e à melhoria da qualidade da água, os resultados ainda não são conclusivos. Existe a possibilidade de que os bons resultados encontrados pelos autores citados acima, no que diz respeito à qualidade da água resultante da infiltração no pavimento, repitam-se para as condições brasileiras. Mas é importante ressaltar que, apesar dos resultados extremamente positivos com uso de pavimentos permeáveis para retenção de poluentes encontrados pelos autores, o bom desempenho dessas estruturas não pode ser transferido para outras regiões devido a diferentes de clima e solo.

Já os telhados verdes são estruturas que se caracterizam pela aplicação de cobertura vegetal nas edificações. Consistem basicamente em uma camada de vegetação, uma camada de substrato (onde a água é retida e a vegetação é escorada) e uma camada de drenagem responsável pela retirada da água adicional. Eles surgem como uma alternativa de cobertura capaz de proporcionar várias vantagens sobre as coberturas convencionais, dentre as principais pode-se citar: diminuição da água de escoamento que seria direcionada ao pluvial; melhoria nas condições de conforto ambiental das edificações e visual paisagístico; proteção do telhado contra a luz do solar e grandes flutuações de temperatura, melhorando assim a vida útil do telhado. Os efeitos dos telhados verdes no escoamento superficial consistem em: uma redução no volume de água escoado, já que o telhado verde é composto por plantas que têm a capacidade de reter água e atraso no pico do escoamento, pois ocorre absorção da água no telhado verde.

Esse tipo de tecnologia está sendo usada em diversos países na Europa e Estados Unidos, onde é adotada não só em empreendimentos residenciais como também comerciais e industriais. Vários autores internacionais (Mentens *et al.*, 2006; Connelly e Liu, 2005; VanWoert *et al.*, 2005; Villarreal e Bengtsson, 2005; Moran, 2004) citam o uso de telhados verdes no controle do escoamento superficial. No Brasil, na cidade de Toledo (PR), Costa *et al.*, 2011, através do monitoramento protótipo com cobertura verde estudaram o comportamento deste no controle de inundações urbanas. Já Almeida Neto *et al.* (2005), estudaram através de um módulo experimental composto por coberturas verdes leves o comportamento da estrutura no controle quali-quantitativo do escoamento superficial.

Porém, pouco se conhece sobre o real efeito dos telhados verdes sobre o escoamento pluvial no Brasil. Sendo assim, é de extrema importância o estudo para verificar a aplicabilidade e os efeitos dessas estruturas no escoamento superficial urbano.

A maioria dos estudos para pavimentos permeáveis e telhados verdes é realizada principalmente na Europa e Estados Unidos, locais que possuem características de clima, solo e precipitação muito distintas se comparadas com as do Brasil. Por esse motivo, pesquisas sobre o impacto desse tipo de técnica, principalmente no que se refere à qualidade das águas devem ser amplamente estudados em nosso país.

Pouco se conhece sobre o efeito dessas estruturas sobre o escoamento pluvial no Brasil. Sendo assim, é de extrema importância o estudo para verificar a aplicabilidade e os efeitos de pavimentos permeáveis e coberturas vegetais nos aspectos quali-quantitativos do escoamento superficial urbano, tendo em vista o planejamento de sistemas de drenagem urbana mais eficientes.

Até o presente momento, não há conhecimento de trabalho experimental para avaliação do controle da qualidade de águas pluviais em estruturas de infiltração no estado do Rio Grande do Sul. Sendo assim existe a necessidade de se aprofundar a discussão desse assunto no Brasil, através de uma contribuição ao conhecimento e entendimento dos aspectos quali-quantitativos das águas de drenagens que chegam às diversas estruturas de controle na fonte existentes.

2 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo principal avaliar a aplicabilidade de duas estruturas de controle na fonte – pavimentos permeáveis e coberturas verdes – no controle quali-quantitativo do escoamento superficial das águas pluviais nas condições de clima e solo de Porto Alegre.

Os objetivos secundários são:

1. verificar a existência ou não de contaminação da água que está infiltrando no solo, proveniente de pavimentos permeáveis;
2. avaliar a contribuição qualitativa e quantitativa de telhados verdes no controle de águas pluviais.

3 MEDIDAS DE CONTROLE NA FONTE E QUALIDADE DAS ÁGUAS PLUVIAIS

Para um melhor entendimento da maneira como as estruturas de controle na fonte, mais precisamente pavimentos permeáveis e coberturas verdes atuam no controle qualitativo e quantitativo das águas de escoamento superficial urbano, é necessário abordar os aspectos que serão mencionados nos itens a seguir.

3.1 Impactos da Urbanização e Drenagem Urbana

É inegável que a urbanização causa mudanças e impactos no ambiente e a nas comunidades. Sabe-se também que muitos efeitos da urbanização são positivos, tais como lugares novos para viver e trabalhar, aumento de áreas recreacionais e aumento do crescimento econômico. Entretanto, alguns desses impactos se tornam negativos, uma vez que o desenvolvimento conduz a um aumento inegável na quantidade de poluentes e de sedimentos provenientes das construções que podem chegar nos cursos d'água, prejudicando a vida animal e vegetal. O óleo e o gás dos veículos, por exemplo, podem escapar em estradas e estacionamentos, além de poder ocorrer deposição de poluentes presentes na atmosfera.

O escoamento superficial proveniente da água da chuva é gerado de inúmeras superfícies impermeabilizadas tais como: áreas residenciais, comerciais, industriais, ruas e estradas. Basicamente, toda a superfície que tiver a capacidade de infiltração reduzida produzirá excesso de escoamento superficial durante a precipitação. O ciclo de contaminação das águas urbanas pode ser visualizado na figura 3.1.

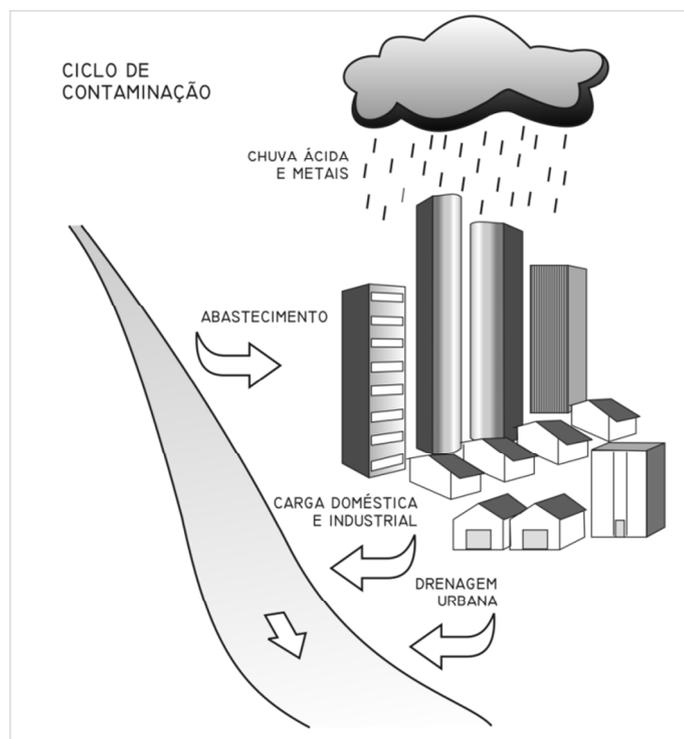


Figura 3.1: Ciclo da contaminação das águas urbanas.
Fonte: Tucci, 2003, p.14.

Quando uma área natural é alterada para um ambiente urbanizado consistindo de ruas, estacionamentos, prédios, telhados e etc, o ciclo hidrológico do sistema é alterado significativamente.

A água que anteriormente era utilizada pelas plantas, evaporada ou infiltrada no solo é agora convertida diretamente no escoamento superficial. Uma medida importante do grau de urbanização de uma bacia é o nível de superfícies impermeáveis. Enquanto o nível de impermeabilização aumenta em uma bacia, a precipitação é convertida em escoamento superficial (EPA, 1999b). As figuras 3.2 e 3.3 ilustram a transformação do ambiente natural para o ambiente urbanizado.

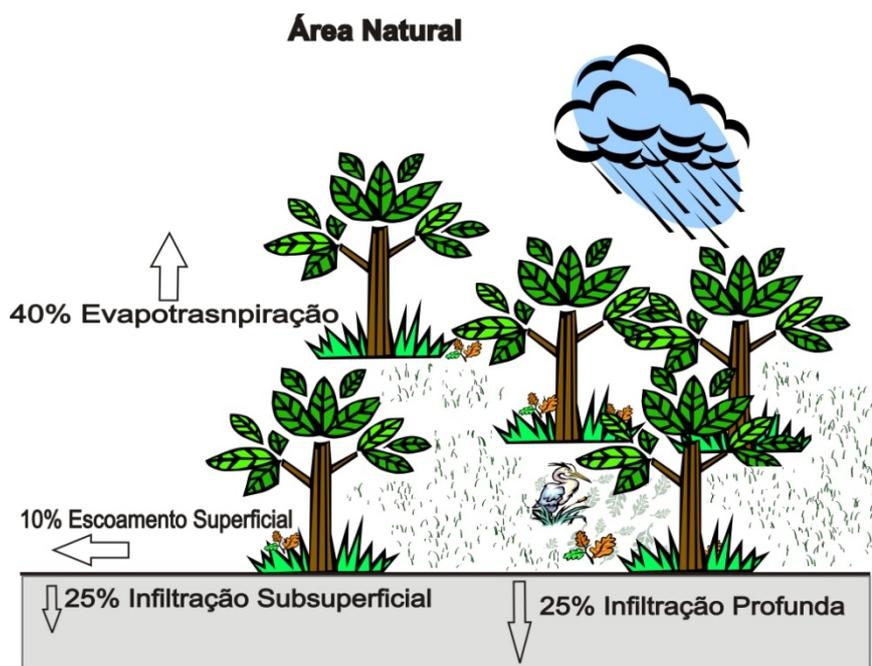


Figura 3.2: Ambiente natural com alta permeabilidade
Adaptado de ARNOLD e GIBBONS, 1996, p.244.

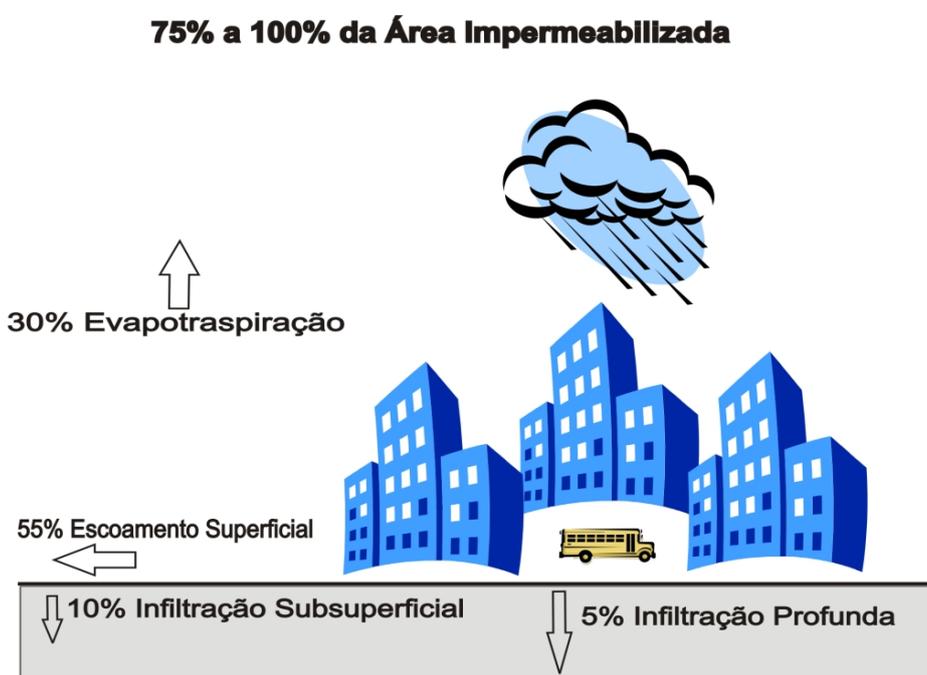


Figura 3.3: Ambiente com um alto grau de impermeabilidade
Fonte: Adaptado de ARNOLD e GIBBONS, 1996, p.244.

Na figura 3.4 pode-se observar um dos efeitos da impermeabilização do solo através da urbanização em uma bacia. A figura mostra um aumento nos volumes escoados e consequentemente um hidrograma de cheia mais crítico.

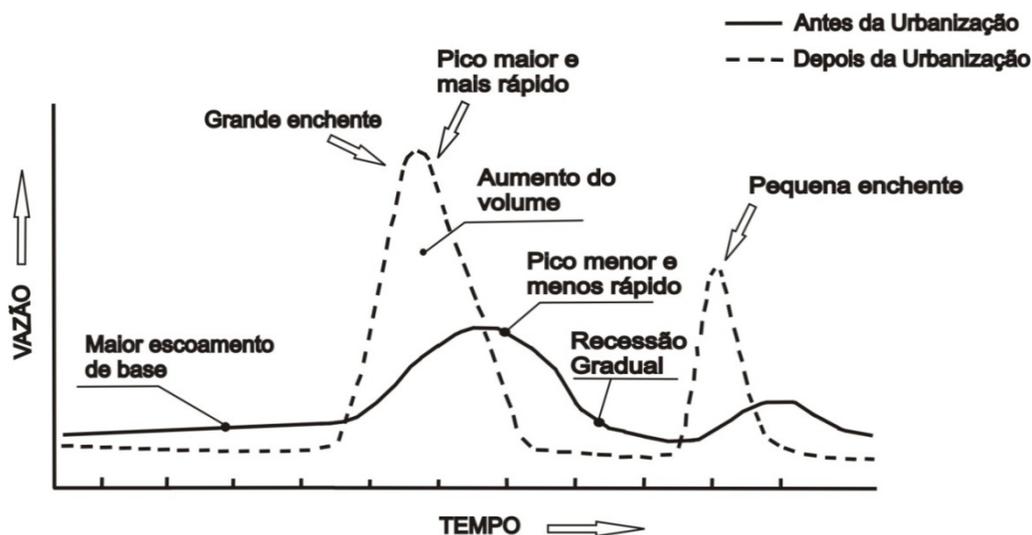


Figura 3.4: Influência da urbanização no hidrograma de uma bacia.
Fonte: Tucci, 2003, p. 91.

À medida que a impermeabilização do solo aumenta, ocorre uma aceleração do escoamento através de condutos e canais, aumentando também a quantidade de água que chega ao mesmo tempo ao sistema drenagem. Além disso, o aumento da urbanização pode produzir obstruções ao escoamento devido a aterros e pontes, drenagens inadequadas e assoreamento. Quando a precipitação é muito intensa, o volume que esco para o sistema de drenagem pode superar a capacidade de escoamento do sistema e o excesso de volume de água provocará as inundações.

É importante ressaltar que os problemas relacionados com alagamentos e transbordamento dos cursos dos rios, erosão e assoreamento podem se tornar mais críticos se as projeções de agravamento dos eventos extremos climáticos se confirmarem. Sendo assim, existe uma tendência de aumento na intensidade dos eventos naturais, tais como as precipitações.

Na tentativa de controlar e minimizar os efeitos das inundações, podem ser destacados dois sistemas de drenagem urbana: os Sistemas Clássicos e os Sistemas Compensatórios.

Os Sistemas Clássicos são baseados nos princípios higienistas, ou seja, a drenagem de águas pluviais e servidas deve ter uma evacuação rápida para jusante, por meio de condutos.

Segundo Baptista *et al.* (2005), este sistema de drenagem é constituído basicamente de dispositivos de microdrenagem que efetuam o escoamento das águas pluviais nas ruas (sarjetas), a captação quando a capacidade de vazão é superada (bocas de lobo), e de condutos enterrados (galerias). Algumas vezes, existe a necessidade de implantar estruturas complementares, tais como: bueiros, dissipadores de energia e estações elevatórias.

O excesso de água pluvial retirado através dos sistemas clássicos de drenagem é transferido rapidamente para outro local. Assim, o problema de inundação é transferido para a jusante. A tendência é que regiões mais antigas sofram com problemas de inundações provocadas por áreas urbanizadas mais novas. Baptista *et al.* (2005) citam que as soluções clássicas de drenagem não contemplam os problemas relativos à qualidade da água. Os autores afirmam que, no Brasil, são comuns problemas relativos à inadequação do funcionamento do sistema de drenagem causado pelo acúmulo de sedimentos originados em processos erosivos, intensificados pela urbanização e/ou deficiência no sistema de limpeza urbana. Além disso, os problemas da qualidade da água provenientes da drenagem urbana não são claramente percebidos, porque grandes cargas de poluentes geradas pelos esgotos sanitários lançados sem tratamento nos cursos d'água disfarçam a real dimensão do problema.

Já os sistemas compensatórios, ao contrário dos clássicos, não têm o objetivo de escoar a água o mais rápido possível para jusante, mas sim, retardar o escoamento e fazer com que água infiltre. Estas técnicas visam compensar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos. Esse tipo de drenagem tem inúmeras vantagens em relação ao preceito tradicional. As vantagens irão depender da maneira como cada estrutura compensatória está inserida no meio ambiente urbano. Como são técnicas que visam a infiltração das águas pluviais, além de contribuírem para a redução dos volumes escoados, elas favorecem a recarga das águas subterrâneas. O uso de técnicas de infiltração pode ficar prejudicado em áreas onde o solo não possui uma boa capacidade de infiltração e em locais onde o lençol freático esteja em profundidade pequena em relação à estrutura.

Uma tendência mais recente na drenagem urbana é o chamado LID, sigla em inglês para o termo “Low Impact Development”. LID foi traduzido para o português como Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto, essa terminologia é utilizada nos Estados Unidos e Canadá. Contudo, no Reino Unido, esse conceito é representado pelo termo SUDS (Sustainable Urban Drainage System); por sua vez, na Austrália é chamado de Water Sensitive Urban Design (WSUD) e, na Nova Zelândia, é conhecido por Low Impact Urban Design and Development (LIUDD) (FORGIARINI *et al.*, 2007).

Já as chamadas BMP's (Best Management Practices) é o termo em inglês que define práticas de gerenciamento do controle de inundações que simulam os processos hidrológicos naturais. Estas são práticas institucionais projetadas para reduzir quantidade de água direcionada ao escoamento pluvial, diminuindo as inundações. Elas também previnem, minimizam ou impedem que a poluição proveniente do escoamento superficial da água da chuva chegue até os rios, lagos e riachos.

O conceito de LID se difere das técnicas BMP's por ser um conceito que engloba ações mais abrangentes no que se refere ao planejamento do sistema de drenagem urbana. A abordagem de LID enfatiza a integração do projeto com técnicas planejamento que conservam os sistemas naturais e funções hidrológicas de um determinado local. Segundo Forgiarini *et al.* (2007), a abordagem LID também inclui medidas não estruturais como layouts alternativos de estradas e prédios para minimizar a área impermeável e para maximizar o uso e preservação dos solos e da vegetação nativa, bem como redução das fontes de contaminação e programas de educação para modificar ações e/ou atividades. Segundo os autores, a abordagem LID procura realizar o controle do escoamento em escala inferior ao aplicado pelas BMPs, ou seja, onde o mesmo é gerado.

É importante ressaltar que os sistemas clássicos ou higienistas não são necessariamente ruins quando comparados com os sistemas compensatórios. É necessário um estudo caso a caso, pois em determinadas situações os sistemas clássicos são a melhor solução.

Muitos autores internacionais têm estudado os impactos da urbanização na drenagem urbana e a utilização de sistemas compensatórios no controle do escoamento superficial, dentre eles, pode-se citar: Palla *et al.* (2010), Stovin (2010), Damodaram *et al.* (2010), Scholz e Grabowieck (2007), Carter e Rasmussen (2006), Acioli (2005), Abbott *et al.* (2003), Brattebo e Booth (2003), Pagotto *et al.* (2000), Barraud *et al.* (1998), Azzout *et al.* (1994).

Kleidorfer *et al.* (2009) *apud* Palla *et al.* (2010) estudaram as consequências que a mudança climática pode causar no aumento das intensidades de chuva que leva a um impacto adicional sobre os sistemas de drenagem. Os autores analisaram, através de simulações, o impacto da urbanização, expresso pelo aumento da área impermeável, em conjunto com os possíveis cenários do aquecimento global sobre a hidrologia urbana. Foi demonstrado pelos autores que um aumento de 20% em um fator que expressa a distribuição na intensidade da chuva tem o mesmo efeito que um aumento de 40% na área impermeável. Os autores sugeriram que o aumento de intensidade de chuvas poderá ser compensado por medidas de infiltração que conduzem a uma redução de 30% da área impermeável. Eles concluíram que o impacto do aumento da urbanização, em alguns casos, é significativamente maior do que os impactos esperados do aquecimento global.

Damodaram *et al.* (2010) estudaram uma abordagem de modelagem com o objetivo de incorporar as LID, com os modelos hidrológicos existentes. O objetivo do trabalho foi de estimar os efeitos do uso dessas práticas na vazão de saída de uma bacia hidrográfica. Os autores concluíram que a utilização da abordagem LID é mais eficaz do que as BMP's para chuvas de pequena intensidade, mas o armazenamento obtido com a utilização de uma BMP é mais eficaz para o gerenciamento de escoamentos de chuvas mais intensas. Para alcançar ambos os objetivos, controle de inundações e sustentabilidade da gestão de águas pluviais, as abordagens LID e BMP's podem ser usadas de forma combinada.

Além do aspecto quantitativo da drenagem urbana, vários autores estudam os efeitos que as estruturas de controle na fonte provocam nas águas de drenagem. Para tanto, deve-se ter um controle rígido da qualidade das águas que saem das estruturas de infiltração e recarregam o lençol freático. A deterioração da qualidade das águas subterrâneas pode ser um risco iminente, já que a água que recarrega o lençol freático é proveniente da precipitação que lava as ruas e calçadas transportando sedimentos e diversos contaminantes. Existente ainda a possibilidade de redes clandestinas de esgoto cloacal estarem ligadas ao pluvial, contaminando assim as águas subterrâneas.

3.2 Controle do volume do escoamento superficial através de estruturas de controle na fonte

As estruturas de controle na fonte têm como princípio um sistema de drenagem urbana sustentável, já que simula o ciclo hidrológico natural, melhora a qualidade de vida e a preservação ambiental. Essa abordagem visa um manejo das estruturas de forma que as águas provenientes do escoamento superficial infiltrem. Esta medida diminuiria o fluxo de água direcionado para os sistemas de captação da água de drenagem, contribuindo para a diminuição de inundações nas cidades.

Segundo Baptista *et al.* (2005) e Canholi (2005), dentre as principais estruturas de controle na fonte, pode-se citar:

- ✓ Pavimentos permeáveis;
- ✓ Trincheiras da infiltração;
- ✓ Valas permeáveis;
- ✓ Bacias de retenção e detenção;
- ✓ Poços de infiltração;
- ✓ Microreservatórios;

Além das técnicas citadas acima, os ecotelhados ou telhados verdes também são considerados uma prática de controle do escoamento superficial (STOVIN, 2010; PALLA *et al.*, 2010; EPA, 2009a; HATHAWAY *et al.*, 2007; TEEMUSK e MANDER, 2007). Os telhados verdes podem também contribuir para a atenuação do escoamento superficial provenientes dos eventos extremos. Bem como podem reduzir a concentração e carga de muitos poluentes, tais como sólidos suspensos, nitrogênio, fósforo e metais pesados encontrados no escoamento da água de drenagem (BERNDTSSON *et al.*, 2006; KÖHLER *et al.*, 2002).

As práticas de gerenciamento das águas provenientes do escoamento superficial das tempestades podem ser ferramentas fundamentais para melhorar a qualidade de corpos d'água. Num primeiro momento, podem representar um custo significativo às comunidades, mas esses custos devem ser avaliados comparando-os com os vários benefícios que podem fornecer.

3.3 Poluição das águas pluviais

Com a urbanização e o aumento da impermeabilização do solo, são gerados nas áreas urbanas volumes de escoamento superficiais cada vez maiores. Com isso, a carga de poluição envolvida neste escoamento também é aumentada. Essa contaminação se dá principalmente devido ao material em suspensão e aos metais pesados. Uma das características da poluição urbana é a mobilidade e afinidade dos metais com a matéria orgânica (BAPTISTA *et al.*, 2005; SCHUELER, 1987).

A poluição que é gerada através do escoamento superficial em zonas urbanas é de origem difusa, ou seja, é gerada de forma esparsa sobre a área da bacia hidrográfica. A poluição de origem difusa é caracterizada pela grande variabilidade na concentração de poluentes presentes.

A poluição das águas de drenagem pode ser originada nas zonas urbanas residenciais, industriais ou comerciais. Estabelecer uma diferenciação na produção das cargas poluidoras entre as três fontes geradoras é muito difícil. Isso se deve ao fato de que áreas residenciais podem ter densidades de ocupação muito variadas, da mesma forma que zonas industriais podem ser formadas por indústrias mais ou menos poluidoras.

Ide (1984), verificou que a carga de poluição do escoamento pluvial pode ser tão nociva quanto os esgotos domésticos, já que concentrações de metais pesados e materiais tóxicos na drenagem urbana são mais altas do que no esgoto doméstico. A diferença é que a poluição dos esgotos domésticos é essencialmente orgânica, enquanto que a transportada pelas águas do escoamento pluvial é composta, principalmente, por material em suspensão e metais pesados. Além disso, a poluição das águas pluviais é caracterizada por sua descontinuidade e por ser a concentração de alguns elementos muito mais elevada que no caso dos esgotos domésticos (como material em suspensão e metais pesados).

A quantidade de material em suspensão presente na água do escoamento pluvial é bem mais significativa no início da chuva. Os primeiros 25mm de escoamento superficial geralmente transportam grande parte de carga poluente (SCHUELER, 1987).

Um exemplo da relação das cargas de poluentes das águas pluviais em comparação com o esgoto sanitário pode ser visualizado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Comparação entre cargas poluidoras do escoamento pluvial e esgoto doméstico.

Parâmetros	Cargas		
	Pluvial/ Esgoto Doméstico		
	PP/ED*		
	Tempo (ano)	Tempo (dia)	Tempo (hora)
Sólidos Totais	0,5	0,5	50
DBO ₅	0,04	0,17	4
NPK	0,04	0,14	3,5
Chumbo (Pb)	27	80	2000
Zinco (Zn)	1	4	100

*PP/ED: relação entre a carga de poluição do escoamento pluvial (PP) e de esgoto doméstico

Fonte: Adaptado de Baptista *et al.* 2005, p. 58.

Na tabela 3.1 pode-se observar que na comparação com o esgoto doméstico, as águas pluviais possuem concentrações bem maiores de chumbo, zinco, sólidos totais, matéria orgânica (DBO₅) e NPK do que o esgoto quando comparamos às cargas de concentração na 1^o hora de precipitação. As concentrações de poluentes na água de escoamento superficial diminuem drasticamente quando comparamos as cargas anuais dos contaminantes. Neste caso, fica evidente que o grande problema de poluição das águas pluviais se dá logo após o início da chuva, quando ocorre a lavagem dos contaminantes.

A contaminação da água pode ocorrer de três maneiras: na atmosfera, na captação e no armazenamento. A composição da água da chuva é influenciada por vários fatores, tais como: condições meteorológicas (ventos, estação do ano, intensidade, duração e o tipo de chuva), localização do ponto de amostragem, ausência ou presença de vegetação, poluição atmosférica e também com o tipo de contaminante.

Tomaz (1998) afirma que em regiões próximas ao oceano, a água da chuva apresenta elementos como sódio, potássio, magnésio, cloro e cálcio. Essas concentrações são proporcionais às encontradas na água do mar. Distante do litoral, os componentes presentes na água são de origem terrestre. Os sedimentos (partículas de solo) podem conter sílica, alumínio e ferro. A contaminação de origem biológica é proveniente do nitrogênio, fósforo e enxofre.

Nos grandes centros urbanos e áreas industriais, os poluentes mais comuns são: dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), chumbo, zinco, ferro, manganês, hidrocarbonetos provenientes do petróleo e outros (TUCCI, 1995 e TOMAZ, 1998). Essas regiões densamente urbanizadas e industrializadas apresentam em sua atmosfera compostos poluentes que sofrem transformações podendo, inclusive, ocasionar o fenômeno da chuva ácida.

É preciso lembrar que a água da chuva já é naturalmente ácida. A presença de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, dissolvido em água, forma o ácido carbônico. É esse ácido fraco que deixa o pH próximo a 5,6. Quando não é natural, a chuva ácida é provocada principalmente por fábricas e carros que queimam combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo. Essa poluição, um pouco se precipita, depositando-se sobre o solo. Outra parte circula na atmosfera e se mistura com o vapor de água. Passa então a existir o risco da chuva ácida.

Tordo (2004) comparou a qualidade da água da chuva de três diferentes tipos de cobertura (fibrocimento, cerâmica e metálica), em cinco bairros do município de Blumenau/SC. Em relação ao pH, o telhado de fibrocimento apresenta uma capacidade maior de neutralizar os ácidos presentes na água da chuva do que as outras duas coberturas estudadas. As amostras referentes à cobertura de fibrocimento apresentaram uma soma de sais de cálcio e magnésio (dureza total) mais elevada que a da cobertura de telha cerâmica e a da cobertura metálica. No parâmetro turbidez, não houve uma diferença significativa entre as coberturas estudadas. Quanto ao aspecto bacteriológico, as amostras apresentaram uma quantidade elevada de organismos patogênicos, não sendo recomendada para consumo humano sem prévio tratamento por desinfecção.

Os dois ácidos predominantes na chuva ácida são o ácido sulfúrico (H_2SO_4) e o ácido nítrico (HNO_3). A chuva ácida geralmente ocorre longe das fontes primárias de produção, pois ela é o produto dos gases dióxido de enxofre (SO_2) e NO_x (o x significa que poderemos ter diversos valores para este índice). Dióxido de nitrogênio (NO_2) e dióxido de enxofre (SO_2) são poluentes que podem estar presentes nos gases lançados na atmosfera. Estes gases reagem com substâncias presentes na atmosfera produzindo ácidos: o dióxido de nitrogênio (NO_2), que forma o ácido nítrico e o dióxido de enxofre, que é responsável pela formação do ácido sulfúrico (BRENA, 2009).

Chocat *et al.* (1997) *apud* Baptista *et al.* (2005) afirmam que de 15% a 25% da carga de poluição pluvial é proveniente da chuva. O restante da contaminação tem origem nos poluentes que se acumulam nas superfícies urbanas nos períodos sem chuva. As águas pluviais lavam as superfícies impermeáveis (ruas, avenidas, terraços, telhados, calçadas) e carregam grande parte dos poluentes que ficam depositados.

May (2004) analisou água proveniente de telhados na cidade de São Paulo no período de novembro de 2003 a março 2004. Neste estudo de 2004, o parâmetro odor apresentou-se ausente em todas as amostras. Já o manganês foi encontrado em 10,3% das amostras. Nas análises bacteriológicas foram encontrados altos índices de coliformes totais, ou seja, em mais de 89% das amostras, sendo que dentre estes, coliformes fecais foram encontradas em mais de 50% das amostras. A qualidade da água da chuva é altamente influenciada por fatores locais (localização geográfica, presença de vegetação, condições meteorológicas e fatores climáticos) e pela poluição atmosférica. Os resultados encontrados por May (2004) não podem ser facilmente transferidos para outra cidade ou região, uma vez que a cidade de São Paulo é densamente urbanizada e industrializada.

O trânsito de pessoas, animais e veículos provoca o acúmulo de resíduos nas ruas e avenidas das cidades. Os resíduos são provenientes do desgaste da pavimentação, dos restos de vegetação, por veículos, por lixo, por partículas de solo, por dejetos de animais, etc.

Em estudos realizados por Eriksson *et al.* (2005), os autores determinaram uma lista dos principais poluentes das águas pluviais, que é constituída de 25 parâmetros divididos seguindo as seguintes categorias: parâmetros básicos da água, metais, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's), herbicidas e misturas de combinações orgânicas.

Provavelmente, há pouca similaridade dos resultados encontrados nos diversos estudos, já que a qualidade do escoamento pluvial depende muito de fatores locais, tais como: condições climáticas, tipo de rua, tipo de tráfego, sistema de limpeza, regime de chuva. A poluição difusa se caracteriza por ter grande variabilidade de concentração, tanto em magnitude entre bacias, como em diferentes eventos e também ao logo de um mesmo evento. Isso impossibilita a transferência de dados de uma região para outra.

Aucharova e Khomich (2005) estudaram os principais poluentes na água do escoamento urbano na cidade de Minsk, capital da Bielorrússia. Os autores concluíram que a contaminação é fortemente influenciada pela época do ano (sazonalidade) e o tipo da área de estudo. Áreas urbanas com alto tráfego e grande densidade de pedestres produzem fortes contaminações de derivados de petróleo, de cloretos, de nitratos e de metais pesados. Os cloretos, o sódio, os nitratos e os metais pesados são os principais poluentes nas águas dos rios dessa região.

Gromaire-Mertz *et al.* (1999) avaliaram águas pluviais na cidade de Paris provenientes de telhados, jardins e ruas. No estudo foram analisados sólidos suspensos, sólidos suspensos voláteis, DBO₅, carbono orgânico dissolvido, hidrocarbonetos e metais pesados, tanto particulado como dissolvido. As águas pluviais coletadas das ruas mostram importantes cargas de sólidos suspensos, carbono orgânico dissolvido e hidrocarbonetos, sendo estas águas bem mais poluídas do que a água proveniente de escoamento superficial de telhados. Já a água de escoamento de telhados é caracterizada por uma alta concentração de metais pesados, sugerindo uma importante contribuição do ambiente das cidades. O escoamento superficial também se caracteriza pelas baixas concentrações de sólidos suspensos e carbono orgânico dissolvido. Os valores de DBO encontrados foram baixos para todos os tipos de escoamento.

Fazendo uma análise dos resultados dos estudos citados anteriormente, verifica-se que o entendimento do fenômeno de poluição e o estudo dos seus impactos são relativamente recentes nos países desenvolvidos. Por outro lado, nos países em desenvolvimento como o Brasil, o controle quantitativo da drenagem urbana ainda é muito restrito e o controle da qualidade da água de drenagem resultante está ainda mais distante. Por isso, para implementação de melhores práticas de gestão de águas pluviais, é de fundamental importância a caracterização da qualidade das águas de drenagem urbana.

3.4 Influência das estruturas de controle na fonte na qualidade das águas pluviais

O controle da poluição das águas urbanas através de dispositivos de controle na fonte é influenciado por muitos fatores. Como o controle do escoamento é realizado na fonte, e se a água tiver pouco contato com as superfícies urbanas, esta carregará poucos poluentes, não tendo tantos problemas no que diz respeito à qualidade. A maior parte dos contaminantes das águas pluviais está associada às partículas sólidas presentes na água de escoamento pluvial.

Na questão do aproveitamento da água da chuva em telhados, a contaminação da água de aproveitamento pode ocorrer de três maneiras: na atmosfera, na captação e no armazenamento. Na atmosfera, a qualidade da água da chuva é influenciada por fatores como: localização geográfica (condições locais e proximidade do oceano por exemplo); presença de vegetação; condições meteorológicas e fatores climáticos; estação do ano e poluição atmosférica.

Outro fator importante que influencia diretamente na qualidade da água da chuva é relacionado com as condições de armazenamento e o descarte do chamado first-flush. O first-flush é a primeira parcela do escoamento, que é geralmente mais poluída. Essa parcela é responsável pela lavagem da atmosfera e da superfície de captação. Logo, essa primeira parcela da chuva pode estar contaminada com fezes de aves e outros animais; com poeira, com folhas de árvores, com revestimento de telhados, com tintas e etc. Por essa razão, é recomendada que a água de lavagem dos telhados seja desprezada. Aconselha-se que a primeira água descartada na proporção de 40 litros para cada 100m² de área de telhado (Tomaz, 1998).

Urban Drainage Flood and Control District (1992) *apud* Porto (1995) cita que o processo de infiltração é uma das principais medidas estruturais utilizadas para a remoção de poluentes. Alguns valores são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Eficiência das estruturas de infiltração na remoção de poluentes

Alternativa de controle	Percentual de Remoção				
	Sólidos em Suspensão	Fósforo Total	Nitrogênio Total	Zinco	Bactéria
Faixas gramadas	10-20	0-10	0-10	0-10	n.d
Valetas gramadas	20-40	0-15	0-15	0-20	n.d
Bacias de retenção secas	50-70	10-20	10-20	30-60	50-90
Bacias de retenção alagadas	60-95	0-80	0-80	0-70	n.d
Pavimentos porosos	80-95	65	80-85	99	n.d

n.d.: não disponível

Fonte: Urban Drainage Flood and Control District (1992) *apud* Porto (1995).

Atualmente, não existem pesquisas científicas suficientes para afirmar que o uso de técnicas de infiltração da água no solo seja eficiente no controle qualitativo das águas urbanas. Embora algumas pesquisas encontradas na literatura, tais como Tota-Maharaj e Scholz (2010), Collins *et al.* (2008), Brattebo e Booth (2003), Pagotto *et al.* (2000) citem que as práticas de infiltração da água no solo estão sendo empregadas para remover sólidos suspensos, partículas orgânicas, bactérias, coliformes, algumas formas de metais solúveis e nutrientes, todos esses encontrados nas águas pluviais oriundas do escoamento superficial urbano.

Ao mesmo tempo, existem impactos negativos que podem surgir com o uso dessas técnicas. Um dos impactos é o potencial de contaminação das águas subterrâneas. Se a estrutura de infiltração não for bem dimensionada e se não for realizada manutenção frequente. Como acontece em qualquer estrutura de infiltração, o potencial de contaminação das águas subterrâneas deve ser cuidadosamente considerado, especialmente, se a água subterrânea é utilizada para consumo humano ou fins agrícolas.

Os contaminantes presentes no escoamento superficial podem se acumular na zona não saturada. Assim, as práticas de infiltração podem aumentar os níveis de matéria orgânica e metais pesados na zona acima do lençol freático e, também, na camada superficial da estrutura, que pode conter componentes muito reativos (ROUSSEAU *et al.*, 2004; LARMET *et al.*, 2005).

Já em relação aos telhados verdes, a qualidade do fluxo de água sub-superficial, isto é, (tipos de contaminantes e as respectivas concentrações) proveniente desse tipo de estrutura depende de vários fatores, tais como:

- ✓ A técnica de construção (profundidade e composição da camada de solo, tipo de vegetação e drenagem da camada),
- ✓ Operações de manutenção,
- ✓ As características do meio ambiente onde está localizado o telhado (áreas residenciais ou industriais);
- ✓ Presença de fontes locais de poluentes e da idade do telhado (tempo decorrido desde a instalação);

Nos próximos itens serão descritos os dois tipos de estruturas de controle na fonte, que serão alvo de estudo desta pesquisa.

3.5 Pavimentos Permeáveis

O termo pavimento permeável se refere basicamente a três tipos de pavimentos, a saber: asfalto poroso, concreto poroso e blocos de concretos, com a superfície projetada para minimizar o escoamento superficial (URBONAS e STAHRÉ, 1993).

Pavimentos de asfalto poroso e concreto poroso são fabricados de forma similar aos pavimentos convencionais, a diferença básica é que os finos são retirados da mistura. O outro tipo de pavimento permeável, ou seja, blocos vazados intertravados são colocados sob uma camada de areia. Um geotextil é colocado ao redor da camada de brita para impedir a migração de material particulado para o reservatório de brita. Os pavimentos permeáveis são utilizados desde a época remota do Império Romano, quando grandes pedras com espaços entre si eram usadas para drenagem (KNAPTON, 2008).

Em áreas de alta densidade de ocupação, o sistema viário e estacionamentos podem representar uma considerável superfície em uma bacia, chegando aproximadamente a 30% da área de drenagem (BAPTISTA *et al.*, 2005). No Brasil, é altamente utilizada a implantação de vias utilizando pavimentos impermeáveis, contribuindo assim para o aumento do escoamento superficial e, conseqüentemente, com uma maior frequência e intensidade das inundações. Os pavimentos permeáveis são dispositivos de controle na fonte, que atuam no controle da produção do escoamento superficial, permitindo que a água proveniente da chuva passe através deles, reduzindo desse modo o escoamento superficial de um local e de áreas circunvizinhas (EPA, 1999a).

Os pavimentos permeáveis podem substituir os pavimentos convencionais em áreas de estacionamentos e em áreas com baixo tráfego. Essa limitação deve ser considerada devido à presença do reservatório de brita que ocasiona a diminuição na capacidade da estrutura de suportar esforços mecânicos provocados pelo tráfego de veículos pesado. O termo em francês para pavimentos permeáveis é *chaussée à structure réservoir*, ou seja, estas estruturas também são conhecidas como estruturas reservatórios, pois são constituídas de uma matriz porosa que permite a infiltração da água. Além da retenção da água, os pavimentos permeáveis podem filtrar alguns poluentes (ANDRADE FILHO *et al.*, 2000 e EPA, 1999a).

Baptista *et al.* (2005) citam que os pavimentos podem ser classificados em três diferentes tipos de acordo com a atuação no controle do escoamento superficial, sendo eles:

- *pavimentos com revestimento superficial permeável*: possibilita a redução da velocidade de escoamento superficial, a retenção temporária de pequenos volumes na própria superfície do pavimento e permite a infiltração de parte das águas pluviais;
- *pavimentos dotados de estrutura porosa*: no reservatório é efetuada a detenção temporária de pequenos volumes de água pluviais, provocando o amortecimento de vazões e a alteração temporal dos hidrograma;
- *pavimentos com estrutura porosa e dispositivos de facilitação da infiltração*: esse tipo de pavimento atua tanto na detenção temporária como na infiltração de águas pluviais. Neste tipo de pavimento obtém-se o amortecimento de vazões, alteração temporal nos hidrogramas e a redução dos volumes efetivamente escoados.

Segundo Azzout *et al.* (1994) e Baptista *et al.* (2005) uma segunda classificação dos pavimentos permeáveis pode ser feita com relação ao seu princípio de funcionamento:

- *entrada imediata da água da chuva na estrutura do pavimento*: pode ser efetuada de forma distribuída (quando a superfície do pavimento possui revestimento permeável) ou de forma localizada, através de drenos laterais ligados ao sistema de drenagem (quando o revestimento for impermeável);
- *detenção temporária da água no interior do pavimento*: a água é estocada nos vazios do espaço poroso, assim como um reservatório enterrado;
- *evacuação lenta da água*: neste caso a água é retirada por infiltração direta no solo ou através de drenos acoplados ao sistema de drenagem.

Azzout *et al.* (1994) citam que existem quatro tipos de pavimentos permeáveis de acordo com o revestimento e com a função que exercem (infiltração ou reservatório). Os quatro diferentes tipos de pavimentos podem ser visualizados na figura 3.5.

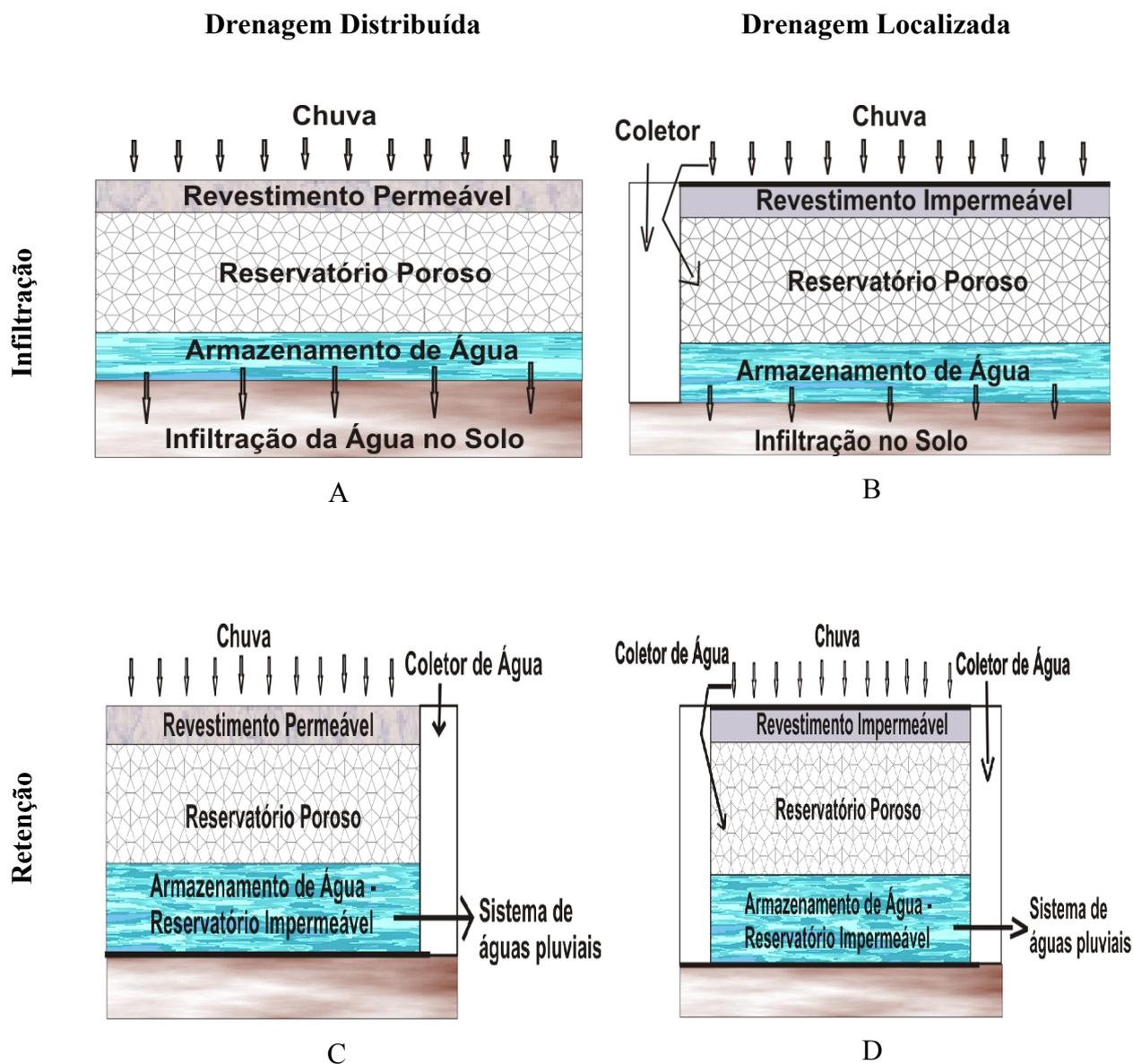


Figura 3.5: Tipos de pavimentos permeáveis de acordo com o revestimento utilizado e a função de infiltração e armazenamento.

Fonte: Adaptado de Azzout *et al.* 1994, p.62.

No caso de pavimentos sem infiltração para o solo (figura 3.5 C e D), ao invés da água ser direcionada para o sistema de drenagem, esta poderá ser reutilizada para usos menos nobres, tais como irrigação de jardins e descargas em vasos sanitários.

No que diz respeito à camada superficial do pavimento, esta pode ser construída de concreto ou de asfalto como nos pavimentos tradicionais, semipermeável, em paralelepípedo ou blocos de concreto permeável, em blocos de concreto vazado e asfalto poroso.

O corpo do pavimento é constituído de brita, sendo que o volume de vazios é de extrema importância na determinação da capacidade de armazenamento do pavimento. Mantas de geotêxtil podem ser utilizadas para prevenir a penetração de material fino para o reservatório poroso. Schueler (1987) cita que, de acordo com o armazenamento de água e a capacidade de infiltração, pode-se distinguir os pavimentos permeáveis em três categorias:

- *sistema de infiltração total*: a saída da água é feita exclusivamente através da infiltração no solo. Neste caso, o reservatório de brita deve ter uma capacidade suficiente para armazenar o volume de escoamento correspondente ao de uma chuva de projeto mesmo volume infiltrado durante a precipitação. Assim, a estrutura promove o controle total da descarga de pico, do volume e da qualidade da água para os eventos com precipitação inferior ou igual ao da chuva de projeto.
- *sistema de infiltração parcial*: é utilizado quando o solo não possui uma boa capacidade de infiltração. Neste caso, um sistema de drenagem (tubos perfurados igualmente espaçados entre si) enterrado é instalado na parte superior do reservatório. O princípio de funcionamento consiste em coletar o excesso de água que não seria retida pelo reservatório de pedras, conduzindo-a até a saída.
- *sistema de infiltração para controle da qualidade da água*: esse sistema é utilizado para captar somente o primeiro escoamento, que em inglês é conhecido como “first-flush”. Este primeiro escoamento é a parcela em que a concentração de poluentes na água é mais elevada. O excesso do volume não é tratado pelo sistema, mas conduzido diretamente através de drenos para coletores de água pluvial.

Basicamente, a escolha do tipo de pavimento permeável dependerá principalmente das condições do local de instalação, ou seja, características geotécnicas do subsolo adjacente e profundidade em que se encontra o nível do lenço freático. Com o tempo, os veículos que utilizam livremente o pavimento transportam materiais sólidos (terra ou folhas), que juntamente com partículas carregadas pelo vento acumulam-se nas aberturas superficiais do pavimento. Essas aberturas são de fundamental importância, pois são elas que dão a porosidade do pavimento, fazendo com que a estrutura funcione adequadamente. O acúmulo de partículas causa a obstrução dos poros, reduzindo a capacidade de infiltração do pavimento permeável. A figura 3.6 mostra como pode ocorrer o acúmulo de material na superfície do

pavimento. Já a figura 3.7 mostra um exemplo de pavimento permeável colmatado superficialmente.

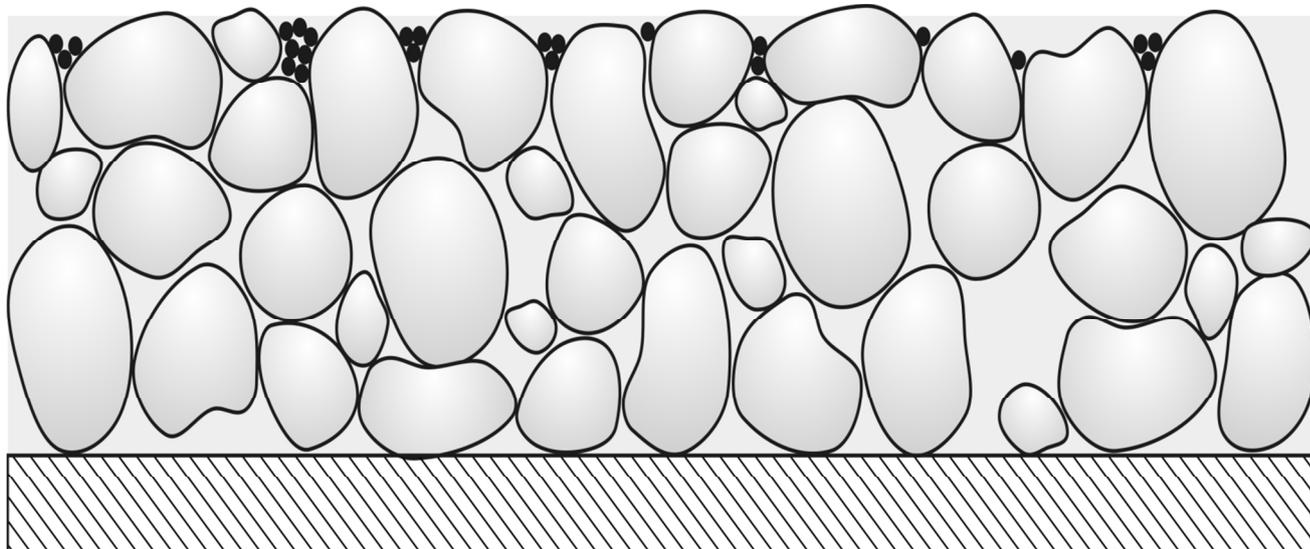


Figura 3.6: Pavimento permeável com superfície colmatada.

Estudos de infiltração superficial em pavimentos permeáveis, no Canadá, mostraram que os lotes mais antigos de blocos de concreto intertravados permeáveis tendem a ter taxas mais baixas de infiltração (36mm/h) do que instalações mais recentes (1200mm/h). Os autores indicaram que o uso de areia em vez de brita para a camada onde é assentado o bloco, é um dos possíveis fatores que contribuem para diminuir taxas de infiltração nos lotes mais antigos (STEP, 2008).



Figura 3.7: Pavimento permeável com sinais de colmatação superficial.

Fonte: EPA, 2009b

A acumulação dos sólidos pode ter as mais diversas fontes, tais como: partículas transportadas por veículos, deterioração dos pneus e presença de áreas verdes ou terrenos descobertos próximos a área do pavimento. Em locais de clima frio, em regiões com altas taxas de erosão devido a ação de ventos e em áreas de recargas de aquíferos, o uso desse tipo de pavimento deve ser evitado. Nestes casos, pode ocorrer o entupimento do pavimento pela neve, pela colmatação devido ao grande acúmulo de sedimentos na superfície do pavimento e pela poluição do lençol freático. Mesmo em locais apropriados, a instalação e a manutenção de pavimentos permeáveis devem ser feitas de forma adequada, para que seus poros não sejam rapidamente obstruídos e percam suas propriedades hidráulicas (EPA, 1999a).

Vantagens e Limitações do uso de pavimentos permeáveis:

Segundo EPA (1999a) e Baptista *et al.* (2005), as principais vantagens no uso de pavimentos permeáveis são:

- ✓ tratamento da água do escoamento superficial, através da remoção de poluentes;
- ✓ menor necessidade de construção de canais de drenagem e meio-fios;
- ✓ aumento do conforto e segurança das vias públicas devido à maior resistência a derrapagem;
- ✓ aumento da recarga de reservas subterrâneas de água.

Contudo, Baptista *et al.* (2005) citam alguns inconvenientes em relação ao uso de pavimentos que utilizam o princípio da infiltração, sendo eles:

- ✓ colmatagem do pavimento,
- ✓ poluição do lençol freático,
- ✓ aumento dos custos de operação e manutenção.

Percebe-se uma contradição no que diz respeito às vantagens e às desvantagens do uso de pavimentos permeáveis. Quer dizer, ao mesmo tempo em que os pavimentos permeáveis podem auxiliar na remoção de poluentes, podem também contaminar o lençol freático. Isso reflete a necessidade de caracterização das águas pluviais, aspectos físicos do local de instalação da estrutura e vulnerabilidade do lençol freático. Por esse motivo, estudos sobre o comportamento dessas estruturas para as condições brasileiras são de fundamental importância para verificação se as mesmas não oferecem riscos sanitários. No Brasil, existem poucos estudos experimentais que avaliam o comportamento de pavimentos permeáveis no que diz respeito ao aspecto quantitativo do escoamento superficial, dentre eles pode-se citar Silva (2006), Acioli (2005) e Araújo *et al.* (2000).

Não se tem conhecimento de estudos experimentais que avaliam o impacto qualitativo dos pavimentos permeáveis no escoamento superficial urbano no Brasil. Já na literatura internacional, alguns autores tais como Brattebo e Booth (2003), Collins (2007) e Pagotto *et al.* (2000) têm encontrado resultados positivos para utilização de pavimentos permeáveis no que diz respeito ao controle do escoamento superficial e à melhoria da qualidade da água.

Um estacionamento de pavimento permeável na Carolina do Norte – EUA – composto por cinco lotes, sendo um de concreto poroso, 2 lotes com diferentes tipos de blocos de concreto intertravados (juntas de 12,9 e 8,5%), um lote com blocos vazados de concreto e um último lote com asfalto convencional. O experimento estudado por Collins *et al.* (2008) foi monitorado de junho de 2006 a julho de 2007, sendo avaliadas as diferenças nos volumes do escoamento superficial, volumes de saídas, tempo de pico dos volumes de saída e retardos dos picos. Os autores verificaram que todos os revestimentos permeáveis diminuíram as taxas de escoamento superficiais quando comparadas com o escoamento superficial gerado pelo asfalto convencional. Dos quatro revestimentos porosos, o revestimento de blocos vazados de concreto foi o que apresentou o maior volume de escoamento superficial. Os lotes revestidos com blocos de concreto intertravados (juntas de 12,8%) e blocos vazados de concreto foram os que apresentaram significativamente volumes de escoamento total (volumes de saída) mais baixos, se comparados aos outros revestimentos porosos e ao asfalto convencional. Além disso, os blocos de concreto intertravados (juntas de 12,8%) e os blocos vazados de concreto tiveram menores picos de saída do pavimento e maior retardo de pico. Os autores verificaram também diferenças sutis de comportamento hidrológico entre os quatro revestimentos porosos, mas grandes diferenças quando comparados os pavimentos permeáveis ao revestimento de asfalto convencional.

Brattebo e Booth (2003) estudaram a durabilidade, a capacidade de infiltração e a qualidade da água de quatro diferentes tipos de pavimentos permeáveis. Os estudos realizados em Renton, Washington, revelaram que, mesmo após 6 anos de uso diário, os quatro tipos de superfície infiltraram praticamente quase toda precipitação mesmo em eventos extremos para a região (7,4mm/h). É importante ressaltar que a região estudada (Noroeste Pacífico dos EUA) se caracteriza por baixas intensidades de chuvas. A qualidade da água resultante da infiltração foi significativamente diferente e geralmente muito melhor do que se comparada com o asfalto impermeável. O estudo mostrou que o cobre e o zinco tinham concentrações abaixo dos níveis detectáveis nas quatro diferentes amostras de pavimentos permeáveis. Em

contrapartida, esses elementos tinham, em geral, uma concentração muito próxima da tóxica, no pavimento impermeável.

A região do noroeste pacífico dos EUA possui regimes de chuvas e clima distintos aos encontrados nas regiões tropicais. Os bons resultados encontrados por Brattebo e Booth (2003) podem não se aplicar em regiões de maior intensidade de chuvas, como as encontradas no sul do Brasil.

Estudos comparando módulos de pavimento permeável, pavimento asfáltico convencional acoplado com valas de biorretenção e pavimentação asfáltica convencional em Toronto, no Canadá, mostram que, para os 71 eventos monitorados, apenas um evento produziu escoamento superficial para o módulo de pavimento permeável. Para este evento, que foi o de maior magnitude, foram registrados 72 milímetros de chuva ao longo de um período de 5,5 horas. O volume de escoamento superficial, proveniente do pavimento permeável, representou menos de 10% do escoamento superficial do pavimento convencional. Já o módulo de pavimento asfáltico, acoplado com vala de biorretenção, produziu escoamento superficial para os eventos com magnitude superior a 20mm de precipitação. Mas a maior parte do escoamento anual, proveniente da vala de biorretenção infiltrada no solo, foi liberado para a atmosfera por evapotranspiração. Os resultados sugerem que essas tecnologias podem contribuir para o restabelecimento ou a manutenção de infiltração, mesmo em solos de baixa permeabilidade como os argilosos (STEP, 2008).

Um estudo foi realizado em autoestrada francesa (PAGOTTO *et al.*, 2000) com o objetivo de determinar o impacto do tipo de pavimento (convencionais e porosos) sobre o comportamento hidráulico do escoamento superficial urbano e a qualidade da água. Dados obtidos antes e depois da substituição de um asfalto convencional por um asfalto poroso são comparados. Este estudo ratifica o asfalto poroso como uma estrutura que permite uma gradual evacuação das águas urbanas, limitando pico de fluxo e aumentando o tempo de descarga. Os autores mostram que ocorreu também a melhora da qualidade da água de escoamento superficial, diminuindo as cargas de metais pesados lançadas no meio ambiente. A redução da poluição chegou a 20% para o cobre e de até 74% para o chumbo. Já os sólidos foram retidos ao nível de 87% e os hidrocarbonetos foram interceptados a um percentual ainda mais elevado, ou seja, 90%. Os autores sugerem que isso se deve basicamente a retenção de partículas finas de poluição no pavimento poroso.

Os resultados encontrados por Pagotto *et al.* (2000) sugerem que a diminuição da contaminação se dá principalmente pela retenção de sólidos suspensos; para tanto, vão ao encontro de estudos realizados por Schueler (1987), reforçando a ideia de que pavimentos permeáveis, além de serem utilizados no controle quantitativo poderão contribuir para a melhor a qualidade da água de escoamento superficial que infiltra no solo.

Na Flórida (EUA), um pavimento permeável combinado com vala de detenção, constituído por três tipos de revestimentos, foi estudado para investigar e demonstrar a aplicabilidade desse tipo de pavimentação. Foi feita uma comparação entre três superfícies, e os resultados no primeiro ano de estudo mostraram que a eficiência de remoção de carga de metais (cobre, ferro, chumbo, manganês e zinco) variou de 23 a 59% para pavimentação de asfalto e vala; 62 a 84% para o pavimento de concreto com vala e 75-92 % para o concreto poroso com vala. Em geral, os metais foram medidos em concentrações muito superiores nos lotes de áreas pavimentadas com asfalto do que nos lotes calçados com concreto. O sistema poroso em conjunto com áreas naturais descobertas atingiu 91% de eficiência de remoção de sólidos suspensos totais, sendo esse valor bem superior aos outros dois sistemas de pavimentação (LID, 2001).

Existe a possibilidade de que os bons resultados encontrados pelos autores citados acima, no que diz respeito à qualidade da água resultante da infiltração no pavimento, repitam-se para as condições brasileiras. Mas, é importante ressaltar que, apesar dos resultados extremamente positivos com uso de pavimentos permeáveis para retenção de poluentes encontrados pelos diversos autores, o bom desempenho dessas estruturas não podem ser transferidos para outras regiões. A maioria dos estudos é realizada principalmente na Europa e Estados Unidos, locais que possuem características de clima, solo e precipitação muito distintos se comparadas com as do Brasil. Por esse motivo, há necessidade de desenvolver pesquisas sobre o impacto desse tipo de técnica em nosso país, principalmente no que se refere à qualidade da água.

3.6 Telhados Verdes

Os ecotelhados, telhados verdes ou telhados vivos são estruturas que se caracterizam pela aplicação de cobertura vegetal nas edificações, utilizando impermeabilização e drenagem adequadas. Consistem basicamente em uma camada de vegetação, uma camada de substrato (onde a água é retida e a vegetação é escorada) e uma camada de drenagem responsável pela retirada da água adicional.

Os telhados verdes são estruturas que surgem como uma alternativa de cobertura capaz de proporcionar várias vantagens sobre as coberturas convencionais. Dentre as principais pode-se citar:

- ✓ diminuição da água de escoamento que seria direcionada ao pluvial;
- ✓ melhoria da qualidade da água, já que ocorre a fitoremediação através das plantas;
- ✓ melhoria nas condições de conforto ambiental das edificações e visual paisagístico;
- ✓ proteção do telhado contra a luz solar e grandes flutuações de temperatura, melhorando assim a vida útil do telhado.

Os efeitos dos telhados verdes no escoamento superficial consistem em:

- ✓ redução no volume de água escoado, já que o telhado verde é composto por plantas que têm a capacidade de reter água;
- ✓ atraso no pico do escoamento, pois ocorre absorção da água no telhado verde;
- ✓ distribuição do escoamento superficial ao longo do tempo através da diminuição da velocidade de liberação do excesso de água retido nos poros do substrato.

Esse tipo de tecnologia está sendo usada em diversos países na Europa, Estados Unidos e Austrália, onde é adotada não só em empreendimentos residenciais como também em comerciais e em industriais. Na Alemanha, país que adota os telhados verdes em grande escala, a legislação ambiental e os códigos de obras de vários estados e municípios incluem aspectos relativos a este tipo de estrutura.

Os telhados verdes podem ser usados efetivamente para reduzir o escoamento de águas pluviais dos prédios residenciais, comerciais e industriais. Servem como contraponto para o asfalto tradicional ou coberturas metálicas. Por ser composto por plantas, estes podem absorver, armazenar e evapotranspirar grande parte da precipitação. Podem ser considerados como um sistema de gestão de águas pluviais, já que reduzem consideravelmente o pico de fluxo de água que seria direcionada ao sistema de galerias de águas pluviais.

Existem algumas limitações que precisam ser observadas no momento da implementação de um telhado verde. Para a maioria dos climas, os telhados verdes precisam ser compostos por espécies de plantas tolerantes à falta de precipitação. Caso contrário, um sistema de irrigação precisará ser adotado para não comprometer a vegetação. Outro fator limitante no que se refere ao aspecto construtivo dos telhados verdes é a inclinação, que poderá variar de 0 a 40°. Além disso, os telhados verdes aumentam a carga na estrutura podendo até inviabilizar o seu uso em construções já concebidas.

Segundo Mentens *et al.* (2006), existem dois tipos de telhados verdes: os extensivos e os intensivos. Telhados verdes extensivos são aqueles em que a camada do substrato tem uma profundidade máxima de 150mm e é composto, na sua maior parte, por plantas do gênero *Sedum* (planta ornamental que tem capacidade de tolerar extremos climáticos). Esse tipo de telhado pode ser instalado em superfícies inclinadas, com um ângulo de aproximadamente 45°. Os telhados verdes intensivos são aqueles que se caracterizam por possuírem uma camada de substrato superior a 150mm. Estes são compostos principalmente por gramas, por plantas perenes e por arbustos. Esse tipo de telhado é geralmente instalado com uma inclinação menor de 10°. Dependendo do tipo de projeto e acesso, esses telhados podem servir como jardins.

Do ponto de vista construtivo, os telhados extensivos têm uma grande vantagem em relação aos intensivos. Isso se deve ao menor peso da estrutura, já que eles possuem uma camada de substrato menos espessa. Isso significa que os telhados extensivos podem ser instalados em edifícios já construídos sem a instalação de reforços na estrutura. Por outro lado, telhados verdes com substratos mais finos podem ser problemáticos, quando a construção está sendo projetada, pois estes possuem uma capacidade limitada de retenção de água e podem ser facilmente secos no período de temperaturas mais elevadas como as que ocorrem no verão (EMILSSON, 2005).

Em relação à manutenção, os telhados verdes precisam ser monitorados regularmente para garantir que a vegetação não seja comprometida. Principalmente na fase inicial, a cobertura precisa ser irrigada periodicamente, no caso de não haver precipitação suficiente. Depois da primeira temporada, geralmente, os telhados verdes extensivos necessitam apenas de aplicação de fertilizante, aproximadamente uma vez por ano. Como são compostos por vegetação, os telhados podem precisar ser podados ocasionalmente e podem exigir algum tipo de irrigação durante períodos secos. Os telhados intensivos precisam ser mantidos como qualquer outra área que contenha jardim. Isso pode demandar um serviço de jardinagem e irrigação.

Os telhados verdes são menos propensos a vazamentos do que telhados convencionais. É necessário ter, em ambas estruturas, um sistema de drenagem adequado para que o excesso de água que não fique retido e atinja a edificação. Na maioria dos casos, detectar e corrigir um vazamento em um telhado verde não é mais difícil do que fazer o mesmo para um telhado convencional (EPA, 2009a).

Mentens *et al.* (2006) revisaram 18 publicações em alemão na literatura sobre o efeito dos telhados verdes no controle do escoamento superficial. Os autores encontraram valores de capacidade anual de retenção de escoamento que pode variar de 75% para telhados verdes intensivos a 45% para telhados verdes extensivos, a taxa de precipitação varia de 554mm a 1347mm anuais. A magnitude da retenção depende da estrutura do telhado verde (número e profundidade de camadas), condições climáticas e a quantidade de precipitação. A partir de uma análise dos dados recolhidos na literatura, ficou demonstrado que a retenção é significativamente menor no inverno do que no verão, em função de diferenças na evapotranspiração e distribuição da precipitação. Os autores simularam um cenário para Bruxelas, considerando precipitação média anual de 821mm e que 10% dos telhados fossem gramados (telhados extensivos – profundidade do substrato de 100mm), a redução no escoamento superficial chegaria facilmente a 2,7% para a região e de 54% para as construções individuais.

O tipo de telhado verde a ser implementado na estrutura poderá ser intensivo, semi-intensivo ou extensivo. O modelo a ser escolhido irá depender da capacidade de carga da estrutura, no caso de edificação já existente, do orçamento disponível para a implementação, da capacidade de retenção de precipitação que se deseja alcançar, dentre outros. Os fatores que influenciam na escolha do tipo de cobertura verde são: clima, tipos de plantas escolhidas, profundidade da camada de solo e viabilidade na construção. Os telhados verdes podem ser

construídos camada por camada, e o substrato geralmente é composto por solo ou pode ser adquirido como um sistema de bandejas que contem a vegetação.

Connelly e Liu (2005) concluíram em seus estudos realizados em Vancouver que a retenção de água no telhado verde aumenta quando o evento chuvoso é antecedido por um período seco. Para um telhado verde com 75mm de espessura, um evento de 12,19mm de chuva com uma duração de 4 horas e 23 minutos e 11 dias antecedentes sem chuva, a mitigação do escoamento superficial pode chegar a 95%. Já quando ocorrem eventos sucessivos de chuva, a taxa de retenção de água pode cair para 20%.

VanWoert *et al.* (2005) realizaram estudos em Detroit, EUA, comparando o efeito de três diferentes tipos de telhados no controle do escoamento superficial urbano. A pesquisa comparou os efeitos de telhados verdes convencionais, telhados de reservatório de brita e telhados sem vegetação. Além disso, foram também avaliadas a influência da declividade e profundidade do substrato na capacidade de retenção da água. Foram estudadas declividades de 2 e 6% e profundidades de substrato de 2,4 e 6cm. Os autores encontraram retenções do escoamento superficial variando de 48% para reservatório de brita e 82,8% para telhados com vegetação. Os pesquisadores concluíram que a maior retenção para este estudo se deu a menor declividade estudada, ou seja, declividade de 2% e uma profundidade média de 4cm.

Os resultados encontrados pelos autores sugerem que quanto menor a declividade, maior a retenção de água. A pesquisa americana ainda indica que a profundidade do substrato também é um fator de forte influência nas capacidades de mitigação do escoamento superficial. Mesmo telhados extensivos com pouca profundidade têm se mostrado eficientes na redução dos escoamentos superficiais. A redução anual do escoamento superficial fica na ordem de 50% para esse tipo de telhado. Além da redução do escoamento, estes telhados podem reduzir o pico de vazão para chuvas com duração média de 20 a 30 minutos (VILLARREAL e BENGTTSSON, 2005; GRAHN e OLSSON, 2005 *apud* EMILSSON, 2005).

Moran (2004) estudou dois telhados verdes localizados na Carolina do Norte. Durante o período de monitoramento, o primeiro telhado verde reteve 62% do total de 901mm de precipitação registrada no local. O segundo telhado verde reteve 63% dos 262 milímetros de precipitação medidos no período de quatro meses (julho, agosto, novembro e dezembro). Em média, cada telhado verde reteve os primeiros 12,7 milímetros de precipitação. Ao mesmo tempo, em média cada telhado reteve aproximadamente 100% dos eventos de chuvas menores que 12,7mm. Dados deste estudo mostram que houve uma redução média da vazão de pico de

78% no primeiro telhado e de 87% no segundo. A média dos coeficientes de escoamento superficial foi desenvolvida a partir dos fluxos observados no primeiro telhado. A média dos coeficientes de escoamento superficial encontrados no estudo foi de 25% para chuvas de 25 a 39mm e de 55% para chuvas maiores que 39mm. A autora cita que a média do coeficiente de escoamento superficial para um telhado típico, sem vegetação, pode variar de 75% a 95%. Além disso, análises mostram que a água proveniente do telhado verde possui concentrações mais elevadas e maiores cargas de nitrogênio e fósforo do que na água da chuva e telhado convencional.

Os resultados encontrados por Moran (2004), mais uma vez, corroboram os achados das pesquisas citadas anteriormente, onde as coberturas verdes são atribuídas como estruturas com alta capacidade de retenção de escoamento superficial, mas as águas de drenagem proveniente destas possuem maiores cargas de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, quando comparadas à água de coberturas convencionais.

Palla *et al.* (2010) investigaram o comportamento hidrológico de telhados verdes na cidade de Gênova, na Itália. Os autores concluíram que o telhado verde é capaz de reduzir significativamente o escoamento superficial de uma tempestade, com valores de retenção de volume da ordem de 40 a 80% do volume total de chuva anual. Além disso, é esperada uma redução de cerca de 60% a 80% no pico do volume de escoamento em águas pluviais. No estudo não foram feitas análises de qualidade da água. Mas os autores citam que a qualidade da água proveniente de um telhado verde, tanto em termos de tipos de contaminantes quanto em concentração, depende de vários fatores, tais como: técnicas de construção, profundidade e composição das camadas do substrato, tipo de vegetação utilizada, presença de fontes locais de contaminação, características do meio ambiente onde está presente a cobertura (residenciais ou industriais) e idade da cobertura vegetal (tempo decorrido desde a instalação).

Estudos realizados na Pensilvânia (EUA) mostram que, para as condições locais, os telhados verdes com profundidade de 8 a 10cm retém mais de 50% da precipitação anual total. Os melhores índices de retenção são encontrados para os meses de verão, onde cerca de 95% da precipitação foi retida. No inverno, a retenção foi menor (< 20%) quando comparado a meses de maiores temperaturas. Os picos de escoamento foram atrasados e, em muitos casos, estes foram reduzidos. Os telhados verdes foram eficazes em retardar o processo e reduzir os fluxos de pico, mesmo quando os mesmos estavam saturados. Chuvas de alta intensidade e de curta duração foram atenuadas. O escoamento superficial foi reduzido até o ponto em que o sistema ficou saturado. A partir desse momento, o escoamento superficial

passou a ser aproximadamente igual à taxa de precipitação. Mesmo quando saturados, os telhados verdes aumentaram significativamente o tempo de pico do escoamento superficial, se comparados a telhados convencionais. Esses dados indicam que os telhados são uma ótima ferramenta de mitigação de águas pluviais (EPA, 2009a).

Os telhados verdes podem também contribuir com a redução da poluição urbana proveniente do escoamento, absorvendo os poluentes da atmosfera. Geralmente, a qualidade da água proveniente de telhados verdes é dependente do tipo de telhado, do tipo de espessura da camada do solo, da composição do solo, do tipo de substrato, da vegetação e do tipo de drenagem. Outro fator que interfere na qualidade da água é a manutenção, ou seja, se o telhado recebe fertilização ou não, além do tipo de área circunvizinha ao telhado. Diferenças poderão ocorrer se a área for industrial, residencial ou comercial. Também, fontes locais de poluição e intensidade de tráfego podem ser determinantes na qualidade da água (BERNDTSSON *et al.*, 2006).

Os telhados verdes, em geral, atuam como um dispositivo de armazenamento: os poluentes se acumulam nas camadas de substrato e são liberados, quando uma chuva intensa carrega os poluentes para a água de drenagem do telhado verde. Componentes precipitados podem ser lavados pela ocorrência de chuva intensa e transportados pelo fluxo de água do subsolo do substrato. Já as modificações nos parâmetros físico-químicos são ligadas principalmente com o crescimento da vegetação, interação entre o sistema radicular e o substrato, o uso de fertilizantes, a composição do solo e a camada de drenagem, que pode afetar a absorção de alguns metais e compostos orgânicos produzindo assim sua liberação. Teoricamente, os telhados verdes deveriam agir como filtros adsorventes da poluição.

Entretanto, podem também contribuir com alguns dos poluentes liberados a água do solo ou substrato, das plantas, e dos fertilizantes. Mudanças nos parâmetros físico-químicos da água, tais como o pH, podem influenciar, por exemplo, na adsorção de algum dos metais pesados causando a liberação desse composto para o excesso de água proveniente dessa estrutura. Devido a evapotranspiração, as substâncias solúveis em água podem, em determinados períodos, precipitar através do telhado verde. Durante períodos de elevada evapotranspiração, a carga da poluição dos telhados verdes será reduzida, entretanto, as chuvas seguintes poderão causar a liberação das substâncias previamente precipitadas. Segundo o mesmo autor, pouco se sabe sobre o real impacto dos telhados verdes sobre a qualidade da água de escoamento superficial (HUTCHINSON *et al.*, 2003).

Levando em consideração a afirmação dos autores, cabe ressaltar que a presença de metais no substrato dos telhados verdes pode estar relacionada com a qualidade do ambiente no entorno da cobertura. Isso poderá ser importante em regiões de grande concentração industrial. Além disso, aumentos nas concentrações de nutrientes parecem estar relacionados com a aplicação de fertilizantes. Logo, o aproveitamento da água proveniente dessas estruturas deve ser feita de forma mais criteriosa, principalmente quando feita após a aplicação de nutrientes, já que estes são fundamentais para a sobrevivência da planta.

Emilsson (2005) não encontrou claro efeito benéfico dos telhados verdes sobre os nutrientes ou influência na acumulação de metais pesados nas águas pluviais provenientes desse telhado. O autor cita que o telhado verde consome nitrogênio, mas é fonte de potássio e fósforo. No estudo foram encontradas altas concentrações de fósforo, podendo isso estar relacionado à contaminação através de dejetos de aves ou a fertilizantes adicionados durante a construção do telhado. Há, também, uma relação com o tempo de funcionamento do telhado verde. Telhados novos ou recém construídos parecem liberar taxas mais altas de fósforo. O estudo realizado por Emilsson (2005) corrobora com a ideia de que a presença de plantas na cobertura piora a qualidade da água, quando os parâmetros considerados são nitrogênio e fósforo.

Por outro lado, estudos realizados na Alemanha por Köhler *et al.* (2002) mostram que os telhados verdes têm efeitos positivos na qualidade da água proveniente do escoamento superficial desse tipo de estrutura, retendo poluente e removendo nutrientes. Os efeitos da retenção e remoção são essenciais para uma melhora da qualidade da água que é direcionada para os rios. Os autores ainda citam que a magnitude dos efeitos parece estar relacionada com a profundidade do substrato e o tipo de vegetação existente no telhado.

Berndtsson *et al.* (2006) estudaram a influência de telhados verdes na qualidade das águas pluviais na região sul da Suécia. O objetivo do trabalho foi verificar se os telhados verdes comportam-se como fontes de poluição ou se retêm os contaminantes. As cargas de poluição dos telhados verdes foram comparadas com as cargas poluidoras de telhados localizados na região de estudo que não possuíam a cobertura vegetal. As cargas de poluição anual foram calculadas baseadas nas medidas da qualidade da água, precipitação anual e volumes de escoamento superficial dos telhados. No estudo em questão foram analisados: Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Pb, Zn, NO₃-N, Nitrogênio total, Fósforo total e PO₄P. Os resultados mostram, no balanço total de cargas poluidoras anuais, que os telhados verdes retêm nitrogênio e comportam-se com uma fonte de potássio e fósforo. A exceção foi para o telhado

verde mais antigo no qual não foi aplicado fertilizante. Já a influência dos telhados verdes nas cargas anuais de metais foi menos significativa.

A água de drenagem dos telhados verdes possui uma cor amarela, tem maiores concentrações de pH e condutividade elétrica, e em geral apresenta concentrações iguais ou mais elevadas dos nutrientes e íons medidos em solução. Cargas de vários nutrientes, com exceção de nitrato e dureza das coberturas verdes foi maior do que nas coberturas tradicionais. No entanto, outras cargas de íons na água de drenagem do telhado verde não foram significativamente diferentes dos telhados convencionais. No verão, quando telhados verdes retém praticamente toda a precipitação, a carga de nitrato foi limitada. Os autores afirmam que os impactos na qualidade da água de drenagem de telhados verdes são sazonais e dependem da concentração de plantas, da precipitação e das taxas de escoamento superficial. Após a estabilização, telhados verdes tendem a diminuir as cargas de nutrientes na água de drenagem, se comparados a telhados em fase de estabilização. Ou seja, telhados verdes com vegetação recentemente plantadas (menos de um ano) tendem a ter altas concentrações de nutrientes presentes na água de drenagem quando comparados com telhados mais antigos (EPA, 2009a).

Apesar dos vários estudos existentes sobre o uso de pavimentos permeáveis e telhados no controle quali-quantitativo do escoamento urbano, percebe-se que a grande maioria das pesquisas foi feitas em países que diferem muito de condições climáticas e de solo aqui do Brasil. Por isso o desenvolvimento dessa pesquisa irá ajudar a compreender o comportamento desse tipo de estrutura para as condições brasileiras e verificar qual a melhor opção de uso para cada caso.

Verificando-se a qualidade, o excesso de água proveniente do telhado verde que escoar para o sistema de drenagem pode ser aproveitado para fins não potáveis. Isso pode reduzir a vazão para a rede pública melhorando o sistema de drenagem a jusante dos locais controlados e contribuindo assim para a diminuição dos alagamentos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa consta do estudo de dois dispositivos experimentais de controle na fonte localizados no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS).

Os dispositivos experimentais de controle na fonte se encontram instalados no IPH-UFRGS e são compostos por:

- um módulo experimental de pavimento permeável,
- um módulo experimental de ecotelhado.

4.1 Pavimento Permeável

O pavimento permeável construído consiste em um módulo experimental de estacionamento composto por reservatório de brita, que foi monitorado para avaliação desses dispositivos no controle dos excessos pluviais.

4.1.1 Descrição do módulo experimental

A obra consta de um lote de estacionamento localizado do IPH/UFRGS com uma área de 264m², com capacidade para 16 automóveis de passeio. A construção da estrutura foi iniciada em 2003, sendo finalizada em fevereiro de 2004. Após o término da estrutura, iniciou-se primeira etapa de monitoramento.

O pavimento foi dividido em duas partes iguais. Uma metade do estacionamento é revestida de asfalto poroso e a outra metade com o revestimento de blocos vazados.

Na figura 4.1 pode-se observar as dimensões principais dos dois módulos de pavimento permeável.

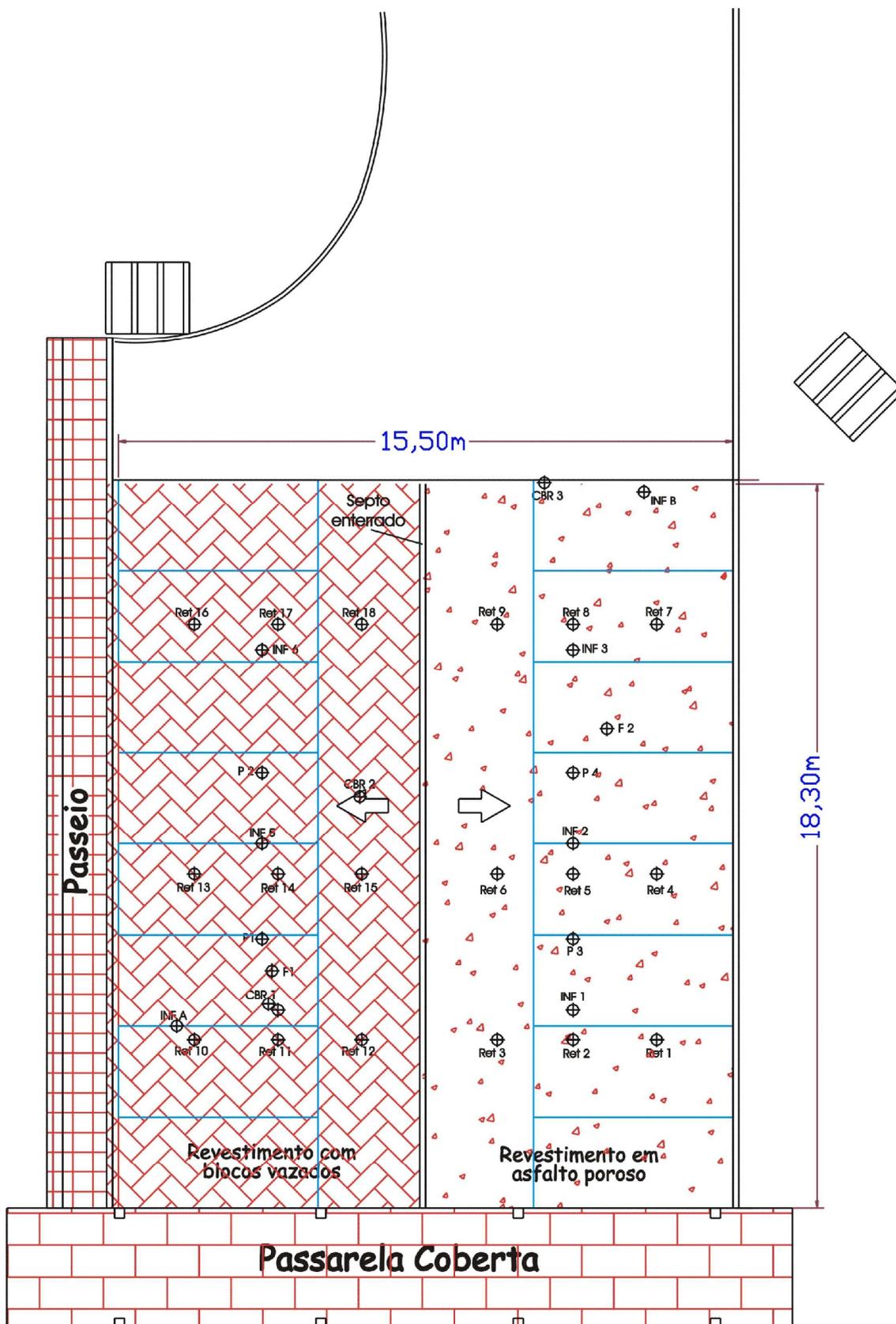


Figura 4.1: Planta baixa do pavimento permeável com suas principais dimensões

Fonte: ACIOLI, 2005, p. 41.

O revestimento de asfalto é do tipo pré-misturado a frio com granulometria aberta. Este tipo de asfalto é atualmente usado pela prefeitura de Porto Alegre para remendos em vias asfaltadas e tem a vantagem de possuir menor custo em relação ao asfalto usinado a quente. O traço utilizado na confecção do concreto foi de 60% de brita 3/4, 40% de brita 3/8 e 5% do volume de agregados em emulsão asfáltica.

Já o outro revestimento é do tipo blocos vazados intertravados de concreto tipo “S” preenchidos com areia e grama. Os blocos possuem uma altura média de 8cm e foram confeccionados segundo normas de controle tecnológico da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

O pavimento foi construído junto ao bloco de ensino do IPH, onde estão situadas as salas de aula e a biblioteca. Esta área se caracteriza por ter tráfego de veículos leves e esporadicamente ter acesso de veículos pesados, servindo basicamente como estacionamento. O pavimento construído pode ser observado na figura 4.2.



Figura 4.2: Pavimento permeável instalado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS.

Fonte: ACIOLI, 2005, p. 40.

O método utilizado no dimensionamento do volume máximo de armazenamento para o pavimento permeável foi o da curva envelope. O método consiste na derivação da equação da continuidade concentrada, sendo armazenamento máximo dado pela máxima diferença entre as curvas de volumes acumulados de entrada (H_E) e de saída (H_S) da estrutura de controle, conforme pode ser visualizado na figura 4.3.

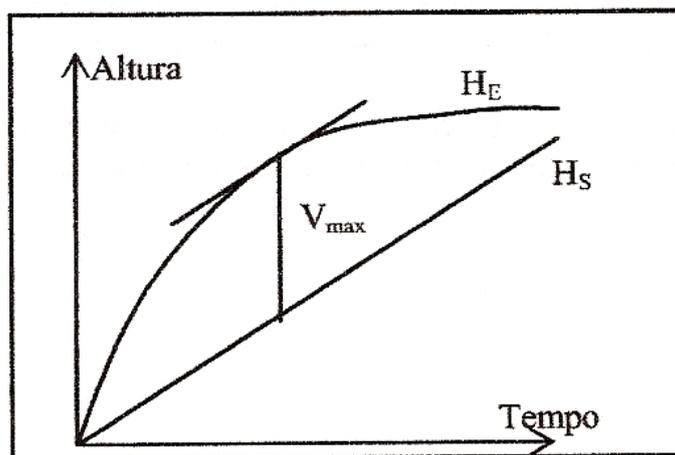


Figura 4.3: Determinação do volume de armazenamento através da máxima diferença entre a curva de entrada e a de saída da estrutura de controle.
Fonte: Urbonas e Stahre (1993), p. 235.

A camada reservatório é composta de brita e possui uma altura que varia de 26 a 34cm, garantindo assim declividade da superfície do pavimento. A altura de brita, ou seja, o volume do reservatório foi dimensionado de modo armazenar o volume d'água referente á chuva de projeto utilizada na estrutura (dimensionamento hidráulico) e também atender as solicitações impostas pelo tráfego de veículos no pavimento (dimensionamento mecânico). A metodologia para o dimensionamento hidráulico e mecânico do pavimento é descrita em Acioli (2005). O tempo de retorno (TR) utilizado para o dimensionamento do reservatório foi de 10 anos. Os ensaios e a caracterização da brita utilizada são descritos em Acioli (2005).

A camada superficial com revestimento asfáltico possui 7cm de espessura. Já a camada de revestimento com blocos está assentada em uma camada de areia de 5cm de espessura, totalizando uma altura de 13cm.

Na interface entre as camadas do pavimento permeável foi colocado filtro geotêxtil para evitar que o material atravessasse de uma camada para outra e assim prevenir a colmatção do reservatório de brita. O geotêxtil foi envolto na camada de brita com o objetivo de impedir o deslocamento de areia ou asfalto para o reservatório e também evitar que a brita migrasse para a camada de solo abaixo do pavimento. Os detalhes construtivos de cada módulo do pavimento permeável podem ser visualizados na figura 4.4.

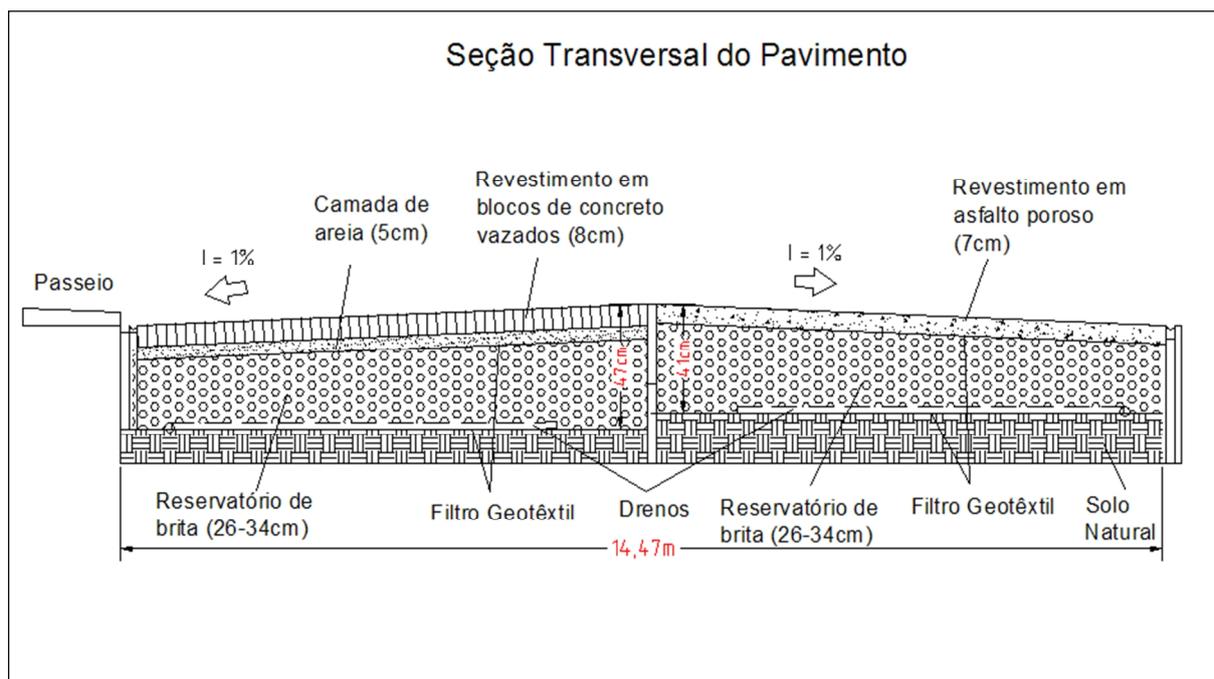


Figura 4.4: Seção transversal do pavimento permeável.
Fonte: ACIOLI, 2005, p. 40.

A entrada de água no pavimento é proveniente apenas da chuva incidente, já que a área de contribuição de escoamento superficial foi isolada. Calhas foram instaladas nos lados mais baixos do pavimento e na cobertura da passarela adjacente ao estacionamento.

Neste experimento também há diversos dispositivos de monitoramento, tais como: reservatórios coletores de escoamento superficial, calhas de coleta de escoamento superficial e sensores de nível, de modo a possibilitar o cálculo do balanço hídrico do sistema.

No monitoramento do nível de água no reservatório de brita, foram instalados em cada módulo do pavimento três poços de observação, constituídos de tubos de PVC de 75mm de diâmetro, perfurados ao longo do seu comprimento. Dentro de cada poço de observação foram instalados sensores de pressão (linígrafos) ligados a dataloggers (registradores automáticos), permitindo assim o acompanhamento constante da altura da lâmina de água no

reservatório. Para evitar danos aos cabos dos sensores, eletrodutos rígidos de uma polegada de diâmetro ligam o datalogger ao poço de observação.

Para a coleta e medição do escoamento superficial foram instaladas em cada lado do pavimento calhas semicirculares de PVC com diâmetro de 125mm. Essas calhas conduzem a água do escoamento superficial para reservatórios coletores, onde a vazão de saída é vertida para um reservatório em acrílico equipado com vertedor triangular. A carga do vertedor é medida por um sensor de pressão e os resultados armazenados no registrador automático. O vertedor utilizado no escoamento superficial foi calibrado sendo obtida a equação 4.1. Detalhes a respeito da calibração do equipamento são descritos em Acioli (2005).

$$Q = 0,0217.k^2 + 0,0079.k + 0,0032 \quad (4.1)$$

Onde:

Q = vazão (L/s)

k = carga no vertedor (cm)

Em cada lado do pavimento existe um dreno de fundo e um dreno extravasor. O dreno de fundo possui registro que permite a liberação do excesso de água que venha a ficar armazenado no reservatório de brita por um tempo superior a 72 horas. O dreno extravasor foi instalado no topo do pavimento devido a baixa permeabilidade registrada nos ensaios de infiltração no solo onde está instalado o pavimento permeável (ACIOLI, 2005). Este também possui um registro que deve ser aberto de modo a impedir o completo enchimento do reservatório de brita evitando também alagamentos na superfície dos pavimentos.

Este dispositivo experimental foi inicialmente monitorado por um período de 9 meses (maio de 2004 a janeiro de 2005), servindo de base para os estudos realizados por Acioli (2005). Após a conclusão dos estudos realizados por Acioli (2005) o módulo experimental de pavimentos permeável ficou sem monitoramento por aproximadamente 18 meses.

Por problemas de falta de financiamento, os reparos, assim como a compra e a instalação de equipamentos só puderam ser feitas no segundo semestre de 2007. Nesse período foi feita uma inspeção e foi verificado que o pavimento permeável precisava de manutenção nos eletrodutos que conduziam os cabos dos sensores, já que estes estavam bem avariados. Além disso, problemas no circuito eletrônico do datalogger também ocorreram. Foi feito o

conserto na fonte que alimentava o datalogger e a troca da rede que fornecia alimentação de energia para o sistema registrador.

A manutenção do pavimento permeável, ou seja, pinturas das faixas, reparo nos protetores dos eletrodutos, conserto e reposição dos meio-fios que impedem que os pneus dos carros danifiquem a calha do escoamento superficial foram feitos nos meses de setembro e outubro de 2007. No mesmo período foi feita a instalação dos reservatórios para coleta de água no telhado verde. Também foram instalados os sensores de nível no telhado verde.

Com a alimentação de energia funcionando, foi possível testar os sensores, onde se detectaram avarias nos sensores dos dois lados do pavimento. Do lado do asfalto poroso os três sensores que controlavam o nível do reservatório estavam danificados, já do lado blocos apenas um sensor estava funcionando. Foi feita a troca dos sensores, e o início do monitorado ocorreu no mês de dezembro.

4.1.2 Análise do comportamento hidráulico do pavimento

Para análise do comportamento hidráulico do pavimento permeável são consideradas as variáveis envolvidas no balanço. As variáveis envolvidas são: precipitação, escoamento superficial, infiltração e armazenamento. Estas variáveis são medidas nos dispositivos de monitoramento ou estimadas através de equações.

Para a análise dos eventos de chuva foi utilizada uma estação meteorológica instalada ao lado da área do estacionamento permeável. Com a estação é possível monitorar a variabilidade da precipitação.

Os fenômenos envolvidos no balanço hidráulico são divididos em: variáveis de entrada, variáveis de saída e armazenamento. Assim, tem-se a equação 4.2, onde o balanço hídrico pode ser representado:

$$Q_e(t) = Q_s(t) + S(t) \quad (4.2)$$

Onde:

$Q_e(t)$ = Vazão de entrada

$Q_s(t)$ = Vazão de saída

$S(t)$ = Armazenamento

O volume de entrada é composto somente pela precipitação direta sobre o pavimento descontado da parcela que escoia superficialmente, já que este foi isolado de contribuições do escoamento superficial. Logo o volume de entrada é representado na equação 4.3

$$Q_e(t) = P(t).A - Q_{sup} \quad (4.3)$$

Onde:

$P(t)$ = precipitação

A = área superficial do pavimento

Q_{sup} = Vazão do escoamento superficial

O armazenamento no reservatório pode ser calculado em um instante qualquer através das equações 4.4 e 4.5 (ACIOLLI, 2005).

$$\text{Se } h_i(t) < I.L = 177,4\text{mm} \rightarrow S(t) = (h_i(t).0,001)^2 \cdot \frac{B}{2.I} \quad (4.4)$$

$$\text{Se } h_i(t) > I.L = 177,4\text{mm} \rightarrow S(t) = \frac{(2.h_i(t) - I.L)}{2} .L.B \quad (4.5)$$

Onde:

$h_i(t)$ = Leitura fornecida pelo sensor i no instante t ;

I = Declividade do terreno;

L = Comprimento do reservatório na direção da declividade;

B = Lado menor do reservatório.

A infiltração é a variável que é determinada por balanço hídrico, já que não é medida pelos aparelhos. O valor é obtido através da equação 4.6.

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = Q_e - Q_s \quad (4.6)$$

Onde:

ΔS = Variação do armazenamento d'água no reservatório no instante t

Q_e = Vazão de entrada

Q_s = vazão de saída

Devido o fato de o de que o reservatório de brita do revestimento de asfalto poroso não apresentar armazenamento nesta segunda etapa de monitoramento, o principal componente para verificação do comportamento hidráulico dos revestimentos foi o percentual de escoamento superficial.

4.1.3 Análise da qualidade da água no pavimento permeável

Para análise da qualidade de água foram instalados três coletores em cada lado do pavimento permeável. Cada coletor é feito de aço inox polido e possui um diâmetro de 80cm, altura de 15cm e espessura de 6mm. Os coletores das extremidades estão localizados na parte superior do pavimento, logo abaixo do revestimento e acima do reservatório de brita. Estes coletores permitem a análise da água que entra no reservatório de brita. Já o coletor do meio localiza-se no fundo do reservatório de brita (abaixo do geotêxtil), permitindo a análise da água que está infiltrando no solo. Foram instalados reservatórios (reservatórios de 30 litros) para as coletas da água que infiltra na estrutura, tanto na parte superficial, quanto no fundo de cada módulo.

A coleta da água foi feita através de um tubo de aço inox, que liga os coletores à borda do pavimento, onde a água é retirada por gravidade. A extremidade de cada tubo foi conectada ao reservatório com capacidade de 30L.

A água que infiltra foi coletada pelos amostradores, conduzida pelo tubo e armazenada no reservatório de 30L. O acesso a extremidade dos tubos é feito através de caixas de alvenaria com 80cm x 80cm e profundidade de aproximadamente 1m. O amostrador de qualidade ligado ao reservatório de 30L é apresentado na figura 4.5.



Figura 4.5: Reservatório para análise de qualidade de água dos pavimentos permeáveis.

A coleta de amostras de água que infiltra nesta estrutura começou no dia 18/01/2008. As amostras foram analisadas para verificação da influência desta estrutura na qualidade das águas pluviais urbanas do local de estudo.

As amostras de água foram coletadas periodicamente em eventos de chuva. Nas análises da água foram considerados diversos parâmetros: incluindo características físicas e químicas.

Nos parâmetros químicos são consideradas as seguintes características da água: pH, DBO₅, DQO, fósforo total, ortofosfato, nitrogênio total, amônia, nitrito, nitrato, zinco, cobre, cádmio, ferro, chumbo, cromo, óleos e graxas.

As amostras dos dois experimentos foram coletadas sempre na parte da manhã, por volta das 9h00min. Após serem devidamente acondicionadas nos frascos, as amostras foram levadas imediatamente para o laboratório. As análises de pH e temperatura foram feitas imediatamente após a coleta.

Aproveitando uma trincheira de infiltração desativada, foram instalados coletores para captação de água proveniente do escoamento superficial. Esta trincheira foi estudada por Souza (2002) e recebe a contribuição de uma área de 450m² compreendida por um

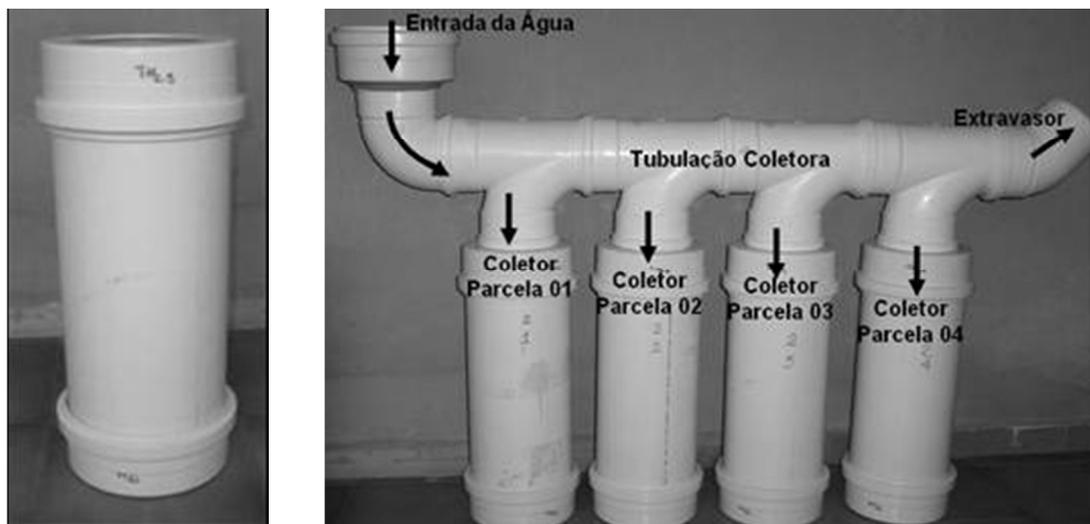
estacionamento pavimentado em paralelepípedo. Essa trincheira de infiltração fica localizada ao lado do pavimento permeável. O estacionamento da pavimentado em paralelepípedo recebe o mesmo tipo de tráfego e o mesmo fluxo de veículos que se deslocam dentro do Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Amostras não poderiam ser retiradas do experimento pavimentos permeáveis, pois isso afetaria a análise quantitativa dos eventos. Assim foram realizadas análises químicas da água do escoamento superficial em quatro eventos no ano de 2009.

É importante ressaltar que o tipo de cobertura do estacionamento da trincheira de infiltração não é o mesmo do pavimento permeável, mas mostra de uma forma aproximada a qualidade da água de escoamento superficial que provavelmente infiltra no pavimento. Parte da tubulação que conduz água do estacionamento para a trincheira de infiltração foi cortada, para instalação de tubos de PVC que continham as garrafas de amostragem de água. Os tubos conectados não foram colados, somente encaixados, sendo possível assim colocar e tirar as garrafas de amostragem. As garrafas utilizadas para coleta de amostras podem ser visualizadas na figura 4.6.



Figura 4.6: Garrafas de amostragem de escoamento superficial

O modelo de amostrador utilizado na coleta de escoamento superficial foi adaptado de Ferreira *et al.* (2008). Neste estudo os autores utilizaram diretamente o tubo de PCV para coleta sequencial de água da chuva. A figura 4.7 mostra o coletor que foi utilizado pelos autores.



A: Recipiente Coletor

B: Amostrador Sequencial e seus constituintes

Figura 4.7: Amostrador sequencial para coleta de águas pluviais.

Para o presente estudo, as garrafas foram acopladas dentro dos tubos coletores que são indicados na figura 4.8. Na extremidade da garrafa, ou seja, no bocal existe uma tampa que permite a entrada d'água até o enchimento da mesma. Após o enchimento da garrafa o sistema que está presente na tampa bloqueia a entrada de mais água, evitando a recirculação no interior da garrafa.

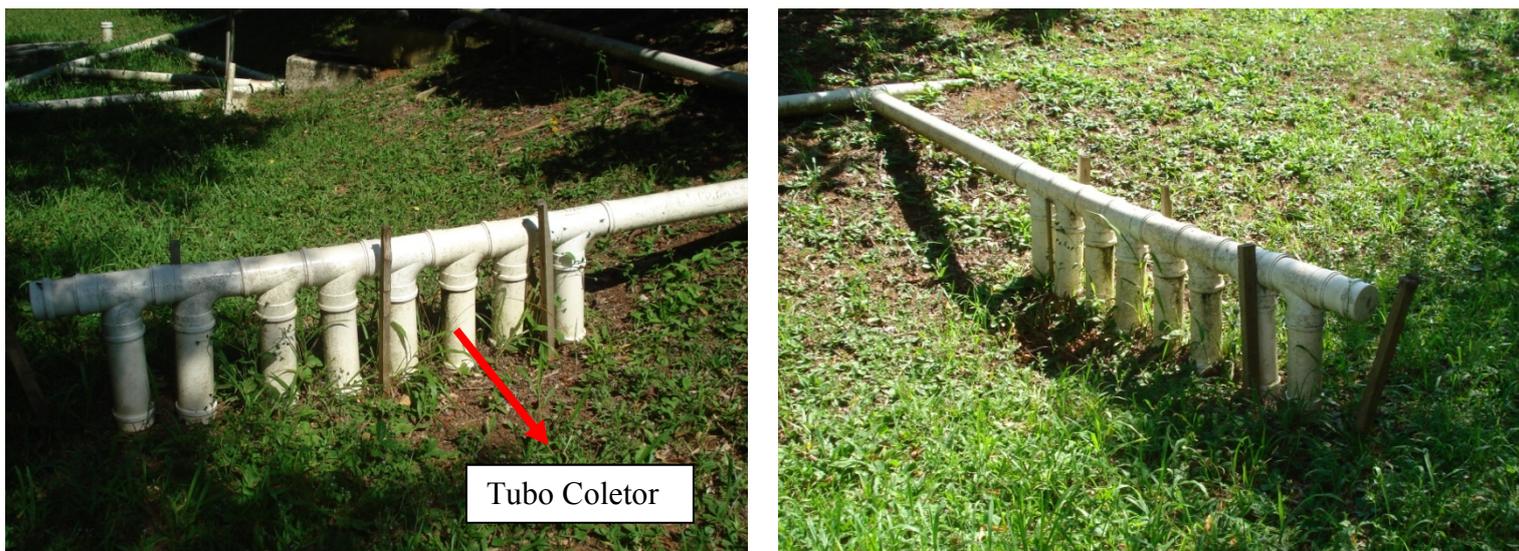


Figura 4.7: Amostradores utilizados na coleta escoamento superficial.

Amostras de água foram coletadas nos eventos 12/01/2009, 10/03/2009, 07/04/2009 e 12/05/2009. Devido ao número de parâmetros analisados e a necessidade de um volume considerável, as amostras de cada garrafa foram misturadas antes da análise.

Assim como as coletas, as análises de laboratórios foram realizadas seguindo como base métodos analíticos apresentados pelo APHA, 1998 (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater). A tabela 4.1 mostra as variáveis ambientais estudadas nos módulos de pavimento permeável e as técnicas analíticas empregadas nas análises.

Tabela 4.1: Variáveis ambientais e as técnicas de análises empregadas nas análises dos físico-químicas dos pavimentos permeáveis.

Variável	Método de Referência	Unidade	Limite de detecção
<i>pH</i>	Potenciometria	unidade de pH	0,1
<i>Temperatura</i>	Medição direta com sonda	°C	0,1
<i>Turbidez</i>	Nefelométrica (Turbidímetro B250 Micronal)	UNT	0,02
<i>Cor Aparente</i>	Método de Comparação visual	u.C	5
<i>Alcalinidade</i>	Método Titulométrico de Neutralização	(mg CaCO ₃)/L	2
<i>Sólidos Totais</i>	Gravimetria	mg/L	10
<i>Sólidos Suspensos</i>	Filtração/Gravimetria	mg/L	10
<i>DBO₅</i>	Winkler com Azida de Sódio	mg O ₂ /L	2
<i>DQO</i>	Refluxo Fechado/Titulometria	mg O ₂ /L	2
<i>Fósforo total</i>	Espectrofotometria/Ácido Ascórbico	mg/L	0,01
<i>Ortofosfato</i>	Espectrofotometria/Ácido Ascórbico	mg/L	0,01
<i>Nitrogênio total</i>	Digestão Kjeldahl/Destilação/Titulometria	mg/L	0,1
<i>Nitrogênio Amoniacal</i>	Destilação, MgO/Titulometria	mg/L	0,1
<i>Nitrato</i>	Destilação, Liga de Varda/Titulometria	mg/L	0,1
<i>Ferro</i>	ICP-OES	mg/L	0,04
<i>Zinco total</i>	ICP-OES	mg/L	0,02
<i>Cobre total</i>	ICP-OES	mg/L	0,004
<i>Cromo total</i>	ICP-OES	mg/L	0,02
<i>Cádmio Total</i>	ICP-OES	mg/L	0,002
<i>Chumbo Total</i>	ICP-OES	mg/L	0,02
<i>Óleos e Graxas</i>	Extração Soxhlet/Gravimétrico	mg/L	10
<i>Surfactantes</i>	Espectrofotometria/Azul de metileno	mg/L	0,01
<i>Coliformes totais</i>	Tubos múltiplos	NMP/100mL	2
<i>Coliformes termotolerantes</i>	Tubos múltiplos	NMP/100mL	2

4.2 Cobertura Verde

A cobertura verde instalada no IPH/UFRGS está localizada ao lado do pavimento permeável e pode ser visualizado na figura 4.9. O módulo experimental foi instalado no IPH em julho de 2006, cedido pela empresa Ecotelhado[©] e é um dispositivo composto por quatro módulos de 4m² cada.



Figura 4.8: Cobertura verde instalada no IPH/UFRGS.

4.2.1 Descrição do módulo experimental

Os módulos que constituem o experimento são:

- Módulo horizontal com cobertura verde (terraço);
- Módulo horizontal sem cobertura verde (terraço);
- Módulo com declividade de 15° (graus) com presença de cobertura verde (telhado);
- Módulo com declividade de 15° (graus) sem presença de cobertura verde (telhado).

Neste experimento um módulo de telhado e um módulo de terraço são constituídos por ecotelhas. Além da ecotelha, o módulo do telhado verde é composto por duas membranas, uma para a retenção de água e nutrientes e outra anti-raízes. A membrana para a retenção de raízes é colocada abaixo da membrana de retenção de água e nutrientes. A figura 4.10 mostra um exemplo de como é feita a instalação das membranas nesse tipo de telhado.



Figura 4.9: Colocação das membranas em um telhado verde.

A figura 4.11 mostra em detalhes a instalação da ecotelha, que se encontra acima da membrana para retenção de água e nutrientes e membrana para a retenção de água.



Figura 4.10: Instalação do telhado verde no Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS.

A ecotelha é um conjunto formado por substrato rígido, um substrato leve e as plantas. O substrato rígido é composto de EVA (Etileno-acetado de vinila) moído misturado a cimento CP-IV com adição de cinzas e nutrientes essenciais. Os nutrientes presentes no substrato rígido são liberados a longo prazo. Tanto o substrato rígido quanto o substrato leve são feitos de materiais reciclados, o EVA é um resíduo muito comum em empresas do ramo calçadista. O substrato rígido tem a função de reter o substrato nutritivo, proporcionar alta capacidade de drenagem de água sem carrear o substrato nutritivo, proporcionar oxigenação das raízes além de evitar o amassamento das mesmas.

O substrato leve e nutritivo é composto por materiais de origem orgânica e sintéticos, tais como, nylon e matéria orgânica. Sua finalidade é de dar suporte a planta, possibilitando baixa carga na base da cobertura, além de gerar grande poder de retenção de água e nutrientes.

Os dois substratos proporcionam retenção de água e drenagem do excedente. Cada ecotelha possui 35cm de largura, 68cm de comprimento e 6cm de espessura. A ecotelha já é fornecida plantada e enraizada, pronta para o uso.

Neste experimento, para cada módulo existem dois reservatórios de coleta de água com capacidade de 200 litros cada. O primeiro reservatório está ligado diretamente através de tubulações a um dreno. Este dreno está localizado na parte mais baixa do módulo, para que a água seja conduzida por gravidade ao primeiro reservatório. O segundo reservatório foi interligado ao primeiro, para servir como vertedouro no caso de o primeiro reservatório extravasar. Sensores de níveis ligados a um datalogger estão instalados no primeiro reservatório, permitindo assim que se monitore a quantidade de água da chuva que o telhado verde consegue segurar, além do tempo em que começa o escoamento do mesmo.

No lado que possui a ecotelha o reservatório irá captar o excesso de água que não é retido pelas plantas. Já o lado que simula um telhado convencional, a água captada é a que escorre diretamente para o sistema público de águas pluviais. Sendo assim é possível fazer o balanço hídrico para verificar a eficácia da estrutura na retenção de água da chuva. O experimento é apresentado na figura 4.12.



Figura 4.11: Cobertura verde instalada no IPH/UFRGS.

Embora as plantas sejam perenes, é indicado que se faça uma manutenção no telhado verde de uma ou duas vezes por ano para retirada de insetos que possam ter sido trazidos e depositados pelos pássaros. Recomenda-se fazer uma fertilização leve à base de NPK. Utilizam-se principalmente plantas do gênero *Sedum* da família das *Crassulaceas*, que sobrevivem em solo raso. Na ecotelha, além do *Sedum* também está presente a *Callisia repens* e a *Portulaca grandiflora*.

4.2.2 Análise do balanço hídrico da Cobertura Verde

A análise do balanço hídrico da cobertura verde é feita de forma similar a técnica utilizada nos pavimentos permeáveis. As variáveis envolvidas no balanço hídrico são: variáveis de entrada, armazenamento e variáveis de saída. Sendo assim, a equação do balanço hídrico do ecotelhado é:

$$Q_e(t) = Q_s(t) + S(t) \quad (4.9)$$

Onde:

$Q_e(t)$ = Vazão de entrada

$Q_s(t)$ = Vazão de saída

$S(t)$ = Armazenamento

A vazão de entrada no ecotelhado é composta pela precipitação. Já a vazão de saída é constituída pela evapotranspiração e escoamento superficial (excesso de escoamento que não ficou retido pelas raízes). O armazenamento é a quantidade de água retida na ecotelha.

Por não termos condições de verificar através de pesagem o volume de água presente na ecotelha antes e depois de cada evento, não foi estimada a evapotranspiração deste módulo experimental.

Assim teremos:

$$\Delta S_t = P_t - (ET_t + E_{sup_t}) \quad (4.10)$$

$$\Delta S_t = P_t - E_{sup_t} \quad (4.11)$$

Onde:

ΔS_t = armazenamento de água na ecotelha;

P_t = Precipitação total;

ET_t = Evapotranspiração total;

E_{supt} = Escoamento superficial total.

Para a análise da precipitação foi utilizada uma estação meteorológica *Vantage Pro 2* da marca *Davis*, mesma utilizado no experimento pavimento permeável e que está instalada ao lado da cobertura verde. Com a estação meteorológica foi possível monitorar a variabilidade da precipitação, já que a estação estava programada para medir dados de 5 em 5 minutos.

Antes do monitoramento, os reservatórios que recebem o excesso de água foram calibradas. Foram feitas as curvas volumétricas de cada reservatório de modo que de a cada valor de altura registrada no sensores de nível, representasse uma volume conhecido. Foram feitos 13 pontos de calibração em cada reservatório e as curvas encontradas são:

- $y = 0,2367.x$ e $R^2 = 0,9975$ para terraço sem cobertura verde,

- $y = 0,2444.x$ e $R^2 = 0,9932$ para telhado cem cobertura verde,

- $y = 0,2415.x$ e $R^2 = 0,9919$ para telhado com cobertura verde;

- $y = 0,2394.x$ e $R^2 = 0,9923$ para terraço com cobertura verde.

O valor de x representa a leitura no sensor de nível e y representa o volume do reservatório.

4.2.3 Análise da qualidade da água no Ecotelhado

Os telhados com cobertura vegetal são responsáveis pela retenção de grande parte da água da precipitação que incide sobre eles. Embora em alguns eventos a retenção da água da chuva seja de 100%, em vários casos pode surgir escoamento superficial nessas estruturas. Essa parcela de água seria encaminhada ao sistema de drenagem convencional pode ser aproveitada para usos não potáveis. Além de não causar impactos nos sistemas clássicos de drenagem urbana, o aproveitamento desta parcela de escoamento pode contribuir a solucionar os problemas relativos a escassez de água. Mas é importante ressaltar que o aproveitamento é possível, desde que haja uma caracterização, ou seja, um controle de sua qualidade e verificação da necessidade de tratamento adequado, de forma que não comprometa a saúde de seus usuários, nem a vida útil dos sistemas envolvidos.

Sendo assim, foi de suma importância ter o conhecimento das características físicas e químicas da água de escoamento proveniente das coberturas verdes. Conhecendo as características físico-químicas da água é possível escolher o tratamento adequado que não demande custo excessivo. Dependendo da qualidade da água e do tratamento utilizado, esta poderá ter diversos fins tais como:

- ✓ irrigação,
- ✓ rega de jardins,
- ✓ lavagem de pisos,
- ✓ descarga em bacias sanitárias,
- ✓ lavagem de veículos, etc.

Da mesma forma que no experimento pavimentos permeáveis, as amostras de água foram coletadas periodicamente e em eventos de chuva.

As amostras foram retiradas do primeiro reservatório de coleta, que possui torneiras na parte mais inferior do mesmo. A torneira é utilizada para a coleta de amostra e esvaziamento do reservatório. A figura 4.13 mostra a coleta de água no reservatório. Após a coleta, as amostras foram levadas ao laboratório para as análises mais imediatas. Para as análises são considerados os parâmetros físicos e químicos.

Os parâmetros físicos analisados foram: cor aparente, turbidez e sólidos suspensos. Já os parâmetros químicos considerados serão: pH, DBO, DQO, fósforo total, ortofosfato, nitrogênio total, amônia, nitrato, zinco, cobre, cádmio, ferro, chumbo e cromo.



Figura 4.12: Coleta de amostra de água no reservatório da cobertura verde.

Após cada evento de chuva, os reservatórios foram limpos para evitar acúmulo de resíduo. Dessa maneira, a contaminação de ocorreu em um evento não interferiu no evento seguinte. Assim como as coletas realizadas no pavimento permeável, as análises de laboratórios foram realizadas seguindo como base métodos analíticos apresentados pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998, 20th ed., Washington D.C.). A tabela 4.2 mostra as variáveis ambientais estudadas no módulo experimental com e sem coberturas verdes e as técnicas analíticas empregadas nas análises.

Tabela 4.2: Variáveis ambientais e as técnicas de análises físico-químicas empregadas nos módulos experimentais com e sem cobertura vegetal.

Variável	Método de Referência	Unidade	Limite de detecção
<i>pH</i>	Potenciometria	unidade de pH	0,1
<i>Temperatura</i>	Medição direta com sonda	°C	0,1
<i>Turbidez</i>	Nefelométrica (Turbidímetro B250 Micronal)	UNT	0,02
<i>Cor Aparente</i>	Método de Comparação visual	uC	5
<i>Sólidos Totais</i>	Gravimetria	mg/L	10
<i>Alcalinidade</i>	Método Titulométrico de Neutralização	(mg CaCO ₃)/L	2
<i>Sólidos Suspensos</i>	Filtração/Gravimetria	mg/L	10
<i>DBO₅</i>	Winkler com Azida de Sódio	mg O ₂ /L	2
<i>DQO</i>	Refluxo Fechado/Titulometria	mg O ₂ /L	2
<i>Fósforo total</i>	Espectrofotometria/Ácido Ascórbico	mg/L	0,01
<i>Ortofosfato</i>	Espectrofotometria/Ácido Ascórbico	mg/L	0,01
<i>Nitrogênio total</i>	Digestão Kjeldahl/Destilação/Titulometria	mg/L	0,1
<i>Nitrogênio Amoniacal</i>	Destilação, MgO/Titulometria	mg/L	0,1
<i>Nitrato</i>	Destilação, Liga de Varda/Titulometria	mg/L	0,1
<i>Zinco total</i>	ICP-OES	mg/L	0,02
<i>Cobre total</i>	ICP-OES	mg/L	0,004
<i>Cromo total</i>	ICP-OES	mg/L	0,02
<i>Ferro total</i>	ICP-OES	mg/L	0,04
<i>Cádmio Total</i>	ICP-OES	mg/L	0,002
<i>Chumbo Total</i>	ICP-OES	mg/L	0,02
<i>Coliformes totais</i>	Tubos múltiplos	NMP/100mL	2
<i>Coliformes termotolerantes</i>	Tubos múltiplos	NMP/100mL	2

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos dois experimentos, pavimentos permeáveis e coberturas verdes são apresentados nos itens a seguir.

5.1 Pavimentos Permeáveis

5.1.1 Análise do Comportamento Hidrológico – Pavimento Permeável

No estudo hidráulico-hidrológico realizado no pavimento por Acioli (2005), a autora avaliou:

- ✓ as precipitações, com análise dos eventos e cálculo dos TR;
- ✓ coeficiente de escoamento superficial para cada revestimento;
- ✓ armazenamento no reservatório de brita para estimativas das taxas de infiltração.

Para possibilitar a comparação dos resultados obtidos nesta pesquisa com os encontrados por Acioli (2005), foi utilizado o mesmo critério para separação dos eventos bem como a mesma metodologia de cálculo. Segundo Bertrand-Krajewski *et al.* (2000) *apud* Acioli (2005), dois eventos chuvosos são independentes quando os efeitos ocasionados pelo primeiro cessaram antes do início do segundo evento. Logo para este estudo, foram considerados eventos independentes quando o reservatório de brita do pavimento permaneceu sem água por um período igual ou superior a 12 horas.

Um resumo dos resultados obtidos na primeira etapa (maio a novembro de 2004) do monitoramento do pavimento permeável (ACIOLI, 2005) é mostrado nas tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1: Coeficientes de escoamento superficial dos Pavimentos Permeáveis – Primeira etapa do monitoramento.

Data	Precipitação (mm)	Coef. de escoamento (%)	
		Asfalto poroso	Blocos vazados
04/05/2004	62,5	SD	0,0
07/05/2004	32,3	SD	1,4
14/05/2004	22,6	0,8	0,0
23/05/2004	9,1	SD	0,0
25/05/2004	23,4	SD	0,0
10/06/2004	83,1	5,0	1,0
24/06/2004	20,1	0,7	0,0
01/07/2004	30,7	SD	0,0
03/07/2004	24,4	1,8	1,8
07/07/2004	9,7	0,0	0,0
14/07/2004	35,6	7,3	0,0
30/07/2004	55,1	9,5	0,0
06/08/2004	20,8	3,6	5,4
17/08/2004	32,5	6,1	3,8
10/09/2004	46,2	8,2	1,1
20/09/2004	115,8	7,7	9,8
28/09/2004	20,8	3,6	5,4
16/10/2004	37,1	6,2	4,5
18/10/2004	15,2	7,2	3,0
03/11/2004	18,5	2,2	0,0
05/11/2004	17,0	3,0	0,0
10/11/2004	90,4	13,5	12,8
	Média	5,08	2,27
	Desv. Pad.	3,62	3,49

Legenda: SD=sem dados.

Fonte: ACIOLI, 2005, p.101.

Tabela 5.2: Resumo dos dados de armazenamento para os eventos analisados - Primeira etapa do monitoramento.

Evento	Total Precip (mm)	Volume Precip. (m ³)	Duração chuva (h:m)	Lado A		Lado B	
				Vol. max (m ³)	Tempo Armaz. (h:m)	Vol. max (m ³)	Tempo Armaz. (h:m)
04/05/2004	62,5	8,24	22:03	SD	SD	0,93	34:26
07/05/2004	32,3	4,25	42:02	SD	SD	0,55	35:26
14/05/2004	22,6	2,98	28:26	0,20	9:56	1,15	9:56
23/05/2004	9,1	1,21	4:52	SD	SD	1,26	8:25
25/05/2004	23,4	3,08	5:52	SD	SD	1,16	17:31
10/06/2004	83,1	10,96	13:55	1,52	13:08	1,47	27:58
24/06/2004	20,1	2,65	11:34	0,07	3:32	0,88	18:21
01/07/2004	30,7	4,05	6:40	SD	SD	1,71	19:54
03/07/2004	24,4	3,22	6:39	0,20	4:51	1,06	15:27
07/07/2004	9,7	1,27	3:38	-	-	0,72	6:03
14/07/2004	35,6	4,69	26:07	0,23	27:58	0,88	40:29
30/07/2004	55,1	7,27	39:33	0,18	30:14:	0,73	45:31
06/08/2004	20,8	2,75	5:22	0,28	5:56	0,28	18:09
17/08/2004	32,5	4,29	42:43	0,17	13:03	1,82	40:49
10/09/2004	46,2	6,10	27:11	0,30	21:46	0,67	38:13
20/09/2004	115,8	15,28	59:19	0,97	60:35	0,80	72:28
28/09/2004	20,8	2,75	5:22	0,28	5:56	0,28	18:09
16/10/2004	37,1	4,89	12:00	0,53	10:12	0,41	18:08
18/10/2004	15,2	2,01	0:57	0,47	5:02	0,25	10:10
03/11/2004	18,5	2,45	3:50	0,46	3:58	0,27	3:20
05/11/2004	17,0	2,24	10:35	0,29	5:35	0,36	11:16
10/11/2004	90,4	11,93	48:28	1,93	25:35	0,41	60:26

Legenda: SD=sem dados; - = não houve armazenamento.

Fonte: ACIOLI, 2005, p.106.

Já os resultados obtidos na segunda etapa de monitoramento do revestimento de asfalto poroso e blocos vazados de 17 eventos de chuva durante os meses de dezembro de 2007 a agosto 2009 são apresentados a seguir.

Nas tabelas 5.3 e 5.4 são apresentados a precipitação total (mm), duração da chuva (horas), o tempo de retorno da precipitação (anos), precipitação total sobre o pavimento (m^3), intensidade média da precipitação (mm/h), o percentual do escoamento superficial (%), volume máximo armazenado no reservatório (m^3), tempo total de armazenamento no (horas) e o tempo esvaziamento depois de cessada a chuva (horas) para cada um dos revestimentos, para a segunda etapa de monitoramento (2007-2009).

O tempo de retorno da precipitação de cada evento foi calculado através da curva IDF (Intensidade-Duração-Frequência) para posto do IPH, de acordo com as diretrizes fornecidas DOP/DEP (Divisão de Obras e Projetos do Departamento de Esgotos Pluviais) da Prefeitura de Porto Alegre. A equação utilizada foi representada por:

$$i_{\text{máx}} = \frac{509,859 \times TR^{0,196}}{(td + 10)^{0,72}}$$

Onde:

$i_{\text{máx}}$ = intensidade máxima de chuva (mm/h);

TR = período de retorno (anos);

td = tempo de duração da chuva (minutos).

Tabela 5.3 Resumo dos eventos de chuva para o lado com revestimento de Asfalto Poroso – segunda etapa de monitoramento.

Revestimento: Asfalto Poroso									
Parâmetros Analisados									
Eventos	Precip. total (mm)	Tempo da Precip. (horas)	TR da Precip. (anos)	Precip. total sobre o pavimento (m³)	Intens. Méd. da Precip. (mm/h)	Escoam. Superficial (%)	Vol. Max. Armaz. (m³)	Tempo total de armazen. (horas)	Tempo de esvaziamento depois de cessada a chuva (horas)
24/12/07	25,13	04:30:00	0,10	3,31	5,58	3,69	0,13	02:00:00	00:30:00
28/12/07	26,9	21:15:00	0,01	3,55	1,27	20,18	0,085	03:30:00	03:45:00
30/01/08	29,6	93:45:00	0,003	3,9	0,3	0	0,078	04:30:00	-
09/02/08	71,01	81:45:00	0,27	9,4	0,9	1,4	1,172	09:00:00	-
28/05/08	66,33	34:55:00	0,65	8,7	1,9	18,5	0,015	01:35:00	-
07/06/08	71,58	55:00:00	0,50	9,44	1,30	s.d	s.d	s.d	s.d
27/07/08	139,54	71:50:00	10,29	18,4	1,94	48,5	s.a	s.a	s.a
16/08/08	84,84	117:55:00	0,40	11,19	0,72	61,4	s.a	s.a	s.a
05/09/08	100,37	51:30:00	3,13	13,27	1,95	10,7	s.a	s.a	s.a
04/10/08	28,06	12:15:00	0,04	3,70	2,29	34	s.a	s.a	s.a
25/10/08	64,85	41:55:00	0,45	8,55	1,55	58	s.a	s.a	s.a
08/01/09	23,51	14:05:00	0,01	3,13	1,69	22	s.a	s.a	s.a
07/07/09	39,41	54:35:00	0,02	5,2	0,72	41	s.a	s.a	s.a
01/08/09	22,7	06:35:00	0,03	3	3,45	22	s.a	s.a	s.a
06/08/09	193,34	102:00:00	33	25	1,90	51	s.a	s.a	s.a
17/08/09	62,15	94:35:00	0,11	8,20	0,66	44	s.a	s.a	s.a
24/10/09	33,89	15:45:00	0,07	4,47	2,15	s.d	s.d	s.d	s.d

s.d – sem dados; s.a – sem armazenamento no reservatório

Tabela 5.4: Resumo dos eventos de chuva para o lado com revestimento de Blocos Vazados – segunda etapa de monitoramento.

Revestimento: Blocos Vazados									
Parâmetros Analisados									
Eventos	Precip. total (mm)	Tempo da Precip. (horas)	TR da Precip. (anos)	Precip. total sobre o pavimento (m ³)	Intens. Méd. da Precip. (mm/h)	Escoam. superficial (%)	Vol. Max. Armaz. (m ³)	Tempo total de Armaz. (horas)	Tempo de esvaziamento depois de cessada a chuva (horas)
24/12/07	25,13	04:30:00	0,10	3,31	5,58	5,84	1,83	36:30:00	12:15:00
28/12/07	26,9	21:15:00	0,01	3,55	1,27	11,18	1,94	46:45:00	44:00:00
30/01/08	29,6	93:45:00	0,003	3,9	0,3	0	1,8	23:15:00	10:00:00
09/02/08	71,01	81:45:00	0,27	9,4	0,9	s.d.	3,7	58:15:00	4:15:00
28/05/08	66,33	4:55:00	0,65	8,7	1,9	1	0,67	51:35:00	19:55:00
07/06/08	71,58	55:00:00	0,50	9,44	1,30	7,5	0,86	77:35:00	23:55:00
27/07/08	139,54	71:50:00	10,29	18,4	1,94	5,1	0,83	101:15:00	29:25:00
16/08/08	84,84	117:55:00	0,40	11,19	0,72	1	0,79	122:30:00	14:35:00
05/09/08	100,37	51:30:00	3,13	13,27	1,95	0	0,82	45:40:00	21:00:00
04/10/08	28,6	12:15:00	0,04	3,70	2,29	9	0,53	29:50:00	22:00:00
25/10/08	64,85	41:55:00	0,45	8,55	1,55	14	0,59	51:45:00	12:05:00
08/01/09	23,51	10:55:00	0,02	3,10	2,15	0	0,44	24:10:00	11:50:00
07/07/09	39,41	54:35:00	0,02	5,2	0,72	6	0,91	91:15:00	39:05:00
01/08/09	22,7	06:35:00	0,03	3	3,45	11	0,5	47:45:00	46:30:00
06/08/09	193,34	102:00:00	33	25	1,90	s.d	1,19	115:50:00	22:50:00
17/08/09	62,15	94:35:00	0,11	8,20	0,66	11	2,73	101:20:00	16:15:00
24/10/09	33,89	15:45:00	0,07	4,47	2,15	15	0,66	87:40:00	68:50:00

s.d – sem dados

Os resultados mostram que, para os 17 eventos estudados nesta segunda etapa de monitoramento, o asfalto poroso apresentou um escoamento superficial bem maior que o revestimento de blocos vazados. Para de eventos de dezembro de 2007 a outubro de 2009 considerando o revestimento de asfalto poroso, o escoamento superficial máximo foi de 61,4%. Esse valor supera em 455% o maior escoamento superficial na 1ª etapa de monitoramento. A média de escoamento superficial dos 17 eventos analisados revestimento asfalto poroso foi de aproximadamente 30%. Já o coeficiente de escoamento superficial para o revestimento com blocos vazados foi de no máximo de 15%. Isso representou um aumento no escoamento máximo de 17,2%, quando comparados com os da primeira etapa de monitoramento. Estes resultados são superiores aos resultados obtidos anteriormente por Acioli (2005), principalmente para o revestimento de asfalto poroso, quando o máximo escoamento observado ficou próximo de 10%, para os 2 tipos de revestimentos.

Os maiores escoamentos superficiais para os dois revestimentos foram alcançados em eventos distintos. O maior escoamento do asfalto poroso se deu no dia 16 de agosto de 2008. Já para os blocos vazados o maior escoamento ocorreu no dia no evento do dia 24 de outubro de 2009. Em ambos os revestimentos, os maiores coeficientes de escoamento não coincidiram com os maiores volumes precipitados.

As diferenças de comportamento no controle de escoamento superficial para os revestimentos eram esperadas. O revestimento de blocos vazados por ter aberturas maiores que as do asfalto poroso, é mais eficiente na retenção da água. As partes vazadas dos blocos funcionam como reservatório, onde mesmo que a chuva exceda a capacidade de infiltração do pavimento, existe um armazenamento da chuva excedente (Acioli, 2005). Os resultados encontrados são convergentes com os estudos realizados por Collins *et al.* (2008). Os resultados obtidos por Collins *et al.* (2008) no que se refere aos baixos índices de escoamento superficial para pavimentos permeáveis também foram encontrados neste pavimento permeável, tanto na primeira etapa de monitoramento (ACIOLI, 2005) quanto na segunda etapa que foi realizada pelo presente estudo.

Para o revestido de asfalto poroso, os dados indicam que a capacidade de escoamento foi aumentada a partir do segundo semestre de 2008, coincidindo com a falta de armazenamento no reservatório de brita. Isso demonstra que este revestimento tem o funcionamento muito comprometido se comparado com os blocos vazados. Na figura 5.1 pode-se observar a comparação entre os dois revestimentos, ou seja, asfalto poroso e blocos vazados no que diz respeito ao escoamento superficial. Pode-se observar nesta figura, que os valores em vermelho, que representam o asfalto poroso têm valores bem superiores aos do pavimento blocos vazados (valores em azul).

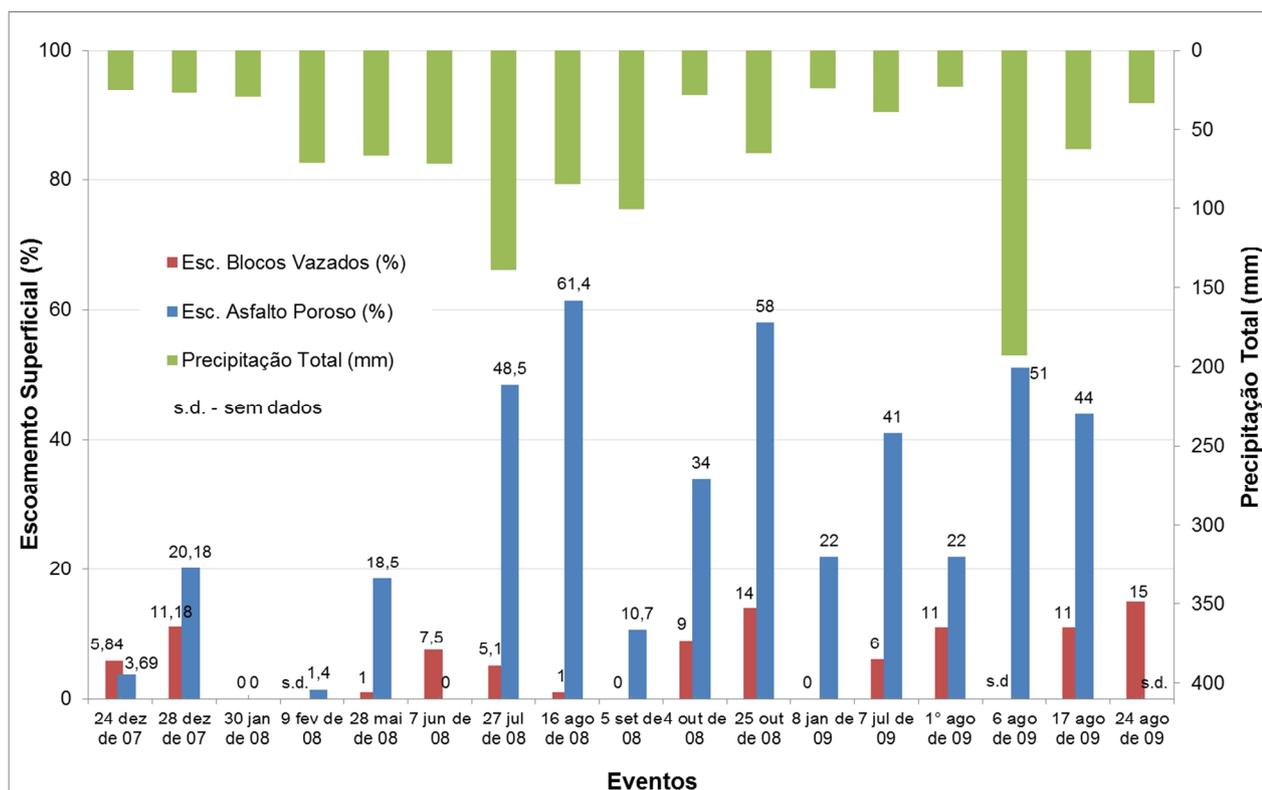


Figura 5.1: Comparação dos valores de escoamento superficial para os revestimento de asfalto poroso e blocos vazados durante o período de estudo (segunda etapa de monitoramento do dispositivo).

Comparando o maior evento encontrado por Step (2008) com o valor similar de intensidade média da chuva encontrada por Acioli (2005) na fase inicial do monitoramento deste pavimento, foi verificado que para eventos com intensidade de chuva similares, ou seja, 16mm/h no estudo brasileiro e aproximadamente 13mm/h no estudo francês, os escoamento superficiais foram inferiores a 10%.

Outro fator importante que diz respeito ao comportamento hidrológico do pavimento é o armazenamento de água no reservatório. Esse fator é de fundamental importância, pois mostra também como está a capacidade de infiltração da água para o subsolo. Para todos os eventos analisados foi observada uma defasagem entre o início da precipitação e o início da do armazenamento no reservatório para os dois revestimentos. Essa diferença entre o início da chuva e a resposta no reservatório de brita parece depender da intensidade da precipitação, das condições antecedentes de umidade do pavimento e também do tempo que a água leva para se distribuir nos poços de sensores de nível presentes dentro do pavimento. A tabela 5.5 mostra os valores da defasagem para ambos os revestimentos.

Tabela 5.5: Defasagem entre o início do armazenamento e o início precipitação.

Eventos	Tempo de defasagem após início da precipitação	
	Blocos Vazados	Asfalto Poroso
24/12/07	3h15min	3h
28/12/07	18h30min	21h15min
30/01/08	2h45min	9h
09/02/08	27h45min	28h15min
28/05/08	3h15min	3h40min
07/06/08	1h25min	s.d.
27/07/08	8h55min	s.a.
16/08/08	2h55min	s.a.
05/09/08	8h30min	s.a.
04/10/08	4h20min	s.a.
25/10/08	2h:15min	s.a.
08/01/09	1h45min	s.a.
07/07/09	2h25min	s.a.
01/08/09	5h35min	s.a.
06/08/09	2h25min	s.a.
17/08/09	5h30min	s.a.
24/10/09	2h35min	s.a.

s.d – sem dados

s.a – sem armazenamento no reservatório

Os valores das defasagens para o revestimento de blocos vazados variaram de 27h45min, para a máximo e de 1h25min para o mínimo. Esta análise para o asfalto poroso não pode ser feita de uma maneira adequada, pois a partir do segundo semestre de 2008 não foi mais detectado armazenamento neste revestimento. A defasagem para o asfalto poroso em 5 eventos (Dezembro de 2007 a Maio 2008) foi de 28h15min para o máximo e de 3h para mínima defasagem.

Acredita-se que os valores de defasagem dependam de diversos fatores tais como: características da chuva (intensidade e duração), condições de umidade inicial do pavimento, frequência da precipitação e colmatação do revestimento.

Para os cinco eventos onde foi possível fazer a comparação da defasagem entre os revestimentos, observou-se que o revestimento de blocos vazados apresentou na grande maioria das vezes os menores valores.

Foi verificada a ausência de armazenamento de água no reservatório de brita para o revestimento de asfalto poroso a partir do evento do dia 27/07/2008. Estes resultados podem ser visualizados na figura 5.2. A falta de armazenamento de água no reservatório de brita detectada pelos sensores pode estar relacionada com a perda de capacidade de infiltração no revestimento de asfalto poroso. Este revestimento apresenta sinais de forte colmatação superficial. Existe a necessidade de realização da limpeza da área superficial para verificação da possível comprometimento definitivo da capacidade de infiltração. Após a limpeza é necessário observar como o pavimento responderá durante os eventos de chuva no que diz respeito aos índices de escoamento superficial. Testes destrutivos seriam necessários para verificação da possibilidade de colmatação nas camadas inferiores do pavimento.

Como consequência da falta de armazenamento no lado com asfalto poroso, observa-se que os valores de armazenamento máximo são bem maiores no revestimento de blocos vazados (pontos em azul). Nos primeiros cinco eventos, quando ainda existia armazenamento no revestimento de asfalto poroso (pontos em vermelho), os valores de armazenamento neste revestimento são menores do que no revestimento de blocos vazados. Os resultados encontrados vão ao encontro dos observados por Acioli (2005), onde a autora também encontrou maiores volumes armazenados no revestimento com blocos vazados.

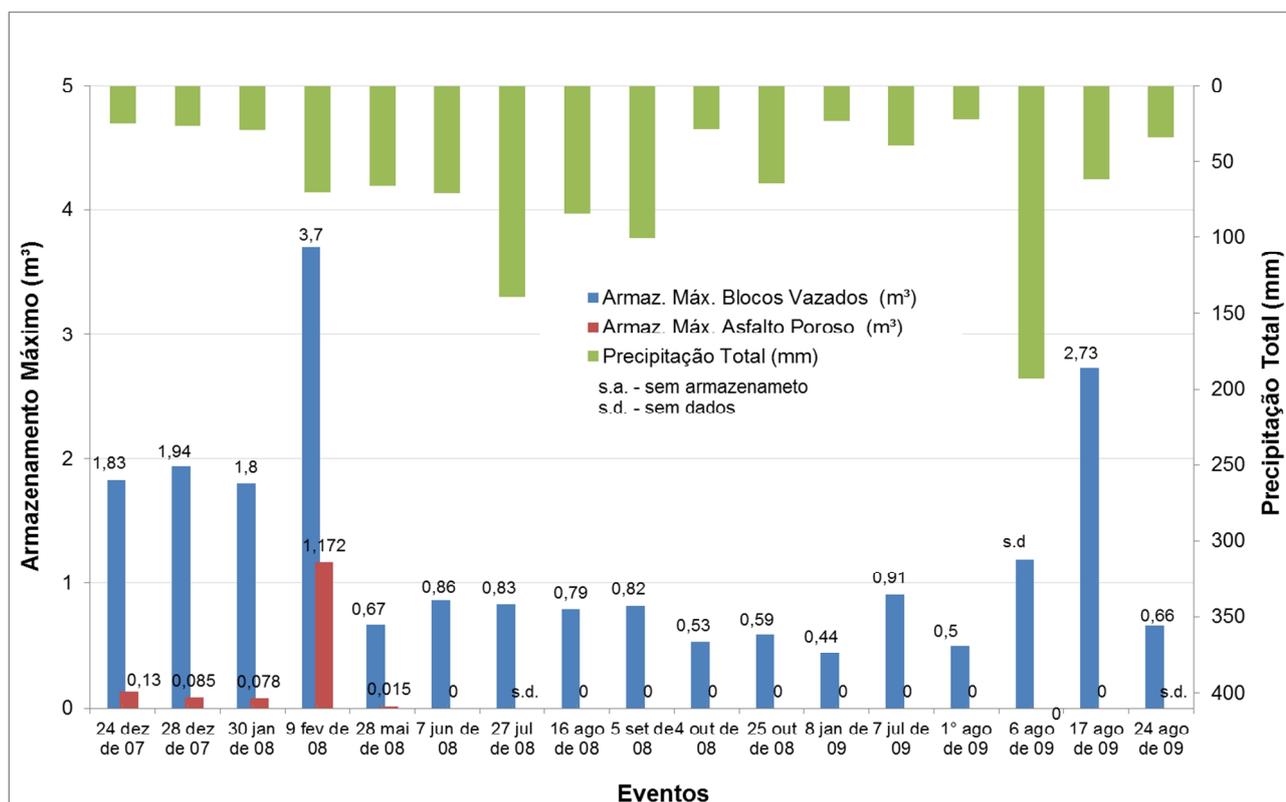


Figura 5.2: Comparação dos valores de armazenamento máximo no reservatório para os revestimentos de asfalto poroso e blocos vazados durante o período de estudo.

Nesta segunda etapa de monitoramento, o armazenamento máximo foi de $2,73\text{m}^3$ para o revestimento de blocos vazados. Este valor representa aproximadamente 33% da capacidade total de armazenamento do pavimento, que é de $8,25\text{m}^3$.

Para o evento de chuva de maior magnitude - quando a precipitação sobre o pavimento foi de $25,5\text{m}^3$ durante em 102 horas - o armazenamento máximo - alcançou somente $0,5\text{m}^3$ no lado de blocos vazados. Para o lado do asfalto poroso não houve armazenamento no reservatório para este evento.

As figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 mostram as curvas de armazenamento e precipitação para os eventos 28/05/2008, 27/07/2008, 05/09/2008 e 06/08/2009.

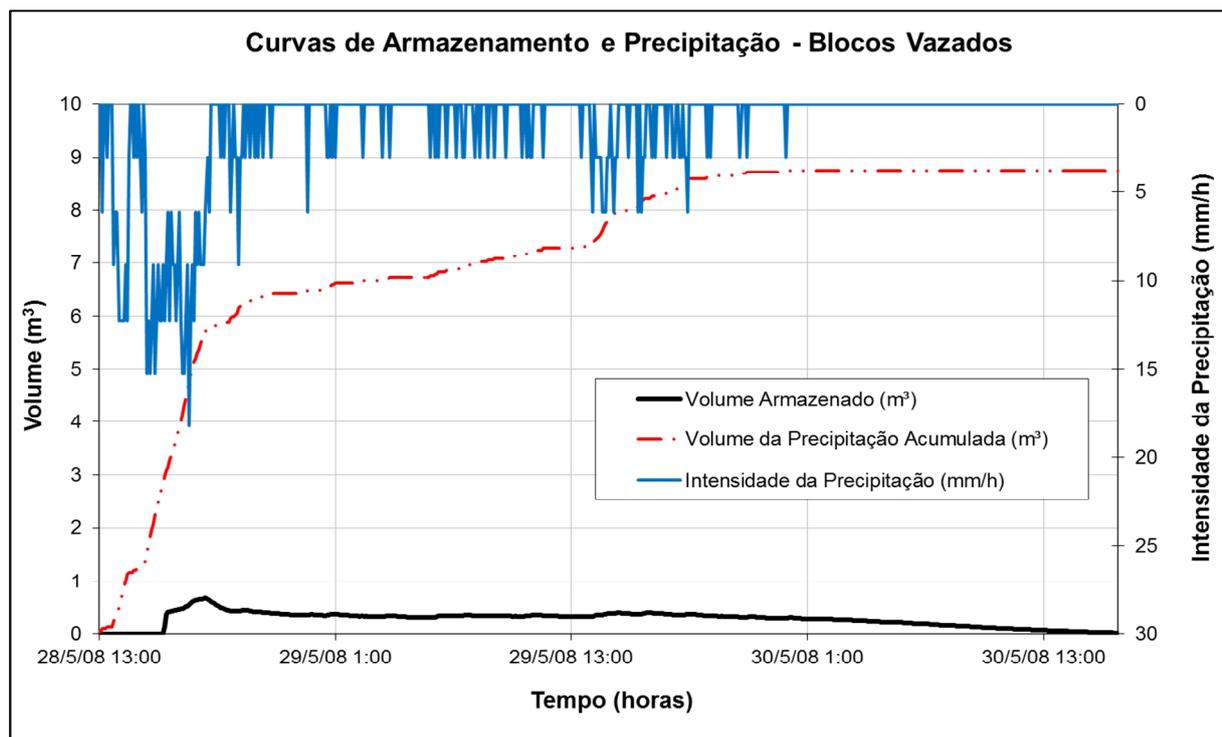


Figura 5.3: Curva de armazenamento e precipitação para o revestimento de blocos vazados, evento do dia 28 de maio de 2008

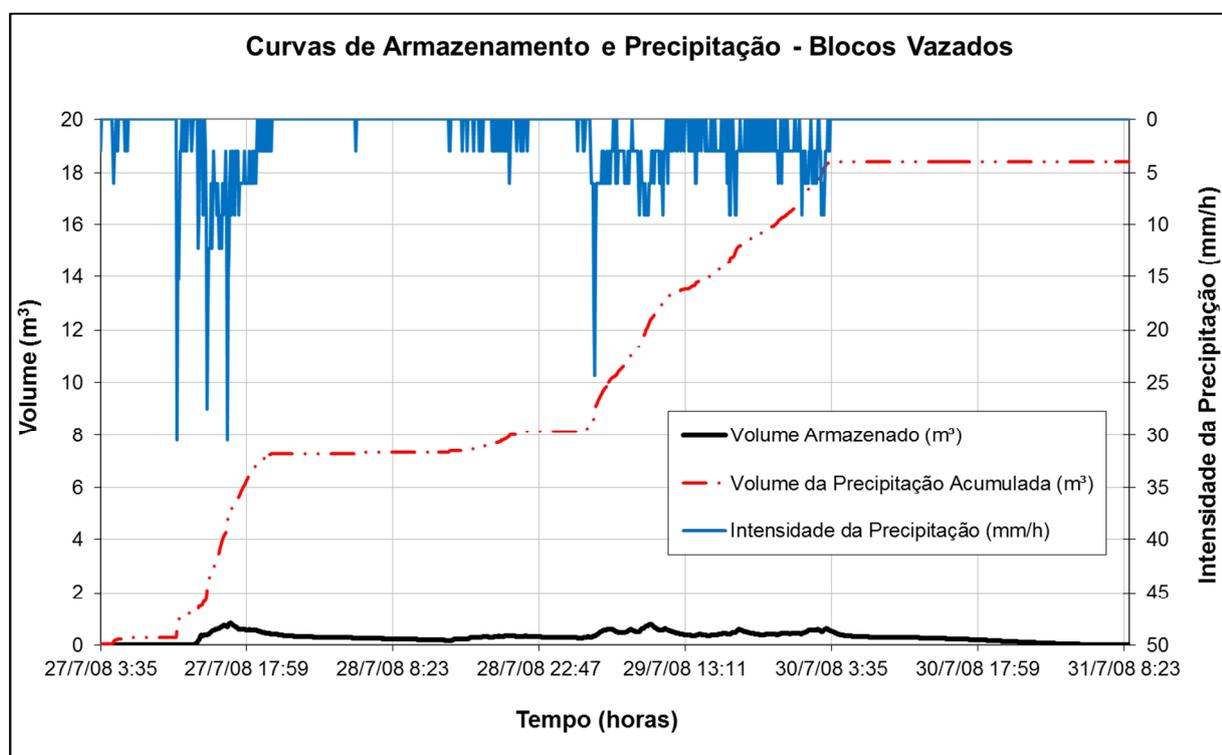


Figura 5.4: Curva de armazenamento e precipitação para o revestimento de blocos vazados, evento do dia 27 de julho de 2008.

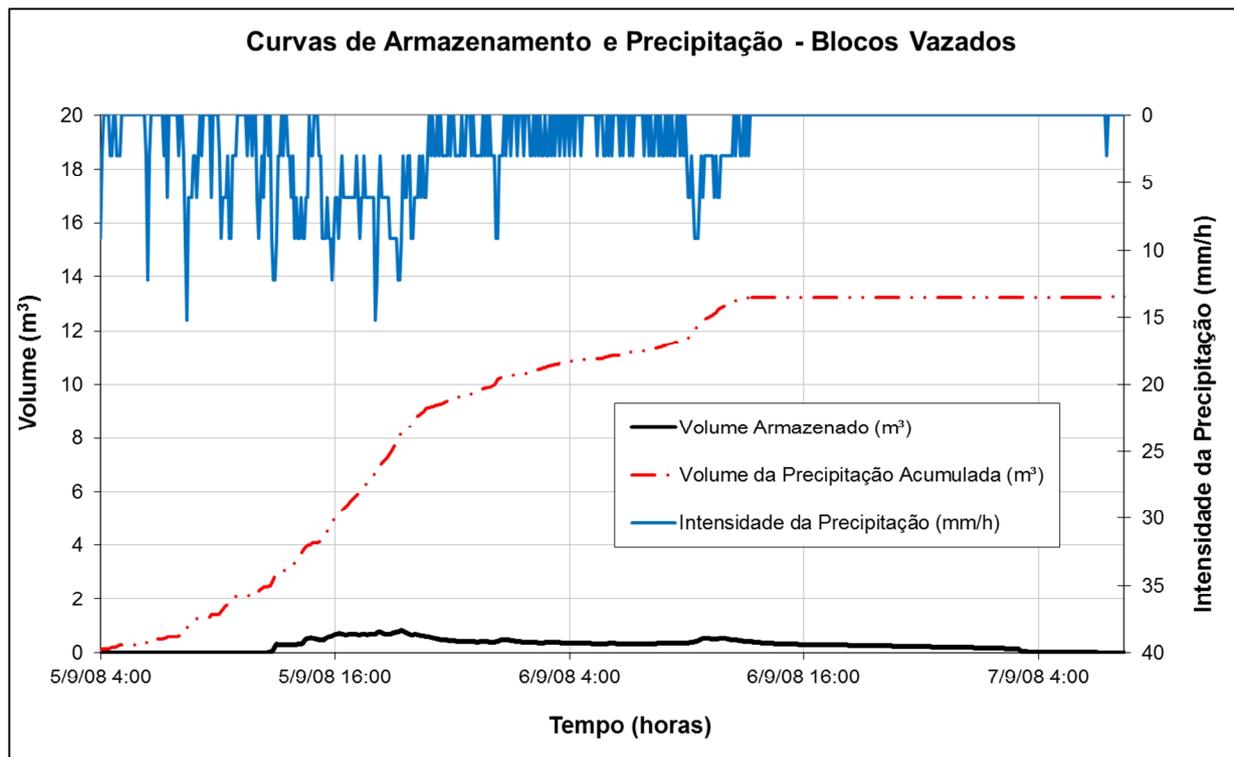


Figura 5.5: Curva de armazenamento e precipitação para o revestimento de blocos vazados, evento do dia 05 de setembro de 2008.

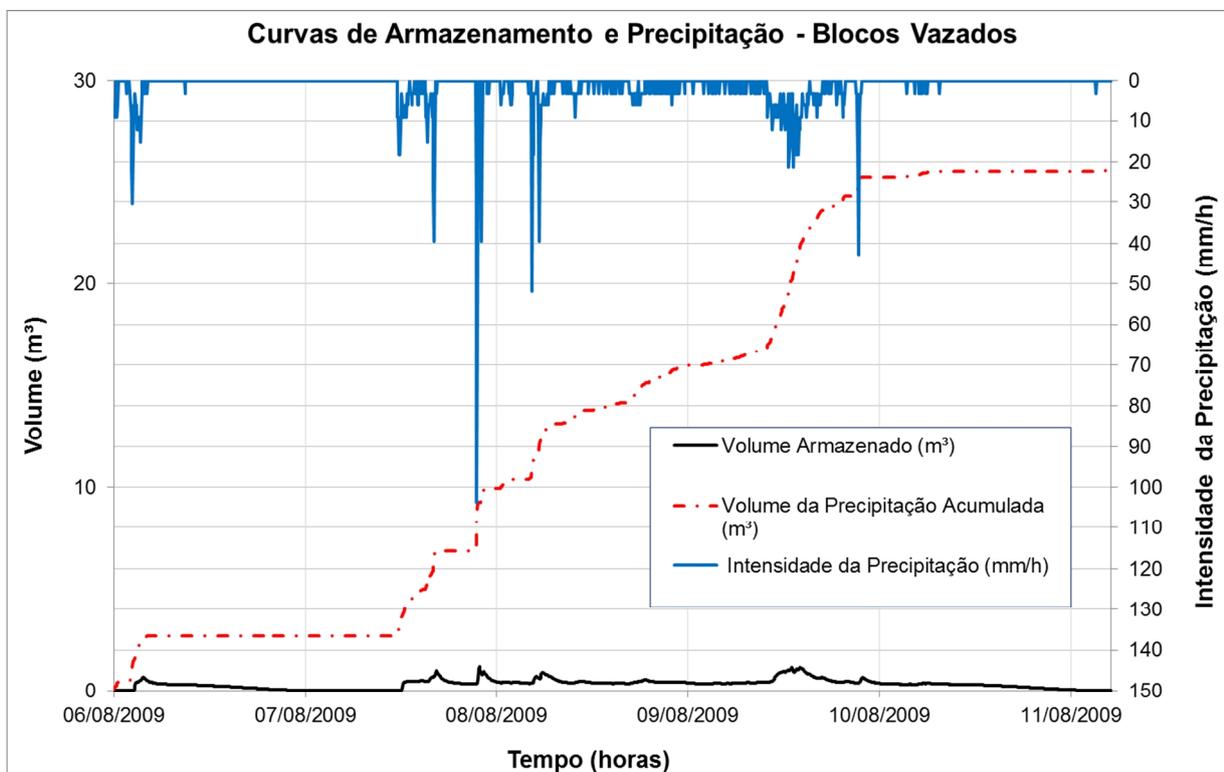


Figura 5.6: Curva de armazenamento e precipitação para o revestimento de blocos vazados, evento do dia 06 de agosto de 2009.

Já para o revestimento de asfalto poroso, os resultados indicam um aumento dos índices de escoamento superficial e a diminuição na capacidade de armazenamento. Verifica-se com isso a redução da capacidade de infiltração do dispositivo experimental.

A estrutura apresenta sinais de forte colmatação no revestimento de asfalto poroso. Ainda não é possível avaliar se a colmatação é reversível ou não. Há necessidade de limpeza da área superficial para verificar se a obstrução dos poros é somente superficial ou se também comprometeu o reservatório de brita.

Os pontos de acúmulo de água são observados no revestimento de asfalto e podem ser visualizados na figura 5.7. Esse acúmulo de água provavelmente é causado pela colmatação superficial. Já o revestimento blocos vazados não apresenta acúmulo de água na sua superfície.

Embora o revestimento de blocos vazados apresente maiores valores de escoamento superficial do que os encontrados no passado, este não apresenta sinais visíveis de deformação ou colmatação superficial. Na figura 5.7 pode-se visualizar acúmulo de água e colmatação visível somente no revestimento de asfalto poroso.



Figura 5.7: Acúmulo de água Pavimento permeável após evento de chuva - Agosto de 2010.

A mudança de comportamento hidrológico dos pavimentos permeáveis parece evidente quando comparamos as duas etapas de monitoramento. O tempo de duração da chuva (devido a mudança no cálculo para separação dos eventos), coeficiente de escoamento superficial, tempo de defasagem após início da precipitação e o tempo que a água permanece do reservatório de brita têm seus valores aumentados na segunda etapa.

Na primeira etapa de monitoramento o maior tempo de armazenamento foi de 72 horas e 28 minutos (revestimento blocos vazados) para uma chuva de 115mm em 59 horas e 19 min. Já na segunda etapa de monitoramento o maior tempo de armazenamento foi de 122 horas e 30 minutos (revestimento blocos vazados) para uma chuva de 84mm com duração 117 horas e 55 minutos.

A defasagem na primeira etapa de monitoramento variou de 1h30min para o menor tempo até 4 horas para o maior valor. Para a segunda etapa as defasagens variaram de 1h25min (blocos vazados) até 28h15min (asfalto poroso).

O tempo de armazenamento de água influenciou na questão da separação dos eventos. Como citado anteriormente, neste estudo utilizou-se a definição de Bertrand-Krajeswski *et al.* (2000) *apud* Acioli (2005), onde os autores definem que dois eventos chuvosos são independentes quando os efeitos ocasionados pelo primeiro cessaram antes do início do segundo evento. Com isso, considerou-se os eventos independentes quando o reservatório de brita do pavimento permaneceu sem água por um período igual ou superior a 12 horas. Parece evidente que na primeira etapa de monitoramento, ou seja, no primeiro ano de funcionamento do pavimento a separação dos eventos foi facilitada. Isso se deve ao fato de que o reservatório de brita ficar vazio por um tempo igual ou superior a 12 horas.

Com o passar do tempo, ou seja, após 5 anos de uso, os resultados mostram uma redução da capacidade de armazenamento, aumento do tempo de defasagem após início da precipitação e também uma diminuição da capacidade de infiltração da água no subsolo adjacente.

A alteração de comportamento hidrológico do pavimento da primeira para a segunda etapa pode estar relacionada a saturação do geotêxtil localizado na parte inferior do reservatório de brita, além também da provável a colmatação do próprio reservatório de brita. A principal finalidade do geotêxtil é evitar a colmação da brita. Esta manta também pode ficar colmatada e não exercer sua a função de maneira adequada. Como não se tem conhecimento de como estão as condições no interior dos componentes do pavimento, acredita-se que com a possível colmatação do geotêxtil a água exerça pressão para atravessar o mesmo. Sendo assim

os finos antes retidos podem ser liberados aos poucos para dentro do reservatório. Isso também possibilitaria a colmatação da camada inferior do geotêxtil.

Outra hipótese para colmatação do reservatório é de que existam pontos de deterioração no geotêxtil fazendo com que ocorra caminhos preferenciais de escoamento e a consequente entrada de materiais para o interior do reservatório de brita.

Para confirmação da hipótese seria necessário a realização de ensaios destrutivos através da extração de testemunhos (amostras) em alguns pontos do pavimento ou a retirada total da camada superficial, camada de brita e geotêxtil. É importante ressaltar que ensaios desta natureza são estão no escopo deste trabalho, podendo ser aplicados a estudos futuros.

Notou-se que com o aumento do tempo de armazenamento a separação dos eventos foi prejudicada, sendo que os efeitos de um evento de precipitação passaram a influenciar no evento seguinte. Assim em algumas situações onde antes se considerava dois eventos separadamente, passou-se a considerar um evento somente.

Como foi considerada a influência do evento anterior no evento seguinte, as durações de cada evento ficaram bem expressivas. Do ponto de vista da drenagem urbana é mais interessante analisar eventos com grandes volumes precipitados de curta duração. Por esse motivo existe a necessidade de que mais eventos extremos sejam monitorados para a verificação do comportamento do pavimento permeável.

É importante ressaltar que nunca foi realizado nenhum tipo de manutenção ou limpeza do revestimento superficial em ambos os lados do pavimento. Considerou-se que a condição que mais se aproxima da realidade brasileira é a falta de manutenção. Logo para o estudo dos pavimentos permeáveis, tanto na primeira etapa do monitoramento quantitativo realizado por Acioli (2005), quanto na realizada neste estudo, não foram realizadas nenhum tipo de manutenção e limpeza no revestimento superficial da estrutura. Neste tipo de avaliação os custos de manutenção devem ser transferidos para os custos de substituição do revestimento superficial ou de todo pavimento. Além disso, com a perda da capacidade de infiltração superficial e a total deterioração da estrutura é possível avaliar qual o tempo de vida útil da mesma.

5.1.2 Análise de Qualidade de Água – Pavimento Permeável

Nesta segunda etapa de monitoramento dos pavimentos permeáveis, foi dado início ao monitoramento qualitativo da estrutura, tendo como objetivo determinar o impacto de pavimento permeável na qualidade da água que infiltra no subsolo.

Com o passar do tempo e a constante a infiltração de água de escoamento superficial, pode ocorrer acúmulo de contaminantes, na camada superficial, no geotêxtil, ou no reservatório de brita.

Dos 17 eventos analisados neste estudo, em 8 eventos foram feitas coletas de água para avaliar a qualidade. Os eventos foram: 28/05/2008, 07/06/2008, 27/07/2008, 16/08/2008, 05/09/2008, 04/10/2008, 25/10/2008, 08/01/2009.

As tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os resultados de qualidade da água, compostos por análises físico-químicas realizadas para os oito eventos durante os meses de março de 2008 a janeiro de 2009 nos dois tipos de revestimentos. Aproveitando a estrutura montada na trincheira de infiltração foram coletadas amostras provenientes do escoamento superficial. As amostras foram coletadas nos eventos, 01/08/2009, 10/03/2009, 07/04/2009 e 12/05/2009. A tabela 5.8 mostra os resultados obtidos com as análises químicas da água do escoamento superficial para quatro eventos chuvosos.

Tabela 5.6: Análises químicas da água para 8 eventos chuvosos – revestimento asfalto Poroso.

<i>Módulo Pavimento Asfalto Poroso</i>							
<i>Parâmetros</i>	<i>n</i>	<i>Valor Máx.</i>	<i>Valor Mín.</i>	<i>Valor Médio</i>	<i>DP</i>	<i>Limite Superior do Intervalo c/ 95% de Confiança</i>	<i>Limites Máximos: Resolução CONAMA 430/11 – classe 2</i>
pH	17	7,75	6,05	7,0	0,6	7,30	5 a 9
Temperatura (°C)	12	25,7	16,1	19,5	2,7	21,15	-
Turbidez (N.T.U)	16	3,1	0,9	1,8	0,7	2,24	< 100
Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	16	26,4	2,64	13,3	9,4	18,24	-
Cor Aparente (u.C)	16	20	5	14,7	4,6	17,16	cor verdadeira: até 75 mg Pt/L
ST (mg/L)	16	266	19	93,3	74,0	132,68	-
SS (mg/L)	12	12	-	< 10	-	*	-
DBO₅ (mg/L O₂)	13	8,6	1,2	4,3	2,4	5,75	5
DQO total (mg/L O₂)	14	42	4	15,0	11,6	21,72	-
Nitrogênio total (mg/L)	14	0,9	0,21	0,5	0,2	0,65	1,27 (ambientes lênticos) a 2,18 (ambientes lóticos)
Nitrogênio Amoniacal (mg/L N)	14	0,8	0,007	0,4	0,3	0,54	3,7 p/ pH ≤ 7,5 2,0 p/ 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0 p/ 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 p/ pH > 8,5
Nitrato (mg/L NO₃⁻)	14	1	0,18	0,5	0,2	0,61	10
Fósforo total (mg/L)	14	0,08	0,01	0,03	0,02	0,04	0,03 (ambientes lênticos) a 0,1 (ambientes lóticos)
Ortofosfato (mg/L)	14	0,02	0,01	< 0,01	0,006	*	-
Chumbo total (mg/L)	13	-	-	< 0,02	-	*	0,01
Cádmio total (mg/L)	13	-	-	< 0,002	-	*	0,01
Cromo total (mg/L)	13	0,007	-	< 0,004	-	*	0,05
Zinco total (mg/L)	13	0,035	0,02	< 0,02	0,008	*	0,18
Cobre total (mg/L)	13	0,005	-	< 0,004	-	*	0,009
Surfactantes (mg/L)	13	0,05	0,02	0,033	0,010	0,039	-
Óleos e graxas (mg/L)	13	-	-	< 10	-	*	virtualmente ausentes
Coliformes Totais (NMP/100mL)	2	900	2	451	-	*	-
Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL)	2	-	-	-	-	-	1000

n – número de amostras

DP - Desvio Padrão

*Limite Superior do Intervalo c/ 95% de Confiança não apresentado, pois a grande maioria das amostras para estes parâmetros ficou abaixo do limite de detecção do método.

Tabela 5.7: Análises químicas da água para 8 eventos chuvosos – revestimento Blocos Vazados.

<i>Módulo Pavimento Blocos Vazados</i>							
<i>Parâmetros</i>	<i>n</i>	<i>Valor Máx.</i>	<i>Valor Mín.</i>	<i>Valor Médio</i>	<i>DP</i>	<i>Limite Superior do Intervalo c/ 95% de Confiança</i>	<i>Limites Máximos: Resolução CONAMA 430/11 – classe 2</i>
pH	20	8,4	7,34	7,81	0,32	7,96	5 a 9
Temperatura (°C)	14	25,7	15,90	19,25	3,08	21,03	-
Turbidez (N.T.U)	20	3,2	0,20	1,48	0,81	1,85	< 100
Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	20	73,92	29,04	52,27	12,91	58,32	-
Cor Aparente (u.C)	20	30	10,00	20,50	5,10	22,89	cor verdadeira: até 75 mg Pt/L
ST (mg/L)	20	326	58,00	144,60	78,90	181,53	-
SS (mg/L)	19	< 10	<10	-	-	*	-
DBO₅ (mg/L O₂)	19	12	2,00	4,21	2,74	5,53	5
DQO total (mg/L O₂)	19	66	2,40	15,19	15,49	22,66	-
Nitrogênio total (mg/L)	19	0,8	0,04	0,44	0,21	0,54	1,27 (ambientes lânticos) a 2,18 (ambientes lóticos)
Nitrogênio Amoniacal (mg/L N)	19	0,8	0,00	0,34	0,24	0,46	3,7 p/ pH ≤ 7,5 2,0 p/ 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0 p/ 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 p/ pH > 8,5
Nitrato (mg/L NO₃⁻)	19	1,32	0,10	0,33	0,33	0,49	10
Fósforo total (mg/L)	19	0,06	0,01	0,03	0,02	0,03	0,03 (ambientes lânticos) a 0,1 (ambientes lóticos)
Ortofosfato (mg/L)	19	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	-
Chumbo total (mg/L)	19	0,00	0,00	<0,02	-	*	0,01
Cádmio total (mg/L)	19	0,002	0,002	< 0,002	-	*	0,01
Cromo total (mg/L)	19	0,005	0,004	0,005	0,001	0,005	0,05
Zinco total (mg/L)	19	0,04	0,02	< 0,02	-	*	0,18
Cobre total (mg/L)	19	-	-	< 0,004	-	*	0,009
Surfactantes (mg/L)	19	0,04	0,02	0,03	0,01	0,03	-
Óleos e graxas (mg/L)	19	-	-	< 10	-	*	virtualmente ausentes
Coliformes Totais (NMP/100mL)	4	16000	5000	8667	6351	15337,99	-
Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL)	4	140	13	94	71	168,51	1000

n – número de amostras

DP - Desvio Padrão

* Limite Superior do Intervalo c/ 95% de Confiança não apresentado, pois a grande maioria das amostras para estes parâmetros ficou abaixo do limite de detecção do método.

Tabela 5.8: Média das Análises químicas da água para 4 eventos chuvosos – Escoamento Superficial.

<i>Escoamento Superficial</i>							
Parâmetros	<i>n</i>	<i>Valor Máx.</i>	<i>Valor Mín.</i>	<i>Valor Médio</i>	<i>DP</i>	<i>Limite Superior do Intervalo c/ 95% de Confiança</i>	<i>Limites Máximos: Resolução CONAMA 357/05 – classe 2</i>
pH	4	7,5	6,4	6,9	0,5	7,7	5 a 9
Temperatura (°C)	4	25,6	18,4	23,4	3,4	28,9	-
Turbidez (F.T.U)	4	115	70	88,7	19,3	119,5	< 100
Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	4	55,44	14,08	31,24	19,55	62,3	-
Cor Aparente (u.C)	4	400	80	215	152,6	457,9	cor verdadeira: até 75 mg Pt/L
ST (mg/L)	4	819	301	560,2	211,5	896,8	-
DBO₅ (mg/L O₂)	5	19	2,5	9,2	7,4	18,39	5
DQO total (mg/L O₂)	3	372,6	72,3	174,6	171,5	600,6	-
Nitrogênio total (mg/L)	4	0,55	0,33	0,42	0,09	0,6	1,27 (ambientes lênticos) a 2,18 (ambientes lóticos)
Nitrogênio Amoniacal Total (mg/L N)	5	0,9	0,02	0,6	0,3	0,98	3,7 p/ pH ≤ 7,5 2,0 p/ 7,5 < pH ≤ 8,0 1 para 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 p/ pH > 8,5
Nitrato (mg/L NO₃)	5	2,1	0,1	0,8	0,8	1,8	10
Fósforo total (mg/L)	5	0,5	0,08	0,25	0,2	0,5	0,03 (ambientes lênticos) a 0,1 (ambientes lóticos)
Ortofosfato (mg/L)	5	0,2	0,04	0,10	0,06	0,16	-
Chumbo total (mg/L)	5	0,00	0,00	0,00	-	-	0,01
Cádmio total (mg/L)	5	0,01	0,01	0,01	-	-	0,01
Cromo total (mg/L)	5	0,01	0,01	0,01	0,002	0,01	0,05
Zinco total (mg/L)	5	0,11	0,10	0,11	0,006	0,11	0,18
Cobre total (mg/L)	5	0,02	0,01	0,02	0,006	0,02	0,009
Surfactantes (mg/L)	5	0,04	0,02	0,03	0,008	0,04	-
Óleos e graxas (mg/L)	5	20	20	20	-	*	virtualmente ausentes
Coliformes Totais (NMP/100mL)	5	30000	16000	20667	8083	30703	-
Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL)	5	24000	1700	9567	12517	25108	1000

n – número de amostras

DP - Desvio Padrão

* Limite Superior do Intervalo c/ 95% de Confiança não apresentado, pois a grande maioria das amostras para estes parâmetros ficou abaixo do limite de detecção do método.

A preocupação com a qualidade da água de infiltração proveniente de pavimentos permeáveis vem do fato que as estruturas de infiltração podem conduzir contaminação ao lençol freático. Além disso, dependendo do tipo de pavimento permeável utilizado, a água armazenada no reservatório de brita pode ser aproveitada para outro fim que não seja a infiltração no subsolo. Caracterizar a qualidade é o primeiro passo para verificar a viabilidade de aproveitamento da água para usos menos nobres.

Para essa caracterização utilizou-se como comparação resolução CONAMA nº 357 de 2005 que “*Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*”; resolução CONAMA nº 430 de 2011 que “*Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA*”; resolução CONSEMA 128 de 2006 do estado do Rio Grande do Sul que “*Dispõe sobre a fixação de Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul*” e as “*Diretrizes para Reuso de Água*” de 2004 da Agência de Proteção Ambiental Americana. Na tabela 5.9 é possível fazer a comparação entre os diversos parâmetros físico-químicos para análise da qualidade da água.

Segundo a resolução CONAMA nº 357 para a classe 2 as águas podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;
- b) a proteção das comunidades aquáticas;
- c) a recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000;
- d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e
- e) à aquicultura e à atividade de pesca.

Tabela 5.9: Comparação de padrões de qualidade da água para os pavimentos permeáveis e escoamento superficial.

<i>Parâmetros</i>	<i>Resolução 128/06 RS¹</i>	<i>EPA – Guia para Reuso da Água²</i>	<i>Resolução CONAMA 357/05 – classe 2³</i>	<i>Resolução CONAMA 430/11⁴</i>
pH	6 a 9	6 a 9	6 a 9	5 a 9
Temperatura (°C)	< 40	-	-	Lançamento < 40
Turbidez (NTU)	-	2	100	-
Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	-	-	-	Alcalinidade
Cor Aparente (u.C)	não deve conferir mudança de coloração (cor verdadeira) ao corpo hídrico receptor.	15	Cor verdadeira até 75 mg Pt/L;	-
ST (mg/L)	-	-	-	-
SS (mg/L)	< 200	5 a 50	-	-
DBO₅ (mg/L O₂)	< 200	10	5	120
DQO Total (mg/L O₂)	< 450	-	-	-
Nitrogênio total (mg/L)	10	< 1 a 30	1,27 (ambientes lênticos) a 2,18 (ambientes lóticos)	-
Nitrogênio Amoniacal Total (mg/L N)	-	-	3,7 p/ pH ≤ 7,5 2,0 p/ 7,5 < pH ≤ 8,0 1 p/ 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 p/ pH > 8,5	20
Nitrato (mg/L NO₃)	-	-	10	-
Fósforo total (mg/L)	1	0,1 - 30	0,03 (ambientes lênticos) a 0,1 (ambientes lóticos)	-
Ortofosfato (mg/L)	-	-	-	-
Chumbo total (mg/L)	0,5	-	0,01	0,5
Cádmio total (mg/L)	0,1	0,01	0,001	0,2
Cromo total (mg/L)	0,5	-	0,05	0,1 (cromo hexavalente) a 1 (cromo trivalente)
Zinco total (mg/L)	1	-	0,18	5
Cobre total (mg/L)	0,5	-	0,009 (dissolvido)	1 (cobre dissolvido)
Surfactantes (mg/L)	2	-	-	-
Óleos e graxas (mg/L)	< 10	-	virtualmente ausentes	20 (óleos minerais) a 50 (óleos vegetais e gorduras animais)
Coliformes Totais (NMP/100mL)	-	< 10 – 10 ⁷ cfu ⁵	-	-
Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL)	≤ 300 NMP	-	1000	-

1 – NMP de emissão de efluentes líquidos de acordo com a portaria resolução N° 128/2006, SSMA/RS .

2 – NMP para Reuso da água, em conformidade U.S.EPA – Guidelines for water reuse de 1992

3 – Limites de acordo com a resolução CONAMA 357/05 – classe 2: Águas que podem ser destinadas: a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; b) a proteção das comunidades aquáticas; c) a recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA no 274, de 2000.

4 – Limites de acordo com a resolução CONAMA 430/11 (Complementa e altera a Resolução n° 357/2005)

5 – cfu - Unidades formadoras de colônia.

O pH da água é um parâmetro importante para os estudos no campo do saneamento ambiental, pois influenciam diretamente na fisiologia de diversas espécies. Além disso, é um fator determinante para a precipitação de elementos químicos tóxicos como metais pesados. Pode também exercer efeitos sobre as solubilidades de nutrientes.

Sendo assim, as restrições de faixas de pH são estabelecidas para as diversas classes de águas naturais, tanto de acordo com a legislação federal (Resolução CONAMA 430/2011), como por legislação de vários estados da federação.

O valor de pH é também um resultado importante para a composição dos chamados “índices de qualidade de águas” (IQA) e Índices de Qualidade das Águas para Proteção da Vida Aquática e de Comunidades Aquáticas (IVA). No cálculo do IQA e IVA desenvolvidos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), o pH é um dos parâmetros selecionados. Os critérios de proteção à vida aquática fixam o pH entre 6 e 9 (BRASIL, 2005). Em todas as amostras o pH proveniente do revestimento blocos vazados foi maior do que nas amostras do revestimento asfalto poroso. Na figura 5.8 pode-se visualizar a diferença dos valores de pH para os revestimentos e amostras de escoamento superficial.

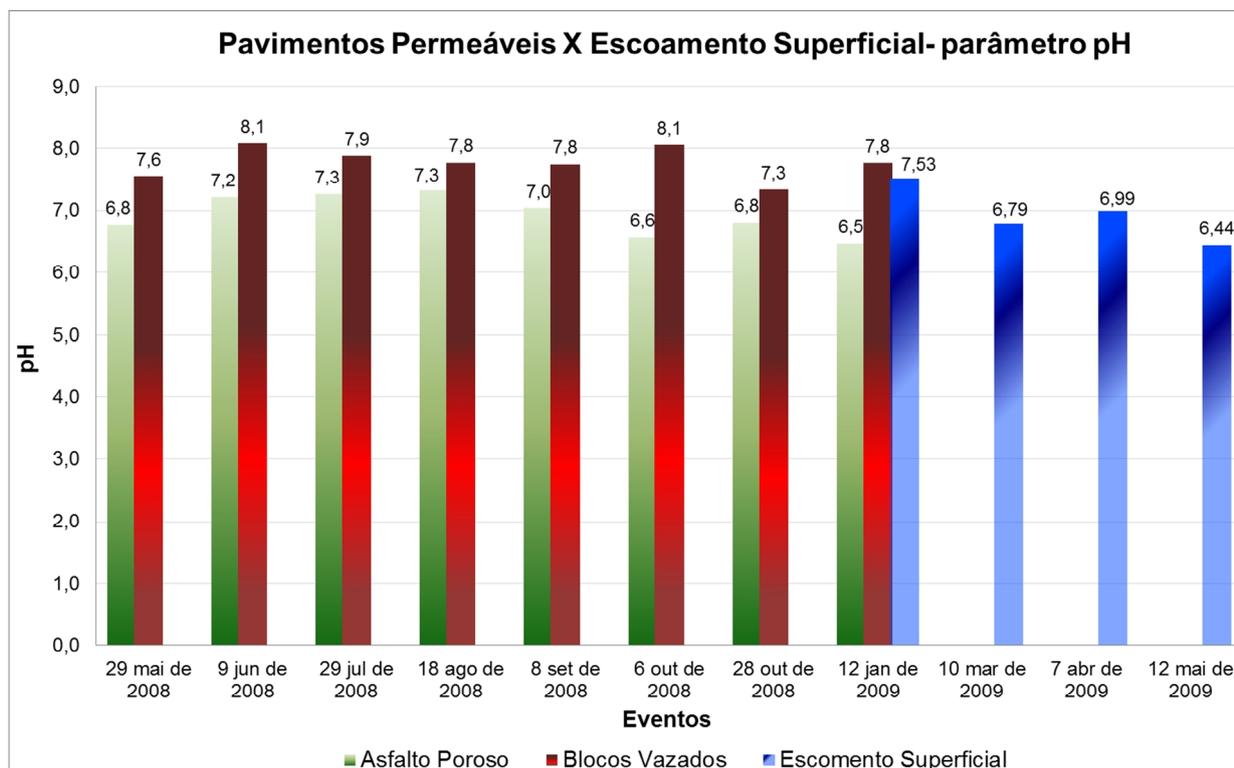


Figura 5.8: Comparação dos valores de pH nos revestimentos asfalto poroso, blocos vazados e escoamento superficial.

Nas amostras provenientes do pavimento permeável, tanto para os blocos vazados quando para o asfalto poroso, os índices de pH (limite superior do intervalo com 95% de confiança) ficou dentro do aceitável para a resolução CONAMA 430/2011. O mesmo ocorreu com as amostras de escoamento superficial, sendo o limite superior do intervalo com 95% de confiança 7,7. Os resultados sugerem que em relação ao pH, os pavimentos permeáveis têm menor influência na qualidade da água que infiltra para o subsolo.

A temperatura da água desempenha um papel importante, pois altera a solubilidade dos gases e a cinética das reações químicas, fazendo com que a interação de poluentes com o ecossistema aquático seja bastante influenciada por sua variação (BRAGA *et al.*, 2002). Assim como o pH, esse parâmetro é dos 9 utilizados para a composição dos chamados “índices de qualidade de águas” (IQA). O valor encontrado para o limite Superior do Intervalo com 95% de confiança nas amostras do pavimento revestido por blocos vazados foi de 21,03°C. Já para o revestimento de asfalto poroso o valor foi de 21,15°C. Os dois valores são muito próximos, mostrando que o tipo de revestimento parece não apresentar influência na temperatura da água que infiltra no subsolo.

Para a água de escoamento superficial o valor encontrado para o limite superior do intervalo com 95% de confiança foi de 28,9°C, ficando aproximadamente 8°C acima da temperatura da água que infiltra no subsolo. Essa diferença de temperatura entre as amostras do pavimento e as amostras do escoamento é justificada, devido ao fato que as coletas da água do pavimento inclui meses do inverno. Já as amostras do escoamento foram feitas nos meses de janeiro, março, abril e maio de 2009.

A resolução CONAMA 430/2011 estabelece como condição para lançamento de efluentes que a temperatura seja inferior a 40°C. Nas três situações, seja nos pavimentos permeáveis (asfalto poroso e blocos vazados) ou na água de escoamento superficial, os valores encontrados ficam bem abaixo do máximo permitido pela referida resolução. A diferença de temperatura entre as amostras do pavimento e escoamento superficial podem ser explicadas pela época de coletas.

Já a turbidez de uma amostra de água é a propriedade de desviar raios luminosos, e é decorrente da presença de material em suspensão na água, tais como partículas inorgânicas (areia, silte, argila) e de detritos orgânicos, algas e bactérias, plâncton em geral, etc. O valor máximo para classe II segundo a resolução 357 do CONAMA deve ser menor do que 100 N.T.U. Os valores dos limites superiores do intervalo com 95% de confiança foi de 1,85 NTU e 2,24 NTU para revestimento de blocos e asfalto poroso respectivamente. Os valores encontrados são aproximadamente 50 vezes menores do que os máximos permitidos. O limite

superior do intervalo com 95% de confiança para as amostrados de escoamento superficial chegou a valor de 119,5 N.T.U, ficando acima dos padrões CONAMA 357/classe II. Isso demonstra que a qualidade da água que infiltrou nos pavimentos em relação no que diz respeito à presença de sólidos em suspensão é melhor do que a que escoou superficialmente ao seu entorno. Os valores encontrados sugerem que os pavimentos permeáveis filtram as águas de escoamento superficial fazendo com que as partículas fiquem retidas em alguma camada da estrutura. Com o acúmulo de sedimentos poderá ocorrer uma contribuição para a colmatação da estrutura. Na figura 5.9 pode-se visualizar uma comparação com os valores de turbidez encontradas nas amostras do asfalto poroso, blocos vazados e escoamento superficial.

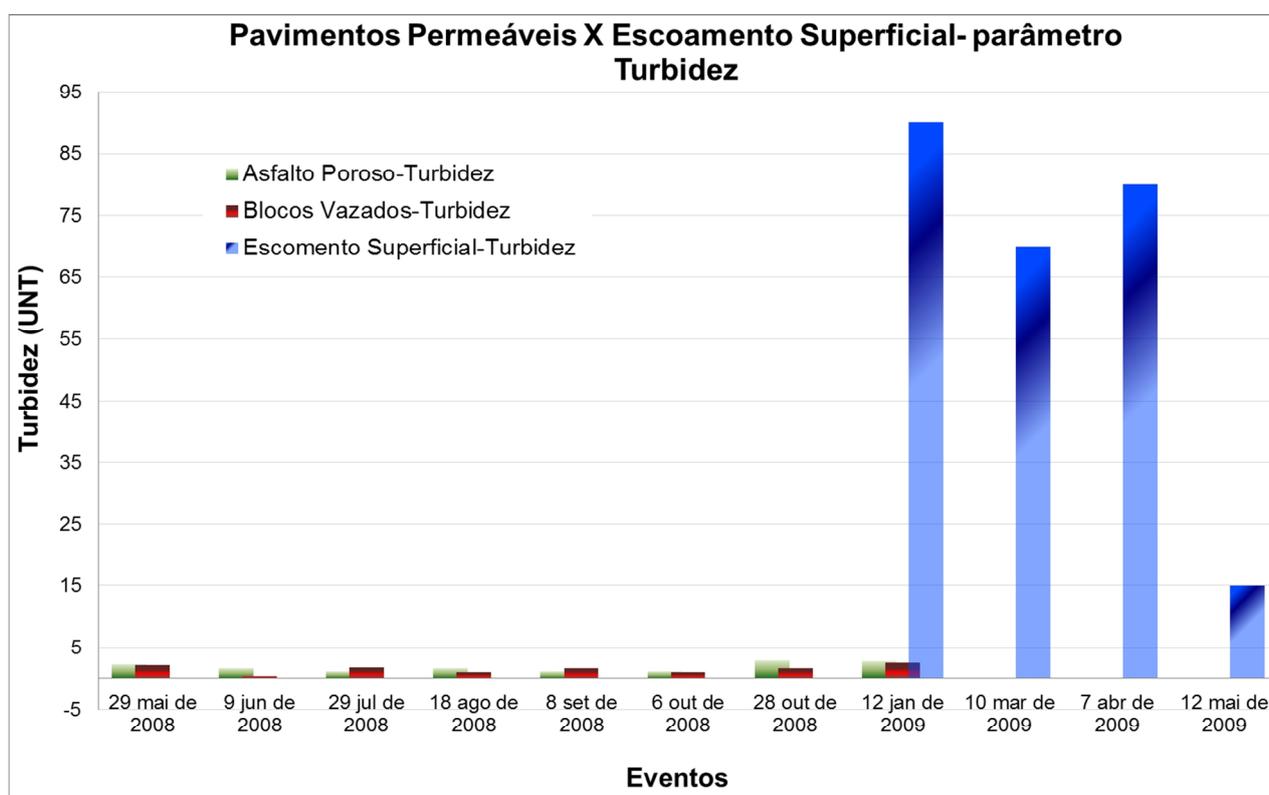


Figura 5.9: Comparação dos valores de turbidez da água dos revestimentos asfalto poros, blocos vazados e nas amostras de escoamento superficial.

Para obtenção da intensidade da cor aparente das amostras foi feita a comparação da amostra com um padrão de cobalto-platina, sendo o resultado fornecido em unidades de cor (uC), também chamadas uH (unidade Hazen). As águas naturais apresentam, em geral, intensidades de cor variando de 0 a 200 unidades. Valores inferiores a 10 unidades de cor na água são dificilmente perceptíveis (BRASIL, 2006). No parâmetro cor, os valores encontrados para os limites superiores do intervalo com 95% de confiança nos pavimentos permeáveis foram de 18uC para o asfalto e de 23uC para revestimento de blocos. Nas amostras de

escoamento superficial, o limite superior do intervalo com 95% de confiança foi mais de 20 vezes maior do que o encontrado na água que infiltrou, alcançando o valor de aproximadamente 460uC. Isso demonstra que na água do escoamento superficial existem vários tipos de partículas e compostos capazes de conferir a cor acentuada nessas amostras.

A presença de cor na água pode ser devido à presença de materiais orgânicos ou minerais que estão dissolvidos. O problema maior de cor na água é, em geral, o estético, já que causa um efeito repulsivo nas pessoas. As amostras obtidas possuem aparência levemente amarelada. Isso pode indicar presença de ácidos húmicos, já que esta cor caracteriza este elemento. Os resultados apresentados na figura 5.10 sugerem que as amostras de escoamento superficial são de pior qualidade, quando comparadas às águas que infiltraram no pavimento permeável para ambos os revestimentos.

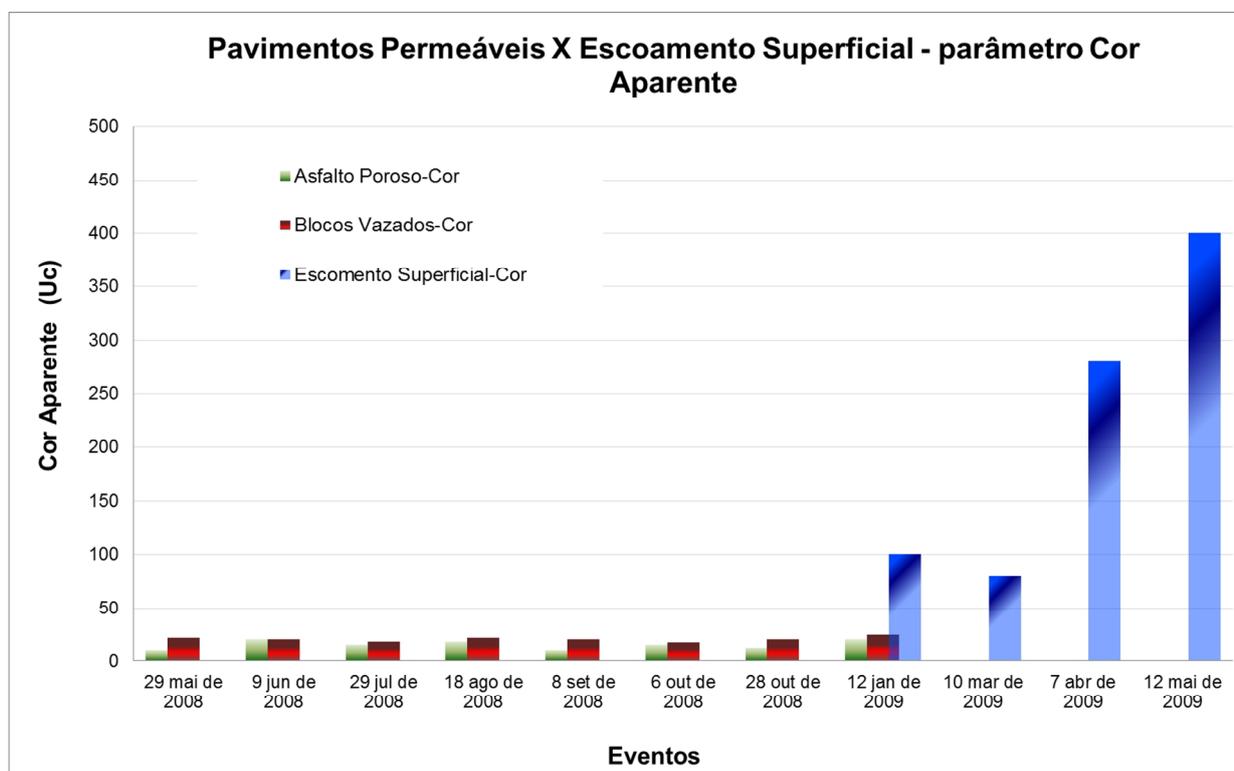


Figura 5.10: Comparação dos valores cor da água dos revestimentos asfalto poroso, blocos vazados e nas amostras de escoamento superficial

A alcalinidade é a medida da capacidade da água de neutralizar os ácidos, ou seja, é a capacidade de resistir às mudanças de pH. Por exemplo, se numa água quimicamente pura (pH=7) for inserida pequena quantidade de um ácido fraco seu pH mudará instantaneamente. Numa água com dada alcalinidade, a adição de uma pequena quantidade de ácido fraco não provocará a elevação de seu pH, porque os íons presentes irão neutralizar o ácido.

A alcalinidade não é considerada padrão de classificação de águas naturais nem de emissão de esgotos e, também, não tem significado sanitário para a água potável, mas em concentrações elevadas confere à mesma um gosto amargo.

A importância desse parâmetro vem do fato de que é um elemento importante no controle do tratamento de água, estando relacionada à coagulação, à redução de dureza e à prevenção da corrosão em tubulações.

Habitualmente, em águas naturais, a alcalinidade, como CaCO_3 , varia entre 10mg/L e 350mg/L. O limite superior do intervalo com 95% de confiança para o parâmetro alcalinidade, encontrado no revestimento blocos vazados foi de 58,32mg/L de CaCO_3 , enquanto no asfalto poroso o valor foi de 18,24mg/L de CaCO_3 . Nas amostras de escoamento superficial, o valor encontrado para o limite superior do intervalo com 95% de confiança foi de 62,30mg/L de CaCO_3 . Verifica-se que este parâmetro, do ponto de vista sanitário, não apresenta significado relevante no que se refere à qualidade da água.

No que diz respeito ao parâmetro de sólidos totais, os valores máximos encontrados para um $\alpha = 5\%$ (nível de significância de 5%) foram de 132,7mg/L, para o asfalto poroso e de 181,5mg/L. Para o escoamento superficial, o valor máximo encontrado foi de aproximadamente 900mg/L. Ambos os valores sugerem altas cargas de substâncias presentes na água de escoamento superficial, na região ao entorno do pavimento permeável, além de indicar que os pavimentos permeáveis contribuem positivamente com a qualidade de água que infiltra no solo.

Altos valores de $\text{DBO}_{5,20}$, indicam presença de matéria orgânica. Grandes quantidades de matéria orgânica podem induzir ao completo esgotamento do oxigênio na água, provocando o desaparecimento de peixes e outras formas de vida aquática. Para este parâmetro, os valores dos limites superiores dos intervalos com 95% de confiança, para pavimentos permeáveis e escoamento superficial, ficou acima do máximo permitido, para a Classe II que é de 5mg/L de O_2 . Os valores podem ser verificados nas tabelas 5.6, 5.7 e 5.8. Para este parâmetro, a água que infiltrou no solo também apresentou uma qualidade superior, quando comparada com as amostras de escoamento superficial.

O fósforo é um dos elementos de eutrofização de águas naturais. As águas de drenagem urbana podem provocar a presença excessiva de fósforo em águas naturais. Por esse motivo, sua determinação é de fundamental importância. A resolução CONAMA – Classe II limita o valor presente nas amostras em 0,03mg/L ambientes lênticos e de 0,1mg/L para ambiente lótico e tributários de ambientes intermediários. Os limites superiores do intervalo de confiança para um $\alpha = 5\%$ foram de 0,04mg/L, para o asfalto poroso, e 0,03mg/L no revestimento de blocos vazados. Os valores encontrados para o revestimento de asfalto poroso ficaram acima da resolução CONAMA para ambientes lênticos. Já o revestimento de blocos vazados ficou no limite da resolução para a pior situação (ambientes lênticos).

Considerou-se que a água presente nos dois revestimentos está dentro dos máximos aceitos na resolução para o enquadramento na classe II. Pode-se considerar que a água que infiltra, através dos pavimentos, tem uma boa qualidade para esse parâmetro, já que os valores citados referem-se sempre aos máximos encontrados.

O fósforo pode aparecer nas águas sob três diferentes formas:

- Fosfatos orgânicos: são a forma em que o fósforo compõe moléculas orgânicas, como a de um detergente, por exemplo;
- Ortofosfatos: são representados pelos radicais, que se combinam com cátions formando sais inorgânicos nas águas;
- Polifosfatos, ou fosfatos condensados, polímeros de ortofosfatos: esta terceira forma não é muito importante nos estudos de controle de qualidade das águas, porque sofre hidrólise, convertendo-se rapidamente em ortofosfatos nas águas naturais.

A segunda forma de fósforo, o ortofosfato, foi analisado nas amostras de água. Os valores máximos encontrados foram de 0,02mg/L de PO_4 para os blocos vazados e de 0,16mg/L de PO_4 para o asfalto poroso. O fósforo aparece em águas naturais principalmente devido à disposição inadequada de esgoto sanitário. Do ponto de vista de águas de abastecimento, o fósforo não apresenta problemas, mas é elemento indispensável para o crescimento de algas e, quando em concentrações elevadas, pode provocar eutrofização (crescimento exagerado de algas em lagos e represas). Para as amostras estudadas, as concentrações encontradas para o fósforo total são baixas e, nestes níveis, tendem a não provocar eutrofização.

O nitrogênio é um nutriente que está presente nas áreas urbanas, na água de drenagem das águas pluviais. Essas cargas são associadas às deficiências do sistema de limpeza pública e constituem uma fonte de poluição difusa de difícil caracterização. Assim como o fósforo, o nitrogênio é um dos elementos que podem causar eutrofização em cursos d'água. O nitrogênio pode ser encontrado nas águas nas formas de nitrogênio orgânico, amoniacal (amônia e amônio), nitrito e nitrato. Neste estudo foram analisados nitrogênio total, o nitrogênio na forma amoniacal e o nitrato. A amônia é elemento tóxico e altos níveis dela presentes na água torna-a bastante restritivo à vida dos peixes. Muitas espécies não suportam concentrações acima de 5 mg/L, além disso, a amônia provoca consumo de oxigênio dissolvido das águas naturais (CETESB, 2011). Por estes motivos, a concentração de nitrogênio amoniacal é um importante parâmetro de classificação das águas naturais e é normalmente utilizado na constituição de índices de qualidade das águas. Pode-se associar a idade da poluição com relação às formas de nitrogênio. Ou seja, se a amostra de água coletada apresentar altas taxas de nitrogênio orgânico e amoniacal é indicação de que a poluição é recente. Ao contrário, se a amostra apresentar concentrações mais altas de nitrato, sugere que esta poluição é mais antiga (BRAGA *et al.*, 2002).

As concentrações de nitrogênio total para o limite superior do intervalo com 95% de confiança encontrados foram de 0,54mg/L e de 0,65mg/L, para o revestimento blocos vazados e asfalto poroso respectivamente. O valor de nitrogênio encontrado para a água superficial foi muito próximo dos encontrados nos pavimentos, sendo o limite superior do intervalo com 95% de confiança igual a 0,6mg/L. Já o nitrato foi encontrado na concentração de 0,67mg/L para o asfalto poroso, 0,49mg/L no blocos vazados e 1,8mg/L na amostra de escoamento superficial. Para o nitrogênio amoniacal, os valores encontrados foram de 0,63mg/L no asfalto poroso, 0,46mg/L para o blocos vazados e de 0,98mg/L nas amostras de escoamento superficial. Para este parâmetro, percebe-se que a água que escoou superficialmente e a que está presente no interior do reservatório de brita são de boa qualidade. A comparação entre as amostras para o parâmetro nitrogênio total pode ser observada na figura 5.11.

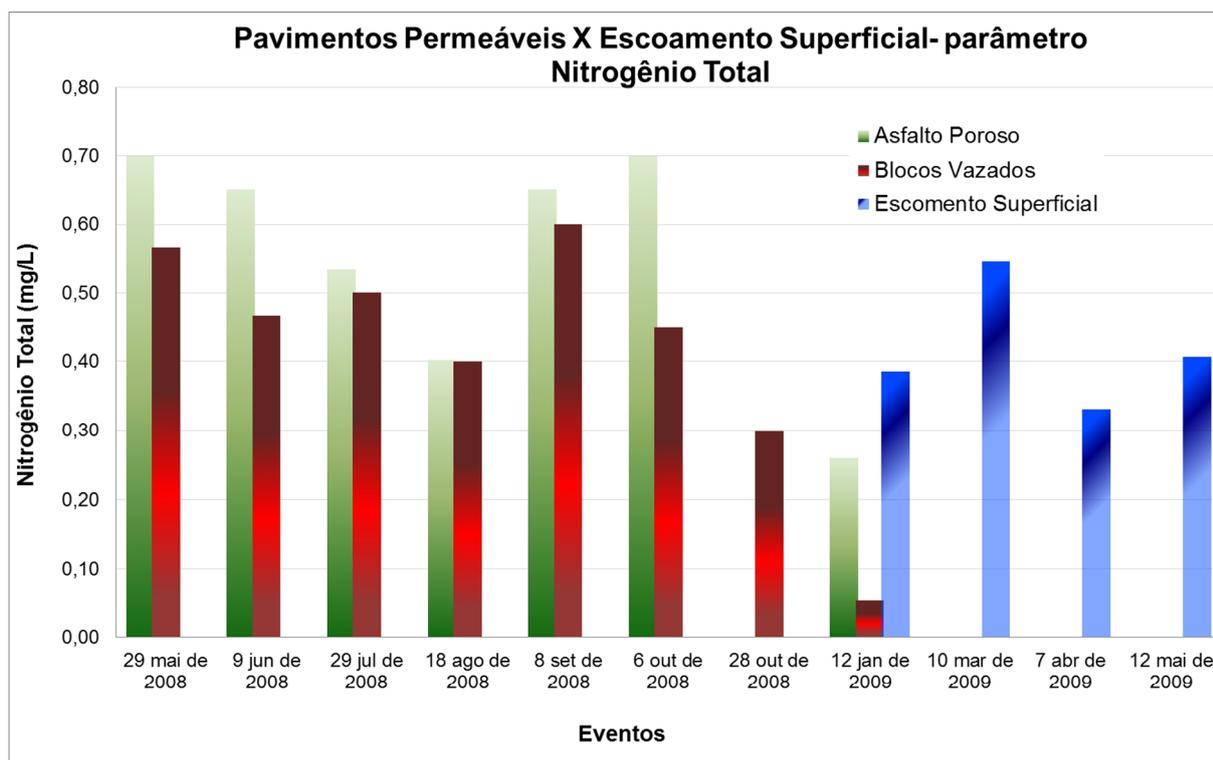


Figura 5.11: Comparação dos valores de nitrogênio total dos revestimentos asfalto poroso, blocos vazados e nas amostras de escoamento superficial.

As águas de escoamento superficiais podem conter metais pesados, tais como: cádmio, cromo, cobre, chumbo e zinco. Além de serem tóxicos, esses metais podem se acumular em ambientes aquáticos, aumentando sua concentração na biomassa de organismos à medida que se evolui na cadeia alimentar. Além da difícil biodegradação, esses compostos apresentam características carcinogênicas (geração de câncer), mutagênicas (influências nas células reprodutoras) e, até mesmo, teratogênicas (geração de fetos com graves deficiências físicas). Os resultados das análises das águas que infiltraram no pavimento mostraram que o chumbo não foi detectado em nenhuma amostra dos dois revestimentos. O mesmo ocorreu nas amostras coletadas do escoamento superficial. O elemento não foi detectado em nenhuma amostra de água neste estudo.

O elemento cádmio não foi encontrado em nenhuma amostra do revestimento de asfalto poroso e foi detectado em apenas uma amostra do revestimento de blocos vazados, sendo o valor de concentração igual a 0,002mg/L. O valor encontrado na amostra do blocos vazados ficou no limite de detecção para o método. Esse elemento também só foi detectado em uma amostra do escoamento superficial, com concentração de 0,01mg/L, sendo o valor exatamente igual limite máximo permitido. Mesmo sendo detectadas em apenas duas amostras,

as concentrações encontradas estão dentro do limite máximo permitido, segundo a resolução Conama 357 – classe II.

Em apenas duas amostras de água infiltrada do revestimento de blocos vazados foi possível detectar cromo. Nessas amostras, a concentração encontrada foi 0,004 e 0,005mg/L, sendo o valor mínimo para a detecção de 0,004mg/L. Esse elemento também só foi detectado em uma amostra do asfalto poroso. O valor encontrado nesta amostra foi de 0,007mg/L, sendo o máximo permitido de 0,05mg/L na CONAMA 357- classe II. Já nas amostras do escoamento superficial, o cromo foi detectado em 3 amostras das 5 analisadas, sendo o valor máximo encontrado de 0,01mg/L.

O elemento cobre foi analisado em dezenove amostras do revestimento blocos vazados e, em apenas duas amostras de água, foi encontrado. No asfalto poroso, somente uma amostra teve concentração acima do limite de detecção do método. As três amostras tiveram a mesma concentração de 0,005mg/L.

Óleos e graxas são substâncias tais como hidrocarbonetos, gorduras, ésteres, entre outros e são raramente encontrados em águas naturais. São normalmente encontradas em águas de drenagem urbana, devido ao fluxo de veículos no pavimento, esperava-se encontrar níveis elevados de óleos e graxas. Isso não se confirmou e, em todas as amostras infiltradas e analisadas nos dois revestimentos, não foi possível detectar esses elementos.

Os metais pesados: chumbo, cromo, cádmio, cobre e zinco podem estar presentes em pastilhas de freio e nos pneus dos veículos; na queima de combustíveis de veículos automotores; e na atmosfera da cidade, ligados a partículas que formam a poeira em suspensão. Já óleos e graxas podem ser encontrados em águas de drenagem devido à circulação de veículos

Com automóveis circulando no estacionamento, seria provável que concentrações elevadas deste elemento fossem encontradas nas amostras estudadas. Isso não foi confirmado, indicando que a ausência pode ser devido a três fatores. Primeiro, ao baixo tráfego de veículos que circula no estacionamento. Segundo fator a ser considerado é a renovação da frota de veículos em escala nacional. Com a idade média da frota caindo e carros mais modernos circulando nas ruas, a tendência é que a liberação desse tipo de poluente diminua. O terceiro fator pode estar relacionado com a boa qualidade do ar presente na região da área em estudo, que parece estar livre de metais. O estacionamento com pavimento permeável do estudo foi considerado de tráfego leve, ou seja, até 50 veículos comerciais por dia, segundo classificação de Caputo (2008).

Segundo CETESB (2011), surfactantes ou detergentes estão presentes nos esgotos sanitários e possuem concentrações na ordem de 3 a 6mg/L. Já efluentes industriais podem alcançar concentrações na ordem de 2000mg/L e descargas indiscriminadas de detergentes nas águas naturais levam a prejuízos de ordem estética provocados pela formação de espumas. Além de prejuízos estéticos, os detergentes aceleram a eutrofização e são compostos tóxicos para o zooplâncton. Assim como os metais pesados, os surfactantes não foram detectados na grande maioria das amostras dos pavimentos permeáveis. Quando detectados, a concentração máxima foi baixa, chegando a 0,04mg/L no revestimento asfalto poroso e 0,03mg/L no blocos vazados.

Assim como ocorreu nas amostras do pavimento permeável, os elementos cromo, zinco e cobre foram detectados em algumas análises realizadas no escoamento superficial. Além disso, as concentrações máximas encontradas ficaram abaixo do máximo permitido pela legislação. Os valores máximos encontrados foram de 0,01mg/L, para o Cádmio e Cromo, 0,11mg/L, para o Zinco, e 0,02mg/L para o Cobre. Os surfactantes também foram encontrados em concentrações baixas, sendo o máximo de 0,04mg/L. Óleos e graxas foram detectadas em apenas uma amostra do escoamento superficial tendo como valor a concentração de 20mg/L.

As bactérias do grupo coliforme estão presentes no intestino de homens e de animais e servem como indicadoras da contaminação de uma amostra de água por fezes. A maior parte das doenças de vinculação hídrica é transmitida para as pessoas que consomem, de forma inadequada, água contaminada por organismos patogênicos presentes nas fezes que atingem o ambiente aquático. Quanto maior a quantidade de bactérias coliformes em uma amostra de água, maior é a chance de que haja contaminação por organismos patogênicos. Logo, a contaminação fecal é medida através da análise de coliformes. Em duas amostras do pavimento permeável foi feita análise de coliformes totais e coliformes termotolerantes.

No evento do dia 12/01/2009 foi feita análise de coliformes totais e termotolerantes para os dois revestimentos. Existem grandes variações de valores para esses parâmetros. Nas duas amostras do asfalto poroso, os valores de coliformes totais encontrados foram de 900NMP/100mL e de 2NMP/100mL. Já para os coliformes termotolerantes foi detectado em 1 amostra das duas coletadas, sendo o valor encontrado igual a 8NMP/100mL. No revestimento de blocos vazados, o valor encontrado para coliformes totais foi maior que 16000NMP/100mL, na primeira amostra, e de 5000NMP/100mL na segunda amostragem. Já os valores de coliformes termotolerantes no revestimento blocos vazados foi bem maior do que no asfalto, alcançando os valores de 140NMP/100mL na primeira amostra e 13NMP/100mL na segunda amostra.

Para o escoamento superficial, foram realizadas coletas das amostras em cinco eventos e, assim, foi possível calcular a média, desvio padrão e o limite superior do intervalo com 95% de confiança. Para os coliformes totais, o limite superior do intervalo com 95% de confiança foi de 30703NMP/100mL . Já para os coliformes termotolerantes, o limite superior do intervalo foi 25108NMP/100mL. Embora haja grande variação nos valores desse parâmetro, verifica-se que as concentrações encontradas nas amostras de escoamento superficial são sensivelmente superiores às encontradas nas amostras de águas provenientes do pavimento permeável.

Os resultados descritos acima mostram que, de uma maneira geral, a qualidade da água que infiltrou no pavimento, nos dois revestimentos para os eventos analisados, está dentro dos parâmetros esperados, sendo algumas análises de melhor qualidade, se comparadas as resoluções nº 357 e 430 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). O tipo de revestimento parece não influenciar na qualidade da água que infiltra no solo, já que os valores encontrados no asfalto poroso e blocos vazados são muito próximos.

Comparando-se os resultados de qualidade do escoamento superficial com a água que infiltra no solo, percebe-se uma melhora da qualidade da água que passou pelo dispositivo pavimento permeável. A água de escoamento superficial possui níveis turbidez, sólidos totais, DQO, fósforo total, ortofosfato e zinco total maiores se comparados ao do pavimento permeável. Os resultados encontrados neste estudo indicam que os pavimentos permeáveis colaboram de forma positiva na retenção de poluentes.

A preocupação com a qualidade da água proveniente de pavimentos permeáveis vem do fato de as estruturas de infiltração poderem conduzir contaminação ao lençol freático. Mas, além disso, dependendo do tipo de pavimento permeável utilizado, a água armazenada no reservatório de brita pode ser aproveitada para outro fim que não seja a infiltração no subsolo. Caracterizar a qualidade é o primeiro passo para verificar a viabilidade de aproveitamento da água para usos não nobres.

5.1.3 Síntese dos resultados – Pavimento permeável

Os dados indicam que a cobertura permeável blocos vazados continua fazendo o controle adequado do volume de escoamento superficial, mesmo com valores de escoamento superiores aos encontrados no passado, no mesmo dispositivo experimental. Já a cobertura de asfalto poroso está com a capacidade de infiltração comprometida, produzindo, nesta segunda etapa de monitoramento, alto escoamento superficial, quando comparando a valores do passado. Concomitante ao aumento do escoamento superficial, ocorreu a falta de armazenamento no reservatório de brita. Isso pode indicar uma possível obstrução da camada superficial que impediria a infiltração da água, no revestimento asfalto poroso. Os resultados de qualidade da água indicam que os pavimentos permeáveis não contribuem para um aumento da contaminação, uma vez que a água armazenada no reservatório possui boa qualidade se comparada a padrões de lançamento de efluentes, segundo as resoluções nº 357 e 430 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) e padrões de contaminações segundo a EPA.

5.2 Cobertura Verde

5.2.1 Análise do Comportamento Hidrológico – Cobertura Verde

Para o presente estudo foi analisado o comportamento hidrológico da estrutura para 19 eventos de precipitação, durante os meses de maio de 2008 a outubro de 2009. Os dados sobre as características de cada evento e os tempos para o início do escoamento nos reservatórios para os 4 módulos experimentais são mostrados nas tabelas 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13.

A tabela 5.10 mostra, para cada evento o horário de início da precipitação, o total precipitado e o tempo de duração da chuva.

Tabela 5.10: Características da precipitação para os 19 eventos estudados.

Data do Evento	Início Chuva	Total Prec. (mm)	Duração da chuva (h:min)
28/05/2008	13h	66,33	34:55:00
07/06/2008	13h:55min	71,58	55:00:00
20/06/2008	06h00min	11,87	05:30:00
20/07/2008	5h	21,44	48:00:00
27/07/2008	3h35min	139,54	71:50:00
01/08/2008	21h40min	38,30	48:00:00
16/08/2008	13h40min	72,70	71:40:00
05/09/2008	04h00min	100,37	33:10:00
10/09/2008	15h:10min	70,01	30:25:00
04/10/2008	20h40min	28,06	12:10:00
25/10/2008	08h25min	62,57	26:10:00
23/12/2008	17h35min	38,26	21:40:00
08/01/2009	20h45min	23,51	10:55:00
07/07/2009	00h50min	21,00	11:25:00
01/08/2009	22h45min	22,73	06:35:00
06/08/2009	03h15min	20,30	04:10:00
17/08/2009	00h55min	56,64	56:55:00
17/09/2009	16h50min	22,94	15:35:00
24/10/2009	09h45min	34,14	17:50:00

Na tabela 5.11 pode-se observar o horário do início da precipitação em cada evento e a resposta (início do escoamento) para cada um dos módulos experimentais.

Tabela 5.11: Início do escoamento superficial (h:min) e tempo (h:min:seg) para o início do escoamento após iniciada a precipitação.

Data do Evento	Início do escoam. c/ telhado verde		Início do escoam. s/ telhado verde	
	Terraço	Telhado	Terraço	Telhado
28/05/2008	17h40min (4:40:00)	14h40min (1:40:00)	13h10min (00:10:00)	13h10min (00:10:00)
07/06/2008	2h40min (12:45:00)	15h20min (1:25:00)	14:00:00 (00:05:00)	15:00:00 (01:05:00)
20/06/2008	S/ escoamento	S/ escoamento	06h05min (0:05:00)	06h05min (0:05:00)
20/07/2008	S/ escoamento	7h35min (2:35:00)	5h10min (0:15:00)	5h10min (0:15:00)
27/07/2008	15h40min (12:05:00)	14h15min (10:40:00)	3h40min (0:05:00)	1h15min (4:50:00)
01/08/2008	1h30min (3:50:00)	0h25min (2:45:00)	21h50 (10min)	23h20min (1:40:00)
16/08/2008	17/08/2008 15h10min (25:30:00)	17/08/2008 13h05min (23:25:00)	14h15min (00:35:00)	14h20min (00:40:00)
05/09/2008	15h20min (11:20:00)	9h45min (5:45:00)	4h00min (0:00:00)	4h05min (0:05:00)
10/09/2008	21h35min (6:25:00)	18h55min (3:45:00)	15h15min (0:05:00)	15h15min (0:05:00)
04/10/2008	08h35min (11:55:00)	01h15min (04:35:00)	20h50min (0:10:00)	20h55min (0:15:00)
25/10/2008	12h15min (03:50:00)	26/10/2008 08h35min (24:10:00)	9h00min (0:35:00)	9h05min (0:40:00)
23/12/2008	10h35min de 24/12/08 (17:00:00)	18h40min (1:05:00)	18h35min (1:00:00)	18h30min (0:55:00)
08/01/2009	S/ escoamento	22h10min (1:25:00)	21h25min (0:40:00)	21h10min (0:25:00)
07/07/2009	12h50min (12:00:00)	09h10min (8:20:00)	01h00min (00:10:00)	01h (00:10:00)
01/08/2009	09h40min de 02/08/09 (10:55:00)	04h45min (6:00:00)	22h50min (00:05:00)	23h15min (00:30:00)
06/08/2009	07h10min (3:55:00)	05h55min (2:40:00)	03h15min (00:00:00)	03h25min (00:10:00)
17/08/2009	10h25min (9:30:00)	08h40min (7:45:00)	01h (00:05:00)	01h (00:05:00)
17/09/2009	07h55min de 18/09/09 (15:05:00)	03h30min de 18/09/09 (10:40:00)	18h30min (01:40:00)	18h45min (01:55:00)
24/10/2009	13h40min (3:55:00)	11h05min (1:20:00)	10h30min (00:45:00)	10h20min (00:35:00)

A tabela 5.12 apresenta os valores de volumes escoados nos quatro módulos experimentais, após três horas do início da precipitação e a precipitação acumulada durante esse período.

Tabela 5.12: Volumes escoados nos 4 módulos experimentais após 3 horas do início da precipitação.

Data do Evento	Dias antecedentes sem chuva	Vol. Escoado após 3 h (c/telhado verde) (mm)		Vol. Escoado após 3 h (s/telhado verde) (mm)		Precipitação Acumulada em 3h (mm)
		Terraço	Telhado	Terraço	Telhado	
28/05/2008	14	0,00	4,53	12,76	13,20	18,8
07/06/2008	4	0,00	0,40	2,79	1,58	4,29
20/06/2008	5	0,00	0,00	7,02	7,12	9,85
20/07/2008	11	0,00	0,16	3,31	3,90	5,05
27/07/2008	4	0,00	0,00	1,36	1,71	2,26
01/08/2008	1	0,00	0,29	12,07	11,51	17,51
16/08/2008	3	0,00	0,00	6,21	6,32	8,35
05/09/2008	11	0,00	0,00	3,02	3,13	3,78
10/09/2008	3	0,00	0,00	9,85	10,18	13,95
04/10/2008	3	0,00	0,00	9,94	10,43	12,66
25/10/2008	2	0,00	0,00	6,21	6,54	6,8
23/12/2008	7	0,00	9,58	14,14	16,80	22,33
08/01/2009	3	0,00	5,31	12,23	14,29	19,25
07/07/2009	7	0,00	0,00	6,27	6,78	8,61
01/08/2009	9	0,00	0,00	4,89	4,80	6,8
06/08/2009	2	0,00	1,77	11,23	11,40	15,24
17/08/2009	6	0,00	0,00	6,90	6,79	1,52
17/09/2009	3	0,00	0,00	1,11	0,90	2,5
24/10/2009	35	0,00	8,07	15,84	17,54	21,31

Os resultados do módulo terraço com cobertura vegetal mostram que, para os 19 eventos estudados, não houve escoamento superficial nas primeiras três horas após o início da chuva, sendo o terraço com cobertura vegetal capaz de reduzir o escoamento a zero, pelo menos nas três primeiras horas após o início da precipitação. Na figura 5.12 pode-se observar a comparação de escoamento superficial para eventos, classificados de acordo com a maior precipitação acumulada nas primeiras 3 horas. Como dito anteriormente, pode-se observar no gráfico a ausência de escoamento superficial no módulo terraço com cobertura vegetal. O maior evento de chuva acumulada nas primeiras três horas de análise foi no dia 23 de dezembro de 2008, alcançando o valor de 22,33mm. Os dados sugerem que o terraço com cobertura vegetal estudado é capaz de reter, na totalidade, precipitações com volumes de aproximadamente 22,33mm.

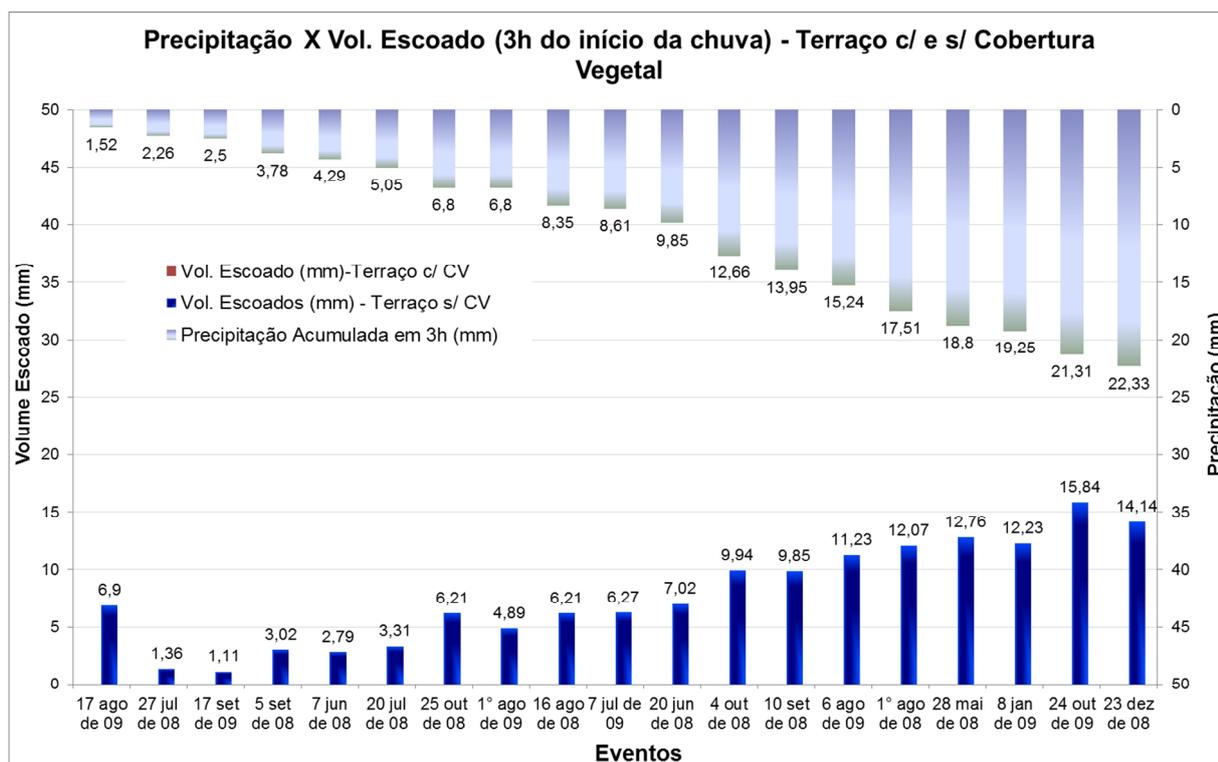


Figura 5.12: Comparação entre os escoamentos superficiais do terraço com e sem cobertura vegetal e a precipitação acumulada.

Um exemplo que demonstra a capacidade de armazenamento e retenção de água nas coberturas vegetais pode ser acompanhado na figura 5.13. Pode-se observar a resposta do terraço com cobertura vegetal desde o início da chuva até as primeiras 24 horas após o início da precipitação (evento do dia 28 de maio de 2008). O módulo começou a apresentar escoamento somente 4h40min, após o início da chuva. Além de retardar o início do escoamento, o volume liberado 24 horas após o início da chuva foi de apenas 13,5% do total precipitado. Isso significa que dos 34,95mm de chuva, 30,22mm ficam retidos na vegetação do terraço.

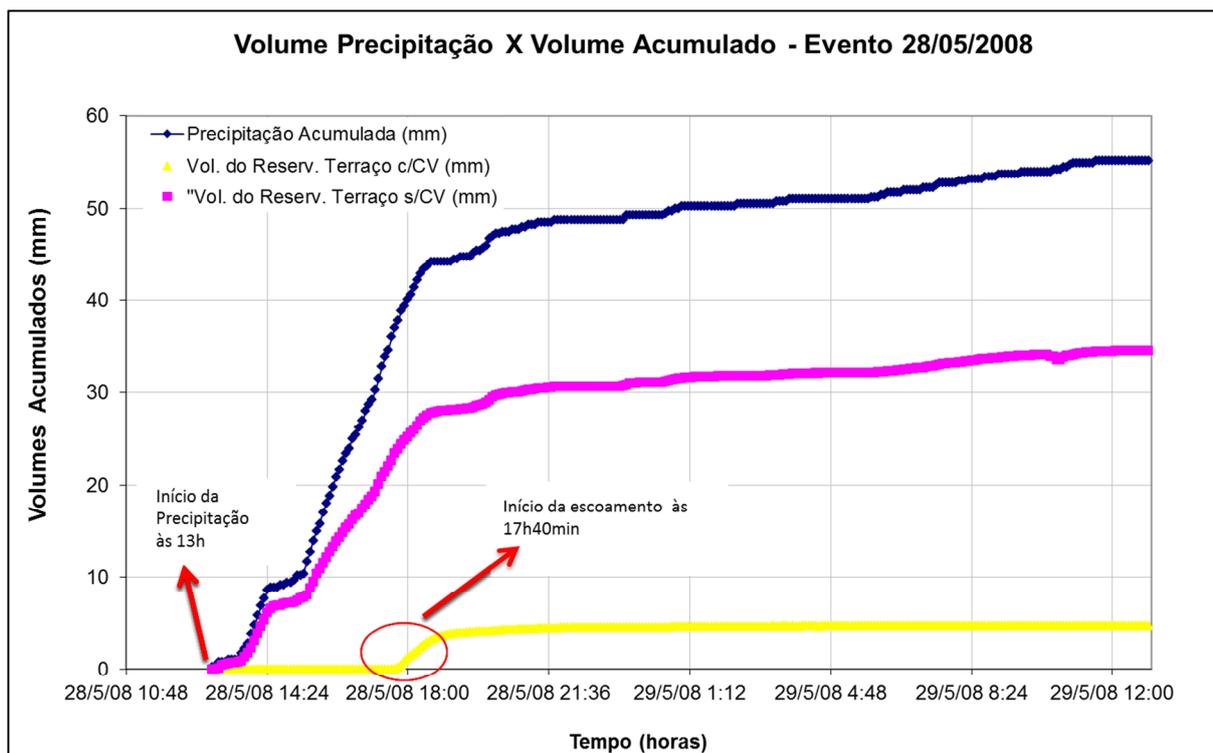


Figura 5.13: Comparação entre os escoamentos superficiais do terraço com e sem cobertura vegetal e a precipitação acumulada.

Como não houve escoamento superficial para o terraço com cobertura vegetal nas primeiras três horas após o início da chuva, fatores como intensidade média da chuva e números antecedentes sem chuva parecem ter menor influência para os volumes escoados superficialmente. É importante considerar que, para os eventos analisados neste estudo, a intensidade média de chuva nas primeiras três horas do início da precipitação foi menor do que 7,5mm/h.

Já o módulo telhado com cobertura vegetal apresentou escoamento em 42% dos eventos analisados. Nas primeiras três horas do início da chuva, oito eventos apresentaram escoamento superficial. Fazendo a mesma comparação realizada para o terraço com cobertura vegetal, observa-se que a figura 5.14 mostra que, diferentemente do terraço, o telhado com cobertura vegetal apresentou escoamento superficial nas primeiras três horas após o início da precipitação em oito dos dezenove eventos analisados. Observa-se também que os volumes escoados no terraço são menores do que no telhado sem cobertura vegetal. A figura 5.14 mostra a tendência de que maiores volumes de chuva gerem maiores escoamentos superficiais para o telhado com cobertura vegetal. Os resultados mostram que, dos 19 eventos, 13 eventos tiveram chuvas abaixo de 14mm nas três primeiras horas de monitoramento. Dessas treze, onze eventos não geraram escoamento superficial. As duas exceções apresentaram os valores de

escoamento superficial de 0,4mm e 0,16mm. Os baixos valores de escoamento superficial gerados nos dois eventos sugerem que o telhado com cobertura vegetal estudado é capaz de reter, na totalidade, precipitações com volumes abaixo de 14mm.

Mesmo pequenos volumes de chuvas, como os ocorridos nos eventos do dia 07 de junho de 2008 e 20 de julho de 2008, podem gerar escoamentos superficiais. Isso pode indicar que, além do volume da precipitação, outros fatores podem influenciar no volume escoado superficialmente para o módulo telhado com cobertura vegetal. Variáveis como: inclinação da cobertura, umidade do substrato quando iniciada a precipitação, intensidade da chuva podem interferir nos volumes escoados superficialmente.

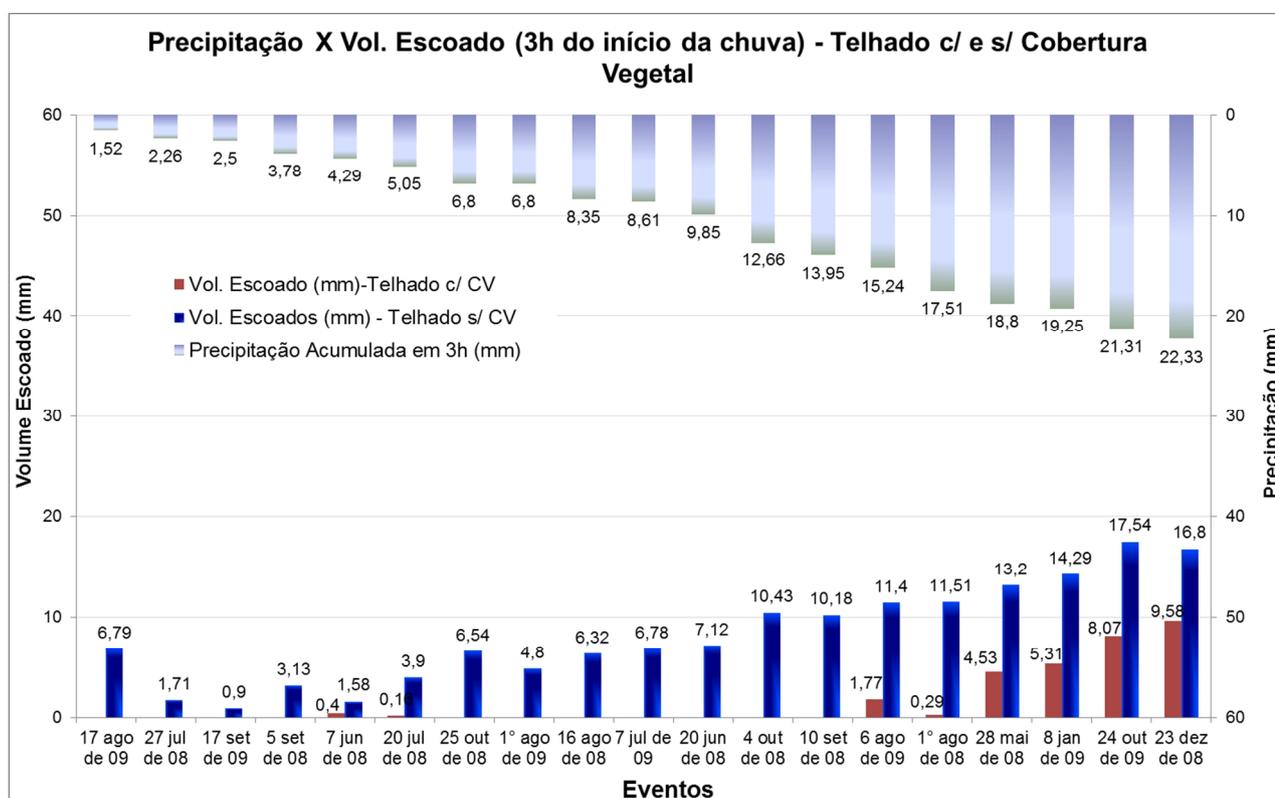


Figura 5.14: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado com e sem cobertura vegetal e a precipitação acumulada.

A figura 5.15 mostra a resposta do telhado com cobertura vegetal ao evento do dia 25 de maio de 2008. Comparando telhado e terraço, pode-se verificar que houve uma diminuição do tempo de resposta do telhado em relação ao terraço. O tempo de início do escoamento do módulo telhado com cobertura vegetal, ocorreu às 14h40min, ou seja, três horas antes da resposta no módulo terraço. Além disso, os volumes escoados no telhado foram

superiores aos do terraço. O total precipitado nas primeiras três horas foi de aproximadamente 19mm, já os volumes escoados foram de 4,5mm para o telhado e nulo no terraço com cobertura verde para o evento citado. Verifica-se no mesmo gráfico que, com o passar tempo, os volumes de escoados no telhado com cobertura vegetal aproximam-se dos valores do telhado sem cobertura vegetal. Isso pode indicar que, com o passar do tempo, a estrutura aumenta a umidade e, conseqüentemente, perde a capacidade de infiltração. A partir de certo ponto, o armazenamento é comprometido e começa a haver, então, a liberação de maiores volumes.

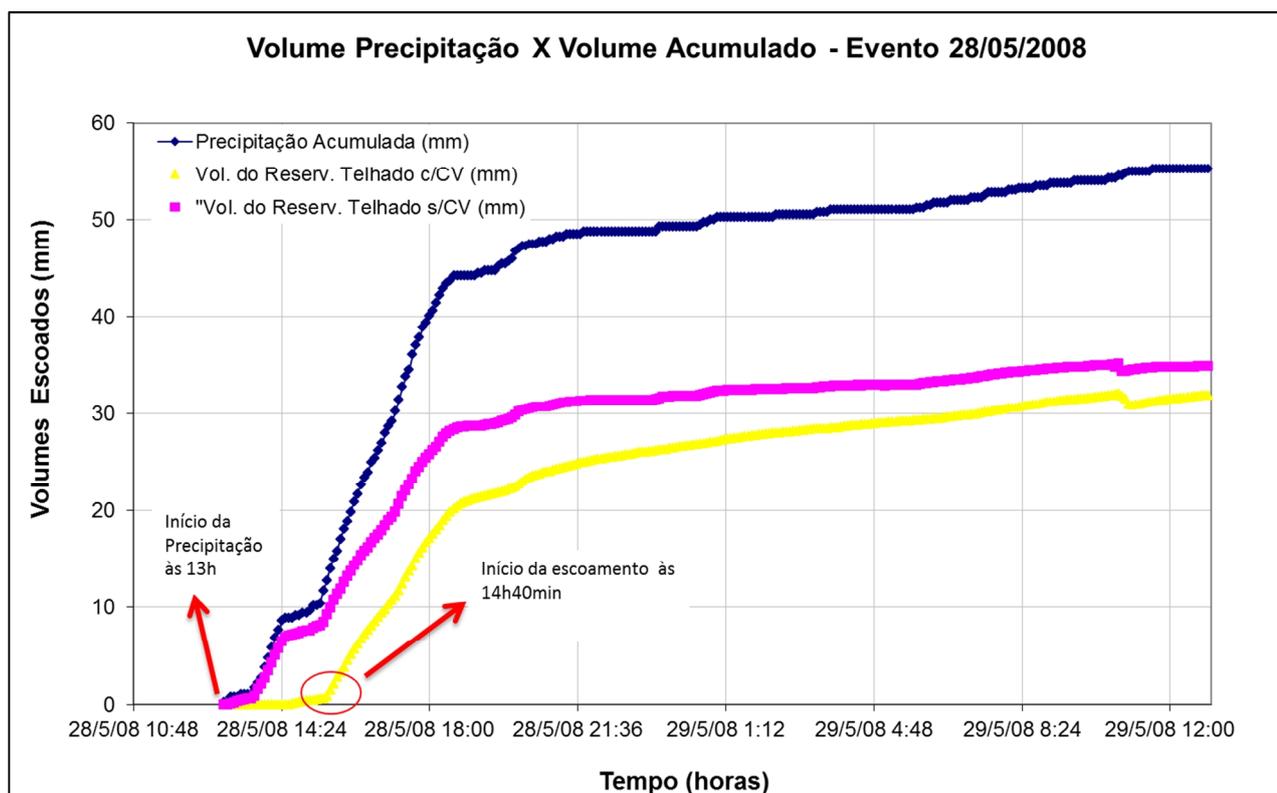


Figura 5.15: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado com e sem cobertura vegetal e a precipitação acumulada.

Na figura 5.16 foi feita a comparação entre a intensidade média da chuva e os volumes de escoamento superficial dos telhados verdes nas primeiras três horas após início da precipitação. No gráfico, observa-se que valores de intensidade média de chuvas inferiores a 6,27mm/h parecem não influenciar de uma maneira direta nos volumes escoados superficialmente. A influência da intensidade da precipitação começa a ficar mais evidente somente para intensidades superiores a 5,84mm/h, onde a partir desse valor, as maiores intensidades estão associadas aos maiores volumes de escoamento superficial.

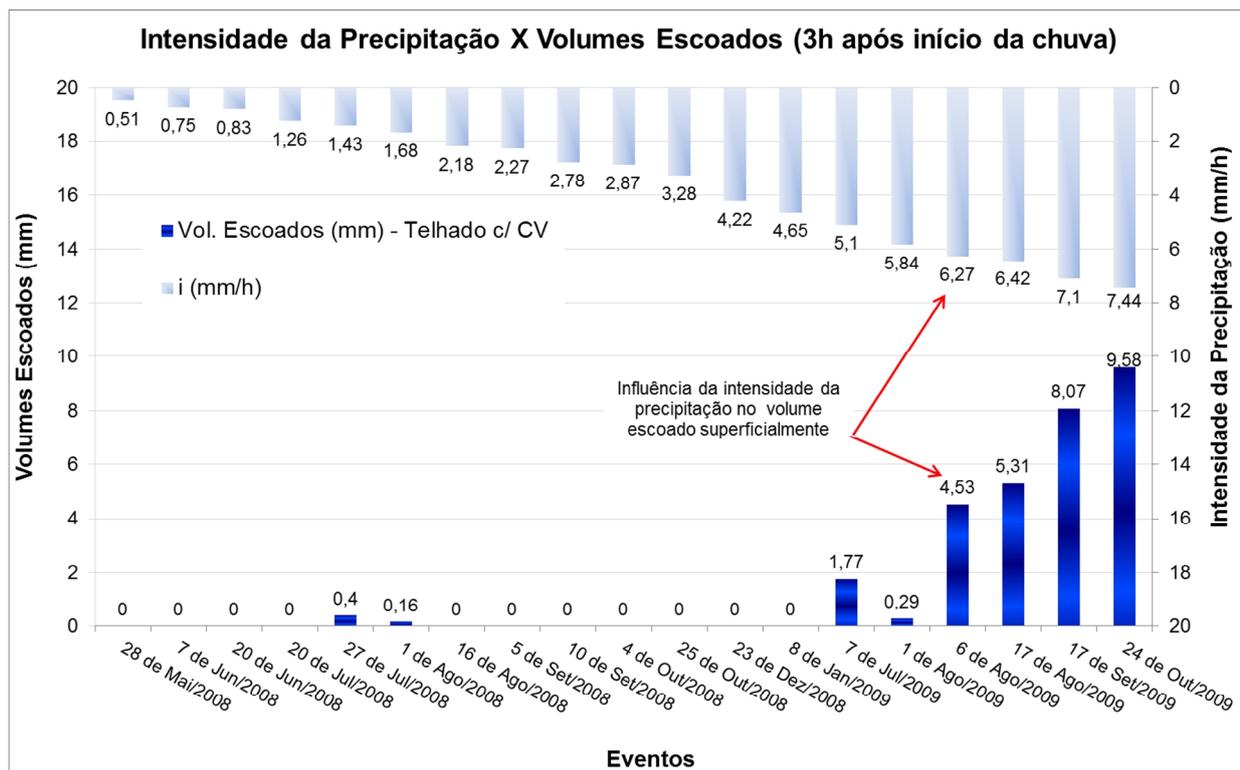


Figura 5.16: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado com cobertura vegetal e a intensidade média da precipitação nas primeiras três horas após o início da chuva.

Se os eventos forem organizados de acordo com estações do ano e a questão da sazonalidade for considerada, pode-se observar que, nas primeiras três horas após o início da precipitação, os maiores volumes escoados superficialmente verificaram-se na primavera e no verão. É justamente, nestes meses, que ocorrem os maiores volumes precipitados e, também, as maiores intensidades médias. Isso parece demonstrar que, para este estudo, o volume precipitado de chuva pode preponderar sobre os demais fatores que controlam o escoamento superficial deste experimento. Os dados das primeiras 3 horas dos eventos podem ser visualizados na figura 5.17.

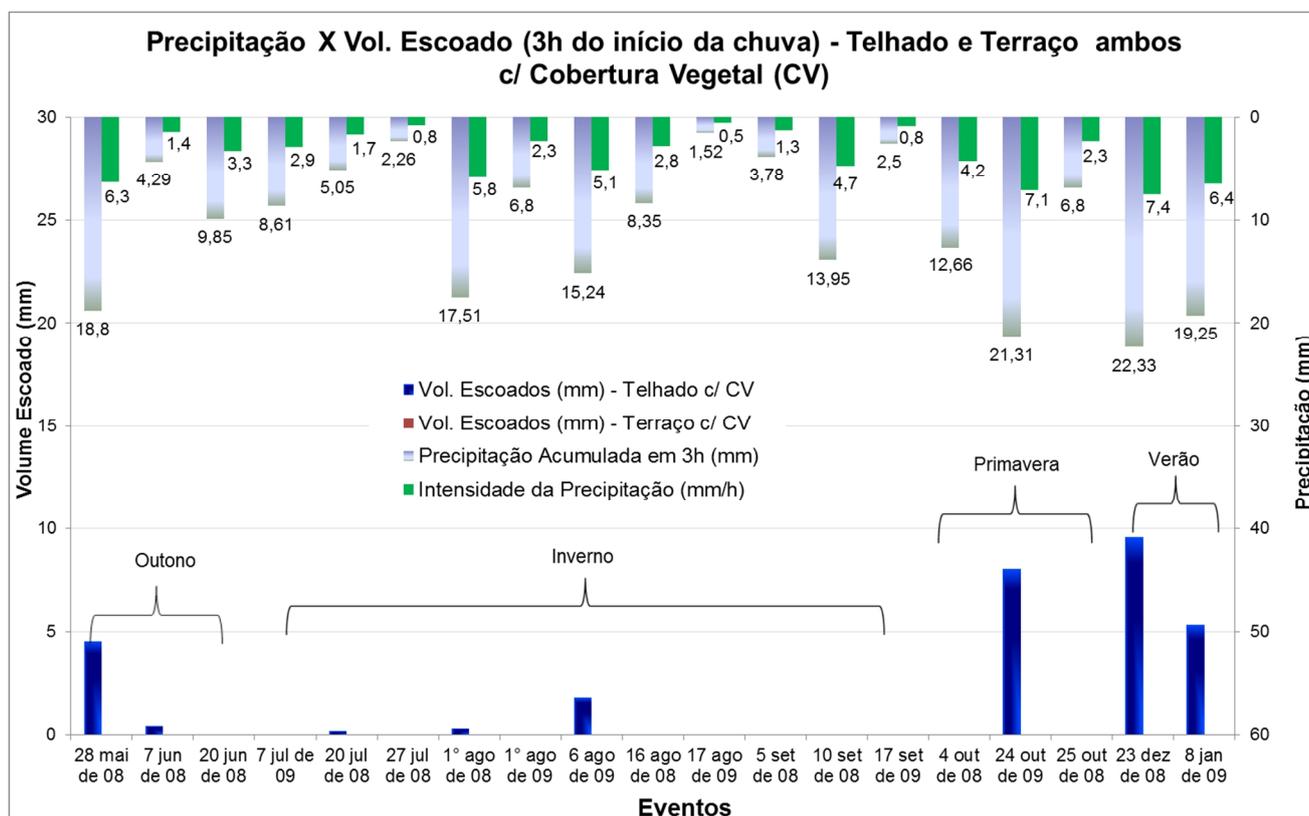


Figura 5.17: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado e terraço com cobertura vegetal, precipitação acumulada no período e a intensidade média da precipitação nas primeiras três horas após o início da chuva.

Informações sobre o comportamento do terraço e do telhado verde em resposta à precipitação ocorrida no período de seis horas após o seu início pode ser verificados na tabela 5.13 e nas figuras 5.18 e 5.19. Informações sobre os volumes escoados dos dezenove eventos mostram que apenas 26% dos eventos geram escoamento para o módulo terraço. O volume máximo de escoamento superficial gerado para este módulo, seis horas após o início da precipitação, foi de 7,7mm para o evento do dia 1º de agosto de 2008. A precipitação acumulada ocorrida, no mesmo período, foi de 36,55mm. Dos eventos que geram escoamento, o menor volume escoado foi de 0,7mm obtido no evento 06 de agosto de 2009.

O telhado com cobertura vegetal produziu escoamento em 63% dos eventos, após seis horas do início da chuva. O volume máximo escoado ocorreu no evento do dia 25 de maio de 2008, no qual foram gerados 21,1mm de um total 44,2mm precipitados. O referido evento também possuiu a maior das intensidades médias de chuvas para as primeiras seis horas, alcançando 7,37mm/h.

Tabela 5.13: Volumes escoados nos 4 módulos experimentais até 6 horas do início da precipitação.

Data do Evento	Dias antecedentes sem chuva	Vol. Escoado (mm) após 6h (c/telhado verde)		Vol. Escoado (mm) após 6h (s/telhado verde)		Precipitação Acumulada em 6h (mm)
		Terraço	Telhado	Terraço	Telhado	
		28/05/2008	14	3,75	21,09	
07/06/2008	4	0,00	5,58	10,47	9,09	13,66
20/06/2008	5	0,00	0,00	8,50	8,56	9,85
20/07/2008	11	0	0,12	3,68	3,89	5,05
27/07/2008	4	0,00	0,00	1,89	1,95	2,26
01/08/2008	1	7,67	2,04	25,15	24,68	36,55
16/08/2008	3	0,00	0,00	6,27	6,26	8,35
05/09/2008	11	0,00	0,14	8,88	8,80	10,62
10/09/2008	3	0,00	0,93	12,37	11,98	16,49
04/10/2008	3	0,00	3,48	17,34	17,39	23,29
25/10/2008	2	7,60	0,00	6,27	6,47	12,83
23/12/2008	7	0,00	10,32	14,95	16,80	22,58
08/01/2009	3	0,00	5,97	13,14	14,48	19,75
07/07/2009	7	0,00	0,00	6,27	6,78	8,61
01/08/2009	9	0,00	0,14	14,40	15,18	20,2
06/08/2009	2	0,66	8,39	15,62	15,64	20,3
17/08/2009	6	0,00	0,00	7,22	7,18	2,03
17/09/2009	3	0,00	0,00	4,04	3,9	5,75
24/10/2009	35	1,26	14,10	21,78	23,79	27,85

Observa-se no gráfico da figura 5.18 que os maiores volumes escoados, após seis horas do início da chuva, não correspondem sempre às maiores intensidades de chuvas para esse período. Dos cinco eventos que geraram escoamento superficial no terraço, três tiveram intensidade de precipitações acima de 4,5mm/h. No evento do dia 25 de outubro de 2008, a intensidade da precipitação foi de 2,1mm/h para volume escoado de 7,6mm. Já a chuva do evento do dia 6 de agosto teve uma duração menor do que seis horas. Isso indica que, em alguns eventos, as chuvas ocorrem principalmente nas primeiras horas, sendo que a água armazenada nesse período passa a ser liberada lentamente para o sistema de drenagem. O tempo de duração da chuva é outro fator que pode influenciar nos volumes escoados. Já os dois maiores volumes escoados superficialmente no terraço com cobertura vegetal, 6 horas após o início da chuva, são respectivamente os eventos dos dias 01/08/2008 e 25/10/2008. Esses

eventos tiveram somente 1 dia antecedente sem de chuva para o dia 01/08 e 2 dias antecedentes sem chuvas para o dia 25/10.

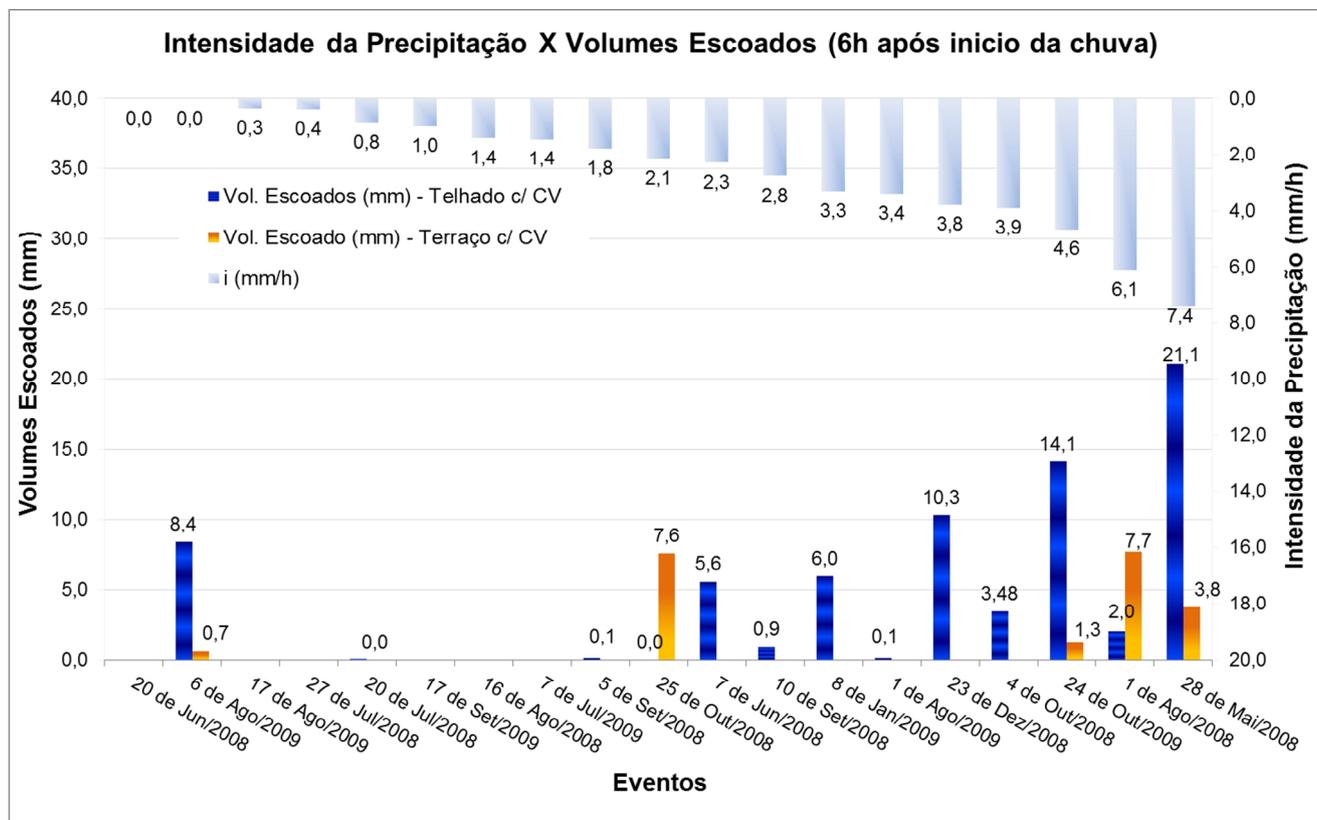


Figura 5.18: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado e terraço com cobertura vegetal e a intensidade média da precipitação nas primeiras seis horas após o início da chuva.

Uma análise semelhante pode ser efetuada levando em consideração a sazonalidade. Após 6 horas do início da chuva, o maior volume escoado superficialmente ocorreu no mês de maio (outono). Nesta situação, também temos o maior volume precipitado e a maior intensidade média para o período de seis horas, sempre para o telhado com cobertura vegetal. Isso parece corroborar com a ideia de que o volume precipitado, a intensidade média da precipitação e a inclinação da cobertura têm maiores influências nos volumes escoados superficialmente. Os dados são mostrados na figura 5.19.

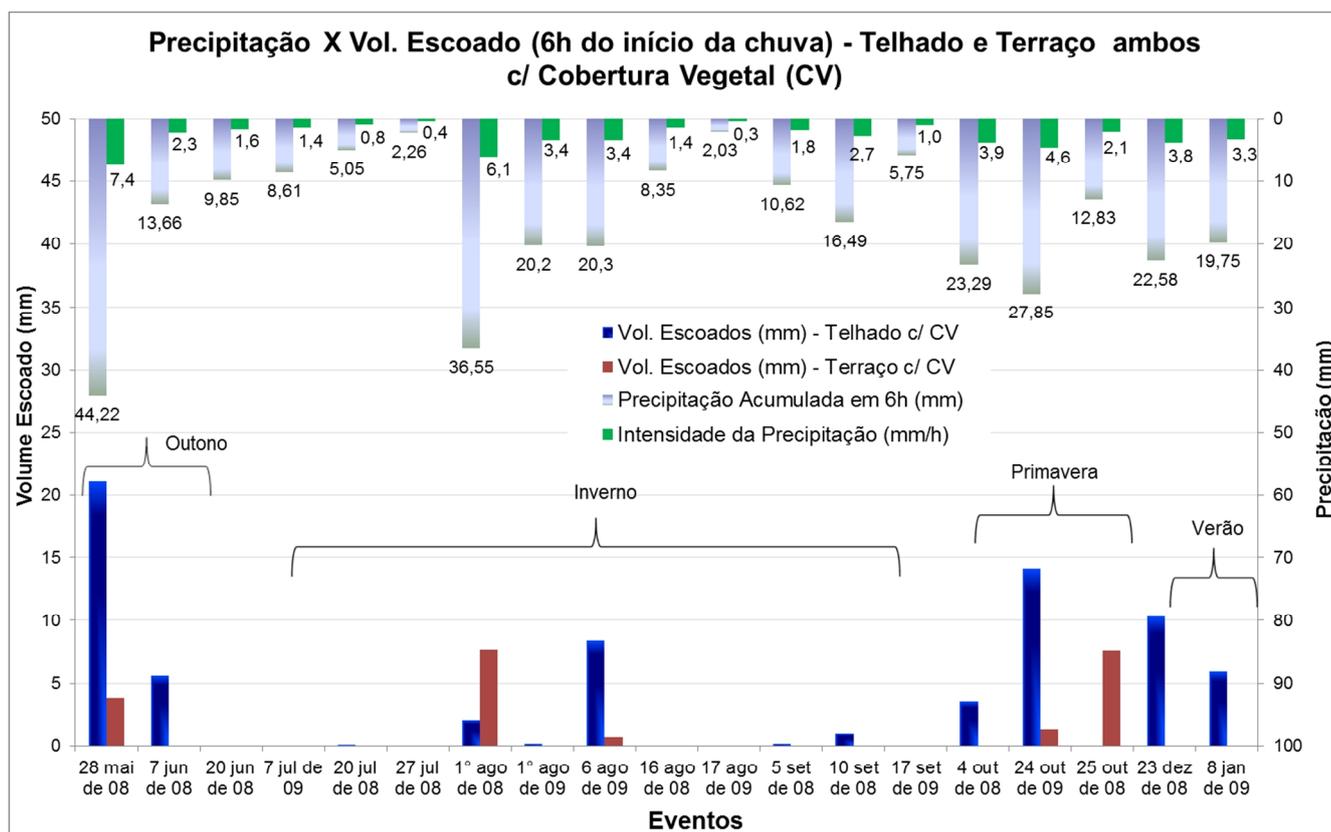


Figura 5.19: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado e terraço com cobertura vegetal, precipitação acumulada no período e a intensidade média da precipitação nas primeiras seis horas após o início da chuva.

É importante salientar que, devido ao fenômeno La Niña (resfriamento das águas do Oceano Pacífico Equatorial) que ocorreu na metade de 2008 até início de 2009, não foi possível monitorar mais eventos no verão, devido à falta de eventos chuvosos. Sabe-se que o regime de chuvas no sul do Brasil apresenta precipitações com maiores volumes e maiores intensidades no verão. Existe a necessidade de monitoramento de mais eventos nesta estação para que se possa avaliar, de maneira mais precisa, o comportamento de coberturas verdes em eventos de maior magnitude.

Com o passar das horas, a cobertura verde vai ganhando umidade e perdendo a capacidade de reter água. Os módulos com cobertura vegetal começam a liberar uma quantidade maior de escoamento. Isso pode ser observado nos resultados apresentados nas tabelas 5.14 e 5.15, onde são mostrados os valores dos volumes escoados na estrutura, após 12 e 24 horas do início da chuva.

Tabela 5.14: Volumes escoados nos 4 módulos experimentais até 12 horas do início da precipitação.

Data do Evento	Dias antecedentes sem chuva	Vol. Escoado (mm) após 12h (c/telhado verde)		Vol. Escoado (mm) após 12h (s/telhado verde)		Precipitação Acumulada em 12h (mm)
		Terraço	Telhado	Terraço	Telhado	
		28/05/2008	14	4,61	27,16	
07/06/2008	4	0,00	10,38	11,53	10,74	14,42
20/06/2008	5	0,00	0,00	8,68	8,62	11,87
20/07/2008	11	0,00	0,57	6,28	6,79	8,86
27/07/2008	4	0,00	8,91	19,33	20,26	30,2
01/08/2008	1	9,84	2,50	26,27	25,74	38,3
16/08/2008	3	0,00	0,00	6,39	6,46	9,1
05/09/2008	11	2,21	16,66	27,34	27,64	37,98
10/09/2008	3	0,36	1,93	12,60	12,13	16,74
04/10/2008	3	0,0	4,91	19,89	21,4	27,56
25/10/2008	2	9,75	0,00	6,39	6,68	28,22
23/12/2008	7	0,00	11,12	15,80	17,90	24,33
08/01/2009	3	0,00	6,99	14,96	17,05	23,51
07/07/2009	7	0,01	3,54	15,86	16,86	21
01/08/2009	9	0,18	4,73	16,57	17,05	22,73
06/08/2009	2	1,50	8,81	15,56	15,51	20,55
17/08/2009	6	4,61	14,73	26,87	28,11	24,06
17/09/2009	3	0,00	1,73	11,42	11,54	15,84
24/10/2009	35	5,43	18,53	27,22	28,53	33,14

Após 12 horas do início da chuva, o terraço com cobertura vegetal continua retendo todo o escoamento superficial em 53% dos eventos analisados. Já o telhado retém a totalidade do escoamento em 16% destes eventos. Dos dezenove eventos analisados, dois eventos não geraram nenhum escoamento superficial em ambas as coberturas vegetais, mesmo doze horas após o início da chuva. Os dois eventos que não geram escoamento foram dos dias 20 de junho de 2008 e 16 de agosto de 2008, os volumes precipitados nos eventos foram de 11,87mm e 9,1mm respectivamente.

Os dois maiores volumes escoados superficialmente no terraço com cobertura vegetal, após 12 horas após o início da chuva, continua sendo os eventos dos dias 01/08/2008 e 25/10/2008. Os volumes escoados no módulo telhado com cobertura vegetal são maiores do que no terraço com cobertura vegetal em 88% dos eventos que geram escoamento, após 12 horas do início da chuva.

O maior volume escoado no telhado verde para esse período foi de 27,16mm para o dia 28/05/2008, sendo a precipitação acumulada de 50,25mm. O evento citado foi o que apresentou maior precipitação pluviométrica nas primeiras 12 horas. Na figura 5.20, pode-se visualizar os volumes escoados superficialmente para terraço e telhado, ambos com cobertura vegetal (CV).

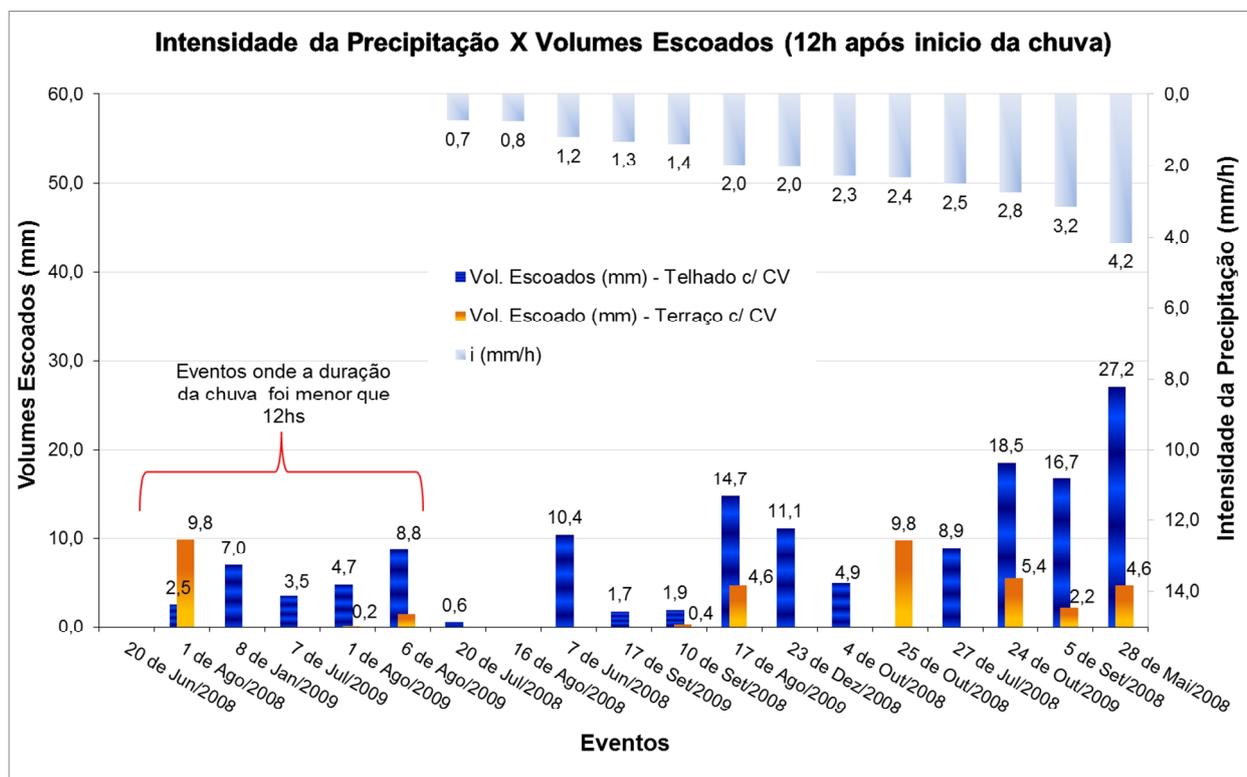


Figura 5.20: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado e terraço com cobertura vegetal e a intensidade média da precipitação nas primeiras doze horas após o início da chuva.

A tabela 5.15 apresenta os resultados dos volumes escoados superficialmente, vinte e quatro horas após o início da chuva para os quatro módulos experimentais.

Tabela 5.15: Volumes escoados nos 4 módulos experimentais após 24 horas do início da precipitação

Data do Evento	Dias	Vol. Escoado após 24 h		Vol. Escoado após 24 h		Precipitação Acumulada em 24h (mm)
	anteriores	(c/telhado verde)		(s/telhado verde)		
	sem chuva	Terraço	Telhado	Terraço	Telhado	
28/05/2008	14	4,72	32,01	34,50	34,95	55,25
07/06/2008	4	1,37	23,08	21,18	20,51	30,59
20/06/2008	5	0	0	8,68	8,63	11,87
20/07/2008	11	0	0,420	7,10	7,73	10,36
27/07/2008	4	14,73	33,92	35,03	37,33	55,29
01/08/2008	1	10,26	2,92	26,39	25,74	38,30
16/08/2008	3	0	0	12,62	13,09	18,38
05/09/2008	11	29,57	41,88	45,74	43,46	82,26
10/09/2008	3	18,48	30,15	44,91	43,84	62,91
04/10/2008	3	1,14	5,50	20,59	21,81	28,06
25/10/2008	2	10,17	0	12,62	13,55	59,57
23/12/2008	7	1,80	21,13	24,44	27,86	38,51
08/01/2009	3	0	8,52	15,56	17,12	23,76
07/07/2009	7	0,97	1,93	16,10	16,92	21,00
01/08/2009	9	0,66	0	16,81	17,41	23,23
06/08/2009	2	1,75	8,59	15,56	15,51	20,55
17/08/2009	6	8,33	18,35	31,69	33,62	30,58
17/09/2009	3	0,78	9,16	16,33	16,86	22,94
24/10/2009	35	6,93	19,30	28,40	28,82	34,14

É possível verificar que, vinte e quatro horas após o início da chuva, o terraço e o telhado verde não geraram escoamento em 21% dos eventos. E os volumes gerados nos telhados são superiores aos terraços em 74% dos eventos. Em apenas duas situações os terraços geram mais escoamento do que os telhados, sendo nos eventos dos dias 1º de agosto de 2008 e em 25 de outubro de 2008.

Os dois maiores volumes escoados superficialmente no terraço com cobertura vegetal, após 24 horas, não coincidem com os mesmos os apresentados nas 3 e 6 horas após o início da chuva. O maior volume escoado no telhado verde para o período de vinte e quatro horas foi de 41,88mm para o dia 05/09/2008, sendo a precipitação acumulada no período de 82,26mm. Para o terraço, o maior volume escoado superficialmente foi de 29,57mm, também ocorrendo no dia 5 de setembro de 2008. Os dados podem ser visualizados na figura 5.21.

Neste dia (5 de setembro de 2008) ocorreu a maior precipitação acumulada nas primeiras 24 horas do início da chuva e, também, os maiores volumes de escoamentos superficiais para os módulos com cobertura vegetal.

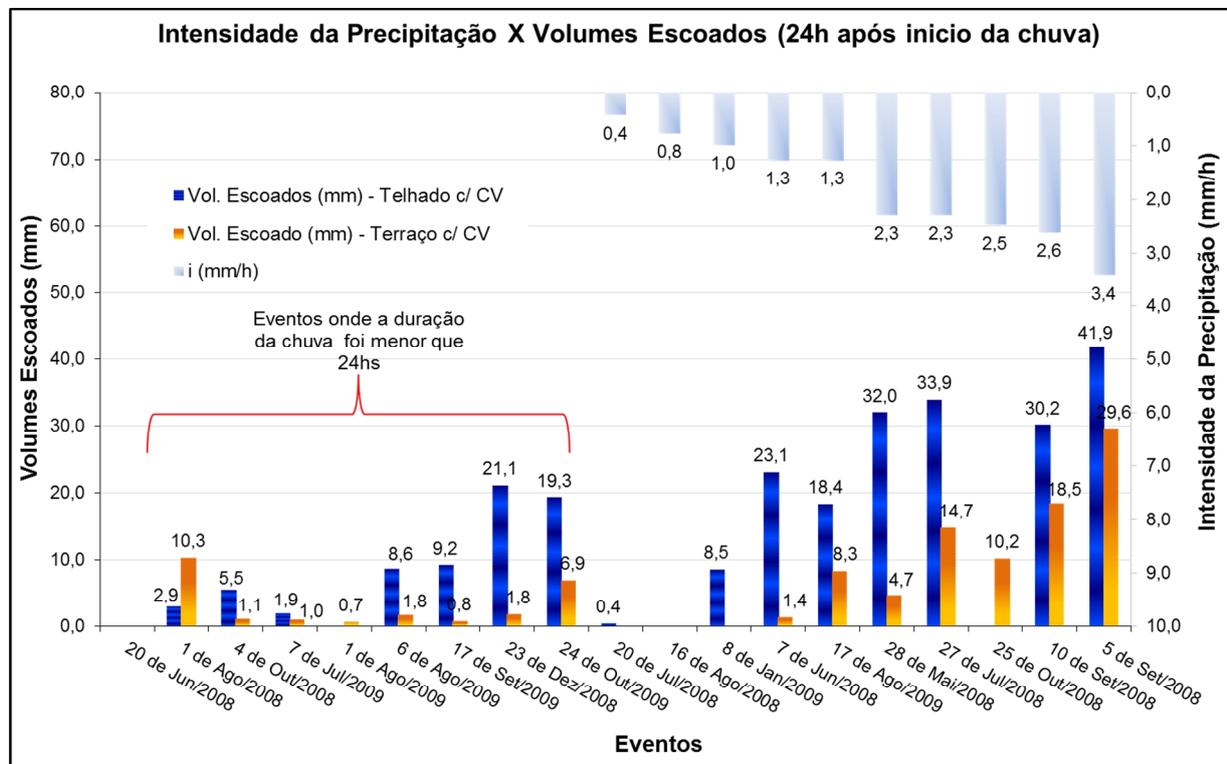


Figura 5.21: Comparação entre os escoamentos superficiais do telhado e terraço com cobertura vegetal e a intensidade média da precipitação nas primeiras doze horas após o início da chuva.

Uma característica observada no desempenho das coberturas vegetais, tanto nos terraços quanto nos telhados, é a detenção de escoamento (armazenamento temporário e eventual libertação lenta). A detenção atrasa os picos dos escoamentos que se dirigem para a rede de drenagem. A atenuação de pico parece estar relacionada com a baixa capacidade de armazenamento do substrato leve, ou seja, a matéria orgânica que dá suporte a planta. Já a capacidade de armazenamento da camada de drenagem está ligada à inclinação da cobertura verde, característica da chuva (intensidade e duração) e da umidade do substrato.

Além disso, uma parcela considerável da precipitação é retida nas plantas por evapotranspiração, diminuindo, assim, as taxas de escoamento superficial, quando comparado com a cobertura convencional dos telhados. Esse efeito pode ser analisado na figura 5.22, que mostra um comparativo no parâmetro de escoamento superficial dos quatro módulos experimentais utilizados, ou seja, telhados e terraços com e sem cobertura vegetal.

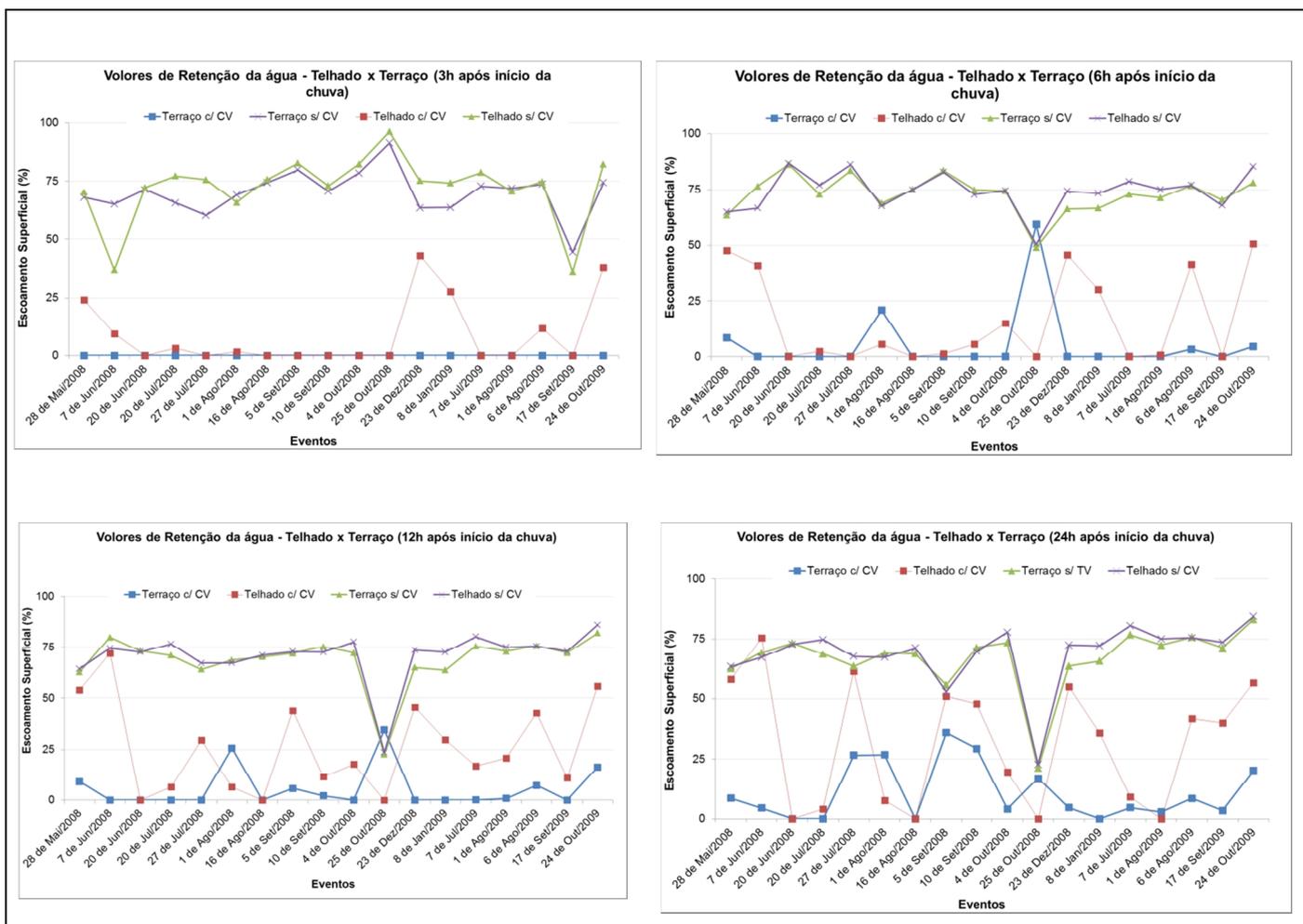


Figura 5.22: Comparação entre os percentuais de escoamentos superficiais do telhado e terraço com cobertura vegetal e sem cobertura vegetal.

Os dados encontrados nesse trabalho vão ao encontro de estudos realizados em outras partes do mundo, onde pesquisadores, tais como: Villarreal e Bengtsson (2005), Conelly e Liu (2005), VanWoert *et al.* (2005), Moran (2004), Palla *et al.* (2010), dentre outros, que também encontraram altos valores de retenção de escoamento superficial com o uso de coberturas vegetais. A variação no percentual de retenção pode ser atribuída a vários mecanismos, tais como: tipo de cobertura verde, profundidade da cobertura vegetal, inclinação do telhado, época do ano, dias antecedentes sem chuvas, temperatura.

Os resultados encontrados por EPA (2009a) diferem dos encontrados na presente pesquisa. No estudo americano, realizado no estado da Pensilvânia, os melhores índices de retenção da água encontram-se nos meses de verão, onde aproximadamente 95% da precipitação foi retida. Já no inverno, a retenção foi menor (< 20%) quando comparado a meses de maiores temperaturas. Embora neste presente estudo poucos eventos tenham sido monitorados no verão, os eventos do inverno, para a condição brasileira, apresentam melhores

índices de retenção do escoamento superficial. Neste sentido, fica claro que o comportamento de telhados com cobertura vegetal é diferenciado nos países de clima tropical, que possuem regime de chuvas, temperaturas e clima bem diferenciados dos países do hemisfério norte. Para o presente estudo, os fatores que parecem mostrar maior influência na capacidade de retenção das coberturas vegetais são a inclinação da mesma e o volume precipitado total.

Nos eventos analisados, a baixa intensidade média da chuva e os dias antecedentes sem chuva parecem exercer pouca contribuição na capacidade de retenção da água, quando comparado ao volume precipitado, principalmente nas primeiras três horas após o início da precipitação. Como ocorreu no monitoramento do experimento pavimento permeável, os eventos monitorados no período não foram tão significativos do ponto de vista da drenagem urbana. O maior volume de chuva acumulado nas primeiras três horas foi de apenas 22,33mm. Já para 6 horas após o início da chuva, o maior volume acumulado foi de 44,22mm. Da mesma forma, é necessário o monitoramento de eventos mais intensos, com maiores volumes, em um espaço de tempo mais curto, para verificação se o telhado com cobertura verde continuaria a reter os mesmos percentuais de eventos de menor magnitude.

5.2.2 Análise de Qualidade de Água – Cobertura Verde

Para a análise da qualidade da água, foram coletadas amostras de quatro módulos experimentais: telhado com e sem cobertura vegetal e terraço com e sem cobertura verde. Dos dezenove eventos quantitativos analisados, em nove foram coletadas a água proveniente de cada módulo para a caracterização da qualidade da água. Os eventos onde houve a coleta de água foram: 29/05/2008, 09/06/2008, 22/07/2008, 29/07/2009, 18/08/2008, 08/09/2008, 06/10/2008, 28/10/08, 12/01/2009.

Para as análises da água, foram considerados os parâmetros físico-químicos. Os parâmetros físicos considerados foram: temperatura, turbidez, cor aparente, sólidos totais e suspensos. Já os parâmetros químicos considerados foram: pH, DBO₅, DQO, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, nitrato, fósforo total, ortofosfato, zinco total, cobre total, cádmio total, ferro total, chumbo total, cromo total, coliformes totais e coliformes termotolerantes.

Da mesma forma como foi feito no pavimento permeável, para a caracterização da água utilizou-se a resolução CONAMA nº 357 de 2005 que “*Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*”; resolução CONAMA nº 430 de 2011 que “*Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA*”; resolução 128/06 do estado do Rio Grande do Sul que “*Dispõe sobre critérios e padrões de efluentes líquidos a serem observados por todas as fontes poluidoras que lancem seus efluentes nos corpos d’água interiores do estado do rio grande do sul* e as “*Diretrizes para Reuso de Água*” de 2004 da Agência de Proteção Ambiental Americana.

A tabela 5.9 apresenta os parâmetros físico-químicos utilizados nos quatro módulos experimentais e os parâmetros de comparação utilizados na caracterização da água.

As análises físico-químicas da água para estes 9 eventos são mostradas nas tabelas 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19.

Tabela 5.16: Resultados das análises físico-químicas para o módulo terraço sem cobertura vegetal

Módulo Terraço sem cobertura verde							
Parâmetros	n	Valor Máx.	Valor Mín.	Valor Médio	DP	Limite Superior do Intervalo c/ 95% de Confiança	Resolução CONAMA 357/05 – classe 2
pH	9	6,94	5,28	6,04	0,4	6,34	6 a 9
Temperatura (°C)	7	26	15,4	19,47	3,5	22,71	-
Turbidez (NTU)	9	5,5	1,2	2,46	1,5	3,61	100
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	9	8,8	1	3,73	2,1	5,36	-
Cor (uC)	9	20	5	12,33	6,4	17,28	Cor verdadeira até 75 mg Pt/L;
Sólidos Totais (mg/L)	9	283	9	60,00	96,5	134,17	0,05
SFT (mg/L)	9	66	0,00	13,78	26,3	34,02	-
SVT (mg/L)	9	240	0,00	49,44	80	110,96	10
DBO ₅ (mg/L O ₂)	9	5,9	2,5	3,756	0,8	4,38	5
DQO Total (mg/L O ₂)	9	28	1	11,38	11,1	19,90	-
N Total (mg/L)	9	0,43	0,05	0,24	0,12	0,34	1,27 (ambientes lênticos) a 2,18 (ambientes lóticos)
Nitrogênio Amoniacal (mg/L N)	9	0,25	0,01	0,09	0,09	0,15	3,7 p/ pH ≤ 7,5 2,0 p/ 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0 p/ 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 p/ pH > 8,5
Nitrato (mg/L)	9	1,44	0,03	0,32	0,54	0,74	10
Fósforo Total (mg/L)	9	0,13	0,01	0,06	0,04	0,09	
Ortofosfato (mg/L)	9	0,10	0,01	0,03	0,03	0,05	10
Chumbo Total (mg/L)	8	< 0,02	< 0,02	< 0,02	-	-	0,05
Cádmio Total (mg/L)	8	< 0,002	< 0,002	< 0,002	-	-	
Cromo Total (mg/L)	8	0,007	0,004	0,005	-	-	0,01
Ferro Total (mg/L)	8	1,50	0,06	0,47	0,6	0,95	0,01
Zinco Total (mg/L)	8	0,030	0,020	0,023	0,007	0,03	0,05
Cobre Total (mg/L)	8	0,005	0,004	0,004	0,001	0,00	
Coliformes Totais (NMP/100mL)	1	170	170	170	-	-	0,18
Coliformes Fecais (NMP/100mL)	1	130	130	130	-	-	-

Tabela 5.17: Resultados das análises físico-químicas para o módulo terraço com cobertura vegetal.

<i>Módulo Terraço com cobertura verde</i>							
<i>Parâmetros</i>	<i>n</i>	<i>Valor Máx.</i>	<i>Valor Mín.</i>	<i>Valor Médio</i>	<i>DP</i>	<i>Limite Superior do Intervalo c/ 95% de Confiança</i>	<i>Resolução CONAMA 357/05 – classe 2</i>
pH	8	8,52	7,37	7,8	0,28	8,23	6 a 9
Temperatura (°C)	6	25,7	15,9	20,1	3,43	23,69	-
Turbidez (NTU)	8	6,3	1	2,1	2,10	3,85	100
Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	8	63,36	42,24	51,59	5,55	56,23	-
Cor (uC)	8	220	80	146,2	56,50	193,43	Cor verdadeira até 75 mg Pt/L;
Sólidos Totais (mg/L)	8	346	153	220,1	72,25	280,53	-
SFT (mg/L)	8	224	68	117,6	54,46	163,16	-
SVT (mg/L)	8	147	75	102,5	28,85	126,62	10
DBO₅ (mg/L O₂)	8	15,2	4,2	9,7	3,97	13,02	5
DQO Total (mg/L O₂)	8	50,000	4,200	24,31	18,17	39,50	-
Nitrogênio Total (mg/L)	8	1,03	0,26	0,45	0,29	1,03	1,27 (ambientes lânticos) a 2,18 (ambientes lóticos)
Nitrogênio Amoniacal Total (mg/L N)	8	0,08	0,005	0,04	0,03	0,08	3,7 p/ pH ≤ 7,5 2,0 p/ 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0 p/ 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 p/ pH > 8,5
Nitrato (mg/L)	8	1,52	0,03	0,68	0,61	1,52	10
Fósforo Total (mg/L)	8	0,94	0,34	0,59	0,21	0,75	0,03 (ambientes lânticos) a 0,1 (ambientes lóticos)
Ortofosfato (mg/L)	8	0,6	0,17	0,39	0,11	0,48	-
Chumbo Total (mg/L)	7	< 0,02	< 0,02	< 0,02	-	-	0,01
Cádmio Total (mg/L)	7	< 0,002	< 0,002	< 0,002	-	-	0,001
Cromo Total (mg/L)	7	0,1	0,04	0,065	0,03	0,09	0,05
Ferro Total (mg/L)	7	0,17	0,03	0,075	0,06	0,13	0,3 (dissolvido)
Zinco Total (mg/L)	7	0,04	0,02	0,029	0,01	0,04	0,18
Cobre Total (mg/L)	7	0,006	0,006	0,006	-	-	0,009 (dissolvido)
Coliformes Totais (NMP/100mL)	1	9	9	9	-	-	-
Coliformes Fecais (NMP/100mL)	1	2	2	2	-	-	1000

Tabela 5.18: Resultados das análises físico-químicas para o módulo telhado sem cobertura vegetal

<i>Módulo Telhado sem cobertura verde</i>							
<i>Parâmetros</i>	<i>n</i>	<i>Valor Máx.</i>	<i>Valor Mín.</i>	<i>Valor Médio</i>	<i>DP</i>	<i>Limite Superior</i>	<i>Resolução CONAMA</i>
						<i>do Intervalo c/ 95% de Confiança</i>	<i>357/05 – classe 2</i>
pH	9	6,65	5,3	5,98	0,43	6,31	6 a 9
Temperatura (°C)	7	25,7	15,4	19,58	3,33	22,67	-
Turbidez (NTU)	9	7	1,1	2,65	2,04	4,36	100
Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	9	7,92	1,76	3,32	2,14	4,97	-
Cor (uC)	9	20	5	11	4,82	14,71	Cor verdadeira até 75 mg Pt/L;
Sólidos Totais (mg/L)	9	286	8	68,75	101,7 2	146,94	-
SFT (mg/L)	9	60	0	16,44	25,96	36,40	-
SVT (mg/L)	9	232	0	47,22	77,5	106,79	10
DBO₅ (mg/L O₂)	9	9,5	2,2	4,92	2,55	6,89	5
DQO Total (mg/L O₂)	9	17	6	10,5	4,22	13,83	-
Nitrogênio Total (mg/L)	9	0,50	0,12	0,30	0,16	0,42	1,27 (ambientes lânticos) a 2,18 (ambientes lóticos) 3,7 p/ pH ≤ 7,5
Nitrogênio Amoniacal Total (mg/L N)	9	0,17	0,01	0,08	0,07	0,08	2,0 p/ 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0 p/ 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 p/ pH > 8,5
Nitrato (mg/L)	9	1,07	0,04	0,28	0,35	0,28	10
Fósforo Total (mg/L)	9	0,118	0,017	0,06	0,036	0,06	0,03 (ambientes lânticos) a 0,1 (ambientes lóticos)
Ortofosfato (mg/L)	9	0,09	0,013	0,026	0,028	0,03	-
Chumbo Total (mg/L)	8	0	0	0	0	0	0,01
Cádmio Total (mg/L)	8	0	0	0	0	0	0,001
Cromo Total (mg/L)	8	0,007	0,004	0,006	0,002 6	0,01	0,05
Ferro Total (mg/L)	8	4,8	0,03	1,11	2,06	2,83	0,3 (dissolvido)
Zinco Total (mg/L)	8	0,08	0,02	0,04	0,03	0,07	0,18
Cobre Total (mg/L)	8	0,01	0,005	0,0075	0,003	0,01	0,009 (dissolvido)
Coliformes Totais (NMP/100mL)	1	140	140	140	0	0	-
Coliformes Fecais (NMP/100mL)	1	0	0	0	0	0	1000

Tabela 5.19: Resultados das análises físico-químicas para o módulo telhado com cobertura vegetal

<i>Módulo Telhado com cobertura verde</i>							
<i>Parâmetros</i>	<i>n</i>	<i>Valor Máx.</i>	<i>Valor Mín.</i>	<i>Valor Médio</i>	<i>DP</i>	<i>Limite Superior do Intervalo c/ 95% de Confiança</i>	<i>Resolução CONAMA 357/05 – classe 2</i>
pH	9	8,3	7,14	7,67	0,32	7,92	6 a 9
Temperatura (°C)	7	26,1	15,70	19,77	3,34	22,86	-
Turbidez (NTU)	9	5,5	1,00	2,28	1,53	3,45	100
Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	9	66,88	39,60	48,40	9,78	55,92	-
Cor Aparente (uC)	9	240	120,00	198,00	47,12	234,22	Cor verdadeira até 75 mg Pt/L;
Sólidos Totais (mg/L)	9	798	148,00	329,67	215,31	495,17	-
SFT (mg/L)	9	326	49,00	160,11	89,88	229,20	-
SVT (mg/L)	9	472	99,00	169,56	134,69	273,09	10
DBO₅ (mg/L O₂)	9	43	4,30	14,59	12,36	24,09	5
DQO Total (mg/L O₂)	9	59	4,80	32,98	17,92	46,75	-
N Total	9	1,03	0,26	0,45	0,29	0,67	1,27 (ambientes lânticos) a 2,18 (ambientes lóticos), 7 p/ pH ≤ 7,5
Nitrogênio Amoniacal Total (mg/L N)	9	0,08	0,005	0,05	0,03	0,07	2,0 p/ 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0 p/ 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 p/ pH > 8,5
Nitrato (mg/L)	9	1,52	0,03	0,68	0,61	1,15	10 0,03 (ambientes lânticos) a 0,1 (ambientes lóticos)
Fósforo Total (mg/L)	9	0,94	0,34	0,59	0,21	0,75	0,1 (ambientes lóticos)
Ortofosfato (mg/L)	9	0,6	0,18	0,39	0,11	0,48	-
Chumbo Total (mg/L)	8	< 0,02	< 0,02	< 0,02	-	-	0,01
Cádmio Total (mg/L)	8	< 0,002	< 0,002	< 0,002	-	-	0,001
Cromo Total (mg/L)	8	0,03	0,009	0,020	0,005	0,02	0,05
Ferro Total (mg/L)	8	0,16	0,004	0,086	0,066	0,14	0,3 (dissolvido)
Zinco Total (mg/L)	8	0,06	0,020	0,035	0,016	0,05	0,18
Cobre Total (mg/L)	8	0,02	0,020	0,020	-	-	0,009 (dissolvido)
Coliformes Totais (NMP/100mL)	1	1400	1400	1400	-	-	-
Coliformes Fecais (NMP/100mL)	1	4	4	4	-	-	1000

Pode-se observar que o limite superior do intervalo com 95% de confiança, no módulo terraço sem cobertura vegetal para parâmetro pH, foi de 6,34. Para o terraço com cobertura, o valor foi de 8,23. Já no módulo telhado, os valores encontrados foram de: 6,31, para o telhado sem cobertura vegetal, e 7,92 para o telhado com cobertura vegetal. Na figura 5.23 pode-se ver um comparativo referente ao parâmetro pH para os quatro módulos experimentais, sendo dois com cobertura vegetal e dois sem cobertura vegetal. Pode-se verificar que a cobertura vegetal tende a aumentar os valores de pH, quando comparado com coberturas convencionais. É importante ressaltar que a água da chuva já é naturalmente ácida (BRENA, 2009). A presença de dióxido de carbono (CO_2), na atmosfera, dissolvido em água, forma o ácido carbônico. É esse ácido fraco que deixa o pH próximo a 6 (TORDO, 2004), sendo esse o valor muito próximo dos valores encontrados para os módulos sem vegetação. Valores mais altos de pH das águas provenientes de telhados verdes foram encontrados nos estudos realizados por Teemusk e Mander (2007). Os autores justificam esse aumento devido à presença de carbonatos nos substrato leve.

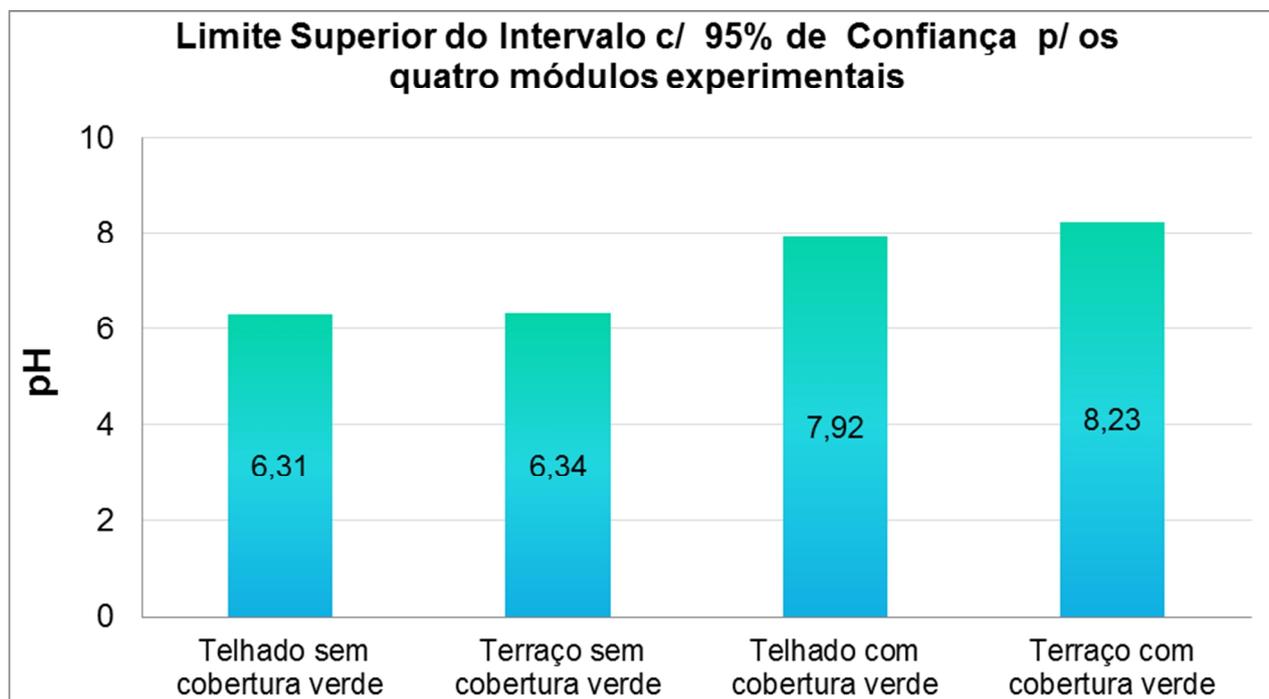


Figura 5.23: Comparação do parâmetro pH para os quatro módulos experimentais.

Embora o valor de pH para o módulo com cobertura vegetal seja maior que o sem vegetação, ambos os valores estão em conformidade com padrões de qualidade utilizados. Para o parâmetro temperatura, os resultados apresentados na figura 5.24 mostram que os limites superiores do intervalo com 95% de confiança para os módulos terraços sem cobertura e com cobertura verde foram 22,71°C e 23,69°C, respectivamente. Para os telhados, os valores encontrados são muito próximos dos anteriores, sendo de 22,67°C, para o módulo sem cobertura, e 22,86°C, para o módulo coberto por vegetação. A maior diferença entre os valores encontrados é menor de 1°C. Isso indica que a presença da cobertura não alterou a temperatura da água, quando comparados aos módulos sem cobertura vegetal.

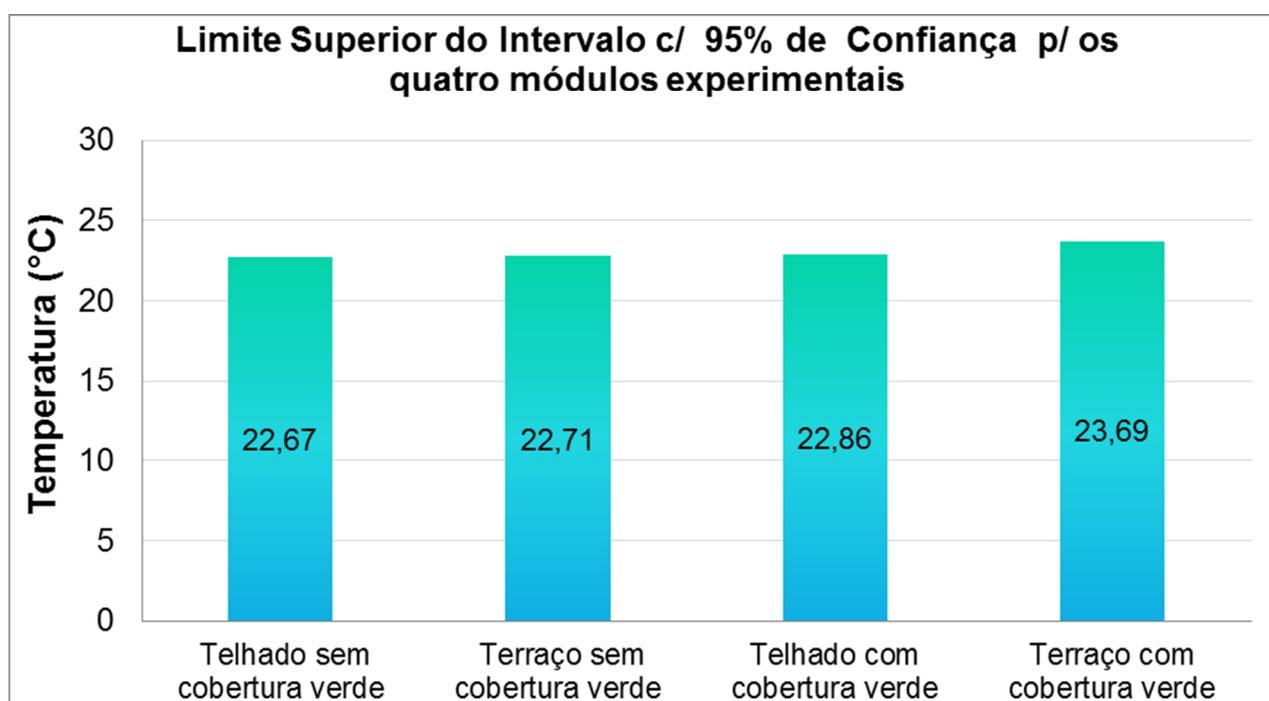


Figura 5.24: Comparação do parâmetro temperatura para os quatro módulos experimentais.

No que se refere aos dados de turbidez, os resultados apresentados na figura 5.25 mostram que os limites superiores dos intervalos com 95% de confiança foram inferiores a 5 NTU, para os quatro módulos experimentais. O maior valor de turbidez foi alcançado no módulo telhado sem cobertura vegetal. Os valores encontrados sugerem que as coberturas vegetais não interferem na qualidade da água, no que diz respeito ao parâmetro turbidez.

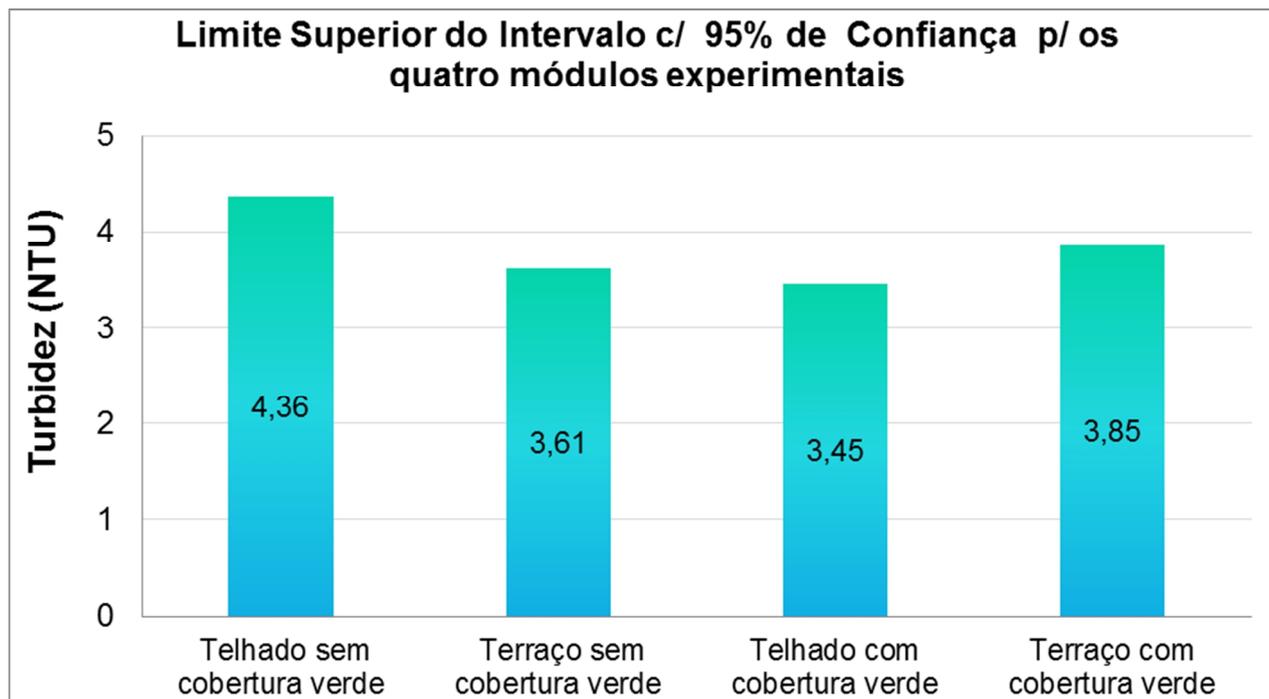


Figura 5.25: Comparação do parâmetro turbidez para os quatro módulos experimentais.

No que se refere ao parâmetro cor, os resultados são apresentados na figura 5.26. Nesta figura pode-se observar que a água de drenagem proveniente das coberturas verdes possui um coloração bem mais acentuada quando comparadas as amostras provenientes dos módulos sem vegetação. Os valores encontrados para os limites superiores do intervalo com 95% de confiança nas coberturas vegetais foram de 193,4 uC, para o módulo terraço com cobertura verde, e 234,2 uC para o módulo telhado com cobertura verde, 17,3 uC, para o módulo terraço sem cobertura vegetal, e 14,7 para o módulo telhado sem cobertura verde.

A presença de cor na água nos módulos com cobertura verde parece ser devido à presença de materiais orgânicos ou minerais que estão dissolvidos na água de drenagem.

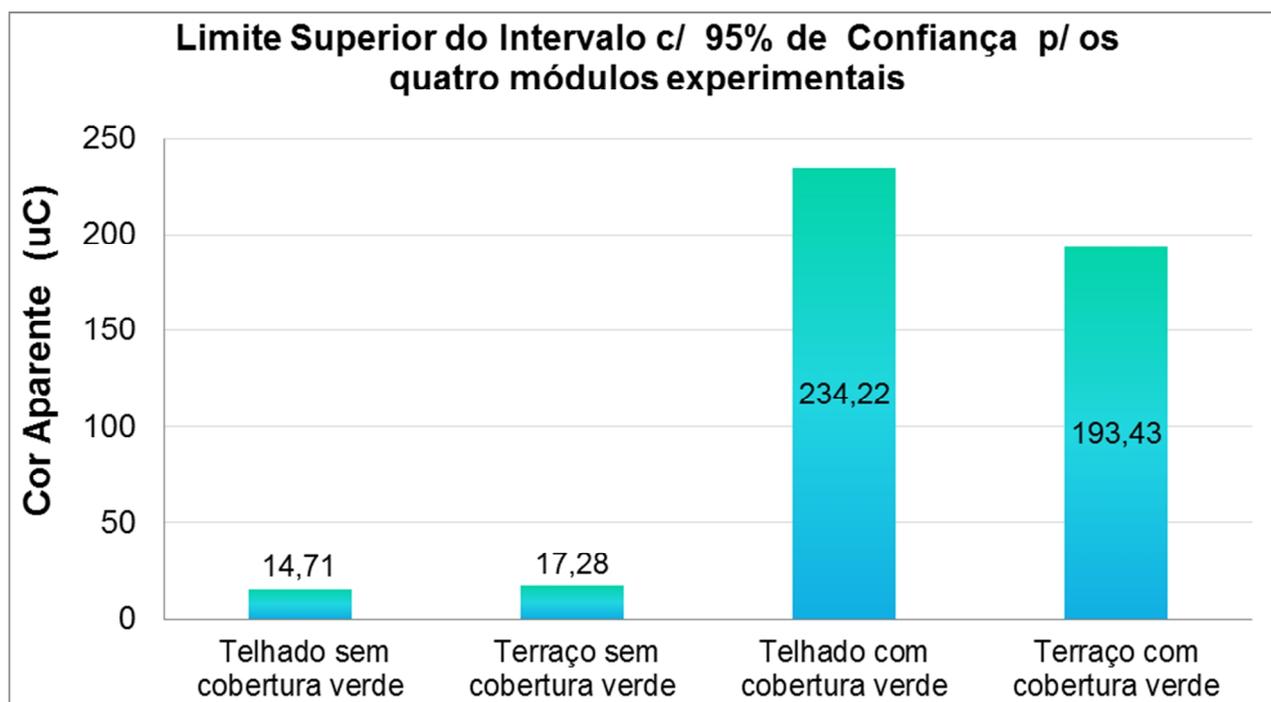


Figura 5.26: Comparação do parâmetro cor para os quatro módulos experimentais.

Em alguns aspectos, a pesquisa realizada pela EPA (2009a) vai ao encontro de alguns resultados encontrados para as condições brasileiras. No que diz respeito à cor, todas as amostras provenientes da cobertura vegetal, deste trabalho, tiveram a mesma característica do estudo americano, ou seja, a cor amarelada. Da mesma forma, o presente trabalho encontrou maiores concentrações de vários nutrientes, quando comparados aos módulos sem cobertura vegetal. Mas, no presente estudo, não foi encontrada diferenças nas concentrações dos diversos elementos nas amostras das coberturas verdes, considerando a sazonalidade dos eventos.

Para o parâmetro de sólidos totais, a figura 5.27 mostra a tendência que as coberturas vegetais que geram maior volume de sólidos totais, quando comparados às coberturas convencionais. Isso é explicado pelo fato de a estrutura com vegetação possuir substrato leve, chamado de substrato nutritivo e este é composto por nylon, matéria orgânica, carvão, húmus e nutrientes. Assim, a passagem da água da chuva através do ecotelha carrega material sólido para a água de drenagem. Parece existir tendência de que a maior liberação de sólidos na água ocorra, principalmente, para o módulo telhado, já que possui uma maior inclinação.

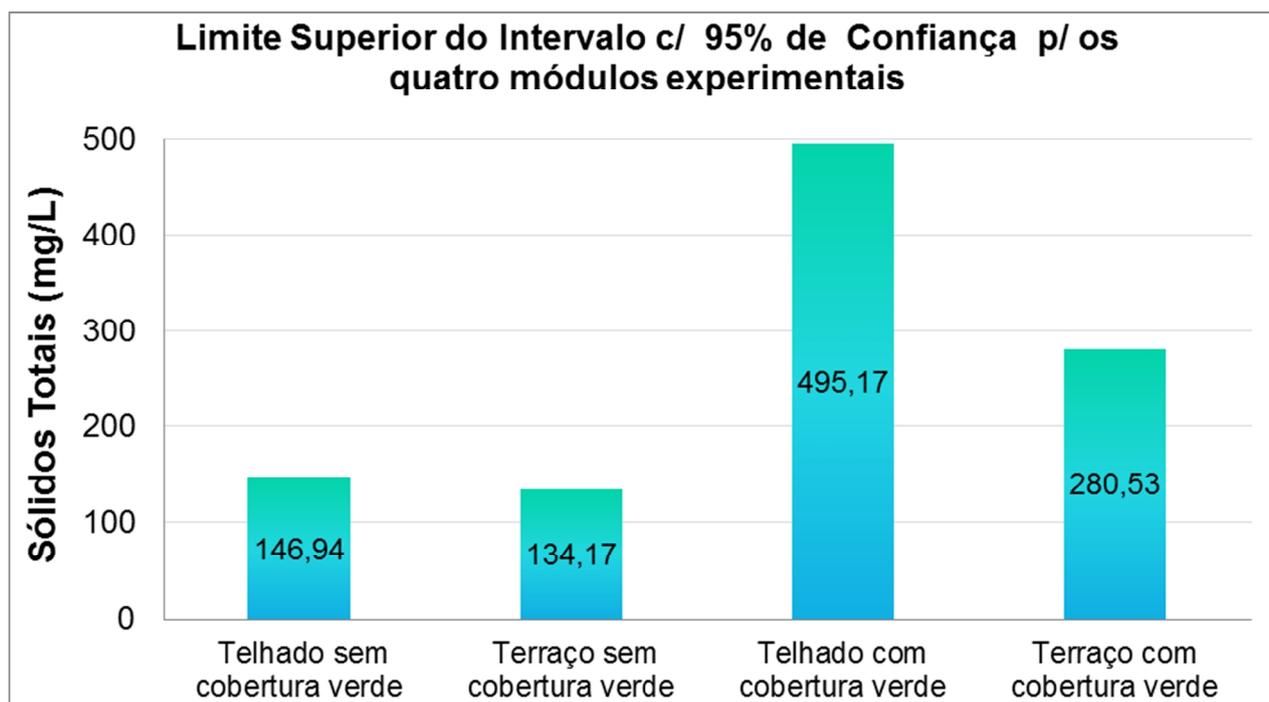


Figura 5.27: Comparação dos sólidos totais para os quatro módulos experimentais.

Os parâmetros de DBO_5 e DQO são mostrados nas figuras 5.28 e 5.29. Pode-se visualizar que, para os dois parâmetros, os limites superiores dos intervalos com 95% de confiança foram mais elevados no módulo com cobertura vegetal. Os resultados verificados nos gráficos sugerem que os módulos com coberturas vegetais tendem a ter maiores valores de DBO_5 e DQO. Isso pode ser justificado pela maior presença de matéria orgânica na cobertura vegetal, quando comparado com a cobertura convencional. Pela própria composição do telhado com cobertura verde, pode ocorrer a liberação de compostos orgânicos provavelmente derivados da decomposição de restos de plantas.

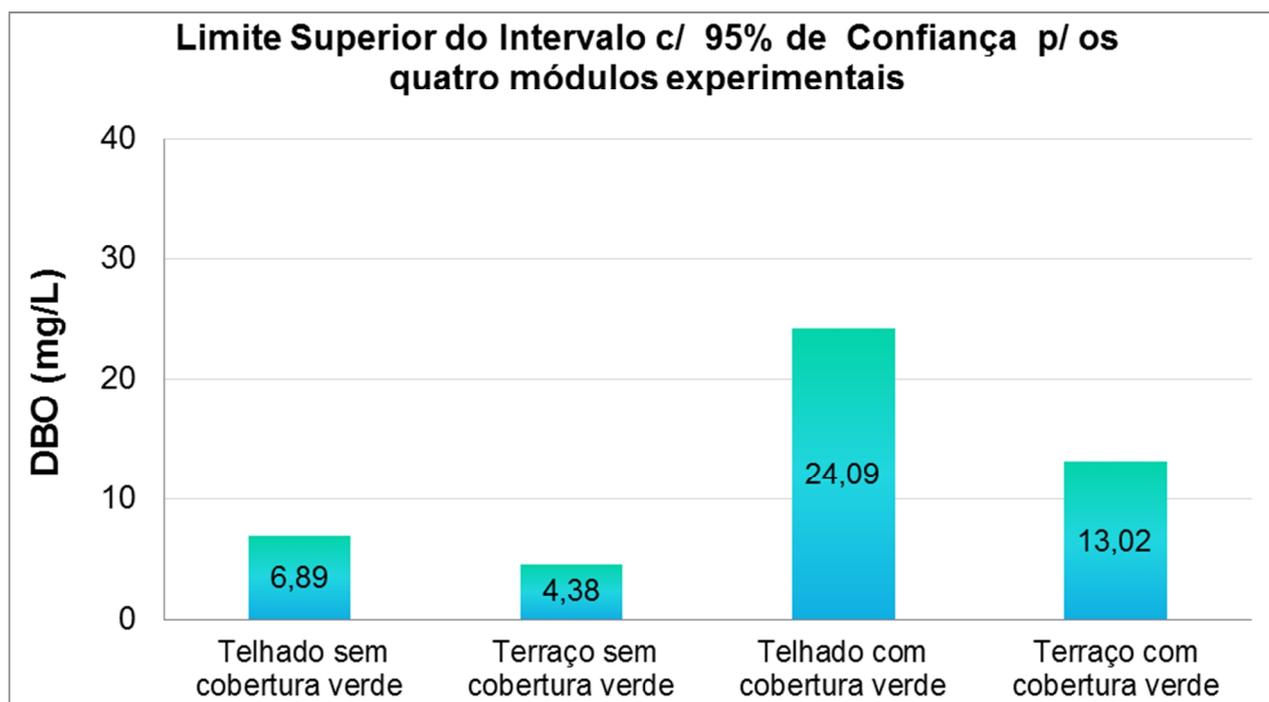


Figura 5.28: Comparação dos valores de DBO para os quatro módulos experimentais.

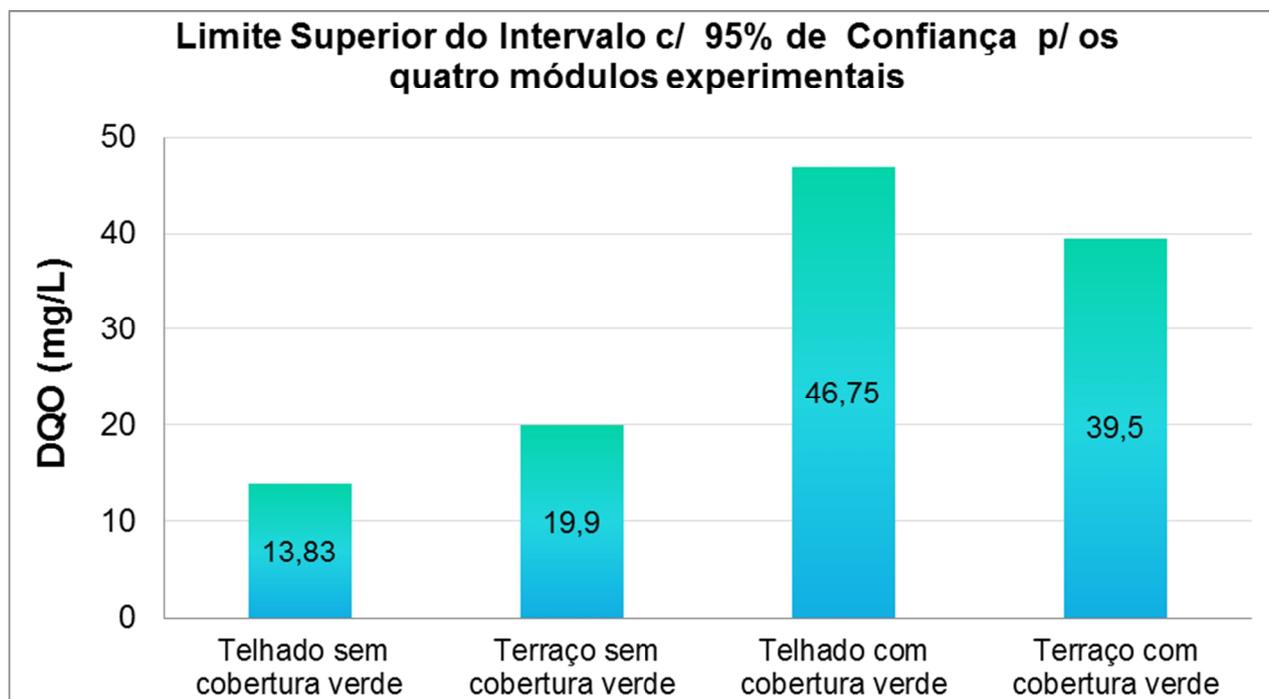


Figura 5.29: Comparação dos valores de DQO para os quatro módulos experimentais.

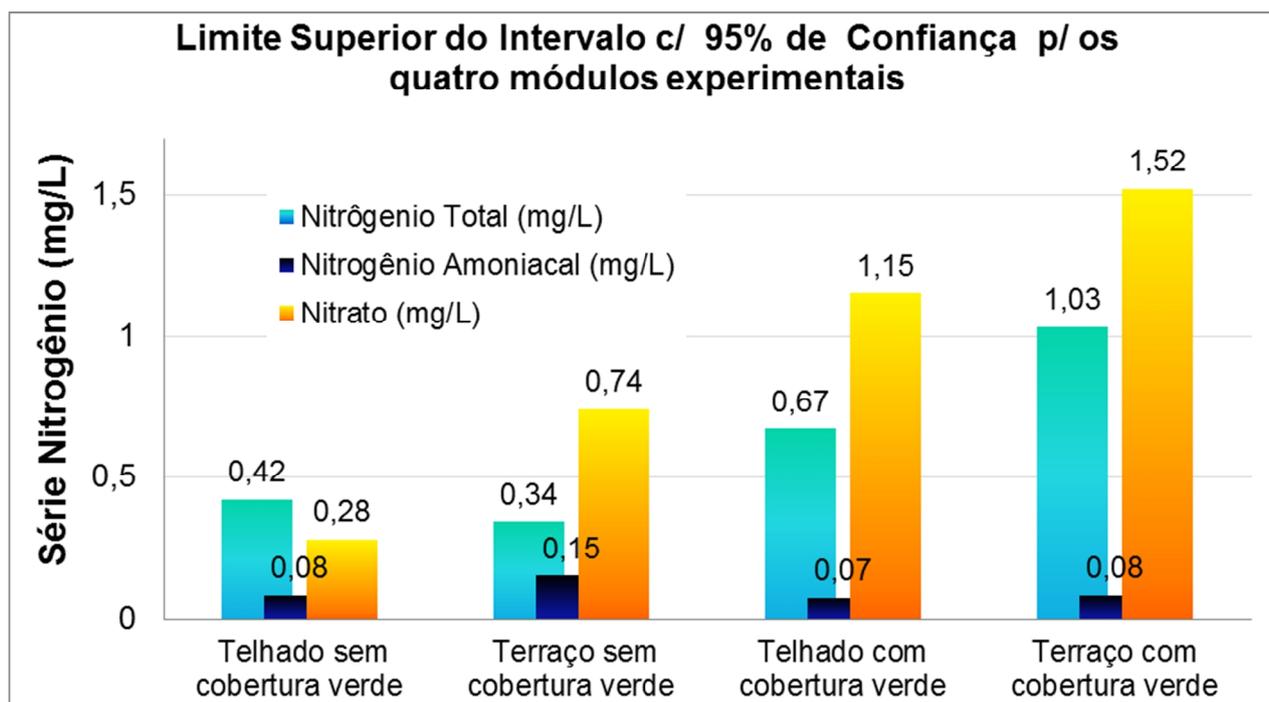


Figura 5.30: Comparação dos valores de nitrogênio total, nitrogênio amoniacal e nitrato para os quatro módulos experimentais.

Os resultados para as análises da série nitrogênio (nitrogênio total, nitrogênio amoniacal e nitrato) indicam que as coberturas verdes são responsáveis pelo aumento dos valores de nitrogênio total e nitrato, isso pode ser visualizado na figura 5.30. Já os valores de nitrogênio amoniacal são relativamente similares nos quatro módulos experimentais. Os maiores valores de nitrogênio total e nitrato foram alcançados no módulo terraço com cobertura vegetal, seguidos pelo telhado com vegetação. É importante ressaltar que não foi feita adubação na vegetação em todo o período estudado.

Na figura 5.31 pode-se visualizar os resultados da série nitrogênio para os quatro módulos experimentais. Da mesma forma que ocorreu com a série nitrogênio, os níveis de fósforo aumentaram quando comparados aos módulos que simulam coberturas convencionais. Os valores de fósforo na água de drenagem provenientes dos telhados e terraços verdes aumentaram em torno de dez vezes em relação aos módulos de controle. Hathaway *et al.* (2007) também encontraram maiores níveis de fósforo e nitrogênio nas águas de drenagem provenientes de telhados com coberturas verdes.

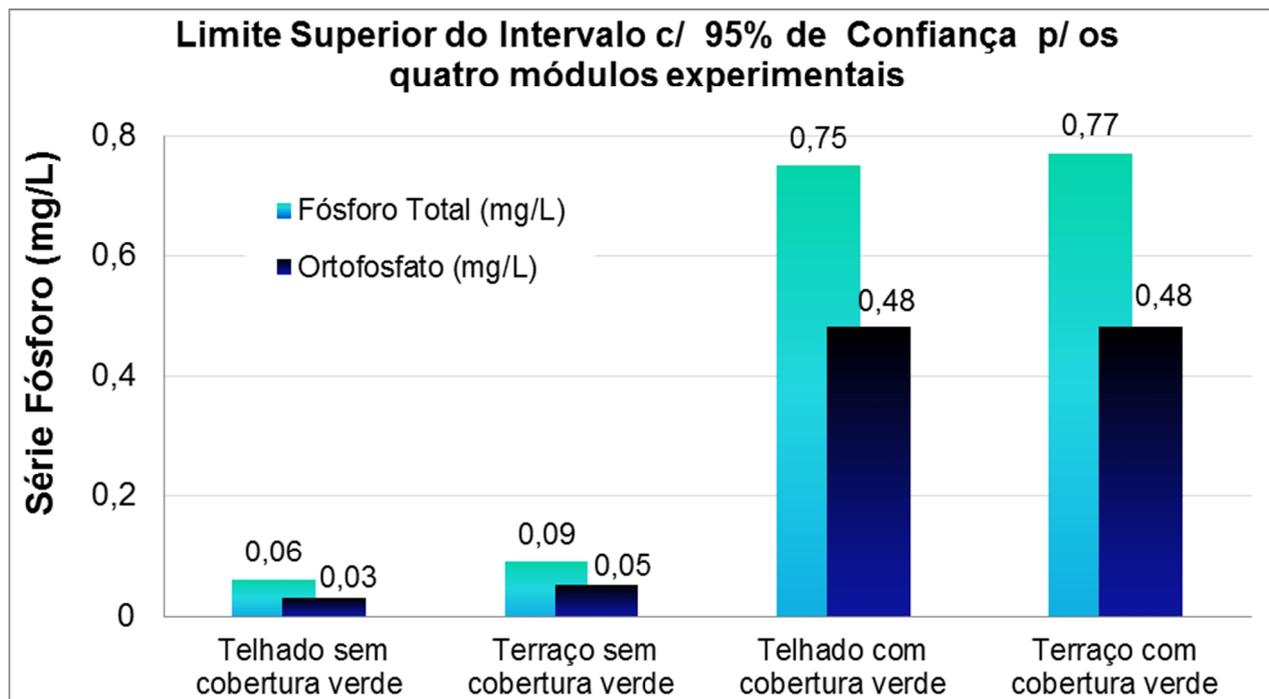


Figura 5.31: Comparação do valores de fósforo total e ortofosfato para os quatro módulos experimentais.

As maiores concentrações de nutrientes (nitrogênio e fósforo), provenientes dos módulos cobertos com vegetação, podem ser explicadas pela composição do substrato rígido e substrato nutritivo. Ambos os substratos contém nutrientes na sua composição que são liberados para a planta a longo e curto prazo. Os metais pesados, chumbo e cádmio, não foram detectados em nenhuma amostra de água. Há indicação de que na região estudada, a água precipitada não apresente a presença desses metais. Além disso, esses elementos não aparecem presentes na água de drenagem proveniente das coberturas vegetais, evidenciando que eles não estão presentes na composição dos substratos das coberturas verdes.

O cromo foi detectado nas águas de drenagem em três dos quatro módulos experimentais. Os valores encontrados para esse elemento ficam muito próximos do valor permitido para água potável que é de 0,05mg/L. Somente o telhado com cobertura vegetal, que apresentou um limite superior do intervalo com 95% de Confiança de 0,09 mg/L. A comparação pode ser observada na figura 5.32.

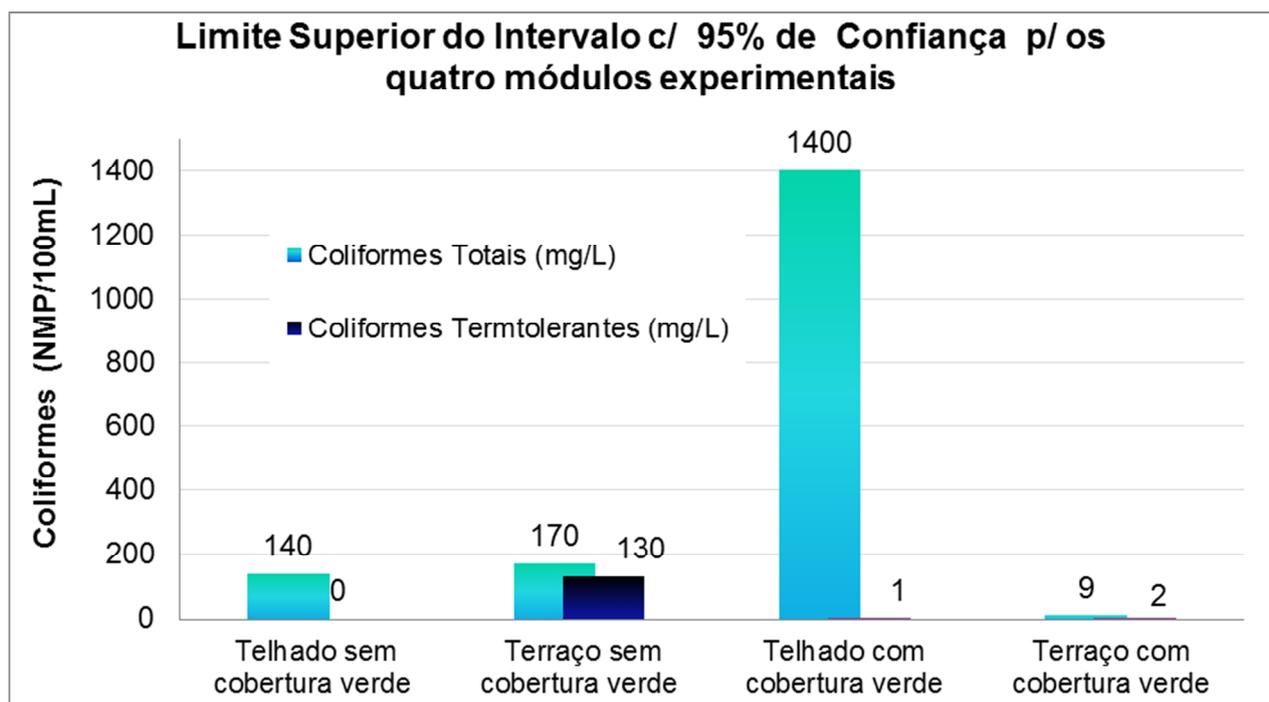


Figura 5.32: Comparação dos valores de metais pesados (chumbo, cádmio e cromo) para os quatro módulos experimentais.

Para os outros metais, cobre, zinco e ferro, a comparação com os quatro módulos experimentais pode ser visualizada na figura 5.33.

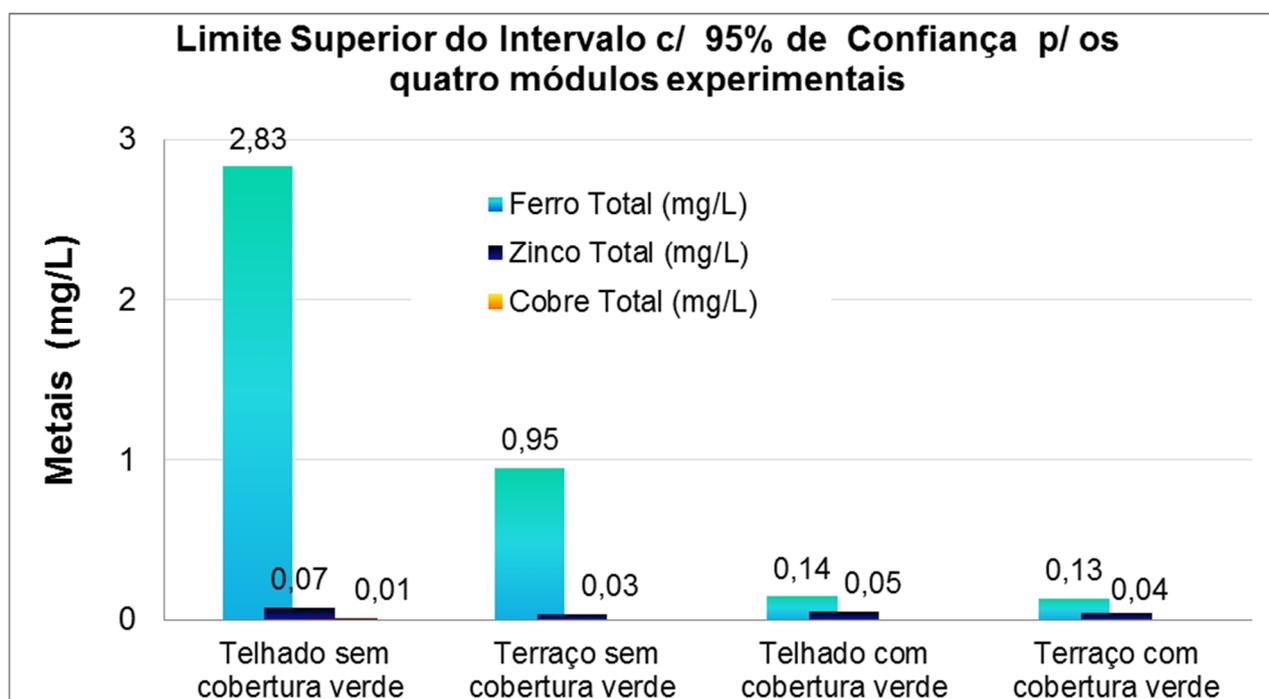


Figura 5.33: Comparação dos valores de metais pesados (chumbo, cádmio e cromo) para os quatro módulos experimentais.

O cobre não foi detectado nas amostras de três dos quatro módulos experimentais. Somente no telhado com cobertura vegetal teve limite superior do intervalo com 95% de confiança de 0,01 mg/L. O zinco foi detectado em todos os módulos experimentais, com concentrações que variaram de 0,04mg/L, no terraço com cobertura verde, a 0,07 mg/L, no telhado sem cobertura vegetal. Já o ferro foi encontrado no telhado sem cobertura vegetal na concentração de 2,83 mg/L. Pode-se observar que a cobertura vegetal parece não interferir nas concentrações de zinco e cobre. Para o parâmetro ferro total, as coberturas vegetais contribuem de maneira positiva na qualidade da água de drenagem, pois a maiores concentrações foram encontradas nas águas de drenagem provenientes dos módulos com ausência de cobertura verde.

Para o evento dia 12 de janeiro de 2009, foram realizadas análises microbiológicas nas amostras dos quatro módulos experimentais. Foram avaliadas as concentrações de coliformes totais e termotolerantes. O resultado qualitativo para esse parâmetro pode ser avaliado na figura 5.34.

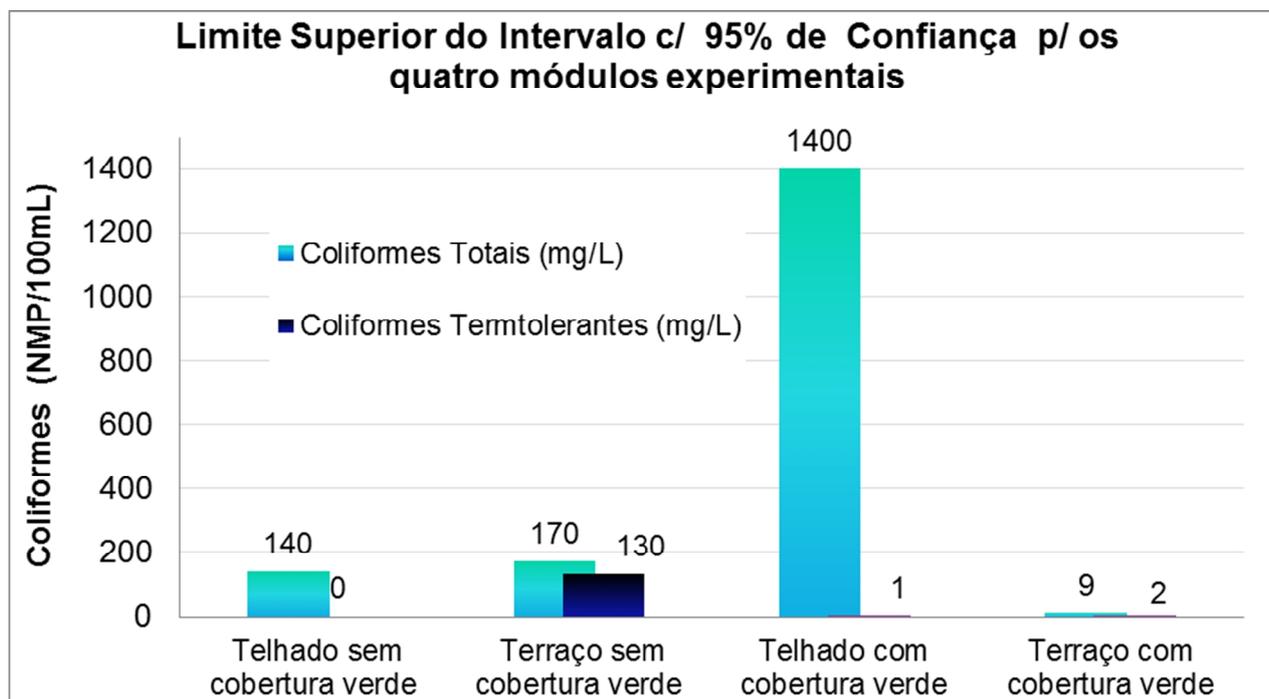


Figura 5.34: Comparação dos valores de coliformes totais e termotolerantes nos quatro módulos experimentais para evento do dia 12/01/2010.

Os valores coliformes totais foram bastante variados para as quatro amostras analisadas. A maior concentração foi obtida no telhado com cobertura verde, com uma concentração de 1400NMP/100mL. Mas os resultados mostram que no terraço convencional também há a presença de coliformes, na concentração de 170NMP/100mL nos totais e 130NMP/100mL para os termotolerantes. Diferentemente do esperado, o terraço com cobertura verde apresentou as menores concentrações. Com a presença de vegetação na cobertura, ocorre a formação de microecossistema que pode atrair vários tipos de pássaros, borboletas além de diversos insetos. A presença de coliformes na água de drenagem dos módulos é justificada por fezes desses animais que podem estar presentes nas coberturas.

A presença da cobertura vegetal mais do que triplica a quantidade de sólidos totais na água, além de aumentar em 10 vezes os níveis de fósforo total na água. Da mesma forma, os valores de turbidez e DBO₅ mais elevados são maiores nos módulos com a presença de cobertura vegetal.

5.2.3 Síntese dos resultados – Cobertura Verde

Sabendo que nos dias de hoje, a água é um recurso natural limitado e indispensável à vida, questões sobre a conservação e preservação dos recursos hídricos vêm sendo cada vez mais utilizadas. Medidas que visam a redução do consumo de água potável e a preservação da qualidade passam, necessariamente, por medidas do uso da água nas residências. Sendo assim, a busca por fontes alternativas de água, como a água da chuva, que visam solucionar o problema de escassez, se tornam necessárias principalmente nos grandes centros urbanos, onde a demanda aumenta a cada dia. Daí surge a importância da caracterização das águas de drenagem provenientes de coberturas com vegetação. Conhecendo as características dessa água é possível definir de maneira mais adequada a sua utilização em atividades que não demandem o uso de água potável. Além disso, controlaria em grande parte o escoamento superficial na fonte, contribuindo para aliviar os volumes de água enviados para o sistema de drenagem convencional, que muitas vezes já se encontra com suas capacidades esgotadas.

Os dados indicam que terraços e telhados com cobertura vegetal fazem um controle adequado do volume de escoamento superficial, mesmo passando 24 horas do início da chuva. Os resultados sugerem um melhor desempenho hidrológico dos terraços em relação aos telhados, na maioria dos eventos estudados. Isso indica que a inclinação do telhado pode ter influência nos volumes escoados.

Os dados indicam que o uso de coberturas vegetais pode proporcionar uma melhor distribuição do escoamento superficial, ao longo do tempo, através da diminuição da velocidade de liberação do excesso de água retido nos poros do substrato. Além disso, parece ocorrer também uma redução no volume de água escoado, já que o telhado verde é composto por plantas que têm a capacidade de reter água.

Já os resultados da qualidade de água de drenagem sugerem que as coberturas verdes tendem a aumentar as concentrações de sólidos totais, DBO₅, DQO, série fósforo, série nitrogênio, além de acentuar cor na água e de a tornar mais alcalina. Para os parâmetros temperatura, turbidez e metais, as coberturas verdes parecem não influenciar na qualidade da água, quando comparadas ao módulo com cobertura convencional.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho descreve um estudo experimental com dois tipos diferentes de técnicas utilizadas para mitigação do escoamento superficial urbano e controle da qualidade das águas pluviais. Uma destas técnicas consiste em quatro módulos experimentais, telhado e terraço, com a utilização de cobertura vegetal, e telhado e terraço, com cobertura convencional. A outra técnica consiste em dois módulos de pavimentos permeáveis, com diferentes tipos de revestimento (blocos vazados e asfalto poroso).

Comparados com estudos anteriores no mesmo dispositivo, os dados indicam que, dos dois pavimentos permeáveis estudados, somente o de revestimento de blocos vazados continua fazendo o controle adequado do volume de escoamento superficial, mesmo com valores de escoamento um pouco superiores aos encontrados no passado, no mesmo dispositivo experimental.

Foi observado um grande comprometimento da capacidade de infiltração no revestimento asfáltico. Os valores de coeficiente de escoamento superficial, encontrados nesta segunda etapa do monitoramento, demonstram serem maiores principalmente no revestimento de asfalto poroso. Isso indica uma obstrução da camada superficial que impede a infiltração da água, sugerindo a necessidade de manutenções periódicas para se conservar as características de porosidade do revestimento, bem como a prevenção de depósito de matéria granular, ou mesmo depósito de sedimentos.

Embora o geotêxtil tenha a finalidade de filtrar a água que fica armazenada no reservatório de brita, este pode também colmatar e não mais realizar sua função. Além disso, com a saturação do geotêxtil e a pressão que água exerce para atravessar o mesmo, os finos antes retidos podem ser liberados aos poucos para dentro do reservatório. Pode ocorrer também deterioração do geotêxtil em alguns pontos do pavimento, fazendo com que exista penetração de materiais e que estes sejam transportados através do reservatório de brita, possibilitando assim a colmatação.

Para uma melhor compressão do que realmente acontece com o geotêxtil (camada superior e inferior) e com a camada reservatório, é necessário testes destrutivos que permitam visualizar as condições do interior do pavimento, após 5 anos de uso. Fica claro que algumas questões relativas ao comportamento hidrológico do pavimento permeável só serão bem esclarecidas com a realização de uma manutenção, principalmente de limpeza da camada superficial. Assim, é possível verificar se a infiltração superficial foi aumentada. Caso isso não se verifique, será necessário ensaios que inutilizem partes do pavimento para verificação do geotêxtil e camada reservatório.

Sendo assim, conclui-se que para um melhor entendimento da evolução do comportamento hidrológico do pavimento, é indicado ensaios destrutivos em determinados pontos do pavimento. Também pode-se substituir por completo a camada superficial, camada de brita e geotêxtil e visualizar do estado de conservação dos elementos após 5 anos de utilização. Ensaios deste tipo poderão ser realizados em estudos futuros, já que não foram contemplados nesta pesquisa.

Já os resultados de qualidade da água, indicam que os pavimentos permeáveis não contribuem para um aumento da contaminação, uma vez que a água armazenada no reservatório possui boa qualidade se comparada a padrões de lançamento de efluentes, segundo as resoluções nº 357 e 430 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), EPA (Guia para Reuso da Água) de 1992 e a resolução 128/06 RS (Rio Grande do Sul).

Com a análise da água do escoamento superficial, há uma indicação de que os pavimentos permeáveis servem como filtros auxiliando na remoção de poluentes, já que águas pluviais lavam as superfícies impermeáveis (ruas, avenidas, terraços, telhados, calçadas) e carregam grande parte dos poluentes que ficam depositados. Esses resultados vêm ao encontro de pesquisas encontradas na literatura que citam que as práticas de infiltração da água no solo e estão sendo empregadas para remover sólidos suspensos, partículas orgânicas, bactérias, coliformes, além de algumas formas de metais solúveis e nutrientes, todos esses encontrados nas águas pluviais oriundas do escoamento superficial urbano.

Já para o experimento com coberturas verdes, os resultados apontam para um melhor desempenho hidrológico dos terraços em relação aos telhados na grande maioria dos eventos estudados. Isso indica que a inclinação do telhado pode ter influência nos volumes escoados. Os dados também indicam que terraços e telhados com cobertura vegetal podem fazer um controle adequado do volume de escoamento superficial, mesmo passando 24 horas do início da chuva.

Os dados indicam que o uso de coberturas vegetais pode proporcionar uma melhor distribuição do escoamento superficial, ao longo do tempo, através da diminuição da velocidade de liberação do excesso de água retido nos poros do substrato. Além disso, os dados demonstram também uma redução no volume de água escoado, já que o telhado verde é composto por plantas que têm a capacidade de reter água. Com os resultados das análises físico-químicas, é possível verificar que existe pouca diferença entre os módulos terraço e telhado sem cobertura vegetal. O mesmo acontece com o terraço e o telhado com cobertura vegetal. Isso já era esperado, já que ambos foram construídos com o mesmo material,

diferenciando apenas a inclinação. Isso mostra que, a princípio, a inclinação tem pouca influência na deposição de material sólido, como folhas e poeira na parte superior da cobertura.

Se compararmos os valores obtidos nas análises da qualidade com os padrões das resoluções nº 357 e 430 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), EPA (Guia para Reuso da Água) de 1992 e a resolução 128/06 RS (Rio Grande do Sul), a água possui uma boa qualidade mesmo não sendo desprezada a primeira parcela que é a mais poluída. As análises físico-químicas da água demonstram que, para todos os módulos analisados, é possível utilizar a água para usos não potáveis, embora a qualidade de água dos módulos com cobertura vegetal seja inferior, se comparada com a água proveniente do módulo sem cobertura vegetal. A presença da cobertura vegetal aumenta os valores de sólidos totais, fósforo total, nitrogênio, nitrato, turbidez, DOB5, além de tornar o pH alcalino com valores próximos a 8. Para um possível uso da água, proveniente do telhado com cobertura vegetal, certo cuidado deve-se ter no tratamento dessa água. O tratamento utilizado irá depender do tipo de uso.

Com esta pesquisa foi possível observar que tanto os pavimentos permeáveis quanto as coberturas verdes são dispositivos que podem ser utilizados de maneira eficiente no controle de água superficiais, sendo possível utilizar este tipo de estrutura em lotes residenciais e estacionamentos comerciais. Estas estruturas podem servir de opção ou atuar em conjunto com as bacias de amortecimento, estrutura de controle de cheia já bastante utilizada no Brasil. Embora cada uma das estruturas tenha sua especificidade construtiva, é importante ressaltar que a utilização dessas estruturas pode apresentar uma possível solução para o excesso de água que atualmente é destinado aos sistemas de drenagem urbana.

7 RECOMENDAÇÕES

Considerando que o trabalho desenvolvido nesta pesquisa constituiu de um estudo de aspecto quantitativo e qualitativo em duas estruturas experimentais, com oneroso custo de manutenção e dependente de fatores incertos como a precipitação, não foi possível analisar alguns aspectos. O monitoramento quali-quantitativo, em duas estruturas, tornou-se muito dispendioso e isso também limitou o número de eventos analisados, principalmente no aspecto qualitativo. Além disso, não houve condições de avaliar alguns fatores importantes, tais como a evapotranspiração das plantas da cobertura vegetal e umidade do solo (pavimentos permeáveis).

Para uma melhor compreensão dos processos quantitativos e qualitativos, nas duas estruturas experimentais, seria necessário:

- ✓ dar continuidade ao estudo quantitativo das duas estruturas para detectar eventos com maior intensidade. Isso se dá principalmente com o monitoramento de eventos no verão, onde se sabe que ocorrem precipitações de maiores intensidade;
- ✓ dar continuidade às análises qualitativas para melhorar a compreensão dos riscos de contaminação do solo adjacente e do lençol freático;
- ✓ realizar testes destrutivos na estrutura do pavimento permeável, principalmente no revestimento do asfalto poroso para verificar se o comprometimento da capacidade de infiltração se deve a colmatação no reservatório de brita ou entupimento dos poros do revestimento superficial;
- ✓ análise do estado de deterioração do geotêxtil e realização de análises para verificação da capacidade de retenção de contaminantes do mesmo;
- ✓ investigar a diferença no controle quali-quantitativo de escoamento superficial de dois tipos de estruturas (telhados verdes e pavimentos permeáveis).

Seria interessante se a continuação deste estudo possibilitasse o auxílio na determinação de um coeficiente de escoamento superficial para telhados verdes e que esse valor pudesse ser utilizado no decreto N° 15.371 (2006) da Prefeitura Municipal de Porto Alegre, que regulamenta o controle da drenagem urbana. O referido decreto especifica valores de redução na quantidade de área a ser computada no cálculo da vazão máxima do empreendimento quando são adotadas técnicas como: pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração e desconexão das calhas de telhado para superfícies permeáveis sem drenagem.

Há a necessidade de avaliação dos custos de manutenções periódicas na estrutura. Talvez seja menos dispendioso construir um novo pavimento, após o término de sua vida útil, do que arcar com manutenções periódicas. Existe a necessidade de comparação entre dois módulos, um com e outro sem manutenção, para poder avaliar qual seria a melhor escolha do ponto de vista econômico.

Também sugere-se efetuar estudos semelhantes com outras medidas não convencionais em drenagem urbana que utilizem o princípio da infiltração. Trincheiras, valas, valetas e planos de infiltração são estruturas com o mesmo princípio, mas de diferentes concepções que poderão ser utilizadas em estacionamentos, parques, calçadas ou passeios.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, C. L.; COMINO-MATEOS, L. 2003. In-situ hydraulic performance of a permeable pavement sustainable urban drainage system. **Water and Environment Journal**. v.17, n.3, p. 187-190.

ACIOLI, Laura Albuquerque. 2005. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ALMEIDA NETO, P. ; OHNUMA JÚNIOR, A. A. ; CUNHA, A. P. R. ; MENDIONDO, E. M. (2005). Análise quali-quantitativo do escoamento superficial gerado pela água de chuva através da cobertura verde leve. In: **VI Encontro Nacional de Águas Urbanas**, 2005, Belo Horizonte, MG. Anais. Belo Horizonte, MG : UFAL/UFMG, 2005. v. 1. p. 31-34.

ANDRADE FILHO, A. G. de.; SZÉLIGA, M. R., SZESZ, J. R. S. 2000. Utilização de micro-reservatório de retenção para atenuações de inundações em bacias urbanas. **Ciências Exatas e da Terra, Ciências Exatas e Engenharia**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 47-68.

APHA. 1998. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 20th ed. Washington, D.C.: American Public Health Association.

ARAÚJO, P. R., TUCCI, C. E. M., GOLDENFUM, J. A. 2000. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial. **RBRH – Revista Brasileira dos Recursos Hídricos**. v. 5, n. 3, Jul/Set , p. 21-29.

ARNOLD, C.L.; GIBBONS, C.J. 1996. Impervious Surface Coverage: The emergence of a key environmental indicator. **Journal of the American Planning Association**. v. 62, n. 2, p. 243-258.

AUCHAROVA, A.; KHOMICH, V. 2005. Priority pollutants in urban runoff (On an example of Minsk city) In: **International Conference on Urban Drainage**, 10., 2005, Copenhagen. ICUD 2005. Copenhagen. p.1-8.

AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.; CRES, F. N.; ALFAKIH, E. 1994. **Techniques alternatives en assainissement pluvial: choix, conception, réalisation et entretien**. Paris: Lavoisier. 372p.

BALADES, J. D.; TRINCAT, A. M. 1998. **Reduction des impacts des rejets urbains de temps de pluie: role d'une tranchée drainante**. Bordeaux: Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement du Sud-Ouest. 39p.

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

BARRAUD, S.; GAUTIER, A.; BARDIN, J. P.; RIOU, V. 1998. The impact of intentional infiltration on soil and groundwater - a case study. In: **International Conference On Innovative Technologies In Urban Drainage**, 3., 1998, Lyon. Novatech 1998. Lyon: GRAIE. p.449-456.

BERNDTSSON, J. C.; EMILSSON, T.; BENGTSSON, L. 2006. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. **Science of the Total Environment**. n. 355, p. 48–63.

BRAGA, Benedito; HESPANHOL, Ivanildo; CONEJO, João G. L.; BARROS, Mário T. L. de; VERAS Jr, Milton S.; PORTO, Monica F. do A.; NUCCI, Nelson L. R.; JULIANO, Neusa M. de A.; EIGER, Sérgio. 2002. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 305p.

BRASIL. Ministério da Saúde. 2006. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**. Brasília: Ministério da Saúde, 2006. 212 p.

BRATTEBO, B. O. ; BOOTH, B. D. 2003. Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. **Water Research**, 37. p. 4369-4376.

BRENA, N. A. 2009. **A chuva ácida e os seus efeitos sobre as florestas 2ªed.** São Paulo: Ed. do Autor. 208 p.

CANHOLI, Aluísio Pardo. 2005. Drenagem urbana e controle de enchentes. São Paulo: Oficina de Textos. 302p.

CAPUTO, Homero Pinto. 2008. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 6.ed. Rio de Janeiro: LTC. 234 p.

CARTER, T.L., RASMUSSEN, T.C. 2006. Hydrologic behavior of vegetated roofs. **Journal of the american water resources association.** v. 42, n. 5, p. 1261–1274.

CETESB – **Variáveis de Qualidade da água.** Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/%C3%81uas-superficiais/109-Vri%C3%A1eis-de-Qalidade-das-%C3%81uas>>. Acesso em: 02 fev. 2011.

COLLINS, Kelly Alyssa. 2007. **A field evaluation of four types of permeable pavement with respect to water quality improvement and flood control.** 291f. Dissertação (Mestrado em *Biological and Agricultural Engineering*) – Graduate Faculty of North Carolina State University.

COLLINS, Kelly; HUNT, William F.; HATHAWAY, Jon M. 2008. Hydrologic Comparison of Four Types of Permeable Pavement and Standard Asphalt in Eastern North Carolina. **Journal of Hydrologic Engineering.** v. 13, n. 12, p 1146-1157.

CONNELLY, M.; LIU, K. 2005. Green roof research in british columbia- an overview. In: *Greening rooftops for sustainable communities*, 2005, Washington, dc.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução n. 430 de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução n. 357 de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – CONSEMA/RS. Resolução n. 128 de 2006. Dispõe sobre a fixação de Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul

DAMODARAM, C.; GIACOMONI, M. H., KHEDUN, C. P.; HOLMES, Hillary H.; RYAN, A.; SAOUR, W.; ZECHMAN, E. 2010. Simulation of Combined Best Management Practices and Low Impact Development for Sustainable Stormwater Management. **Journal of The American Water Resources Association**. V. 46, n. 5, p 907-918.

EPA (Environmental Protection Agency). 1992. **Guidelines for Water Reuse**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r92004/625R92004.pdf>>. Acesso em 15/10/2010.

EPA (Environmental Protection Agency). 1999a. **Storm Water Technology Fact Sheet - Porous Pavement**. Fed. Regist, 832-F-99-023.

EPA (Environmental Protection Agency). 1999b. **Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices** - Fed. Regist , 821-R-99-012.

EPA (Environmental Protection Agency). 2009a. **Green Roofs for Stormwater Runoff Control** - Fed. Regist , EPA/600/R-09/026.

EPA (Environmental Protection Agency). 2009b. **Operation and Maintenance of Permeable Pavements (Pervious Concrete)**. Disponível em: <http://www.epa.gov/region07/newsevents/events/proceedings/om_green_infrastructure/maintaining_hardscapes_porous_pavements_kevern.pdf>. Acesso em 12/11/2010.

EMILSSON, Tobias. 2005. **Extensive Vegetated Roofs in Sweden- Establishment, Development and Environmental Quality**. 34 p. Tese – Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.

ERIKSSON, E.; BAUN, A.; MIKKELSEN, P. S.; LEDIN, A. 2005. Selection of stormwater priority pollutants. In: **International Conference on Urban Drainage**, 10., 2005, Copenhagen. ICUD 2005. Copenhagen. p.1-8.

FERREIRA, L. C. De Araújo ; NETO, C. O. de A.; RIGHETTO, A. M.; BRITO, Luiz Pereira de; SALES, Thaise Emanuele Andrade de. **Dispositivo automático simples para coleta de amostras sequenciais de águas do escoamento superficial em áreas urbanas**. In: XXXI Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria e Ambiental, 2008, Santiago - Chile. XXXI Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria e Ambiental Aidis, 2008.

FORGIARINI, F. R. ; SOUZA, C. F. ; SILVEIRA, A. L. L. da; SILVEIRA, G. L. da ; TUCCI, C. E. M. 2007. **Avaliação de Cenários de Cobrança pela Drenagem Urbana de Águas Pluviais**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo – Brasil.

GROMAIRE-MERTZ, M. C.; GARNAUD, S.; GONZALEZ, A.; CHEBBO, G. 1999. Characterisation of urban runoff pollution in Paris. **Water Science and Technology**. v. 39, n.2, p. 1-8.

HATHAWAY, A. M.; HUNT, W. F.; JENNINGS, G. D. 2007. A field study of green roof hydrologic and water quality performance. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. v.51, n.1, p.37-44.

HUTCHINSON, D.; ABRAMS, P.; RETZLAFF, R.; LIPTAN, T. (2003). Storm water monitoring two ecoroofs in Portland, Oregon, USA. In **Proceedings of the Greening Rooftops for Sustainable Communities**. Chicago, IL, USA, May 2003.

IDE, Carlos Nobuyoshi. 1984. **Qualidade da drenagem pluvial urbana**. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

KNAPTON, John. **John Knapton's pictorial guide to paving through the ages**. Disponível em: <<http://www.john-knapton.com/paving.htm>>. Acesso em: 17 de março de 2008.

KÖHLER, M.; SCHMIDT, M.; GRIMME, F. W.; LAAR, M.; PAIVA, V. L. de A.; TAVARES, S. 2002. Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. **Environmental Management and Health**. v.13, n. 4, p.382-391.

LARMET, H. ; DELOLME, C.; BEDELL, J. P.; NETO, M. 2005. Facilitated transport of metals and bacteria into two infiltration basins in Lyon (France) under changing hydrological conditions: soil column study. In: **International Conference on Urban Drainage**, 10., 2005, Copenhagen. ICUD 2005. Copenhagen. p.1-9.

LID (Low Impact Development). 2001. **Permeable Pavers**. Disponível em: <http://www.lid-stormwater.net/permpavers_benefits.htm> Acesso em:19 de setembro 2010.

MAY, Simone. 2004. **Estudo da viabilidade do aproveitamento de água de chuva para consumo não potável em edificações**. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? **Landscape and Urban Planning**. Amsterdam, v.27, p.217-226.

MORAN, Amy Christine. 2004. **A North Carolina field study to evaluate greenroof runoff quantity, runoff quality, and plant growth**. 300f. Dissertação (Mestrado em *Biological and Agricultural Engineering*) – Graduate Faculty of North Carolina State University.

PAGOTTO, C.; LEGRET, M.; LE CLOIREC, P. 2000. Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement. **Water Research**. Amsterdam, v.34, n.18, p.4446-4454.

PALLA, Anna; GNECCO, Ilaria; LANZA, Luca G. 2010. Hydrologic restoration in the urban environment using green roofs. **Water**. Basel, v.2, p. 140-154.

PORTO, M. F. A. 1995. **Aspectos qualitativos do escoamento superficial em áreas urbanas**. In TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. (Org.). Drenagem urbana. Porto Alegre: ABRH: Ed. da Universidade/UFRGS. Cap.9, p.388-428.

ROUSSEAU, M.; PIETRO, L. Di; ANGULO-JARAMILLO, R.; TESSIER, D.; CABIBEL, B. 2004. Preferential Transport of Soil Colloidal Particles: Physicochemical Effects on Particle Mobilization. **Vadose Zone Journal**. v.3, p. 247–261.

SCHOLZ, Miklas; GRABOWIECKI, Piotr. 2007. Review of permeable pavement systems. **Building and Environment**. v. 42, n.11, p. 3830-3836.

SCHUELER, T. R. 1987. **Controlling Urban Runoff: A practical manual for planning and designing urban BMP's**. Washington: Metropolitan Washington Council of Governments, 1987. 229 p.

SILVA, Gustavo Barbosa Lima da. 2006. **Avaliação Experimental sobre a Eficiência de Superfícies Permeáveis com Vistas ao Controle do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas**. 180 f. Tese (Doutorado Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

SOUZA, Vladimir Caramori Borges de. 2002. **Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial**. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

STEP (Sustainable Technologies Evaluation Program). 2008. **Performance Evaluation of Permeable Pavement and a Bioretention Swale Seneca College, King City**. Ontario Sustainable Technologies Evaluation Program. Disponível em: <http://www.sustainabletechnologies.ca/>

STOVIN, Virginia. 2010. The potential of green roofs to manage Urban Stormwater. **Water and Environment Journal**. v. 23, n.3, p. 192-197.

TEEMUSK, A.; MANDER, U. 2007. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events. **Ecological Engineering**. v. 30, p. 271–277.

TOMAZ, P. 1998. **Conservação da água**. Editora Parma. 294p.

TORDO, Olga Catarina. 2004. **Caracterização e avaliação do uso de águas de chuva para fins**. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – , Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau.

TOTA-MAHARAJ, Kiran; SCHOLZ, Miklas. 2010. Efficiency of permeable pavement systems for the removal of urban runoff pollutants under varying environmental conditions. **Environmental Progress & Sustainable Energy**. v.29, n.3, p.358-369.

TUCCI, C. E. M.; GENZ, F. 1995. **Controle do impacto da urbanização**. In TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. (Org.). Drenagem urbana. Porto Alegre: ABRH: Ed. da Universidade/UFRGS. Cap.7, p.277-347.

TUCCI, C. E. M. 2003. **Inundações e Drenagem Urbana**. In TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Org.). Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre: ABRH: Ed. da Universidade/UFRGS, p. 45-150.

URBONAS, Ben; STAHERE, Peter. 1993. **Stormwater: Best management practices and detention for water quality, drainage and cso management**. Englewood Cliffs: PTR Prentice Hall, p. 442.

VANWOERT, N. D.; ROWE, D. B.; ANDRESEN, J. A.; RUGH, C. L.; FERNANDEZ, R. T.; XIAO, L. 2005. Green Roof Stormwater Retention: Effects of Roof Surface, Slope, and Media Depth. **Journal of Environmental Quality**. v. 34, p. 1036-1044.

VILLARREAL, E. L.; BENGTTSSON, L. 2005. Response of a *sedum* green-roof to individual rain events. **Ecological Engineering**. n. 25, p. 1–7.