

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Gabriela Hammes

**APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL CAPTADA A PARTIR DE PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS PARA USO NÃO POTÁVEL**

Florianópolis
2017

Gabriela Hammes

**APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL CAPTADA A PARTIR DE PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS PARA USO NÃO POTÁVEL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof^a Liseane Padilha Thives, Dr^a

Co-orientador: Prof. EneDir Ghisi, PhD.

Florianópolis

2017

Gabriela Hammes

**APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL CAPTADA A PARTIR DE PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS PARA USO NÃO POTÁVEL**

Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro Civil, e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 26 de junho de 2017.

Banca examinadora:



Prof^a Liseane Padilha Thives, Dr^a
Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. EneDir Ghisi, PhD.
Co-orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fernando Pelisser, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Ana Kelly Marinoski Ribeiro, Dr^a
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora, professora Dr^a Liseane Padilha Thives, pela orientação, incentivo e apoio, e por todos os ensinamentos repassados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu co-orientador, professor PhD. Eneir Ghisi, por sua análise crítica e construtiva, pelo aprendizado proporcionado, e pela disponibilidade e paciência durante o andamento do estudo.

À Mestre Emmanuelle Stefânia Holdefer Garcia, por ter fornecido as placas de concreto asfáltico e outros materiais, além de ter auxiliado nos primeiros ensaios.

À Elaine Mitie Nakamura, Gustavo Coutinho Rosa, João Renato de Mendonça Strelau, Sofia Souza e Gabriel Monteiro dos Santos, do Laboratório Integrado de Meio Ambiente da UFSC, pelo auxílio na realização dos ensaios.

Aos meus pais, Nilson e Marlete, que através de muito trabalho, dedicação e amor, deram-me a oportunidade de chegar até aqui. A eles expresseo o meu profundo reconhecimento e gratidão.

Aos meus irmãos, Guilherme e Luciane, pela cumplicidade e pelo apoio, mesmo que de longe, durante todos esses anos de faculdade.

Ao meu namorado, Guilherme Miguel Müller, que tornou possível o desenvolvimento e finalização deste trabalho, por ter me acompanhado e apoiado nos momentos difíceis.

Ao professor Dr. Fernando Pelisser e à Dr^a Ana Kelly Marinoski Ribeiro, por terem aceitado participar da minha banca e contribuir para o aprimoramento deste trabalho.

A todas as pessoas que de alguma maneira contribuíram para que os meus objetivos fossem alcançados.

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de avaliar o desempenho de um pavimento permeável quanto à quantidade e à qualidade da água pluvial infiltrada, visando seu aproveitamento em atividades que permitam o uso de água não potável. Foram construídos dois modelos de pavimentos permeáveis com revestimento de concreto asfáltico drenante e diferentes camadas granulares. Os modelos foram expostos à chuva para medir a quantidade de água infiltrada que pode ser coletada e aproveitada. Os pavimentos propostos apresentaram média de infiltração de 70,1% e 80,0%, sendo a diferença atribuída à utilização de uma camada de areia com o intuito de melhorar a filtragem da água em um dos modelos. Esses mesmos modelos foram utilizados para filtrar a água coletada do escoamento superficial de um estacionamento. Depois de filtradas, as amostras de água pluvial foram submetidas a diversos ensaios a fim de avaliar os parâmetros recomendados pela Agência Nacional de Águas. Foi observada uma influência positiva dos modelos em alguns parâmetros, mas, ainda assim, constatou-se a necessidade de um tratamento adicional da água para adequá-la a qualidade prevista para o uso desejado. Também foi proposta a utilização do pavimento permeável em um estacionamento da Universidade Federal de Santa Catarina para filtração de água pluvial e posterior utilização na descarga de vasos sanitários e mictórios do bloco central do Centro Tecnológico. A espessura da camada de armazenamento temporário de água do pavimento foi calculada de modo a atender à chuva de projeto adotada, bem como foi indicado um volume para o reservatório permanente do sistema de aproveitamento. O prédio em questão teve um consumo médio mensal de quase 196 m³ de água potável em 2016. Através do uso do programa computacional Netuno, verificou-se que, caso fosse implantado um sistema de aproveitamento de água pluvial, com reservatório de 45.000 litros, o consumo mensal estimado de água potável para o período ficaria entre 90 e 93 m³, o que indica uma economia de pelo menos cerca de 53%.

Palavras chaves: Pavimentos permeáveis. Concreto asfáltico drenante. Aproveitamento de água pluvial. Água não potável. Programa computacional Netuno.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Influência do pavimento permeável no hidrograma de uma bacia.....	20
Figura 2.2 – Seção transversal de um pavimento permeável, de revestimento permeável e convencional.....	21
Figura 2.3 – Demonstração da eficiência do pavimento permeável em estacionamento	22
Figura 2.4 – Pavimento com infiltração total	23
Figura 2.5 – Pavimento com infiltração parcial	24
Figura 2.6 – Pavimento sem infiltração	24
Figura 2.7 – Superfície de um concreto asfáltico drenante.....	25
Figura 2.8 – Execução de um pavimento permeável	32
Figura 2.9 – Variáveis do balanço hídrico em um pavimento permeável.....	33
Figura 2.10 – Experimento com pavimento permeável no IPH/UFRGS	34
Figura 2.11 – Estimativa dos usos finais de água para o bloco central do CTC.....	42
Figura 3.1 – Pavimento com poças de água após eventos de chuva.....	48
Figura 3.2 – Buracos e poças de água após chuvas intensas.....	48
Figura 3.3 – Imagem de satélite da área de coleta da água	49
Figura 3.4 – Curva granulométrica.....	51
Figura 3.5 – Placa 2 durante ensaio de vazios comunicantes	52
Figura 3.6 – Ensaio com permeâmetro LCS	52
Figura 3.7 – Agregados graúdos utilizados.....	53
Figura 3.8 – Agregado miúdo utilizado.....	54
Figura 3.9 – Estrutura de suporte para os modelos	55
Figura 3.10 – Recipiente de controle, modelo B e modelo A.....	56
Figura 3.11 – Modelo de pavimento permeável A.....	57
Figura 3.12 – Modelo de pavimento permeável B.....	58
Figura 3.13 – Modelos durante coleta de dados quantitativos.....	59
Figura 3.14 – Processo de filtragem da água	60
Figura 3.15 – Amostras recolhidas do escoamento superficial, do modelo A e do modelo B, de precipitação ocorrida em 18/05/17	60
Figura 3.16 – Determinação de óleos e graxas	62

Figura 3.17 – Cartelas para leitura dos coliformes das amostras da precipitação ocorrida em 14/05/17	63
Figura 3.18 – Prédios abastecidos pelo hidrômetro H33	67
Figura 3.19 – Interface do programa Netuno	71
Figura 4.1 – Médias mensais de precipitação de janeiro de 2000 a dezembro de 2016	73
Figura 4.2 – Médias mensais de precipitação de janeiro de 2000 a agosto de 2012	73
Figura 4.3 – Médias mensais de precipitação de junho de 2013 a dezembro de 2016	74
Figura 4.4 – Consumo de água potável no bloco central do CTC em 2016	75
Figura 4.5 – Potencial de economia de água potável para os quatro cenários	90
Figura 4.6 – Exemplo da disposição dos reservatórios inferiores.....	91
Figura 4.7 – Diferença entre potenciais de atendimento pluvial	92
Figura 4.8 – Volume de água pluvial extravasado	93
Figura 4.9 – Potencial de economia de água potável para diferentes áreas de coleta da água pluvial	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Faixas granulométricas da CPA.....	28
Tabela 2.2 – Faixa granulométrica para CPA de 1 polegada	28
Tabela 2.3 – Usos finais em dez edifícios públicos de Florianópolis.	41
Tabela 2.4 – Média do consumo diário dos aparelhos sanitários, alunos e CTC, com base nas respostas dos entrevistados	42
Tabela 2.5 – Parâmetros de qualidade de água de chuva para usos restritivos não potáveis.....	44
Tabela 2.6 – Parâmetros característicos para água Classe 1.	45
Tabela 3.1 – Resultados da caracterização dos agregados	50
Tabela 3.2 – Composição granulométrica.....	50
Tabela 4.1 – Dados quantitativos do modelo A.....	76
Tabela 4.2 – Percentual de água retido na <i>filter course</i>	78
Tabela 4.3 – Comparação entre a média dos valores obtidos e os limites adotados	79
Tabela 4.4 – Dados das coletas	80
Tabela 4.5 – Resultados da análise de coliformes fecais	81
Tabela 4.6 – Resultados da análise de pH	81
Tabela 4.7 – Resultados da análise de cor	82
Tabela 4.8 – Resultados da análise de turbidez	82
Tabela 4.9 – Resultados da análise de DBO	83
Tabela 4.10 – Resultados da análise de nitrato	84
Tabela 4.11 – Resultados da análise de nitrogênio amoniacal.....	84
Tabela 4.12 – Resultados da análise de nitrito	84
Tabela 4.13 – Resultados da análise de fósforo total	85
Tabela 4.14 – Resultados da análise de sólidos suspensos totais	86
Tabela 4.15 – Altura de chuva total para diferentes durações.....	88
Tabela 4.16 – Dados de entrada no Netuno	89
Tabela 4.17 – Potencial de economia de água potável para reservatório inferior de 45.000 litros.....	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Poluentes típicos no escoamento superficial de rodovias.....	36
Quadro 2.2 – Fontes de poluentes em rodovias	37
Quadro 3.1 – Parâmetros avaliados e métodos de análise	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
CALTRANS	<i>California Department of Transportation</i>
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CAP	Cimento Asfáltico do Petróleo
CIRIA	<i>Construction Industry Research and Information Association</i>
CPA	Camada Porosa de Atrito
CPPF	Comissão Permanente de Planejamento Físico
CSE	Centro Socioeconômico
CTC	Centro Tecnológico
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (Extinto)
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DPAE	Departamento de Projetos de Arquitetura e Engenharia
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
ES	Especificação de Serviço
EUA	Estados Unidos da América
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade-duração-frequência
IFSTTAR	<i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux</i>
IPH/UFRGS	Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
LIMA	Laboratório Integrado de Meio Ambiente

LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Extinto)</i>
LCS	<i>Laboratorio Escuela de Caminos de Santander</i>
ME	Método de Ensaio
NAPA	<i>National Asphalt Pavement Association</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NF	<i>Norme Française</i>
NMP	Número Mais Provável
OGFC	<i>Open Graded Friction Course</i>
PURA-USP	Programa de Uso Racional da Água da Universidade de São Paulo
RWMWD	<i>Ramsey Washington Metro Watershed District</i>
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
SINDUSCON-SP	Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
uH	Unidade Hazen
UNHSC	<i>University of New Hampshire Stormwater Center</i>
uT	Unidade de Turbidez
WSDOT	<i>Washington State Department of Transportation</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	PAVIMENTOS PERMEÁVEIS	19
2.1.1	Definição	19
2.1.2	Classificação segundo a destinação da água	22
2.1.2.1	Tipo A: Pavimento com infiltração total	22
2.1.2.2	Tipo B: Pavimento com infiltração parcial	23
2.1.2.3	Tipo C: Pavimento sem infiltração	24
2.1.3	Concreto asfáltico drenante	25
2.1.3.1	Ligante asfáltico	26
2.1.3.2	Agregados	27
2.1.4	Sistema de Camadas Drenantes	29
2.1.4.1	<i>Choker Course</i>	29
2.1.4.2	<i>Filter Course</i>	29
2.1.4.3	<i>Filter Blanket</i>	30
2.1.4.4	<i>Reservoir Course</i>	30
2.1.4.5	Geotêxtil e Impermeabilizante	32
2.1.5	Capacidade drenante e de aproveitamento da água coletada	33
2.1.6	Manutenção	34
2.2	QUALIDADE DA ÁGUA	35
2.2.1	Qualidade da água de escoamento superficial em rodovias	35
2.2.2	Qualidade da água infiltrada pelo pavimento	37
2.3	CONSUMO HÍDRICO	39
2.3.1	Distribuição do consumo	40
2.3.2	Aproveitamento de água não potável	43
2.3.3	Aproveitamento de água para descarga de vasos sanitários	44
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46

3	MATERIAIS E MÉTODO	47
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	47
3.2	OBJETO DE ESTUDO.....	47
3.3	MATERIAIS UTILIZADOS.....	49
3.3.1	Concreto asfáltico drenante	49
3.3.2	Agregado graúdo	53
3.3.3	Agregado miúdo	53
3.3.4	Recipientes de acrílico, grelhas, suportes metálicos e geotêxtil	54
3.4	MODELOS PROPOSTOS.....	55
3.4.1	Modelo A	56
3.4.2	Modelo B	57
3.5	ESTUDO QUANTITATIVO DOS MODELOS PROPOSTOS.....	58
3.6	ESTUDO QUALITATIVO DOS MODELOS PROPOSTOS.....	59
3.7	DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DO PAVIMENTO.....	63
3.8	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA DE ÁGUA POTÁVEL.....	66
3.8.1	Levantamento de dados	66
3.8.1.1	Índices pluviométricos.....	66
3.8.1.2	Consumo de água.....	67
3.8.1.3	Área de coleta da água pluvial.....	68
3.8.1.4	Percentual de água potável a ser substituído por água pluvial.....	68
3.8.1.5	Coeficiente de aproveitamento da água.....	68
3.8.2	Reservatório de água pluvial	68
4	RESULTADOS	72
4.1	ANÁLISE DE DADOS.....	72
4.1.1	Índices pluviométricos	72
4.1.2	Consumo de água	74
4.1.3	Área de coleta da água pluvial	75
4.2	ESTUDO QUANTITATIVO.....	75
4.3	ESTUDO QUALITATIVO.....	78
4.4	ESPESSURA DA <i>RESERVOIR COURSE</i>	87
4.5	VOLUME DO RESERVATÓRIO PERMANENTE.....	88
5	CONCLUSÃO	96
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	96

5.2 LIMITAÇÕES.....	97
5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
REFERÊNCIAS.....	99
APÊNDICE.....	105

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas o Brasil passou por um intenso processo de urbanização e em 2010 mais de 84% da população brasileira já morava em áreas urbanas (IBGE, 2010).

A impermeabilização do solo como consequência da ocupação urbana provoca impactos no meio ambiente, principalmente relacionados às modificações do ciclo hidrológico, maiores responsáveis pelo agravamento dos problemas ligados às inundações (RAMOS et al., 1999). A redução da infiltração e do tempo de concentração das águas em uma bacia urbanizada se reflete em picos de vazão muito maiores que os observados em condições naturais, aumentando a frequência e a magnitude das cheias.

O sistema de drenagem urbana convencional se baseia no conceito de escoar a água precipitada o mais rápido possível, atenuando o problema na área drenada ao mesmo tempo em que faz com que aumente o risco de inundações no corpo hídrico que receberá essa água a jusante.

Em resposta às necessidades de solucionar os efeitos da urbanização, uma variedade de estratégias de gestão da água se popularizou globalmente. Em muitas cidades são utilizados reservatórios de retenção ou detenção com o intuito de atenuar esse problema, porém tais alternativas requerem a utilização de grandes áreas, que muitas vezes não estão disponíveis. Dessa maneira, é cada vez mais evidente a adoção de medidas que atuem na fonte do escoamento superficial, diminuindo as vazões geradas.

Em grandes centros urbanos, as superfícies destinadas ao sistema viário e às áreas de estacionamento podem chegar a 30% da área da bacia de drenagem (ABCP, 2013). Diante disso, o uso de pavimentos permeáveis é uma alternativa para aumentar as áreas de infiltração nas cidades, de maneira que se consiga reduzir o volume e a velocidade dos escoamentos superficiais, além de ele ser capaz de reabastecer o lençol freático (UNHSC, 2014).

Em um pavimento permeável, a água infiltra através das camadas e depois é armazenada temporariamente, podendo ser aproveitada, infiltrar no solo ou ser escoada de forma controlada a jusante (CIRIA, 2015).

Outra característica de interesse dos pavimentos permeáveis está na melhoria da qualidade da água, visto que o escoamento superficial de vias urbanas representa uma importante fonte de poluição de rios e lagos. Essa poluição é de origem não pontual, ou difusa, e está relacionada à ocorrência de precipitações. Ela é resultado de diversas atividades que depositam poluentes de forma esparsa sobre a área de contribuição da bacia hidrográfica, sendo, portanto, de difícil controle (RAMOS et al., 1999).

Estudos indicam que a passagem da água pelo pavimento permeável pode reduzir a quantidade de poluentes contidos na água da chuva e do escoamento superficial. Roseen (2011), por exemplo, analisou o desempenho de um pavimento permeável em um estacionamento nos Estados Unidos, onde foi observada uma redução significativa na quantidade de sólidos suspensos, hidrocarbonetos e metais, presentes na água.

Ainda devido às suas propriedades drenantes, o pavimento permeável proporciona maior segurança e conforto aos usuários. Reduzindo a espessura da lâmina d'água na superfície do pavimento, diminui-se a distância de frenagem e os riscos de aquaplanagem e se garante melhor visibilidade da sinalização horizontal. Também há redução da reflexão da luz dos faróis e um aumento da distância de visibilidade devido à diminuição do *spray* de água (borrifo d'água formado com a passagem de um veículo sobre a superfície molhada), além de reduzir o ruído pneu-pavimento (BERNUCCI et al., 2008; NAPA, 2002). Outro benefício ambiental é a redução do fenômeno da ilha de calor devido à existência de poros que permitem um maior movimento de ar através do pavimento (ASCE, 2013).

Por fim, o aproveitamento da água captada em pavimentos permeáveis apresenta uma fonte alternativa de água que pode gerar uma grande economia no consumo de água potável, descarregando os sistemas de tratamento e abastecimento e contribuindo para a preservação dos mananciais.

1.1 JUSTIFICATIVA

Devido a problemas de escassez de água cada vez mais recorrentes, a sociedade está olhando com mais atenção para fontes alternativas de água. O aproveitamento da água proveniente de coberturas já é bastante difundido e utilizado. Contudo, pouco se fala dos pavimentos permeáveis, que além de

permitirem o aproveitamento da água armazenada, também auxiliam na redução da ocorrência e da amplitude de inundações e melhoram a qualidade da água.

Diante do cenário atual vivido nas grandes cidades e de todos os benefícios que o pavimento permeável pode trazer, este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento do tema através da discussão de suas características, da avaliação da eficiência de um pavimento permeável e sua aplicação focada no aproveitamento da água.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a quantidade de água pluvial que pode ser aproveitada após infiltrar em um pavimento permeável de concreto asfáltico, bem como analisar a qualidade da água captada para uso em fins não potáveis.

1.2.2 Objetivos Específicos

Têm-se os seguintes objetivos específicos propostos:

- Realizar um estudo de caso hipotético da instalação de pavimento permeável em um estacionamento da UFSC e aproveitamento da água captada para utilização na descarga dos vasos sanitários e mictórios do bloco central do Centro Tecnológico (CTC);
- Avaliar a quantidade de água disponível para aproveitamento após infiltrar pelos modelos de pavimentos permeáveis propostos;
- Avaliar a qualidade da água de escoamento superficial antes e após ser filtrada pelos pavimentos propostos e comparar os resultados a limites estabelecidos;
- Estimar a espessura da camada de armazenamento temporário de água do pavimento permeável (*reservoir course*) para uma chuva de projeto;
- Indicar um volume de reservatório para um sistema de aproveitamento de água pluvial no bloco central do CTC, a partir da avaliação dos resultados apresentados pelo programa Netuno quanto ao potencial de economia de água potável.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos apresentados resumidamente a seguir:

No primeiro capítulo, **Introdução**, apresenta-se o tema da pesquisa, com uma breve descrição dos pavimentos permeáveis, seus benefícios e aplicações para o aproveitamento da água, além da justificativa e a motivação para a realização deste trabalho. Por fim, são definidos os objetivos geral e específicos.

Na **Revisão Bibliográfica**, segundo capítulo, é visto o conceito de um pavimento permeável, bem como sua classificação e as camadas constituintes de acordo com as funções desejadas. Na sequência, é discutida a qualidade da água de escoamento superficial e os benefícios que o pavimento permeável pode trazer nesse contexto. Por fim, são abordadas informações a respeito do consumo de água e suas características.

O terceiro capítulo descreve o **Método** utilizado. São apresentados os locais de estudo, os materiais utilizados, os ensaios e levantamentos que foram realizados e as etapas desenvolvidas durante a pesquisa.

No quarto capítulo, **Resultados**, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com o desenvolvimento deste trabalho. São listadas as análises e ensaios realizados, cujos resultados são confrontados com valores recomendados. Por fim, também são discutidos os modelos propostos em relação ao sistema de aproveitamento de água não potável.

O último capítulo traz as **Conclusões** obtidas ao fim do trabalho, bem como reflexões a respeito do desenvolvimento do tema, limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim são apresentadas as **Referências** utilizadas no trabalho e o **Apêndice**.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os conceitos necessários ao entendimento do trabalho desenvolvido. A revisão bibliográfica se inicia com as definições a respeito de pavimentos permeáveis, seguindo com a exposição dos conceitos referentes à qualidade e ao aproveitamento da água captada pelo pavimento.

2.1 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

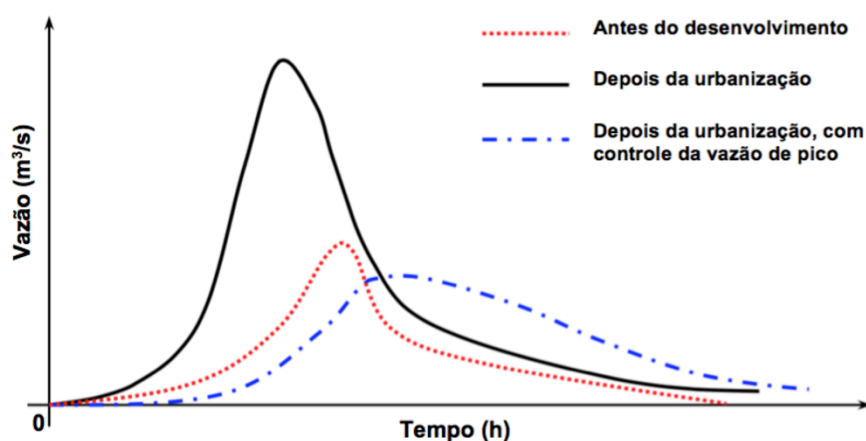
Pavimentos permeáveis consistem em uma alternativa que pode atenuar os problemas relacionados a inundações em centros urbanos, pois devido às suas características, reduzem o escoamento superficial e diminuem as vazões geradas, além de melhorarem a qualidade da água (HANSEN, 2008).

2.1.1 Definição

Segundo Ferguson (2005), pavimentos permeáveis são aqueles que possuem vazios comunicantes através dos quais a água pode passar e, ao mesmo tempo, sua estrutura deve atender aos carregamentos do tráfego. O pavimento permeável tem sido indicado para ser utilizado em estacionamentos, pátios, calçadas e vias de tráfego leve. A camada de revestimento pode ser de vários materiais, como blocos de concreto pré-moldado, concreto poroso moldado *in loco*, concreto asfáltico drenante, blocos de concreto vazados preenchidos com areia ou grama, entre outros.

Embora, de maneira geral, ambos sejam chamados pela literatura de pavimento permeável, existem os pavimentos dotados apenas de revestimentos superficiais permeáveis e o pavimento permeável propriamente dito, dotado de estrutura completamente permeável. Esse último promove o amortecimento de vazões, a alteração temporal dos hidrogramas e em alguns casos, a redução dos volumes escoados (ABCP, 2013). A Figura 2.1 ilustra o efeito do pavimento permeável na vazão gerada.

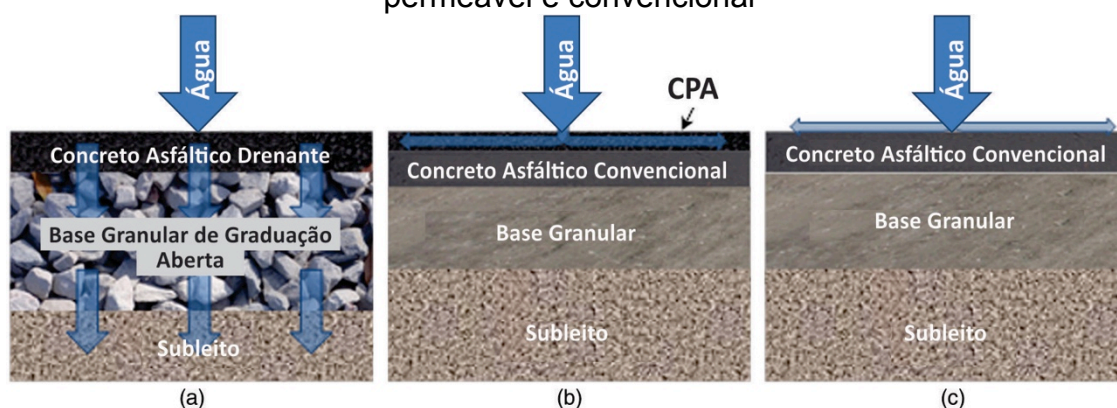
Figura 2.1 – Influência do pavimento permeável no hidrograma de uma bacia



Fonte: Adaptado de Tucci e Genz, 1995 apud Acioli, 2005.

De acordo com a Administração Rodoviária Federal dos Estados Unidos (FHWA), existem dois usos comuns para uma mistura asfáltica drenante. O primeiro deles, e também mais simples, consiste em uma fina camada de mistura asfáltica drenante sobreposta ao concreto asfáltico convencional, de graduação densa. Essa aplicação é conhecida no Brasil por camada porosa de atrito (CPA) e em inglês é chamada de *open-graded friction course* (OGFC). Nesse caso, a água infiltra na CPA e em seguida é drenada para fora do pavimento devido a sua declividade, se tratando apenas de um revestimento permeável. O segundo uso consiste em um revestimento com a mistura asfáltica drenante sobreposta a um sistema de camadas também drenantes, o que permite que a água infiltre por toda a profundidade do pavimento. Finalmente, após passar por todas as camadas, a água pode infiltrar no solo do subleito ou ser captada por um sistema de drenagem. Devido a sua configuração, esse último tipo é chamado de pavimento permeável de concreto asfáltico drenante (FHWA, 2015). A Figura 2.2 ilustra seções transversais de um pavimento permeável (a), um pavimento de revestimento permeável (CPA) (b) e de um pavimento asfáltico convencional (c), e demonstra o comportamento da água pluvial incidente sobre cada um.

Figura 2.2 – Seção transversal de um pavimento permeável, de revestimento permeável e convencional



Fonte: Adaptado de Putman e Kline (2008).

Segundo Roseen (2011), o uso de pavimentos permeáveis de concreto asfáltico drenante é recomendado em estacionamentos e vias de tráfego leve (com $N < 10^5$, sendo “N” o número de repetições do eixo simples padrão durante o período de projeto). O pavimento com revestimento permeável, por sua vez, pode ser utilizado em rodovias de tráfego pesado e intenso. Neste caso, o revestimento permeável é considerado uma camada de “sacrifício”.

A Figura 2.3 mostra um estacionamento no Estado de Iowa, Estados Unidos da América (EUA), em que uma parte do pavimento asfáltico é convencional e outra é permeável. Um caminhão-pipa demonstra como o pavimento permeável, à direita, drena a água rapidamente, enquanto no pavimento convencional, à esquerda, forma-se uma lâmina d’água na superfície.

Figura 2.3 – Demonstração da eficiência do pavimento permeável em estacionamento



Fonte: Hansen (2008).

2.1.2 Classificação segundo a destinação da água

De acordo com a Sociedade Americana de Engenheiros Civis (ASCE, 2013), os pavimentos permeáveis podem ser construídos com sucesso sobre a maioria dos terrenos, mas as diferentes características encontradas em cada solo que servirá de subleito podem influenciar na configuração do pavimento. A Associação de Pesquisa e Informação da Indústria da Construção dos EUA (CIRIA, 2015) classifica os pavimentos permeáveis em três sistemas principais quanto à destinação da água.

2.1.2.1 Tipo A: Pavimento com infiltração total

No pavimento com infiltração total (Tipo A), todo volume de água coletado infiltra no subleito. Esse pavimento pode ser usado em situações em que o solo do subleito apresenta alta permeabilidade e o nível do lençol freático for suficientemente baixo (ASCE, 2013). Normalmente, não há descarga do sistema para a rede de esgoto ou curso de água, pois toda água é infiltrada. No entanto, isso pode se fazer necessário a fim de atender a precipitações que excedam a chuva de projeto ou para quando o sistema se tornar menos eficiente, devido a redução das taxas de infiltração ao longo do tempo (CIRIA, 2015).

A Figura 2.4 ilustra um exemplo de pavimento com infiltração total. Observe-se a possibilidade do uso de diversos revestimentos permeáveis, como a mistura asfáltica, concreto e *paver*. Na seção 2.1.3 será discutido sobre o revestimento de concreto asfáltico drenante e na seção 2.1.4 serão detalhadas as características das camadas drenantes, como sua composição e espessura, que podem variar.

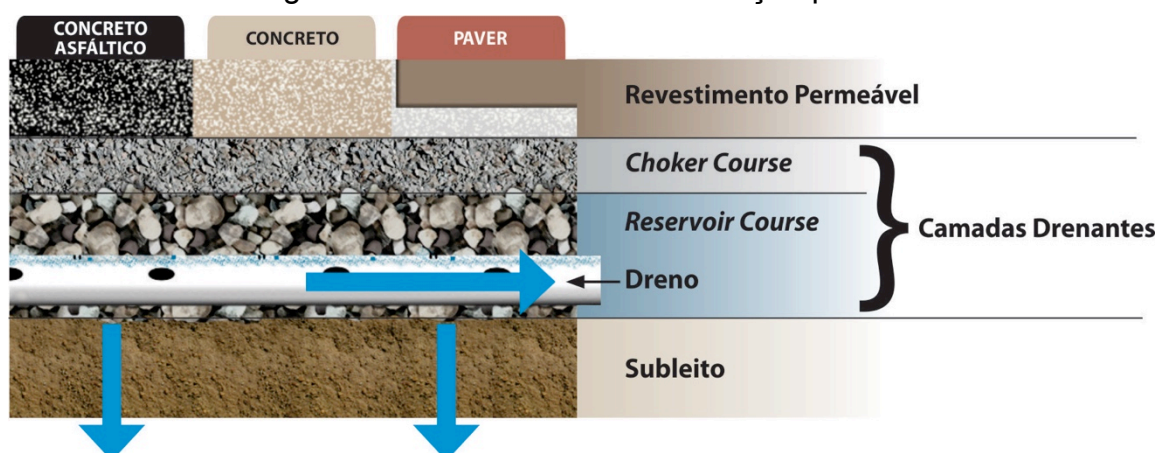


Fonte: Adaptado de ASCE (2013).

2.1.2.2 Tipo B: Pavimento com infiltração parcial

O pavimento com infiltração parcial (Tipo B) é projetado de modo que parte da água precipitada é infiltrada no subleito e o excesso desta é escoado para fora do sistema por meio de drenos (CIRIA, 2015). Essa configuração é utilizada em locais em que o subleito apresenta baixa permeabilidade, fazendo com que o solo não possua capacidade de infiltrar todo o volume de água necessário em tempo hábil (ASCE, 2013). A Figura 2.5 ilustra a configuração de um pavimento com infiltração parcial.

Figura 2.5 – Pavimento com infiltração parcial

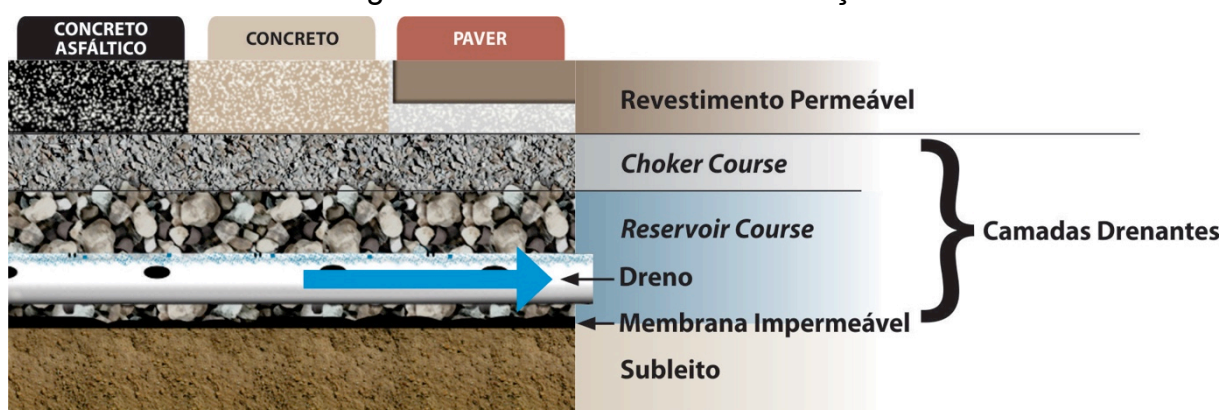


Fonte: Adaptado de ASCE (2013).

2.1.2.3 Tipo C: Pavimento sem infiltração

No caso do pavimento sem infiltração (Tipo C), todo volume de água coletado é drenado para fora do sistema, que geralmente é envolvido numa membrana impermeável e flexível colocada acima do subleito. Esse sistema é indicado para situações em que o subleito apresenta baixa permeabilidade ou mesmo baixa resistência, de modo que a exposição à água possa comprometer a estabilidade do pavimento. Outro fator que leva ao uso de pavimento sem infiltração é em caso de o lençol freático estar muito próximo da sub-base (menos de 1 m de profundidade). Por fim, essa configuração é utilizada quando se prevê o aproveitamento da água pluvial (CIRIA, 2015). A Figura 2.6 ilustra a configuração de um pavimento sem infiltração.

Figura 2.6 – Pavimento sem infiltração



Fonte: Adaptado de ASCE (2013).

2.1.3 Concreto asfáltico drenante

No Brasil, a mistura asfáltica drenante tem sua maior aplicação como camada porosa de atrito (CPA), atuando como camada de sacrifício. A CPA é sobreposta ao concreto asfáltico convencional em rodovias que apresentam alto volume de tráfego e chuvas intensas com o intuito de proporcionar maior segurança e conforto aos usuários (CALTRANS, 2006). A Especificação de Serviço do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER-ES 386/99, define os requisitos relativos aos materiais utilizados e procedimentos para execução da CPA.

A principal característica de um revestimento de concreto asfáltico drenante é a presença de vazios comunicantes, qualidade que o difere do concreto asfáltico convencional, de graduação densa, e do poroso. Esse último também possui um elevado volume de vazios, porém eles não são interligados e, portanto, não permitem que a água atravesse o pavimento. A Figura 2.7 mostra a superfície de um concreto asfáltico drenante, que se difere do revestimento convencional como consequência da granulometria utilizada.

Figura 2.7 – Superfície de um concreto asfáltico drenante



Fonte: UNHSC (2014).

Segundo DNER-ES 386/99, uma mistura asfáltica drenante deve apresentar entre 18 e 25% de vazios comunicantes, valor alcançado em virtude da pequena quantidade de fíler, agregado miúdo e ligante asfáltico presentes na mistura que, devido às suas características, é classificada como de graduação aberta (BERNUCCI et al., 2008). Todos os outros aspectos de fabricação da mistura

asfáltica drenante são semelhantes à convencional e, portanto, ela pode ser produzida em uma fábrica de asfalto padrão (CAHILL; ADAMS; MARM, 2005).

A Norma DNER-ES 386/99 estabelece ainda, 30% como o valor máximo para perda de massa por abrasão no ensaio Cântabro e resistência mínima à tração por compressão diametral, a 25° C, de 0,55 MPa.

De acordo com Hansen (2008), a maioria dos pavimentos permeáveis é projetada para baixo volume de tráfego e veículos leves, portanto, os requisitos estruturais não são significantes. Por essa razão, a espessura das camadas granulares é determinada conforme requisitos hidrológicos e, a espessura do concreto asfáltico drenante é resultante dos carregamentos do tráfego. Em estacionamentos com poucos ou sem a presença de caminhões é recomendada espessura mínima de 2,5 polegadas (6,35 cm).

2.1.3.1 Ligante asfáltico

As características do cimento asfáltico de petróleo (CAP) utilizado como ligante em pavimentos flexíveis são muito importantes para o bom desempenho da mistura asfáltica drenante. Isso porque, a mistura asfáltica utilizada como revestimento dos pavimentos permeáveis apresenta elevado volume de vazios e de vazios comunicantes.

A estrutura permeável, por permitir que o ar e a água penetrem seus poros, sofre um envelhecimento mais acelerado se comparada a uma mistura asfáltica convencional. O elevado volume de vazios comunicantes leva a mistura a sofrer uma oxidação mais rápida e a passagem de água pelos vazios tende a reduzir a adesividade do ligante ao agregado (BALBO, 2007). Por essa razão, os ligantes utilizados em misturas drenantes devem ser mais resistentes aos efeitos do envelhecimento, sendo indicado o uso de ligantes modificados por polímero ou o asfalto-borracha (CALTRANS, 2008).

O polímero SBS (borracha sintética de Estireno-Butadieno-Estireno) é um dos materiais mais utilizados na modificação do CAP. Sua adição melhora a recuperação elástica do ligante, além de aumentar sua ductilidade em baixas temperaturas. Em temperaturas altas, o SBS aumenta a rigidez do asfalto, reduzindo a deformação permanente em trilhas de rodas (BALBO, 2007).

Segundo Fontes (2009), a incorporação da borracha no asfalto diminui sua susceptibilidade térmica e melhora seu comportamento elástico em relação à mistura convencional. O uso do asfalto-borracha também aumenta a resistência da mistura à fadiga e à deformação permanente, além de retardar a propagação de fendas.

Outro fator importante para garantir a eficiência do pavimento permeável é a quantidade de ligante na mistura. Essa deve ser tal que permita a existência de vazios, e principalmente a conexão entre eles, mas suficiente para envolver perfeitamente os agregados, evitando a segregação (CALTRANS, 2006). A Norma DNER-ES 386/99 recomenda que o teor de ligante esteja entre 4,0 e 6,0%. Bernucci et al. (2008) ressaltam que a quantidade de ligante geralmente é reduzida, entre 3,5 e 4,5%, devido às características granulométricas da mistura. No entanto, para cada mistura é necessário realizar a dosagem para determinação dos parâmetros volumétricos e teor de projeto.

2.1.3.2 Agregados

As propriedades que determinam a adequação de um agregado para uso em misturas asfálticas drenantes são as mesmas exigidas em uma mistura convencional. A diferença está na granulometria, que nesse caso deve ser uniforme, com agregados quase do mesmo tamanho, além de conter poucos finos (partículas menores que 0,075 mm), para que se obtenha um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados (BERNUCCI et al., 2008).

O esqueleto mineral formado precisa suportar os carregamentos do tráfego, portanto, o agregado graúdo deve ser bastante resistente e apresentar perda menor que 30% no ensaio de abrasão “Los Angeles” (NAPA, 2002). Para Ruiz (1997 apud Meurer Filho, 2001) esse limite deve ser ainda menor, em torno de 18 a 20%.

Além da alta resistência à fragmentação, destaca-se a importância de o agregado ser angular (com muitas faces fraturadas), de textura áspera e limpo, garantindo o intertravamento adequado e prevenindo a deformação permanente do pavimento (CALTRANS, 2008; RUIZ, 1997 apud MEURER FILHO, 2001). Dessa maneira se preserva a macrotextura do pavimento e se evita a redução dos vazios comunicantes da mistura drenante.

A granulometria da mistura asfáltica drenante é do tipo *open graded*, em português, granulometria aberta. Existem inúmeras faixas granulométricas indicadas pela literatura para aplicação como CPA que servem de referência para a escolha da granulometria de um concreto asfáltico drenante. A Tabela 2.1 apresenta a faixa granulométrica proposta na Norma DNER-ES 386/99 para a CPA. A Tabela 2.2 mostra a granulometria recomendada pelo Departamento de Transporte da Califórnia (CALTRANS, 2008) para misturas asfálticas drenantes de 1 polegada (25,4 mm).

Tabela 2.1 – Faixas granulométricas da CPA

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passante, em peso (faixas)					Tolerância na curva de projeto (%)
ABNT	Abertura (mm)	I	II	III	IV	V	
3/4"	19,0	-	-	-	-	100	-
1/2"	12,5	100	100	100	100	70-100	±7
3/8"	9,5	80-100	70-100	80-90	70-90	50-80	±7
Nº 4	4,8	20-40	20-40	40-50	15-30	18-30	±5
Nº 10	2,0	12-20	5-20	10-18	10-22	10-22	±5
Nº 40	0,42	8-14	-	6-12	6-13	6-13	±5
Nº 80	0,18	-	2-8	-	-	-	±3
Nº 200	0,075	3-5	0-4	3-6	3-6	3-6	±2
Espessura da camada acabada (cm)		3,0		≤4			-

Fonte: Adaptado de DNER-ES 386/99.

Tabela 2.2 – Faixa granulométrica para CPA de 1 polegada

Peneira		Porcentagem passante, em peso (faixas)	Tolerância na curva de projeto (%)
ASTM	Abertura (mm)		
1 1/2"	38,1	100	-
1"	25,4	99 - 100	±5
3/4"	19,0	85 - 96	±5
1/2"	12,5	55 - 71	±6
Nº 4	4,8	10 - 25	±7
Nº 8	2,4	6 - 16	±5
Nº 200	0,075	1-6	±2

Fonte: Adaptado de CALTRANS (2008).

2.1.4 Sistema de Camadas Drenantes

Além do revestimento de concreto asfáltico drenante, pavimentos permeáveis podem apresentar diversas camadas, de acordo com a função ao qual ele se destina. Os sistemas de camadas drenantes variam do mais básico, com estrutura voltada ao armazenamento temporário da água coletada, até sistemas mais complexos, que além de armazenar a água, contam com camadas adicionais com o intuito de filtrar a água e melhorar sua qualidade.

2.1.4.1 *Choker Course*

Segundo o Departamento de Bacias Hidrográficas dos Condados de Ramsey e Washington (RWMWD, 2006) em Minnesota, EUA, a camada imediatamente abaixo da superfície de concreto asfáltico drenante é chamada de *choker course*. Essa camada tem a função de nivelar e preparar a superfície para receber o revestimento asfáltico. Ela deve ser composta por um agregado britado, limpo e com granulometria uniforme de $\frac{1}{2}$ polegada (1,27 cm) (ADAMS et al., 2001; RWMWD, 2006). Outros autores não indicam um tamanho específico, ressaltando apenas que o agregado deve ser uniforme e de pequenas dimensões, tal que permita o nivelamento da superfície (FHWA, 2015; HANSEN, 2008).

De acordo com FHWA (2015), a camada de *choker course* deve apresentar cerca de 1 polegada (2,54 cm) de espessura e para Adams et al. (2001) ela deve ter aproximadamente 2 polegadas (5,08 cm). O Centro de Águas Pluviais da Universidade de New Hampshire por sua vez, recomenda que essa camada tenha entre 10 e 20 cm, sendo a utilização de espessuras maiores indicada para atender a um maior volume de tráfego (UNHSC, 2014).

2.1.4.2 *Filter Course*

A *filter course* é uma camada opcional que visa filtrar a água coletada pelo pavimento, como o próprio nome indica. Diversos são os pavimentos que não apresentam essa camada, visto que são estruturas projetadas para a infiltração e não com o intuito de aproveitar a água coletada. A espessura e os materiais

utilizados na composição da *filter course* devem levar em conta a permeabilidade requerida, bem como os poluentes a serem removidos (ASCE, 2013).

Conforme UNHSC (2014), a *filter course* deve ser composta por areia com granulometria uniforme e diâmetro máximo de 4,75 mm, com espessura mínima de 20 a 30 cm. Ainda segundo UNHSC (2014), essa camada deve apresentar coeficiente de permeabilidade (K) entre $3,5 \times 10^{-5}$ e $2,1 \times 10^{-4}$ m/s, sendo K um valor que representa a velocidade com que a água atravessa determinado material. Deve-se ter cuidado para não compactar excessivamente os materiais, resultando na diminuição da capacidade de infiltração da camada.

2.1.4.3 *Filter Blanket*

A UNHSC (2014) recomenda que se construa uma camada entre a *filter course* (areia) e a *reservoir course* (pedra britada), e cujo material utilizado também apresente uma granulometria intermediária à dessas duas camadas. Essa camada é chamada de *filter blanket* e tem o intuito de prevenir a migração da areia para a camada do reservatório, o que causaria uma diminuição dos vazios, bem como da capacidade de armazenamento de água do reservatório.

A *filter blanket* deve apresentar uma espessura de pelo menos 3 polegadas (aproximadamente 8 cm), sendo a utilização de um agregado com diâmetro médio de 3/8 polegadas (9,5 mm) bastante comum (UNHSC, 2014). ASCE (2013) por sua vez, cita o uso de uma camada semelhante à de *choker course*, porém nesse caso, com a função de separação.

2.1.4.4 *Reservoir Course*

Essa é uma camada projetada para atender tanto aos requisitos ligados à função estrutural do pavimento quanto à sua capacidade de armazenamento da água pluvial (ASCE, 2013). Também chamada de *stone recharge bed* por RWMWD (2006), indica-se que essa camada apresente volume de vazios de cerca de 40%, visando o armazenamento temporário da água e permitindo sua infiltração gradual no subleito, ou que seja captada por sistemas de drenagem.

A *reservoir course* é constituída por um agregado graúdo com granulometria uniforme e angular, que deve ser lavado e não conter muitos finos. Adams et al.

(2001) indicam o uso de um agregado britado de grandes dimensões, usualmente de 2 a 2,5 polegadas de diâmetro (5,08 a 6,35 cm). ASCE (2013) não cita dimensões, e pontua que a disponibilidade de agregados no local normalmente é o que define o tamanho utilizado, desde que o agregado seja uniforme e forneça uma boa capacidade de armazenamento de água ao pavimento. RWMWD (2006) ressalta que não devem ser utilizados agregados de origem calcária uma vez que eles são frágeis e, devido aos esforços a que são submetidos, podem quebrar em pedaços menores causando o entupimento do sistema e comprometendo sua capacidade de armazenamento. Por esse motivo, é indicado o uso de agregado granítico.

A espessura da *reservoir course* depende das características do tráfego ao qual o pavimento foi projetado, da capacidade de armazenamento desejada, da permeabilidade do subleito e da destinação pretendida para a água coletada. Caso se opte por um sistema com infiltração total ou parcial, a espessura do reservatório é função direta da capacidade de infiltração do subleito somada à vazão dos drenos (quando existentes). Já em sistemas sem infiltração, a espessura do reservatório, após determinada a chuva de projeto, é influenciada apenas pela capacidade de escoamento dos drenos (UNHSC, 2014).

UNHSC (2014) recomenda espessuras mínimas de 10 cm em casos de pavimentos com infiltração e solo do subleito com alta permeabilidade, e 20 cm em pavimentos sem infiltração e que, portanto, possuirão drenos. Além disso, a declividade do pavimento não deve ultrapassar 5%.

Quando utilizados, os tubos perfurados devem ser espaçados de 3 a 8 metros (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000), sendo que nos sistemas em que se prevê infiltração da água no solo os drenos são colocados a pelo menos 10 cm da base da *reservoir course*. Caso contrário, eles são instalados no fundo da camada (UNHSC, 2014).

Segundo Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), o sistema adotado deve prever o esgotamento do volume de água em um período de 6 a 12 horas e, para Tomaz (2009), esse tempo pode ser de 24 a 72 horas. Por outro lado, Pratt (1999) reporta o uso do pavimento permeável como reservatório permanente de um sistema de aproveitamento de água de um albergue no Reino Unido, em que o pavimento armazena, além da água por ele infiltrada, a precipitação coletada a partir do telhado da edificação.

2.1.4.5 Geotêxtil e Impermeabilizante

Segundo RWMWD (2006) e FHWA (2015), nos sistemas projetados com infiltração da água no solo, a *reservoir course* deve ser alocada sobre uma manta geotêxtil. Essa manta permite a infiltração da água enquanto funciona como uma barreira para evitar que o solo do subleito se misture a camada de pedra britada.

UNHSC (2014), por outro lado, defende que o uso de mantas geotêxteis na base da *reservoir course* é prejudicial ao funcionamento do sistema, uma vez que a manta pode entupir prematuramente, dificultando a infiltração da água. Caso se opte por uma camada de separação, indica-se uma fina faixa de brita graduada. Por fim, UNHSC (2014) acrescenta que a utilização da manta geotêxtil só é indicada para proteger as laterais escavadas da *reservoir course*, de modo a evitar a erosão.

ASCE (2013) também cita que há divergências com relação ao uso da manta geotêxtil, devido a relatos do potencial entupimento da mesma. Ainda assim, indica o uso da manta em solos com baixa capacidade de suporte ou com elevado teor de finos, além das laterais da escavação como já citado.

Pavimentos permeáveis do tipo sem infiltração devem apresentar uma estrutura estanque e, por isso, é imprescindível o uso de membranas impermeáveis. Da mesma maneira que nos outros sistemas, essa membrana deve ser instalada entre a camada de reservatório e o subleito (UNHSC, 2014). A Figura 2.8 mostra a execução de um pavimento permeável sem infiltração. Pode-se observar a membrana impermeável no fundo, bem como a tubulação para drenar a água. Também se observa o preenchimento da área com a brita para a *reservoir course*.

Figura 2.8 – Execução de um pavimento permeável

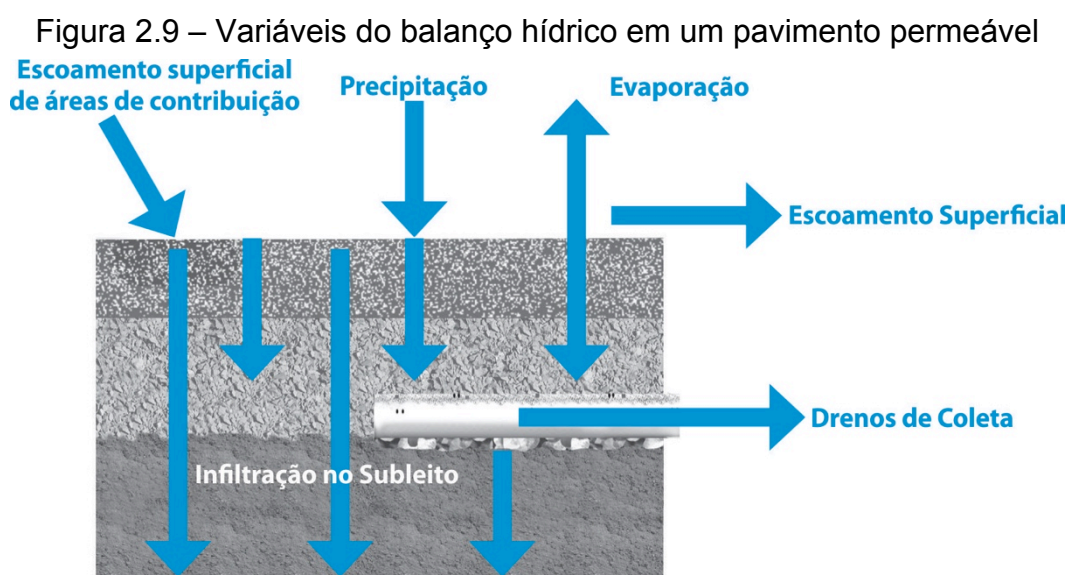


Fonte: Website nbwest.com (2013).

2.1.5 Capacidade drenante e de aproveitamento da água coletada

Usualmente, o revestimento de concreto asfáltico drenante possui permeabilidade entre 430 cm/h até mais 1.250 cm/h, de modo que sua utilização em pavimentos permeáveis reduz ou até elimina o escoamento superficial (ASCE, 2013).

A quantidade de água que infiltra pelo pavimento, e que posteriormente vai para o solo do subleito ou é drenada para fora do sistema, depende de diversos fatores. O balanço hídrico no pavimento permeável envolve o volume de precipitação, de evaporação, do escoamento superficial gerado pelo pavimento permeável, e o que provém de áreas impermeáveis e se soma ao volume de precipitação (ASCE, 2013). A Figura 2.9 ilustra as variáveis que influenciam na quantidade de água infiltrada pelo pavimento.

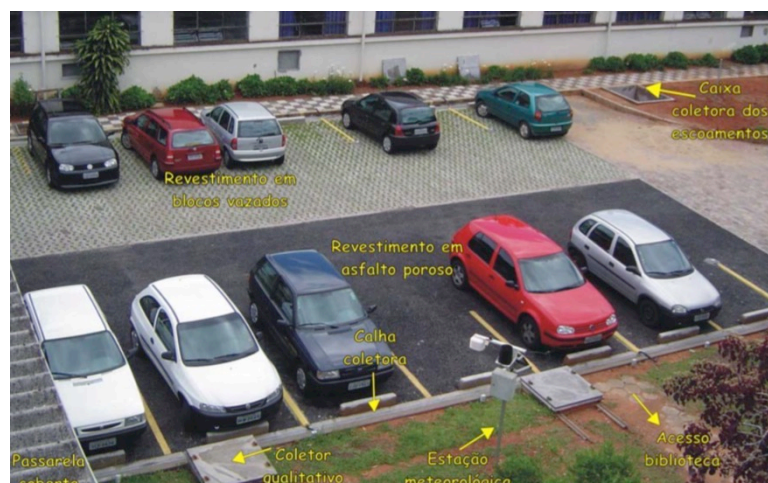


Fonte: Adaptado de ASCE (2013).

Acioli (2005) avaliou a capacidade de redução do escoamento superficial de um pavimento permeável com revestimento asfáltico em um trecho experimental instalado no estacionamento do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS), conforme mostra a Figura 2.10. Nos eventos analisados, o coeficiente de escoamento variou de zero a 13,5%, com média de 5,08%, valor bastante satisfatório considerando que o coeficiente de

escoamento superficial em áreas verdes recomendado pela literatura é de no mínimo 5% (WILKEN, 1978).

Figura 2.10 – Experimento com pavimento permeável no IPH/UFRGS



Fonte: Acioli (2005).

Brecht (2015), por sua vez, avaliou a quantidade de água disponível para aproveitamento após infiltrar em pavimentos permeáveis. Um dos sistemas de pavimento propostos, construído para volume de tráfego intermediário, era composto de revestimento de concreto asfáltico drenante e base de pré-misturado a quente, com função de *choker course*. Por último, uma camada de brita graduada simples a fim de armazenar a água. Esse sistema apresentou média de 83,74% da água precipitada disponível para aproveitamento.

O segundo sistema de pavimento foi projetado para atender a um volume de tráfego leve. Além do revestimento de concreto asfáltico drenante, ele possuía a camada de *choker course* de agregado graúdo uniforme, a *filter course* de areia grossa, e a *reservoir course*, também com granulometria uniforme. Para esse sistema, a quantidade de água disponível para aproveitamento foi de 86,39%.

2.1.6 Manutenção

Segundo FHWA (2015), pavimentos permeáveis com revestimento de concreto asfáltico drenante são utilizados com êxito nos EUA há mais de 35 anos. De modo a garantir a eficiência do pavimento a longo prazo, é indicado que a

superfície seja aspirada ou lavada com água pressurizada, a fim de remover sólidos e detritos que podem causar uma maior obstrução permanente do sistema.

As recomendações quanto à frequência da manutenção variam. A FHWA (2015), por exemplo, indica que sejam realizadas de duas a quatro vezes ao ano. CIRIA (2015) cita que, usualmente, tem-se a necessidade de uma manutenção anual, mas ressalta que a frequência deve ser ajustada conforme as circunstâncias e, portanto, é essencial que se monitore as taxas de infiltração do pavimento. Por outro lado, há relatos de inúmeros estacionamentos com pavimento permeável que duraram mais de 20 anos sem nenhuma manutenção, além da limpeza de rotina (FHWA, 2015).

Além das manutenções, o efeito da passagem de veículos em alta velocidade ajuda a manter os poros limpos devido ao bombeamento de ar nos poros. Por esse motivo, estradas com menor volume de tráfego e com baixa velocidade, bem como os acostamentos, estão mais sujeitos à colmatação do revestimento (JAMES, 2003).

Por fim, em regiões frias, sujeitas ao acúmulo de neve sobre o pavimento, é vetado o uso de areia na remoção da neve, pois ela provocará o entupimento dos poros. Sal e outros químicos também devem ser evitados de modo a proteger o solo do subleito e o lençol freático em caso de pavimentos com infiltração (RWMWD, 2006).

2.2 QUALIDADE DA ÁGUA

2.2.1 Qualidade da água de escoamento superficial em rodovias

Muitos fatores influenciam os tipos e a quantidade de poluentes encontrados no escoamento superficial de rodovias: as características da precipitação em si, como sua intensidade e duração, e o período seco que a antecede; as condições do tráfego, como a quantidade e tipos de veículos e a velocidade com que trafegam, além do número de veículos circulando durante, ou antes, de uma precipitação; a localização da rodovia, seja em área urbana, rural ou perto de indústrias; e por fim as condições e a manutenção da rodovia, como a necessidade do uso de materiais para degelo em regiões frias (JAMES, 2003; WSDOT, 2007). O Quadro 2.1 lista os poluentes tipicamente encontrados no escoamento superficial de rodovias, bem como parâmetros de qualidade da água por eles afetados.

Quadro 2.1 – Poluentes típicos no escoamento superficial de rodovias

Categoria do poluente	Parâmetro
Sólidos Suspensos	Sólidos suspensos totais Sólidos suspensos voláteis
Metais	Arsênio, Cádmio Cromo, Cobre Ferro, Chumbo Mercúrio, Níquel e Zinco
Nutrientes	Nitrogênio amoniacal Nitrato, Nitrogênio total Nitrogênio total Kjeldahl Fósforo total e Ortofosfato
Compostos Orgânicos	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos Óleo e graxa Hidrocarbonetos totais de petróleo Pesticidas e Herbicidas
Bactérias	Coliformes totais Coliformes fecais
Demanda de Oxigênio	Demanda biológica de oxigênio (5 dias) Demanda química de oxigênio
Parâmetros Convencionais	Sódio e Cloreto (quando realizado degelo) pH e Turbidez Condutividade e Dureza

Fonte: Adaptado de WSDOT (2007).

Usualmente, os estudos sobre a qualidade do escoamento superficial de rodovias abrangem apenas alguns dos parâmetros listados no Quadro 2.1, a fim de fornecer informações específicas a cada caso pesquisado.

As fontes de poluição do escoamento superficial podem ser classificadas em três categorias: deposição atmosférica, veículos (incluindo combustível e emissão de gases) e deposição direta e indireta. O Quadro 2.2 mostra uma lista com as categorias de poluentes e suas origens.

Quadro 2.2 – Fontes de poluentes em rodovias

Origem	Poluente
Deposição atmosférica	Partículas, nitrogênio, fósforo, metais, PAHs e PCBs
Veículos	Partículas, borracha, amianto, metais, sulfatos, brometo, petróleo e PAHs
Deposição direta e indireta	Partículas, nitrogênio, fósforo, metais, sódio, cloreto, sulfatos, petróleo, pesticidas e patógenos
PCBs – bifenilspoliclorados PAHs - hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	

Fonte: Adaptado de WSDOT (2007).

Poluentes com origem na deposição atmosférica, como o próprio nome diz, são aqueles carregados pelo ar e que se depositam no pavimento; sejam partículas que estão próximas ao local, pela ação da gravidade, no caso da deposição seca, ou através das chuvas que podem carregar poluentes de lugares mais distantes, caso que se denomina deposição úmida (WSDOT, 2007).

A maior parte dos poluentes associados aos veículos têm origem nos resíduos do desgaste e exaustão do motor, uso de lubrificantes, ferrugem e desgaste dos pneus e pastilhas de freio.

A terceira categoria citada por WSDOT (2007), deposição direta e indireta, inclui substâncias presentes nos materiais utilizados para manutenção da rodovia, em reparos e operações de degelo, e de seu entorno, como pesticidas e herbicidas, além de dejetos e restos de animais.

2.2.2 Qualidade da água infiltrada pelo pavimento

A poluição encontrada na superfície das rodovias e estacionamentos, em consequência de vazamentos de óleo e combustível, desgaste dos pneus, deposição de partículas da atmosfera e as demais formas de poluição citadas anteriormente são lavadas pelas chuvas e se juntam ao escoamento superficial. Os sistemas de drenagem convencionais recolhem e encaminham a água para um corpo receptor sem que ela receba nenhuma forma de tratamento, tornando-a uma

das principais fontes de poluição dos mananciais (ABUSTAN; HAMZAH; RASHID, 2012).

Os pavimentos permeáveis aparecem como uma das formas mais efetivas para reduzir a poluição do escoamento superficial. CIRIA (2015) enfatiza a importância ainda maior do pavimento permeável no tratamento da água de escoamento superficial quando em eventos de chuva frequentes, ou seja, com curto período de retorno. Nesses casos a concentração dos poluentes é bastante alta e por isso causam maior impacto no corpo receptor. Em eventos com período de retorno mais elevado a carga de poluentes fica mais diluída e assim, os riscos ambientais são menores.

Uma pesquisa realizada na Holanda por Berbee et al. (1999) comparou a qualidade da água de escoamento superficial em pavimentos impermeáveis convencionais com a escoada através da CPA. Foi observada uma redução nos teores de poluentes das amostras que passaram pelo revestimento permeável. A concentração de sólidos suspensos totais foi 91% menor, houve redução de 84% para o nitrogênio total Kjeldahl, de 88% na demanda química de oxigênio e as concentrações de cobre, chumbo e zinco apresentaram queda de até 92%.

Pagotto, Legret e le Cloirec (2000) realizaram um estudo semelhante em uma rodovia da França que teve seu revestimento convencional substituído por uma camada de 3 cm de CPA. Os resultados das análises de qualidade da água após a substituição mostraram uma redução em todos os parâmetros considerados, variando de um pequeno percentual a até mais de 90%. Destaca-se uma diminuição de 92% na concentração de hidrocarbonetos e 81% nos sólidos suspensos totais, além de 74% de redução no teor de amônio (NH_4^+) e 69% no de nitrato (NO_3^-).

Ainda não são muitos os estudos que avaliam a eficiência do pavimento permeável em sua totalidade. Nesses casos, além da redução de poluentes na água devido a sua passagem através do revestimento de concreto asfáltico drenante, pode haver uma melhora em sua qualidade ao percolar pelas camadas subjacentes que também são drenantes. Cahill, Adams e Marm (2005) reportam com base na literatura, um alto índice de remoção de sólidos suspensos totais, metais e óleos e graxas.

Roseen (2011) coletou amostras de água em um estacionamento com pavimento permeável no estado de New Hampshire, nos EUA. Ele cita um bom desempenho no tratamento de sólidos suspensos (99%), hidrocarbonetos (99%) e

metais (95%), além de uma redução parcial na quantidade de fósforo (42%). Porém, foi observada pouca ou nenhuma remoção de nitrato, sendo frisado que esse era um resultado esperado, pois a remoção de nitrato tipicamente ocorre em sistemas de filtração com presença de vegetação. Por fim, com relação ao pH, houve um aumento desse parâmetro após a passagem da água pelo pavimento, sendo o pH médio do escoamento superficial igual a 6,1 e do efluente igual a 7,1.

2.3 CONSUMO HÍDRICO

Um volume de quase 110.000 km³ de precipitação cai em terra anualmente. Cerca de 61% desse valor sofre evapotranspiração e os outros 39% (43.000 km³) são convertidos em escoamento superficial, alimentando lagos e rios, ou em água subterrânea, abastecendo aquíferos. A sociedade faz uso dessa água disponível para os mais diversos fins sendo que, mundialmente, em média 69% de toda a água captada é utilizada na agropecuária, 19% é usada pela indústria e 12% para o abastecimento humano (FAO, 2010).

No Brasil, estima-se que 74,830 milhões de m³ de água foram extraídos de mananciais no ano de 2010. Destes, cerca de 54% foram utilizados para irrigação e 6% na pecuária, deixando a atividade agropecuária com a maior demanda de recursos hídricos do país. O restante da água é destinado ao abastecimento humano, que representa 23% da demanda, e às indústrias, com 17% (ANA, 2012 apud FAO, 2010). Em Florianópolis observa-se um cenário bem diferente da média; no ano de 2006 a distribuição do consumo de água foi de 56,7% para o setor residencial, 31,9% para o público, 10,2% para o comercial e apenas 1,1% para o setor industrial (PROENÇA et al., 2011).

Um levantamento realizado no ano de 2013 pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento aponta que o Brasil possui um índice médio da população atendida com abastecimento de água de 83,0% e um consumo médio diário de 162,0 litros *per capita*. O consumo médio diário *per capita* representa o volume utilizado para atender aos consumos domésticos, comercial, público e industrial de um indivíduo em um dia. Esse consumo varia bastante entre as regiões do país, sendo o menor valor médio encontrado na região nordeste, com 118,9l/hab.dia, e a maior média pertencendo à região sudeste, com 187,9l/hab.dia. No estado de Santa Catarina o consumo médio diário *per capita* é de 153,5 litros,

estando abaixo da média nacional (SNIS, 2014). Tais diferenças se devem a grande extensão do país, que apresenta regiões com climas, culturas e níveis de desenvolvimento distintos, influenciando diretamente os hábitos da população quanto ao uso da água (HAFNER, 2007).

2.3.1 Distribuição do consumo

Em edificações comerciais e públicas não é possível definir uma distribuição padrão de consumo, como a realizada para as residências, em virtude da vasta quantidade de atividades distintas que podem ser desenvolvidas nesses locais. Os estabelecimentos comerciais incluem edifícios de escritórios, restaurantes, hotéis e lojas, e entre as construções públicas têm-se escolas, universidades, hospitais, terminais rodoviários e aeroportos, todos com necessidades de consumo muito diferentes. Dessa forma, a fim de se conhecer o consumo e distribuição de água específicos dessas edificações, é indispensável a realização de um monitoramento, seja através de sensores de fluxo instalados nos pontos de utilização ou pela aplicação de questionários e entrevistas com os frequentadores do local, por exemplo (HAFNER, 2007).

Kammers e Ghisi (2006) realizaram um estudo em dez edifícios públicos de Florianópolis para estimar os usos finais de água. O levantamento confirmou a disparidade na distribuição do consumo entre os locais avaliados, ainda assim, é possível notar que os vasos sanitários e mictórios representam a maior demanda. O consumo dos dois dispositivos somados equivale entre 36,5 e 84,3% de toda água utilizada nas edificações. Deve-se ressaltar que dois dos edifícios pesquisados possuíam torre de resfriamento, a qual utiliza grande quantidade de água, portanto nesses lugares foi realizado um levantamento no verão e outro no inverno, a fim de considerar o impacto do funcionamento da torre na distribuição do consumo. A Tabela 2.3 apresenta o resultado obtido.

Tabela 2.3 – Usos finais em dez edifícios públicos de Florianópolis.

Edifício	Usos finais (%)							
	Vaso sanitário	Mictório	Torneira	Restaurante	Lavação de carros	Torre de resfriamento	Outros	Total
BADESC	55,8	14,3	18,3	-	-	-	11,6	100
CELESC (verão)	28,1	29	8,9	7,8	2,2	18,7	5,3	100
CELESC (inverno)	34,6	35,6	11	9,5	2,7	-	6,6	100
CREA	23	47	24,5	-	-	-	5,5	100
DETER	66,6	-	31,2	-	-	-	2,2	100
EPAGRI	33,1	43,9	12,5	-	-	-	10,5	100
Secretaria da Agricultura (verão)	23	13,5	5,5	23	1,8	26,6	6,6	100
Secretaria da Agricultura (inverno)	31,4	18,4	7,4	31,4	2,4	-	9	100
Secretaria da Educação	70	14,3	9,4	-	-	-	6,3	100
Secretaria de Segurança Pública	78,8	-	18,4	-	-	-	2,8	100
Tribunal de Contas	36,4	45,9	14	-	0,7	-	3	100
Tribunal de Justiça	53,2	29,9	8,7	-	-	-	8,2	100

Fonte: Adaptado de Kammers e Ghisi (2006).

Botelho (2008) realizou um estudo no ano de 2006 a fim de estimar os usos finais de água no Centro Tecnológico (CTC) e no Centro Socioeconômico (CSE) da UFSC. Para tanto, foi necessário conhecer os dispositivos que consomem água, com suas respectivas vazões e frequência de uso. Em geral, as vazões foram determinadas através de medições nos próprios dispositivos, utilizando-se um recipiente com volume conhecido e medindo o tempo necessário para enchê-lo. Para os mictórios com válvula de descarga eletrônica, que são acionadas com o afastamento do usuário, e as torneiras hidromecânicas, aquelas acionadas por pressão e com fechamento automático, as vazões foram adotadas conforme especificações dos fabricantes. Por fim, nos vasos sanitários com válvula de descarga a vazão foi determinada de acordo com valores recomendados por Norma.

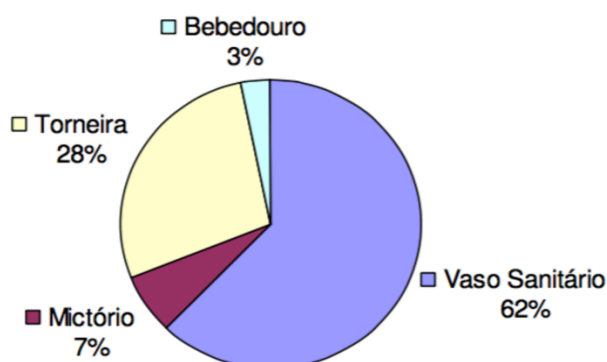
A frequência de uso de água em cada edificação foi determinada por meio de entrevistas com uma amostra dos alunos de cada centro. Foram feitas perguntas com o intuito de levantar a quantidade de vezes e o tempo em que cada dispositivo era acionado. Com essas informações foram calculados os consumos de cada dispositivo e a partir deles, o consumo total de água no centro e o consumo per capita para homens e mulheres, como exposto na Tabela 2.4. A Figura 2.11 mostra a distribuição média do uso final da água para o bloco central do CTC.

Tabela 2.4 – Média do consumo diário dos aparelhos sanitários, alunos e CTC, com base nas respostas dos entrevistados

Item	Consumo per capita somente no CTC para homens (l/dia)	Consumo per capita somente no CTC para mulheres (l/dia)
Vaso sanitário	3,74	9,55
Mictório	1,47	-
Torneira	1,79	4,19
Bebedouro	0,32	0,33
Por aluno	7,32	14,07
CTC	30567	18988

Fonte: Adaptado de Botelho (2008).

Figura 2.11 – Estimativa dos usos finais de água para o bloco central do CTC



Fonte: Botelho (2008).

2.3.2 Aproveitamento de água não potável

A Portaria do Ministério da Saúde nº 2.914, de 12 dezembro de 2011, dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. O artigo quinto da Portaria define água para consumo humano como sendo a água potável, destinada à ingestão, preparação e produção de alimentos e à higiene pessoal. Essa água deve atender ao padrão de potabilidade, cujos parâmetros de qualidade são estabelecidos na Portaria, e não pode oferecer riscos à saúde.

Uma grande parcela da água potável utilizada nas edificações se destina a atividades que não exigem o uso de água com essa qualidade, como é o caso da lavagem de pisos e calçadas, descargas de vasos sanitários, sistema de resfriamento de ar condicionado, rega de jardins e lavagem de veículos (HAFNER, 2007). Segundo diretriz adotada pelo Conselho Econômico e Social da Organização das Nações Unidas (ONU), “a não ser que haja grande disponibilidade, nenhuma água de boa qualidade deve ser utilizada em atividades que toleram águas de qualidade inferior”.

Atualmente, a escassez de água não é mais uma preocupação exclusiva de regiões áridas e semi-áridas. Frente a demandas cada vez maiores, mesmo locais com recursos hídricos em abundância sofrem com restrições de consumo que afetam o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida (ANA; FIESP; SINDUSCON-SP, 2005). Diante desse cenário, o uso de fontes alternativas de água surge como uma opção conveniente, como o reúso de efluentes do tratamento de esgoto, de água da chuva coletada de coberturas e de água cinza. A reutilização da água traz benefícios ambientais e econômicos; reduz a quantidade de água retirada dos mananciais, o consumo de energia e gastos associados à sua captação, tratamento e distribuição.

A normalização brasileira ainda não abrange todos os requisitos e critérios para o uso de água de fontes alternativas (ALMEIDA, 2011), como é o caso da água captada após infiltrar em um pavimento permeável. A Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005 estabelece critérios gerais para reúso de água não potável, porém não comenta nada a respeito de critérios de qualidade mínimos. Posteriormente foi criada a Norma Brasileira Regulamentadora, NBR 15527/07, que fornece os requisitos para o aproveitamento de água de chuva de coberturas em

áreas urbanas para fins não potáveis. A Norma menciona que os padrões de qualidade da água devem ser definidos pelo projetista de acordo com a utilização prevista e apresenta parâmetros de qualidade que devem ser atendidos em usos mais restritivos, não indicando, contudo, o que seriam usos restritivos. Os parâmetros da Norma estão apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Parâmetros de qualidade de água de chuva para usos restritivos não potáveis.

Parâmetro	Análise	Valor
Coliformes totais	Semestral	Ausência em 100 ml
Coliformes termotolerantes	Semestral	Ausência em 100 ml
Cloro residual livre ^a	Mensal	0,5 a 3,0 mg/L
Turbidez	Mensal	< 2,0 uT ^b , para usos menos restritivos < 5,0 uT
Cor aparente (caso não seja utilizado corante)	Mensal	< 15 uH ^c
Deve prever ajuste de pH para proteção das redes de distribuição	Mensal	pH de 6,0 a 8,0 (no caso de tubulação de aço carbono ou galvanizado)

^a No caso de serem utilizados compostos de cloro para desinfecção.

^b uT é a unidade de turbidez.

^c uH é a unidade Hazen.

Fonte: NBR 15527/07.

2.3.3 Aproveitamento de água para descarga de vasos sanitários

Como exigências mínimas para o uso na descarga de vasos sanitários, a água não deve apresentar mau cheiro, não deve ser abrasiva, não deve manchar superfícies, não deve deteriorar os metais sanitários e não deve propiciar infecções ou a contaminação por vírus ou bactérias prejudiciais à saúde humana (ANA; FIESP; SINDUSCON-SP, 2005).

A Agência Nacional de Águas, em conjunto com a Federação das Indústrias e o Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo (2005), definiu quatro classes de água para aproveitamento com base nos critérios de qualidade estipulados para cada atividade. A descarga de vasos sanitários é uma aplicação da água de Classe 1, juntamente com as atividades de lavagem de pisos, roupas e veículos, e fins ornamentais (chafarizes, espelhos de água etc.). A principal condição comum a essas atividades é a exposição da água ao contato humano. A Tabela 2.6

apresenta os parâmetros característicos para água Classe 1. Quanto às demais categorias, o uso preponderante da água Classe 2 é na construção (como na preparação de concreto), a Classe 3 destina-se a irrigação e a Classe 4 para torres de resfriamento de sistemas de ar-condicionado.

Tabela 2.6 – Parâmetros característicos para água Classe 1.

Parâmetro	Concentração
Coliformes fecais ¹	Não detectáveis
pH	Entre 6,0 e 9,0
Cor (uH)	≤ 10 uH
Turbidez (uT)	≤ 2 uT
Odor e aparência	Não desagradáveis
Óleos e graxas (mg/L)	≤ 1 mg/L
DBO ² (mg/L)	≤ 10 mg/L
Compostos orgânicos voláteis ³	Ausentes
Nitrato (mg/L)	< 10 mg/L
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	≤ 20 mg/L
Nitrito (mg/L)	≤ 1 mg/L
Fósforo total ⁴ (mg/L)	≤ 0,1 mg/L
Sólido suspenso total (SST) (mg/L)	≤ 5 mg/L
Sólido dissolvido total ⁵ (SDT) (mg/L)	≤ 500 mg/L

1. Esse parâmetro é prioritário para os usos considerados.

2. O controle da carga orgânica biodegradável evita a proliferação de microrganismos e cheiro desagradável, em função do processo de decomposição, que podem ocorrer em linhas e reservatórios de decomposição.

3. O controle deste composto visa evitar odores desagradáveis, principalmente em aplicações externas em dias quentes.

4. O controle de formas de nitrogênio e fósforo visa evitar a proliferação de algas e filmes biológicos, que podem formar depósitos em tubulações, peças sanitárias, reservatórios, tanques etc.

5. Valor recomendado para lavagem de roupas e veículos.

Fonte: ANA, FIESP e SINDUSCON-SP (2005).

A NBR 13969/97 trata de tanques sépticos utilizados em sistemas locais de tratamento e traz alternativas técnicas quanto ao tratamento complementar e disposição final do efluente. A Norma cita o reúso da água e também define classes de qualidade conforme a utilização. A classe 3 consiste no reúso em descargas de vasos sanitários. As exigências para este fim são: turbidez inferior a 10 e coliformes fecais inferiores a 500 NMP/100ml.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados alguns tipos de sistemas de pavimentos permeáveis encontrados na literatura, bem como suas camadas e materiais constituintes. Além dos benefícios quanto à redução das vazões geradas durante chuvas intensas e à melhoria na qualidade da água, deve-se atentar à possibilidade de seu aproveitamento.

É notório que a utilização de pavimentos permeáveis e, principalmente, o aproveitamento da água por eles infiltrada, ainda é pouco comum. Os próximos capítulos apresentam um estudo realizado com o intuito de analisar a quantidade e a qualidade da água infiltrada por um pavimento permeável, além de mostrar um exemplo de utilização dessa água, depois de captada.

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O estudo para o desenvolvimento de um sistema de aproveitamento de água para fins não potáveis em um prédio da UFSC se deu através de uma metodologia que consiste nas seguintes etapas: construção de modelos de pavimentos permeáveis, medições da quantidade e ensaios da qualidade da água por eles infiltrada, definição da área de coleta da água pluvial, levantamento do consumo hídrico no prédio em questão e dos dados pluviométricos da região. Por fim, foi calculada a altura da camada de armazenamento temporário de água do pavimento permeável para uma chuva de projeto, e indicado um volume para o reservatório permanente do sistema de aproveitamento, com seu respectivo potencial de economia de água potável.

3.2 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo foi o bloco central do Centro Tecnológico da UFSC, localizado no campus do bairro Trindade, em Florianópolis, Santa Catarina, e uma das áreas de estacionamento da universidade. A edificação é composta por cinco prédios de três pavimentos, sendo um central que interliga os demais e onde estão localizados os banheiros. Cada andar possui um banheiro feminino e um masculino, totalizando seis banheiros onde estão distribuídos 26 lavatórios, 28 vasos sanitários e 13 mictórios.

O estacionamento utilizado fica próximo ao edifício, sendo parte dele atualmente construído em lajota de concreto sextavada e o restante se encontra sem nenhum tipo de pavimento. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram a área de estacionamento utilizada para o estudo. Podem-se notar vários buracos e poças de água que se formam após chuvas intensas.

Figura 3.1 – Pavimento com poças de água após eventos de chuva



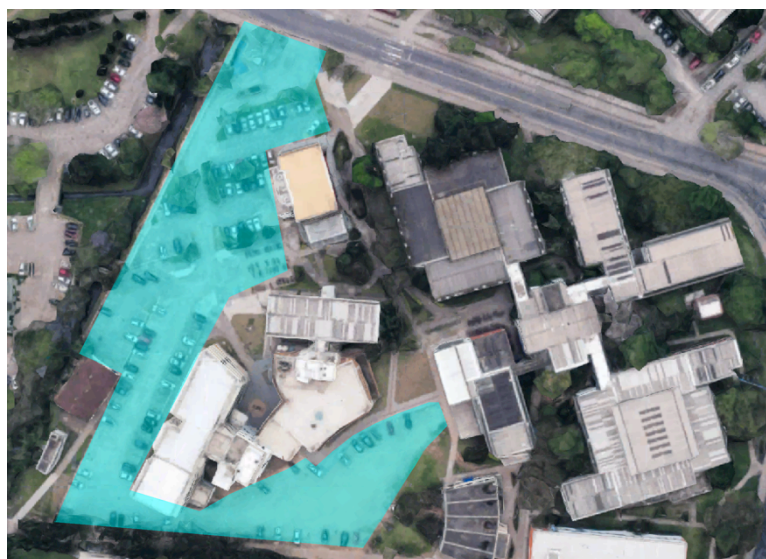
Figura 3.2 – Buracos e poças de água após chuvas intensas



A área considerada para coleta da água pluvial foi estimada a partir de imagens de satélite e de uma planta básica do campus, desenvolvida pela Comissão Permanente de Planejamento Físico (CPPF, 2003). O arquivo está em formato .pdf e não é cotado, portanto as dimensões foram medidas com o auxílio do programa AutoCAD. Também foi utilizada a ferramenta de medições existente no *Google Maps*. Foram encontradas divergências entre a localização de alguns edifícios e o tamanho do estacionamento na planta e o observado por satélite, de modo que se obteve uma área aproximada. A área total inclui as áreas de estacionamento

próximas ao edifício em estudo, bem como as calçadas entre as vagas, pois a chuva que incidir sobre elas irá escoar para o pavimento. Além disso, foram descontadas as áreas com vegetação, uma vez que nesses locais a água consegue infiltrar diretamente no solo. Na Figura 3.3 é possível ter uma noção das dimensões da área de coleta da água pluvial.

Figura 3.3 – Imagem de satélite da área de coleta da água



Fonte: Adaptado de GOOGLE MAPS (2017).

3.3 MATERIAIS UTILIZADOS

No capítulo 2 foram discutidas recomendações a respeito dos materiais e das diferentes camadas constituintes de um pavimento permeável. A seguir, são apresentados o concreto asfáltico drenante, utilizado como revestimento, e os agregados graúdo e miúdo, usados nas camadas drenantes dos modelos de pavimento propostos e detalhados, posteriormente, na seção 3.4.

3.3.1 Concreto asfáltico drenante

As placas de concreto asfáltico drenante foram produzidas por Garcia (2017). Os agregados utilizados são de origem granítica, procedentes de uma pedreira localizada em Paulo Lopes, Santa Catarina, e foram fornecidos pela empresa SETEP Construções S/A. Os agregados foram caracterizados previamente por Kolodziej (2016), a partir de ensaios normatizados pelo Departamento Nacional de

Infraestrutura de Transportes (DNIT) e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Na Tabela 3.1 são apresentados os ensaios realizados e os resultados obtidos. Todos os resultados atenderam às normas e, portanto, os agregados são adequados para a pavimentação.

Tabela 3.1 – Resultados da caracterização dos agregados

Ensaio	Unidade	Norma	Limites	Resultado
Abrasão "Los Angeles"	(%)	DNER-ME 035/98	≤ 30	21,47
Avaliação da durabilidade	(%)	DNER-ME 089/94	≤ 12	2,80
Absorção do agregado graúdo	(%)	DNER-ME 081/98	-	0,47
Partículas máximas não cúbicas	(%)	ABNT NBR 5564:2011	≤ 10	9,00

Fonte: Adaptado de Kolodziej (2016).

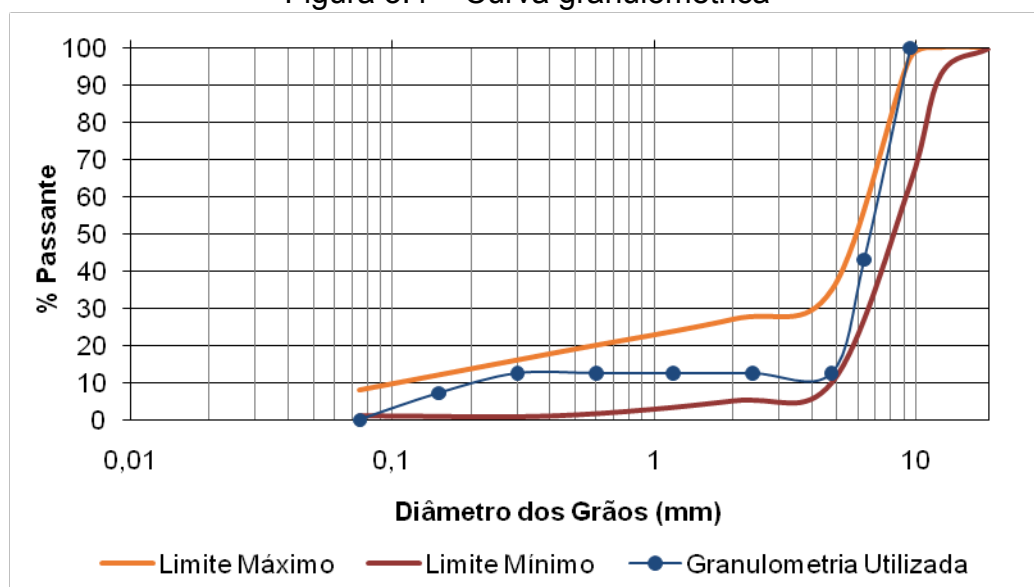
Os agregados utilizados foram a brita zero, com tamanho nominal de 4,8 a 9,5 mm, e pó de pedra, de tamanho nominal inferior a 4,8 mm. Eles foram fracionados em laboratório de modo a obter a curva granulométrica desejada, que foi desenvolvida por Guimarães (2012), pois sua mistura asfáltica também faz uso do asfalto modificado com borracha e apresenta bom desempenho quanto à deformação permanente. A granulometria utilizada é apresentada na Tabela 3.2 e se enquadra dentro do intervalo da faixa IV recomendada pela Norma DNER-ES 386/99 para a CPA de 4 cm. A Figura 3.4 mostra os limites da faixa granulométrica IV juntamente com a curva utilizada.

Tabela 3.2 – Composição granulométrica

Abertura (mm)	% Retida	% Acumulada	% Passante
9,52	0,00	0,00	100,00
6,35	56,93	56,93	43,07
4,76	30,56	87,49	12,51
2,38	0,00	87,49	12,51
1,18	0,00	87,49	12,51
0,6	0,00	87,49	12,51
0,3	0,00	87,49	12,51
0,15	5,36	92,85	7,15
0,075	3,07	95,92	4,08
Fundo	4,08	100,00	0,00

Fonte: Adaptado de Guimarães (2012).

Figura 3.4 – Curva granulométrica



Na confecção das placas foi utilizado ligante modificado por borracha moída de pneus inservíveis tipo TYREFLEX AB8, e o teor de projeto determinado na dosagem foi de 5,0%. O asfalto foi fornecido em latas de 3,6 litros pela distribuidora CCB Asfaltos, situada em Curitiba, Paraná.

As placas de concreto asfáltico drenante foram compactadas na mesa compactadora francesa desenvolvida pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), atual *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR). A compactação foi realizada de acordo com a Norma criada pela Associação Francesa de Normalização, AFNOR NF 98-250-2 (1991). O molde utilizado tem dimensões de 50,0 x 18,0 x 5,0 cm.

As misturas asfálticas foram compactadas com pressão do pneu constante de 6 bar, até atingir a densidade aparente determinada na dosagem. A placa 1 foi moldada diretamente em contato com o pneu, simulando a utilização em campo de um rolo de pneus. Na placa 2 foi utilizada uma chapa entre o pneu e a placa, simulando a compactação em campo com rolo de chapa. O rolo de pneus tende a fechar os poros da mistura.

O volume de vazios da placa 1 é de 31,55%, e da placa 2 é de 30,64%. Esses valores foram obtidos a partir do ensaio de densidade aparente, segundo a Norma DNER-ME 117/94.

O volume de vazios comunicantes das placas foi determinado de acordo com a Norma AFNOR NF P98-254-2 (1993). A Figura 3.5 ilustra a placa 2 durante a realização do ensaio. O volume de vazios comunicantes da placa 1 é de 24,87%, e da placa 2 é de 23,23%. Ambos os resultados estão dentro do limite recomendado pela Norma DNER-ES 386/99 para misturas asfálticas drenantes, que é de 18 a 25% de volume de vazios comunicantes.

Figura 3.5 – Placa 2 durante ensaio de vazios comunicantes



A permeabilidade das placas foi medida seguindo a Norma NLT-327/00 e com o uso do permeâmetro LCS (Laboratório da Escola de Engenharia Civil de Santander). A placa 1 apresenta coeficiente de permeabilidade (K) de 342 cm/h e o coeficiente da placa 2 é de 667 cm/h. A Figura 3.6 mostra a realização do ensaio.

Figura 3.6 – Ensaio com permeâmetro LCS



3.3.2 Agregado graúdo

Os agregados, de origem granítica, foram cedidos pela empresa de Mineração Santa Bárbara, situada em Palhoça, Santa Catarina. Na composição das camadas drenantes foi usado agregado graúdo com tamanho nominal de 19,0 mm (ABNT NBR 7211-2005), denominado neste estudo como Brita $\frac{3}{4}$ " (nome comercial) e utilizado na *choker course*, agregado graúdo com tamanho nominal de 9,5 mm (ABNT NBR 7211-2005), denominado neste estudo como Brita $\frac{3}{8}$ " (nome comercial) e utilizado na *filter blanket*, e Brita nº 3 (nome comercial), com tamanho nominal de 37,5 mm (ABNT NBR 7211-2005), que foi utilizada na *reservoir course*. Os agregados são ilustrados na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Agregados graúdos utilizados



(a) Brita $\frac{3}{8}$ "

(b) Brita $\frac{3}{4}$ "

(c) Brita nº 3

3.3.3 Agregado miúdo

A areia, utilizada em um dos modelos propostos como *filter course*, foi adquirida em loja local da cidade de Florianópolis como do tipo “grossa” (nome comercial), com diâmetro máximo de 4,75 mm. Esse material foi usado com o objetivo de filtrar a água incidente no pavimento permeável. Em consequência da condição em que os modelos foram construídos, a compactação da areia foi realizada de modo a não danificar a caixa de acrílico. A Figura 3.8 mostra a areia utilizada em um dos modelos.

Figura 3.8 – Agregado miúdo utilizado



Areia do tipo “grossa”

3.3.4 Recipientes de acrílico, grelhas, suportes metálicos e geotêxtil

Os três recipientes utilizados no estudo são de acrílico cristal com 8,0 mm de espessura. Dois deles foram destinados para acomodar os modelos de pavimento permeável e o terceiro foi usado como controle, para medir a quantidade de água pluvial captada em cada evento (altura da precipitação).

Os recipientes dos modelos apresentam base interna de 50,0 x 18,0 cm, altura de 53,0 cm e dois suportes nas laterais maiores (filetes de acrílico) para a sustentação das placas de concreto asfáltico drenante. Esses filetes de acrílico garantem uma inclinação de aproximadamente 2,5% para a placa asfáltica, simulando a declividade transversal das estradas e o efeito dela sobre o escoamento superficial. O recipiente de controle possui base interna com dimensões idênticas aos demais, porém não possui os suportes laterais de acrílico e sua altura é de apenas 50,0 cm.

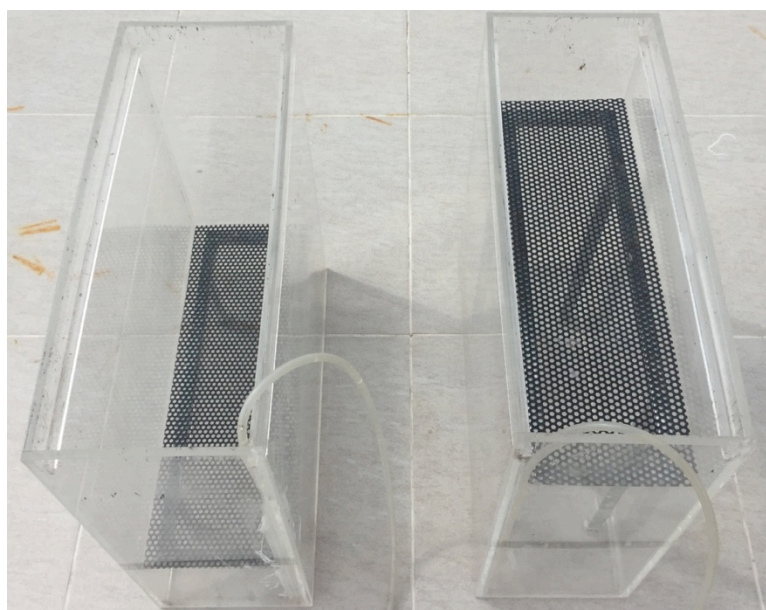
Na montagem dos modelos foram utilizados suportes metálicos com hastes de altura ajustável para atender às diferentes espessuras de pavimento. Os suportes foram envoltos em papel filme a fim de evitar o contato deles com a água, uma vez que continham pontos de corrosão que poderiam alterar as propriedades das amostras. Os suportes serviram de apoio para uma grelha metálica sobre a qual as camadas drenantes foram assentadas. Uma segunda grelha metálica foi apoiada nos filetes de acrílico de modo a sustentar a placa de concreto asfáltico, pois poderiam ocorrer deformações na placa ao se acomodar sobre as camadas drenantes.

Todas as camadas de agregado que compõem os sistemas de pavimento permeável propostos foram envoltas em manta geotêxtil. Isso foi necessário para

permitir a reutilização e, principalmente, evitar que o material das camadas se misture, uma vez que o modelo apresenta restrições quanto à compactação e ao confinamento dos materiais, diferentemente do pavimento em escala real.

A remoção da água após cada evento de chuva foi feita através de uma mangueira fixada no fundo de cada modelo. Na Figura 3.9 observa-se a estrutura que recebeu o pavimento.

Figura 3.9 – Estrutura de suporte para os modelos



3.4 MODELOS PROPOSTOS

A partir da análise das diversas abordagens propostas na literatura foram projetados dois modelos de pavimento do tipo sem infiltração a fim de avaliar a capacidade drenante e a eficiência na filtragem da água incidente sobre eles.

Pavimentos permeáveis projetados para o aproveitamento da água coletada devem possuir uma membrana impermeável logo abaixo da *reservoir course* de modo a impedir que a água passe da estrutura do pavimento para o subleito. Nos modelos propostos nenhuma membrana foi utilizada, uma vez que as camadas não foram construídas sobre o solo, mas sobre um suporte e tela metálicos, permitindo que a água fosse coletada pelo fundo dos recipientes. Por esse motivo não foram necessários drenos. Contudo, na prática, ambos os elementos são necessários na construção de um pavimento permeável do tipo sem infiltração.

Os recipientes utilizados para receber os modelos permitem a construção de camadas drenantes com espessura de 37 cm (sem o uso das hastes metálicas) ou entre 6 e 16 cm (com o uso das hastes metálicas), variando a cada 1 cm dentro desse intervalo, conforme os níveis existentes nos suportes reguláveis. Nesses valores não é considerada a espessura do revestimento asfáltico, que fica apoiado aos filetes de acrílico e também pode apresentar diferentes espessuras.

Diante dessas condições e para avaliar a eficiência da areia na filtração da água incidente no pavimento, foram propostos dois modelos de pavimento com camadas diferentes. A Figura 3.10 mostra os modelos propostos e o recipiente de controle.

Figura 3.10 – Recipiente de controle, modelo B e modelo A



3.4.1 Modelo A

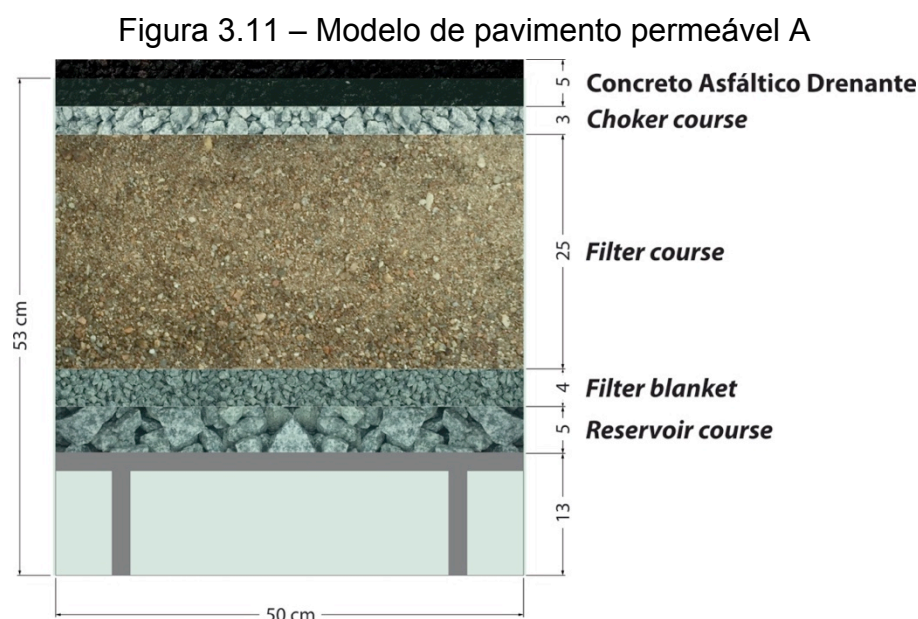
O modelo de pavimento permeável A possui espessura total de 42 cm. O revestimento é de concreto asfáltico drenante de 5 cm, sobreposto à *choker course*, que apresenta 3 cm de espessura, valor próximo ao indicado por FHWA (2015) que é de aproximadamente 1 polegada (2,54 cm). Abaixo da *choker course* está a *filter course*, camada opcional que visa uma maior filtração da água coletada, com 25 cm de espessura. Esse valor se encontra no intervalo de 20 a 30 cm que é a espessura mínima recomendada por UNHSC (2014).

Na sequência, está posicionada a *filter blanket* que possui 4 cm e está presente para separar a camada filtrante da *reservoir course*. Sua espessura é

menor que a mínima recomendada por UNHSC (2014), que é de 8 cm, devido a disponibilidade de material. Contudo, sua função de separação foi realizada por meio da manta geotêxtil, tal que a estrutura não foi comprometida.

A última camada é a *reservoir course*, que no sistema A, apresenta 5 cm, também ficando abaixo do mínimo proposto por UHNSC (2014) para pavimentos sem infiltração, que é de 20 cm. A espessura reduzida dessa camada se deve à altura limitada do recipiente e à disponibilidade de material. Além disso, devido à sua função de reservatório temporário, a espessura da camada não afeta o desempenho do modelo quanto à filtragem da água.

Por fim, a inexistência do solo do subleito sob o pavimento permite que o recipiente armazene um grande volume de chuva, independente da altura da *reservoir course*. Em um pavimento real, com a presença de um fundo impermeável e dos drenos que fazem a coleta da água, a espessura da *reservoir course* necessita ser calculada para cada caso. O modelo A é ilustrado na Figura 3.11.

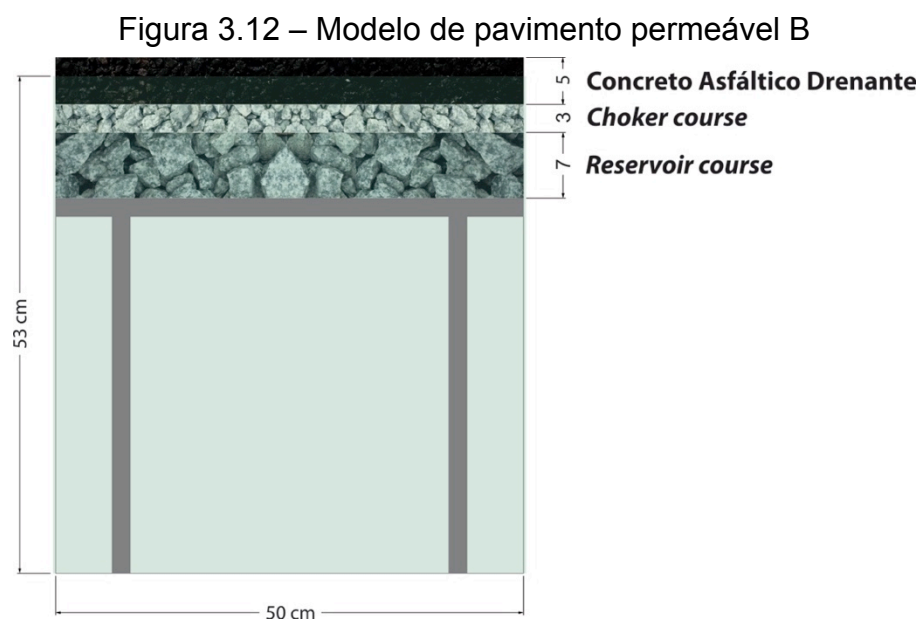


3.4.2 Modelo B

O modelo de pavimento permeável B é mais simples que o primeiro e totaliza 15 cm de espessura. O modelo B também possui revestimento de concreto asfáltico drenante de 5 cm, sobreposto à *choker course*, que apresenta 3 cm de espessura. Porém, diferentemente do modelo A, abaixo da *choker course* está a camada

reservoir course, dessa vez com 7 cm, espessura reduzida pelos mesmos motivos já citados.

Novamente, embora o modelo não apresente estes elementos, em um pavimento real o solo do subleito deve ser protegido por uma membrana impermeabilizante e drenos são instalados ao fundo da *reservoir course* para a coleta da água. O modelo B é ilustrado na Figura 3.12.



3.5 ESTUDO QUANTITATIVO DOS MODELOS PROPOSTOS

A quantidade de água que pode ser coletada e aproveitada após infiltrar nos pavimentos permeáveis propostos foi avaliada através da construção de modelos que foram expostos à chuva na cobertura do Bloco A do Departamento de Engenharia Civil da UFSC. A Figura 3.13 mostra como os modelos foram dispostos.

Figura 3.13 – Modelos durante coleta de dados quantitativos



Uma vez que a chuva se distribui igualmente pela superfície dos recipientes, a eficiência dos modelos foi determinada comparando-se a altura de água coletada em cada modelo com a altura observada no recipiente de controle, que contabiliza a quantidade de chuva total em cada evento. As medidas foram realizadas com o uso de uma régua milimetrada simples e os recipientes esvaziados após cada medição.

O percentual de infiltração dos modelos para cada evento foi calculado por meio da Equação 3.1. A média dos valores obtidos para cada modelo representa sua eficiência, o percentual de água que pode ser coletada com relação ao total precipitado.

$$I = \frac{h_1}{h_2} \times 100\% \quad (3.1)$$

Onde:

I é o percentual de infiltração do modelo analisado (%);

h_1 é a altura de água infiltrada medida no modelo em questão (mm);

h_2 é a altura de água medida no recipiente de controle (mm).

3.6 ESTUDO QUALITATIVO DOS MODELOS PROPOSTOS

No capítulo anterior foram apresentados os principais poluentes encontrados na água de escoamento superficial em rodovias e estacionamentos e abordado o uso de pavimentos permeáveis com o intuito de coletar e filtrar essa água, de modo a reduzir sua carga de poluentes. Partindo desse princípio, foi discutido o

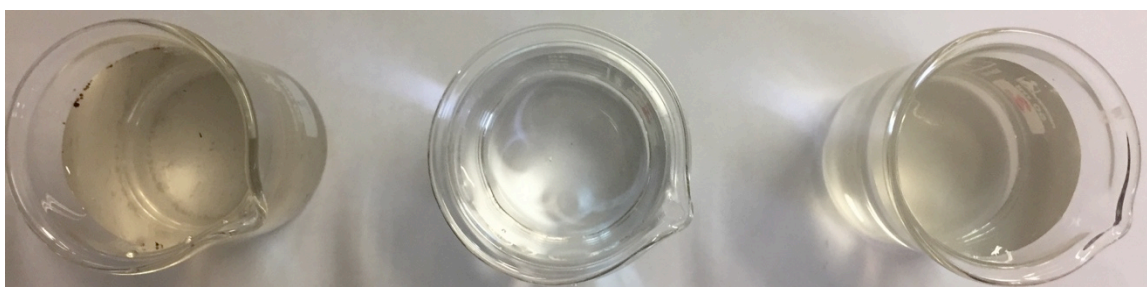
aproveitamento da água coletada para fins não potáveis, mais especificamente, em descargas de vasos sanitários e mictórios, utilização proposta neste estudo.

A eficiência no tratamento da água filtrada pelos pavimentos propostos foi avaliada a partir de simulações com os modelos construídos. Após eventos de chuva, coletou-se água do escoamento superficial do estacionamento objeto de estudo em garrafas plásticas e se submeteu essa água à filtragem através dos dois modelos (A e B). Para cada coleta, foram ensaiadas amostras da água do escoamento superficial antes e após ser filtrada por cada um dos modelos, totalizando assim três amostras por evento. O processo de filtragem é mostrado na Figura 3.14, e a Figura 3.15 apresenta um conjunto de amostras referentes à precipitação ocorrida no dia 18 de maio de 2017.

Figura 3.14 – Processo de filtragem da água



Figura 3.15 – Amostras recolhidas do escoamento superficial, do modelo A e do modelo B, de precipitação ocorrida em 18/05/17



A partir de recomendações da Agência Nacional de Águas (ANA), adotou-se uma série de parâmetros de qualidade da água, apresentados na Tabela 2.6, para sua utilização em vasos sanitários. Os ensaios foram realizados no Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA), do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC, sob a orientação de um técnico de laboratório. A análise dos parâmetros seguiu os preceitos do *Standard methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2005), publicação que aborda todos os aspectos das técnicas de análise de águas naturais, de abastecimento e águas residuais, sendo uma referência mundial. Os reagentes para os ensaios foram adquiridos em duas distribuidoras da cidade de Florianópolis e os equipamentos e a vidraria foram disponibilizados pelo LIMA.

Dentre os parâmetros listados não foi avaliada a concentração de sólidos dissolvidos totais, pois esse indicador é recomendado para lavagem de roupas e veículos, utilização distinta da proposta por este trabalho. Outro parâmetro não medido foi a presença de compostos orgânicos voláteis, devido ao ensaio não ser realizado pelo LIMA, e como já citado, o controle desse parâmetro visa evitar odores desagradáveis, principalmente em aplicações externas em dias quentes (ANA; FIESP; SINDUSCON-SP, 2005).

A análise de óleos e graxas foi efetuada uma única vez, pois o ensaio para determinar a concentração dessas substâncias envolve o uso de grande quantidade do reagente hexano, que é tóxico e inflamável, e a utilização da estufa por um longo período de tempo. Sendo assim, as limitações do LIMA quanto à disponibilidade da estufa inviabilizaram a realização desse procedimento por mais vezes. Através do ensaio com uma amostra retirada do escoamento superficial do estacionamento em estudo foi possível se ter uma noção da quantidade de óleos e graxas existente na água e compará-la ao limite estipulado. A Figura 3.16 mostra uma parte do procedimento para extração de óleos e graxas da amostra.

Figura 3.16 – Determinação de óleos e graxas



Os demais parâmetros elencados na Tabela 2.6 foram avaliados sem restrições. São eles: coliformes fecais, pH, cor, turbidez, odor e aparência, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrato, nitrogênio amoniacal, nitrito, fósforo total e sólidos suspensos totais. É importante salientar que para uma análise mais completa da água é aconselhado que todos os parâmetros sejam levados em consideração. O Quadro 3.1 apresenta o método de análise para cada parâmetro avaliado.

Quadro 3.1 – Parâmetros avaliados e métodos de análise

Parâmetros	Método de análise
Coliformes fecais	Colilert®
pH	Potenciométrico
Cor	Espectrofotométrico
Turbidez	Nefelométrico
Odor e aparência	Sensorial
Óleos e graxas	Gravimétrico
DBO	Manométrico
Nitrato	Colorimétrico da Brucina
Nitrogênio amoniacal	Colorimétrico de Nessler
Nitrito	Colorimétrico da Alfaftilamina
Fósforo total	Colorimétrico Ácido Vanadomolybdofosfórico
Sólido suspenso total	Gravimétrico

A Figura 3.17 mostra um dos ensaios realizados. Ela apresenta as cartelas utilizadas para a leitura da concentração de coliformes. A cartela da esquerda pertence à amostra retirada diretamente do escoamento superficial do estacionamento, a do meio pertence ao modelo A e a da direita, ao modelo B. A cor amarela de uma quadrícula indica a presença de coliformes totais e a leitura de coliformes fecais é realizada na luz ultravioleta.

Figura 3.17 – Cartelas para leitura dos coliformes das amostras da precipitação ocorrida em 14/05/17



Após realizadas todas as coletas e ensaios, os resultados obtidos foram confrontados com os limites estabelecidos pela ANA com o propósito de verificar se a qualidade da água filtrada pelos modelos construídos é compatível com a utilização proposta ou se há necessidade de um tratamento secundário, como o uso de filtros, desinfecção através da adição de cloro, ozônio ou uso de luz ultravioleta, por exemplo.

3.7 DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DO PAVIMENTO

Uma das funções da *reservoir course* é a de reservatório temporário da água que infiltra no pavimento permeável. Sua espessura é projetada conforme as características pluviométricas de cada local através da Equação 3.2 (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; CIRIA, 2015).

$$h = \frac{t(Ri - q)}{n} \quad (3.2)$$

Onde:

h é a espessura da *reservoir course* (mm);

i é a intensidade da chuva de projeto correspondente ao período de retorno e duração escolhidos (mm/h);

t é a duração da chuva de projeto (h);

R é a razão entre a área drenada (pavimento permeável e áreas impermeáveis que contribuem com o escoamento superficial) e a área do pavimento permeável;

q é a condutividade hidráulica do solo do subleito (mm/h);

n é o volume de vazios da *reservoir course* (%).

A razão entre a área drenada e a área do pavimento permeável (R) foi obtida a partir de áreas estimadas com a utilização de uma planta do local e de imagens de satélite, conforme explicado na seção 3.2. O volume de vazios (n) adotado para a *reservoir course* foi o percentual indicado pela literatura, de 40%.

A intensidade da chuva de projeto (i) é consequência do período de retorno e da duração da chuva (t) adotados. O período de retorno é um parâmetro muito importante para o dimensionamento de dispositivos de drenagem e obras hidráulicas. O período adotado deve levar em conta os riscos quanto à segurança da população e danos materiais decorrentes de um evento que supere o utilizado no dimensionamento de um projeto. Além disso, devem-se avaliar os custos associados ao nível de segurança desejado.

Normalmente o período de retorno para projetos de microdrenagem, caso dos pavimentos permeáveis, é de 5 a 10 anos (ABCP, 2010). Tucci, Porto e Barros (1995) também indicam o uso de período de retorno de 5 anos para obras de microdrenagem em áreas com edifícios de serviços ao público, sendo esse o valor adotado para o dimensionamento hidráulico do pavimento permeável proposto.

Após determinado o período de retorno, a intensidade da chuva e sua duração foram obtidas através da equação de chuvas intensas, também denominada de equação intensidade-duração-frequência (IDF), proposta para Florianópolis por Back (2013), a partir da série de dados pluviométricos de 1969 a

2009. Foram calculadas as intensidades correspondentes a diferentes durações de chuva, sendo escolhida aquela que resultou no maior volume de água (altura total de precipitação), conforme indicado por CIRIA (2015). A Equação 3.3 mostra a equação IDF utilizada.

$$i = \frac{1.168,46T^{0,237}}{(t + 9,12)^{0,703}} \quad (3.3)$$

Onde:

i é a intensidade da chuva (mm/h);

T é o período de retorno (anos);

t é a duração da chuva (min), sendo que para essa equação $5 \leq t \leq 120$ min.

A condutividade hidráulica do solo do subleito (q) vale zero, uma vez que o pavimento proposto é do Tipo C, sem infiltração. No entanto, deve ser considerada a vazão de esvaziamento da camada com função de reservatório temporário do pavimento, a *reservoir course*, para o reservatório propriamente dito.

Um método de dimensionamento simplificado apresentado por Baptista, Nascimento e Barraud (2011) supõe que a estrutura de drenagem apresente vazão de saída constante, que pode ser expressa sob a forma de vazão específica, conforme a Equação 3.4.

$$q_s = \frac{Q_s}{A_a} \quad (3.4)$$

Onde:

q_s é a vazão de saída específica (m/h);

Q_s é a vazão de saída constante (m³/h);

A_a é a área de drenagem efetiva (m²).

Seguindo as recomendações de Tomaz (2009) foi adotado período de esgotamento máximo do volume de água armazenado na *reservoir course* de 24 horas. A vazão de saída constante (Q_s), necessária para o cálculo da vazão de saída específica (q_s), resultou da divisão do volume de água da chuva de projeto incidente

na área drenada pelas 24 horas de descarga. A área de drenagem efetiva (A_a) corresponde à área coberta pelo pavimento permeável.

A partir das grandezas citadas até aqui se obteve a espessura mínima da *reservoir course* para atender à chuva de projeto. Deve-se ainda, levar em conta a declividade do fundo do pavimento, de modo que a água flua para os drenos e posteriormente para o reservatório permanente. Como não foi realizado nenhum tipo de projeto localizando os drenos e as inclinações necessárias, esses valores não foram calculados, ficando a decisão para o projetista.

3.8 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA DE ÁGUA POTÁVEL

O cálculo da economia de água potável em função da implantação de um sistema de aproveitamento de água pluvial em um edifício depende de muitas variáveis. A capacidade dos reservatórios superior e inferior (cisterna), extensão da área de coleta da água, pluviosidade do local e as características do consumo, são algumas delas. A avaliação do potencial de economia de água potável no bloco central do CTC foi realizada como disposto a seguir.

3.8.1 Levantamento de dados

3.8.1.1 Índices pluviométricos

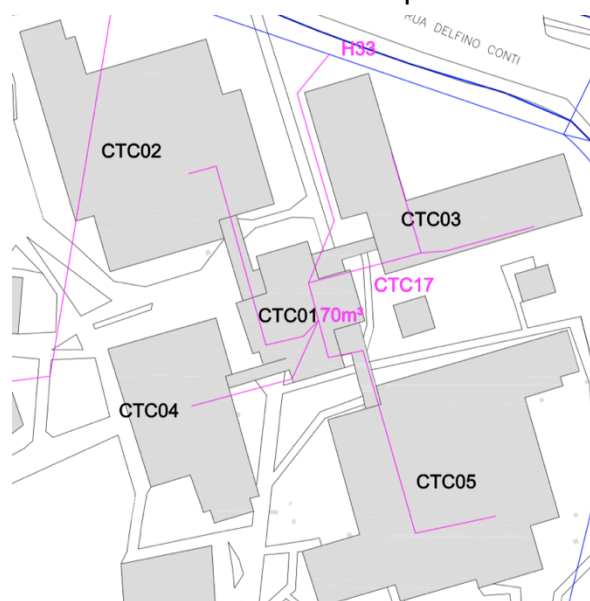
Os dados pluviométricos utilizados neste estudo foram fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI). As informações são referentes à Estação Meteorológica de Florianópolis situada no bairro Itacorubi, latitude 27°34'49" Sul, longitude 48°30'22" Oeste e a 2 metros de altitude. Essa é a estação mais próxima ao campus da UFSC onde foi realizado o estudo de caso, sendo o motivo pelo qual foi escolhida para representar o comportamento das chuvas no local. A análise abrange o histórico de precipitações diárias de um período de 17 anos, de 01/01/2000 a 31/12/2016.

Devido a um problema no sensor que faz a medição da altura das precipitações diárias na Estação Meteorológica de Florianópolis, há uma interrupção dos dados pluviométricos de setembro de 2012 a maio de 2013.

3.8.1.2 Consumo de água

As informações sobre o consumo de água no bloco central do CTC foram fornecidas pelo Departamento de Projetos de Arquitetura e Engenharia da UFSC (DPAE). Foram disponibilizadas as faturas mensais do ano de 2016 provenientes da Companhia Catarinense de Água e Saneamento (CASAN). O bloco central do CTC, que compreende as edificações CTC 01, CTC 02, CTC 03, CTC 04 e CTC 05, é abastecido pelo hidrômetro H33, segundo numeração interna da UFSC ilustrada na Figura 3.18. O consumo verificado na edificação em 2016 representa 0,6% do volume total consumido pela UFSC no período, incluindo todos os campi da universidade, bem como a demanda do Hospital Universitário que, sozinho, contribui com 36,2% do consumo (DPAE, 2017).

Figura 3.18 – Prédios abastecidos pelo hidrômetro H33



Fonte: Adaptado de DPAE (2017).

3.8.1.3 Área de coleta da água pluvial

A área de coleta para abastecer o reservatório do sistema de aproveitamento de água foi estimada conforme descrito na seção 3.2.

3.8.1.4 Percentual de água potável a ser substituído por água pluvial

Neste estudo considerou-se a utilização da água pluvial coletada para fins não potáveis na descarga de vasos sanitários e mictórios dos banheiros do bloco central do CTC. Na seção 2.3.1 foi citado o estudo realizado por Botelho (2008) em que foram estimados os usos finais de água para esse mesmo edifício. Segundo o levantamento, 62% da água consumida atende aos vasos sanitários e 7% se destina aos mictórios.

Esses números foram utilizados na realização deste estudo, visto que um novo levantamento seria muito dispendioso, além de não se observar nenhuma alteração significativa na configuração e utilização do local. Assim sendo, o percentual de água potável que pode ser substituído pela água não potável na edificação é de cerca de 69%.

3.8.1.5 Coeficiente de aproveitamento da água

O coeficiente de aproveitamento da água incidente sobre o pavimento foi estimado com base na média das medições do percentual de água infiltrada em cada um dos modelos de pavimento construídos, conforme descrito na seção 3.5.

3.8.2 Reservatório de água pluvial

Normalmente, o reservatório é o elemento que requer maior investimento na implantação de um sistema de aproveitamento de água pluvial. Existem inúmeros métodos de dimensionamento do reservatório, que conduzem a resultados bastante variados, de modo que a escolha do método mais adequado é fundamental para assegurar a viabilidade técnica e econômico-financeira do sistema (PURA-USP, 2011).

Neste estudo foi utilizado o programa computacional Netuno 4 (GHISI;

CORDOVA, 2014) que realiza simulações de sistemas de captação de água pluvial e estima a economia de água potável para várias capacidades de reservatório. As variáveis de entrada necessárias para um dimensionamento a partir do programa Netuno são:

- Dados diários de precipitação pluviométrica do local em análise (mm);
- Quantidade de descarte do escoamento inicial (mm);
- Área de captação da água pluvial (m^2);
- Demanda diária de água potável per capita (l/dia);
- População total atendida;
- Percentual da demanda total de água que pode ser substituída por água não potável (%);
- Coeficiente de aproveitamento da água;
- Volume máximo do reservatório inferior (L);
- Intervalo entre volumes do reservatório inferior (L);
- Volume do reservatório superior (L);
- Volume de água no reservatório superior abaixo do qual há recalque (%).

O programa Netuno estima o potencial de economia de água potável para diferentes volumes de reservatório conforme limites estabelecidos. O volume máximo adotado para o reservatório inferior foi de 100.000 litros e o intervalo entre volumes para o cálculo do potencial de economia foi de 5.000 litros. Sendo assim, o programa fez simulações para volumes de reservatório a cada 5.000 litros variando de zero até o máximo de 100.000 litros. Os resultados são expressos por tabelas e gráficos que também auxiliam na visualização do comportamento dos valores obtidos conforme a variação de volume.

O volume do reservatório superior foi adotado considerando a parcela da demanda diária média de água do edifício que pode ser substituída por água não potável, ou seja, a utilizada em vasos sanitários e mictórios. Desse modo, a capacidade do reservatório deve ser igual ou maior do que esse valor, sendo adotado um volume igual ao de um reservatório encontrado no mercado. O volume abaixo do qual há recalque do reservatório inferior para o superior foi adotado como 10% da capacidade do reservatório superior.

Além dos parâmetros já citados, outra grandeza necessária é a quantidade de descarte do escoamento inicial, que foi definida como zero, pois toda água coletada pelo pavimento permeável será encaminhada aos reservatórios.

Foram realizadas adaptações para adequar alguns dados obtidos neste estudo aos parâmetros de entrada exigidos pelo programa Netuno. Primeiramente, foi informada a demanda diária de água potável total para a edificação e não o consumo *per capita*, de modo que se considerou a população atendida como sendo unitária. Além disso, uma vez que as faturas do consumo de água são mensais, a demanda diária de água potável total foi obtida a partir da divisão do consumo de cada fatura igualmente pelo número de dias a ela correspondentes. Sendo assim, foi informada uma demanda diária de água variável.

Por consequência da falta de dados pluviométricos entre setembro de 2012 e maio de 2013, foram feitas duas simulações distintas para cada período resultante, sendo os valores obtidos comparados a fim de assegurar a coerência nos resultados apresentados. A inclusão de um período sem medições afetaria o dimensionamento do reservatório, uma vez que o programa atribui pluviosidade igual a zero aos dias sem informações. Também foram avaliados dois coeficientes de aproveitamento da água diferentes, obtidos a partir dos modelos de pavimento construídos (A e B).

Com os dados em mãos, e após as adaptações necessárias, foram realizadas simulações para quatro cenários distintos, sendo eles:

- A. Índices pluviométricos do período de janeiro de 2000 a agosto de 2012 e pavimento permeável com *filter course* (semelhante ao modelo A);
- B. Índices pluviométricos do período de janeiro de 2000 a agosto de 2012 e pavimento permeável sem *filter course* (semelhante ao modelo B);
- C. Índices pluviométricos do período de junho de 2013 a dezembro de 2016 e pavimento permeável com *filter course* (semelhante ao modelo A);
- D. Índices pluviométricos do período de junho de 2013 a dezembro de 2016 e pavimento permeável sem *filter course* (semelhante ao modelo B).

A escolha do volume para o reservatório inferior foi feita a partir da diferença de potenciais de economia de água potável entre cálculos subsequentes e foi realizada através da análise da curva do potencial de economia em função do volume do reservatório. A análise consiste em verificar um ponto em que, a partir do

qual, com o aumento do volume do reservatório, o potencial de economia de água potável passe a aumentar muito lentamente, formando um patamar na curva. Contudo, essa é uma escolha subjetiva, que também deve levar em conta fatores externos, como o espaço disponível para a locação do reservatório, e que, acima de tudo, deve ser confirmada com uma avaliação econômico-financeira.

Além do potencial de economia de água potável para cada volume calculado, o programa estima o percentual de atendimento da demanda de água pluvial (total, parcial ou nulo), consumo de água pluvial e seu volume extravasado. A Figura 3.19 mostra a interface do programa Netuno.

Figura 3.19 – Interface do programa Netuno

The screenshot displays the Netuno software interface with the following sections and controls:

- Menu:** Simulação, Ajuda, Citação, Validação, Sobre
- Buttons:** Carregar simulação previamente salva, Reservatório superior, Simular, Salvar simulação atual, Limpar campos, Análise Econômica
- Data Entry Section:**
 - Carregar dados de precipitação (table with columns for Número de registros, Data inicial (M/d/yyyy), and Descarte escoamento inicial (mm))
 - Área de captação (m²)
 - Demanda total de água (litros per capita/dia) with a Variável... button
 - Número de moradores with a Variável... button
 - Percentual da demanda total a ser substituída por água pluvial (dropdown menu and input field)
 - Coefficiente de escoamento superficial (dropdown menu and input field)
 - Observações (text area)
- Simulation Settings Section:**
 - Reservatório inferior:
 - Radio buttons for: Simulação para reservatório com volume conhecido (unselected) and Simulação para reservatórios com diversos volumes (selected)
 - Intervalo da simulação:
 - Volume máximo (litros)
 - Intervalo entre volumes (litros)
 - Indicar volume ideal para o reservatório inferior (checkbox, unchecked)

Por fim, conforme os resultados obtidos para o volume de reservatório inferior adotado, também foram realizadas simulações com diferentes áreas de coleta de água pluvial, menores que a utilizada inicialmente, a fim de verificar a influência deste parâmetro no potencial de economia de água potável. As simulações foram realizadas apenas para o cenário que apresentou menor potencial de economia de água potável entre os quatro avaliados.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados das análises quantitativas e qualitativas realizadas nos modelos de pavimento permeável e um dimensionamento simplificado para a camada *reservoir course*, em caso de implantação do pavimento no estacionamento em estudo. Por fim, são apresentados os resultados obtidos com as simulações realizadas no Netuno para os cenários levantados, e é indicado um volume de reservatório, conforme avaliação do percentual de economia de água potável para o prédio em estudo.

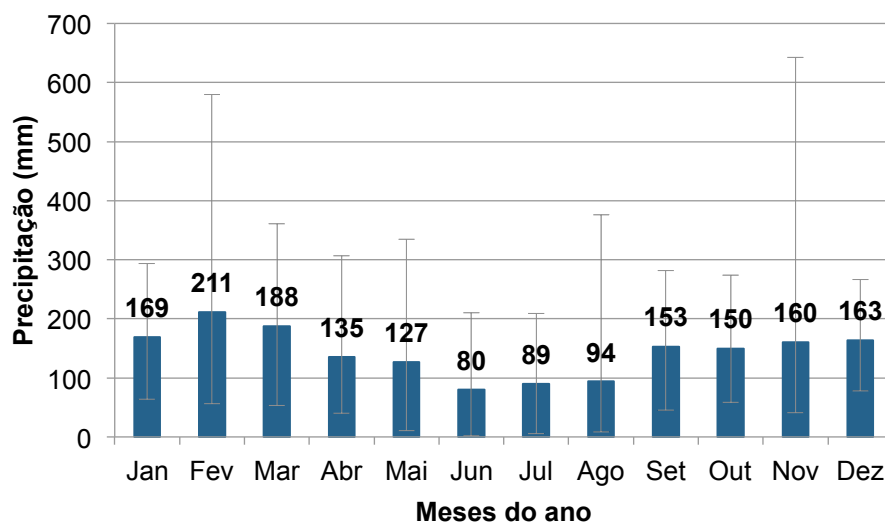
Também são feitas considerações a respeito da pluviosidade registrada na Estação Meteorológica de Florianópolis para o período de 2000 a 2016, sobre o consumo de água potável do bloco central do CTC em 2016 e sobre a área do estacionamento utilizado para coleta de água pluvial. Esses parâmetros influenciam diretamente os valores obtidos no programa Netuno.

4.1 ANÁLISE DE DADOS

4.1.1 Índices pluviométricos

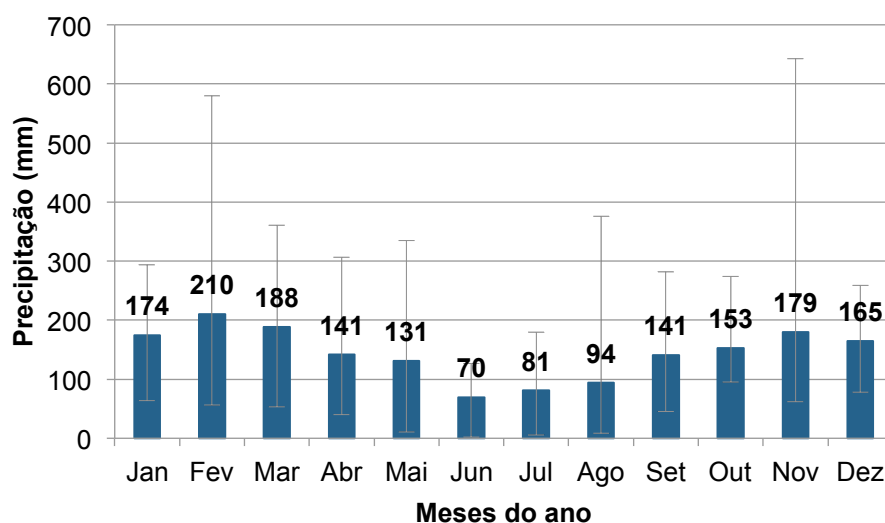
A partir da análise dos dados da Estação Meteorológica de Florianópolis para os anos de 2000 a 2016 é possível observar que a região apresenta elevados índices pluviométricos ao longo de todo o ano, possuindo pluviosidade média anual de 1.720 mm. Contudo, nota-se que os meses de junho, julho e agosto são os mais secos e entre janeiro e março encontram-se os maiores volumes de chuva. A Figura 4.1 mostra as médias mensais de precipitação registradas para o período de 2000 a 2016, bem como indica o acumulado máximo e mínimo para cada mês.

Figura 4.1 – Médias mensais de precipitação de janeiro de 2000 a dezembro de 2016



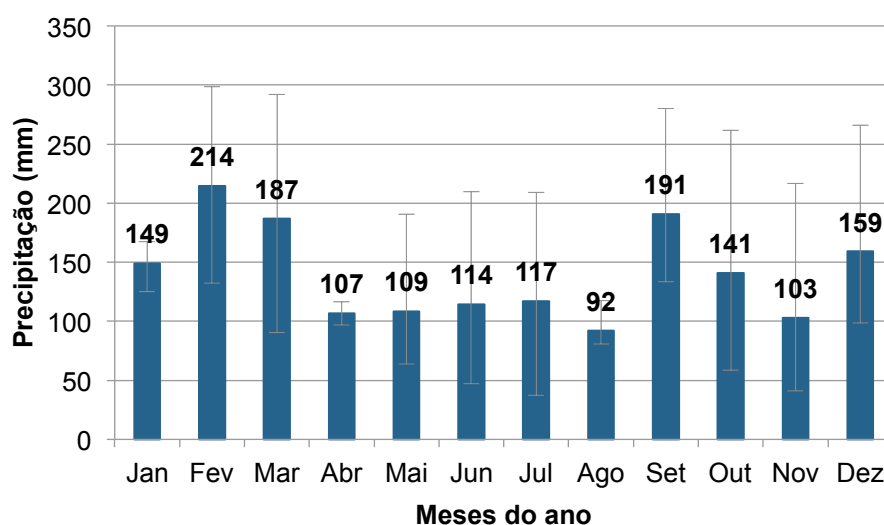
Devido aos problemas na coleta de dados, também foram analisados, separadamente, o período anterior e posterior à interrupção. O período de janeiro de 2000 a agosto de 2012 teve pluviosidade média anual de 1.728 mm e apresentou uma diferença ainda mais notável entre o volume de chuva dos meses mais secos, junho e julho, em relação ao restante do ano. Esse comportamento pode ser observado na Figura 4.2, que mostra as médias mensais de precipitação desse período e indica o acumulado máximo e mínimo para cada mês.

Figura 4.2 – Médias mensais de precipitação de janeiro de 2000 a agosto de 2012



O período de junho de 2013 a dezembro de 2016 apresentou pluviosidade média anual de 1.683 mm. Os volumes de precipitação média e o acumulado máximo e mínimo para cada mês são mostrados na Figura 4.3, em que se nota uma distribuição do volume de chuva bem diferente da observada nos anos anteriores. Nesse período o mês mais seco foi agosto, seguido de novembro.

Figura 4.3 – Médias mensais de precipitação de junho de 2013 a dezembro de 2016

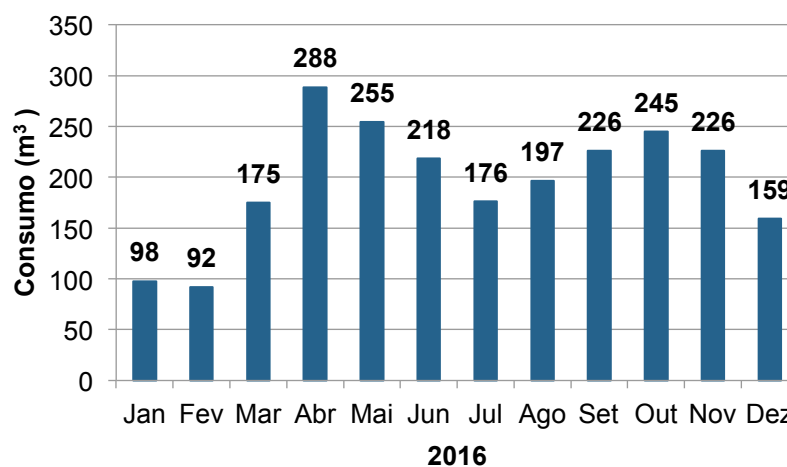


4.1.2 Consumo de água

O consumo médio de água potável registrado no hidrômetro do bloco central do CTC no ano de 2016 foi de 196 m³ por mês. Houve uma variação de mais de três vezes entre o mês de abril, que foi o de maior demanda, com 288 m³, e fevereiro, que apresentou o menor consumo, com 92 m³.

A Figura 4.4 mostra a distribuição do consumo de água potável ao longo do ano de 2016. Pode-se observar uma queda significativa no consumo dos meses de janeiro e fevereiro, que correspondem ao período de recesso na universidade. Na sequência dos meses de menor consumo estão dezembro, março, julho e agosto, em ordem crescente. Esses meses marcam o início ou fim de um semestre da graduação, que representa a maior demanda de água no edifício. Portanto, essa redução no consumo pode ser decorrente do menor número de dias letivos da graduação nesses meses.

Figura 4.4 – Consumo de água potável no bloco central do CTC em 2016



4.1.3 Área de coleta da água pluvial

A área aproximada estimada para a coleta da água pluvial é de 5.500 m². A área de calçadas no estacionamento compreende cerca de 300 m²; elas contribuem no escoamento superficial gerado, contudo, não são permeáveis. Portanto, a área coberta pelo pavimento permeável é de aproximadamente 5.200 m².

4.2 ESTUDO QUANTITATIVO

Os recipientes contendo os modelos de pavimento permeável (A e B) e o recipiente de controle ficaram expostos ao ar livre de 24 de fevereiro a 26 de abril de 2017. Nesse intervalo foram coletadas informações de 18 períodos de chuva para a avaliação da quantidade de água infiltrada pelos modelos propostos.

Durante o período de estudo, ocorreram eventos de chuva que foram desconsiderados devido ao pequeno volume precipitado, o que inviabiliza as medições, ou pela indisponibilidade de realizar a medição em tempo hábil. Vale ressaltar que nesses casos, os recipientes também eram esvaziados de modo a não causar alterações na medição subsequente. Além disso, chuvas intermitentes, aquelas com ocorrências espaçadas em algumas horas ou minutos, foram consideradas como um único evento.

Observou-se que em precipitações menores ou iguais a 5 mm não foi possível coletar água dos modelos. Considerou-se, portanto, que não houve infiltração nesses casos.

A Tabela 4.1 apresenta os dados obtidos. Para cada uma das 18 ocorrências de chuva medidas são listados o volume total precipitado, medido no recipiente de controle, e os volumes observados nos modelos de pavimento A e B. O percentual de infiltração para cada modelo foi calculado conforme explicado na seção 3.5. O modelo A apresentou infiltração média de 70,1% e desvio padrão de 13,0% e para o modelo B, a média foi de 80,0% e o desvio padrão de 7,4%.

Tabela 4.1 – Dados quantitativos do modelo A

Nº da amostra	Data da coleta	Precipitação (mm)	Modelo A		Modelo B	
			Altura de água (mm)	Infiltração (%)	Altura de água (mm)	Infiltração (%)
1	28/02	13,5	5,5	40,7	11,0	81,5
2	05/03	32,5	15,0	46,2	26,0	80,0
3	06/03	28,0	25,5	91,1	26,0	92,9
4	08/03	14,5	8,0	55,2	9,0	62,1
5	09/03	9,0	7,5	83,3	8,5	94,4
6	13/03	15,0	11,5	76,7	12,0	80,0
7	16/03	6,0	3,5	58,3	4,5	75,0
8	20/03	17,5	12,5	71,4	13,5	77,1
9	22/03	18,5	12,5	67,6	13,5	73,0
10	29/03	15,0	9,5	63,3	10,5	70,0
11	01/04	20,0	15,5	77,5	16,5	82,5
12	02/04	23,0	18,5	80,4	19,0	82,6
13	03/04	18,0	14,0	77,8	15,0	83,3
14	10/04	20,5	16,0	78,0	17,5	85,4
15	17/04	14,5	10,5	72,4	11,5	79,3
16	18/04	8,5	6,5	76,5	7,0	82,4
17	19/04	10,5	7,5	71,4	8,5	81,0
18	26/04	11,5	8,5	73,9	9,0	78,3
Média			-	70,1	-	80,0
Desvio padrão			-	13,0	-	7,4

Alguns fatores que podem ter causado as variações no percentual de infiltração de um evento para outro são as condições climáticas após a precipitação, sua intensidade e o período decorrido entre a precipitação e a medição da água nos recipientes.

A variação no tempo decorrido entre o fim da precipitação e a medição pode interferir na quantidade de água coletada, pois se a medida é feita logo após a precipitação ainda pode haver água que não atravessou todo o pavimento. Por outro lado, se o tempo entre o fim da precipitação e a medição for muito grande, a água pode evaporar, principalmente quando as precipitações ocorrem em dias quentes e ensolarados. Não foi possível realizar as medições sempre após o mesmo intervalo de tempo devido à localização dos modelos e disponibilidade de horários.

Outro fator que pode ter resultado na variação observada está relacionado às pequenas dimensões do modelo. Conforme a intensidade da precipitação, as gotas de chuva podem respingar para fora do pavimento ao tocar sua superfície, reduzindo a quantidade de água coletada.

Os valores de infiltração referentes aos primeiros eventos no modelo A podem ser explicados pelo fato de a areia que compõe a *filter course* estar seca e por isso absorveu muita água, resultando em uma pequena quantidade de água disponível para coleta no recipiente.

Por fim, considerando que no modelo A tenha precipitado a mesma quantidade de chuva que no modelo B, a diferença entre as médias de percentuais de infiltração obtidos se deve a absorção de água pela camada de areia. Além disso, a baixa permeabilidade desta camada com relação às demais retarda o fluxo de água através do pavimento. A Tabela 4.2 indica o percentual de água retido na *filter course* do modelo A em relação à quantidade infiltrada pelo modelo B.

Tabela 4.2 – Percentual de água retido na *filter course*

Nº da amostra	Data da coleta	Infiltração no modelo A (%)	Infiltração no modelo B (%)	Percentual retido na <i>filter course</i> (%)
1	28/02	40,7	81,5	50,0
2	05/03	46,2	80,0	42,3
3	06/03	91,1	92,9	1,9
4	08/03	55,2	62,1	11,1
5	09/03	83,3	94,4	11,8
6	13/03	76,7	80,0	4,2
7	16/03	58,3	75,0	22,2
8	20/03	71,4	77,1	7,4
9	22/03	67,6	73,0	7,4
10	29/03	63,3	70,0	9,5
11	01/04	77,5	82,5	6,1
12	02/04	80,4	82,6	2,6
13	03/04	77,8	83,3	6,7
14	10/04	78,0	85,4	8,6
15	17/04	72,4	79,3	8,7
16	18/04	76,5	82,4	7,1
17	19/04	71,4	81,0	11,8
18	26/04	73,9	78,3	5,6
Média				12,5
Desvio padrão				13,1

4.3 ESTUDO QUALITATIVO

Conforme detalhado na seção 3.6, e a partir de parâmetros recomendados na Tabela 2.6, foram analisados cinco eventos de chuva. Os resultados das análises realizadas mostraram uma variação bastante grande nas características da água e na eficiência da filtragem realizada pelos modelos de pavimento propostos (A e B). Os modelos se mostram eficientes na redução de alguns parâmetros, contudo, também causaram um aumento na concentração de outros. Considerando todos os parâmetros analisados, a água proveniente de ambos os pavimentos precisaria passar por um tratamento adicional a fim de se adequar aos limites recomendados pela Agência Nacional de Águas para a utilização em vasos sanitários e mictórios.

É importante ressaltar que, independentemente do tratamento adicional adotado, deve-se realizar a desinfecção da água antes de sua utilização, com a

adição de cloro, por exemplo. O cloro destrói ou anula a atividade de micro-organismos patogênicos, algas e bactérias.

A Tabela 4.3 apresenta, de maneira resumida, os parâmetros analisados em cada amostra e a condição de cada um deles com relação aos valores recomendados. Os blocos em verde indicam que o parâmetro avaliado está de acordo com as recomendações. Os blocos vermelhos representam os parâmetros que não respeitaram o limite adotado. O asterisco indica que o ensaio não foi realizado para o parâmetro e tipo da amostra em questão. O Apêndice A mostra gráficos com os resultados das amostras analisadas, a fim de facilitar a interpretação e comparação visual dos valores obtidos para cada parâmetro.

Tabela 4.3 – Comparação entre a média dos valores obtidos e os limites adotados

Parâmetro	Limite	Escoamento superficial	Modelo A	Modelo B
Coliformes fecais	Não detectáveis	1.020,3	6,5	352,0
pH	Entre 6,0 e 9,0	7,62	5,28	7,45
Cor	≤ 10 uH	144	5	146
Turbidez	≤ 2 uT	51,7	1,7	23,2
Odor e aparência	Não desagradáveis	não	sim	não
Óleos e graxas	≤ 1 mg/L	1,0	*	*
DBO	≤ 10 mg/L	8,2	5,0	8,0
Nitrato	< 10 mg/L	0,28	0,52	0,30
Nitrogênio amoniacal	≤ 20 mg/L	0,67	0,80	0,95
Nitrito	≤ 1 mg/L	0,04	0,01	0,06
Fósforo total	≤ 0,1 mg/L	0,40	0,31	0,17
Sólido suspenso total	≤ 5 mg/L	98	8	17

*Parâmetro não analisado

■ Média dentro do limite recomendado.

■ Média fora do limite recomendado.

A Tabela 4.4 mostra os dias de coleta e a altura de cada precipitação. Em geral não foi observada relação entre as concentrações dos poluentes e o volume precipitado.

Tabela 4.4 – Dados das coletas

Evento	Data da coleta	Precipitação (mm)
1	14/05	3
2	18/05	11
3	21/05	31
4	24/05	16
5	28/05	80

Os ensaios não foram realizados imediatamente após a coleta das amostras; o intervalo de tempo entre a ocorrência da precipitação e a realização dos ensaios variou de algumas horas a seis dias. Desse modo, simulou-se um cenário em que a água coletada do pavimento permanecesse no reservatório permanente por prolongado período de tempo. O evento número 4 foi o que levou mais tempo para ser ensaiado, e de modo geral seus resultados foram semelhantes aos das amostras ensaiadas em menos tempo. Isso indica que não haveria grandes alterações nas características da água, caso fosse armazenada por mais dias. As datas referentes à realização dos ensaios são expostas nas tabelas, juntamente com os resultados de cada parâmetro.

O parâmetro prioritário para o uso da água em descargas de vasos sanitários é a presença de coliformes fecais (ANA; FIESP; SINDUSCON-SP, 2005). A recomendação é de que não sejam detectados coliformes fecais em uma amostra de 100 ml, no entanto, essas bactérias estavam presentes em todas as amostras analisadas.

As amostras do escoamento superficial continham em média 1.020,3 NMP/100ml, número mais provável por 100 ml. Contudo, observou-se uma redução significativa em sua concentração nas amostras submetidas à filtração pelo modelo A, que teve média de 6,5 NMP/100ml. Com relação às amostras filtradas pelo modelo B, a média foi de 352,0 NMP/100ml, porém, não foi observado um comportamento padrão. Em dois casos houve uma pequena redução, em outros dois houve uma redução considerável e em um deles a concentração chegou a ser

maior do que a encontrada na amostra de água antes da filtragem. A Tabela 4.5 mostra os resultados da análise de coliformes fecais.

Tabela 4.5 – Resultados da análise de coliformes fecais

Evento	Data do ensaio	Coliformes fecais (NMP/100ml)		
		Escoamento superficial	Modelo A	Modelo B
1	15/05	461,1	1,0	365,4
2	18/05	2419,2	1,0	9,8
3	22/05	1413,6	21,6	435,2
4	29/05	37,7	4,1	28,7
5	29/05	770,1	5,0	920,8
Média		1020,3	6,5	352,0
Desvio padrão		929,0	8,6	371,6

O pH da água, segundo limite adotado, deve ficar entre 6,0 e 9,0. A amostra do escoamento superficial do estacionamento e a filtrada pelo modelo B atenderam esse requisito, pois apresentaram pH médio de 7,62 e 7,45, respectivamente. Contudo, com a passagem da água pelo modelo A houve uma redução do pH da água para, em média, 5,28, não se enquadrando no intervalo recomendado. A Tabela 4.6 mostra os resultados da análise de pH.

Tabela 4.6 – Resultados da análise de pH

Evento	Data do ensaio	pH		
		Escoamento superficial	Modelo A	Modelo B
1	15/05	8,44	6,53	8,46
2	18/05	7,50	4,60	7,31
3	22/05	7,36	5,25	7,15
4	29/05	7,45	4,88	6,99
5	29/05	7,34	5,15	7,32
Média		7,62	5,28	7,45
Desvio padrão		0,46	0,74	0,58

O limite máximo recomendado para a cor é de 10 uH (unidade Hazen). As amostras do escoamento superficial e do modelo B apresentaram cor média bem acima desse valor, 144 uH e 146 uH, respectivamente. Observa-se, pela média, que em alguns casos a cor das amostras filtradas pelo modelo B foi até maior do que a

cor das amostras não filtradas. Isso indica que alguma substância que contribui para o aumento da cor é liberada por algum material do pavimento. Com relação ao modelo A, foi expressiva a redução da cor, possivelmente em função da camada de areia. A cor média foi de 5 uH e apenas uma amostra apresentou valor acima do limite recomendado. A Tabela 4.7 mostra os resultados da análise de cor.

Tabela 4.7 – Resultados da análise de cor

Evento	Data do ensaio	Cor (uH)		
		Escoamento superficial	Modelo A	Modelo B
1	15/05	154	11	164
2	18/05	208	4	209
3	22/05	209	7	182
4	29/05	55	2	64
5	29/05	95	0	109
Média		144	5	146
Desvio padrão		68	4	58

A turbidez máxima recomendada é de 2 uT (unidade de Turbidez). Os valores observados nas amostras do escoamento superficial foram bem maiores, apresentando uma média de 51,7 uT. Os dois modelos causaram a redução da turbidez, o modelo A de maneira mais eficiente. A turbidez média das amostras filtradas pelo modelo A foi de 1,7 uT, dentro do limite recomendado. A média para o modelo B foi de 23,2 uT, abaixo da turbidez das amostras anteriormente à filtragem, porém bem acima do máximo permitido. A Tabela 4.8 mostra os resultados da análise de turbidez.

Tabela 4.8 – Resultados da análise de turbidez

Evento	Data do ensaio	Turbidez (uT)		
		Escoamento superficial	Modelo A	Modelo B
1	15/05	75,9	3,6	19,3
2	18/05	61,1	1,5	25,4
3	22/05	53,0	1,2	36,6
4	29/05	46,8	1,0	16,6
5	29/05	21,8	1,1	18,3
Média		51,7	1,7	23,2
Desvio padrão		20,0	1,1	8,2

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) foi menor que a máxima recomendada, de 10 mg/L, em treze das quinze amostras. As amostras do escoamento superficial e as filtradas no modelo B apresentaram DBO média muito próximas, de 8,2 mg/L e 8,0 mg/L, respectivamente. Analisando cada resultado separadamente, não é possível avaliar a influência do modelo B sobre esse parâmetro, pois em duas amostras a DBO foi reduzida, em outras duas seu valor aumentou e uma amostra não sofreu alteração. As amostras infiltradas pelo modelo A apresentaram DBO média de 5,0 mg/L e em todos os eventos analisados houve uma redução nesse parâmetro. A Tabela 4.9 mostra os resultados da análise de DBO.

Tabela 4.9 – Resultados da análise de DBO

Evento	Data do ensaio	DBO (mg/L)		
		Escoamento superficial	Modelo A	Modelo B
1	15/05	8,8	2,7	6,1
2	18/05	11,0	8,3	11,0
3	22/05	7,0	4,4	8,7
4	29/05	7,7	4,8	6,3
5	29/05	6,6	5,0	7,8
Média		8,2	5,0	8,0
Desvio padrão		1,8	2,0	2,0

As concentrações de nitrato, nitrogênio amoniacal e nitrito de todas as amostras ficaram bem abaixo do limite máximo recomendado que é de 10 mg/L, 20 mg/L e 1 mg/L, respectivamente. Porém, nem sempre houve uma redução na quantidade dessas substâncias após a filtragem pelos pavimentos. Em geral, as concentrações de nitrato e nitrogênio amoniacal aumentaram após a filtragem e a quantidade de nitrito na água diminuiu com a passagem através do modelo A e aumentou no modelo B. As Tabelas 4.10 a 4.12 apresentam os resultados da análise de nitrato, nitrogênio amoniacal e nitrito.

Tabela 4.10 – Resultados da análise de nitrato

Evento	Data do ensaio	Nitrato (mg/L)		
		Escoamento superficial	Modelo A	Modelo B
1	15/05	0,45	0,37	0,63
2	18/05	0,10	0,57	0,51
3	22/05	0,22	0,41	0,00
4	30/05	0,13	0,35	0,00
5	30/05	0,50	0,89	0,34
Média		0,28	0,52	0,30
Desvio padrão		0,18	0,23	0,29

Tabela 4.11 – Resultados da análise de nitrogênio amoniacal

Evento	Data do ensaio	Nitrogênio amoniacal (mg/L)		
		Escoamento superficial	Modelo A	Modelo B
1	15/05	0,84	1,16	1,31
2	18/05	1,31	1,05	1,11
3	22/05	0,66	0,55	0,81
4	30/05	0,28	0,64	0,63
5	30/05	0,26	0,58	0,90
Média		0,67	0,80	0,95
Desvio padrão		0,44	0,29	0,26

Tabela 4.12 – Resultados da análise de nitrito

Evento	Data do ensaio	Nitrito (mg/L)		
		Escoamento superficial	Modelo A	Modelo B
1	15/05	0,06	0,02	0,09
2	18/05	0,06	0,01	0,06
3	22/05	0,05	0,00	0,04
4	30/05	0,02	0,00	0,03
5	30/05	0,01	0,00	0,07
Média		0,04	0,01	0,06
Desvio padrão		0,02	0,01	0,02

A quantidade de fósforo total, em média, foi superior ao limite de 0,1 mg/L para os três casos analisados. A concentração média de fósforo total no escoamento superficial foi de 0,40 mg/L, no modelo A foi de 0,31 mg/L e no modelo B, de 0,17 mg/L. Os resultados de cada caso foram bastante aleatórios para este parâmetro,

devido a isso, não foi possível avaliar a influência da filtragem pelos modelos de pavimento. A Tabela 4.13 mostra os resultados da análise de fósforo total.

Tabela 4.13 – Resultados da análise de fósforo total

Evento	Data do ensaio	Fósforo total (mg/L)		
		Escoamento superficial	Modelo A	Modelo B
1	15/05	1,23	0,40	0,31
2	23/05	0,06	0,00	0,00
3	22/05	0,00	0,00	0,00
4	30/05	0,37	0,61	0,06
5	30/05	0,33	0,53	0,47
Média		0,40	0,31	0,17
Desvio padrão		0,49	0,29	0,21

A quantidade média de sólidos suspensos totais ficou acima da recomendada que é de 5 mg/L, tanto para o escoamento superficial, quanto para os modelos de pavimento. Algumas amostras apresentaram valor negativo, o que não é possível. Isso pode ter ocorrido, pois a membrana utilizada para filtrar a amostra é bastante frágil e pode ter sido danificada durante o manuseio, de modo que seu peso final foi menor que o inicial. Por esse motivo, os resultados desses ensaios foram descartados para o cálculo da concentração média de cada caso. Além disso, a amostra proveniente do evento 5 e filtrada pelo modelo B não teve um resultado devido a um imprevisto durante a realização do ensaio. Vale ressaltar que a quantidade de amostras perdidas torna mais difícil de analisar o comportamento deste parâmetro.

Entre os ensaios válidos, as amostras do escoamento superficial continham em média 98 mg/L de sólidos suspensos totais. As amostras do modelo A sofreram uma boa redução, porém ainda apresentaram concentração acima do máximo permitido, com média de 8 mg/L. No modelo B também foi observada uma diminuição, obtendo uma média de 17 mg/L. A Tabela 4.14 mostra os resultados da análise de sólidos suspensos totais.

Tabela 4.14 – Resultados da análise de sólidos suspensos totais

Evento	Data do ensaio	Sólidos suspensos totais (mg/L)		
		Escoamento superficial	Modelo A	Modelo B
1	15/05	180	16	36
2	22/05	104	0	4
3	22/05	36	12	12
4	29/05	72	-16*	-8*
5	29/05	-16*	4	SR
Média		98	8	17
Desvio padrão		61	7	17

*As amostras foram desconsideradas para o cálculo da média e do desvio padrão.
SR – Sem resultado

A análise do odor e aparência é subjetiva, e depende da interpretação de cada pessoa. De modo geral, nenhuma amostra apresentou odor desagradável, contudo a água do escoamento superficial e a filtrada pelo modelo B continham uma coloração mais amarelada, o que pode causar desconfiança por parte dos usuários. As amostras filtradas pelo modelo A não possuíam coloração e tinham aspecto semelhante ao da água potável.

A análise de óleos e graxas, que foi realizada uma única vez por motivos já descritos, indicou a presença dessas substâncias na amostra coletada do escoamento superficial do estacionamento em uma concentração de 1 mg/L. O valor máximo recomendado pela ANA para este parâmetro é de 1 mg/L, sendo assim, antes mesmo de ser submetida à filtração pelo pavimento permeável a concentração fica no limite máximo tolerado. Conforme afirmam Cahill, Adams e Marm (2005), com a passagem da água através do pavimento é esperado que a concentração de óleos e graxas seja reduzida, ficando mais distante do limite máximo.

Outro fator positivo é o de que a coleta foi realizada após a precipitação ocorrida na madrugada do dia 7 de maio de 2017 que foi de pequena intensidade e curta duração (volume de chuva de aproximadamente 7 mm), além de ter sido antecedida por um período de mais de 10 dias sem chuva. Nesse intervalo houve a deposição de poluentes sobre a superfície do pavimento que foi lavado pela água da chuva e, portanto, os poluentes estavam em concentrações potencialmente altas.

Apesar do resultado obtido, deve-se levar em consideração que a qualidade da água da chuva, bem como do escoamento superficial por ela gerado é bastante

variável em diferentes eventos. É necessário fazer um monitoramento mais detalhado, bem como avaliar se a filtragem de óleos e graxas realmente acontece no pavimento proposto. Somente após essa avaliação é possível estabelecer concentrações recorrentes e a necessidade de um tratamento adicional para este parâmetro. Essas recomendações valem também para os demais parâmetros analisados.

Os resultados aqui apresentados são uma indicação de valores obtidos a partir da observação de cinco eventos. Apenas com um estudo a longo prazo poderá ser confirmada a influência dos pavimentos permeáveis na qualidade da água para uso não potável.

Além disso, foi observado que não existe uma regulamentação oficial quanto à qualidade necessária para o uso da água em vasos sanitários. Além dos parâmetros e valores utilizados neste trabalho, sugeridos pela ANA, foram encontradas outras fontes com recomendações bastante divergentes. Na NBR 13969/97, por exemplo, as únicas exigências estabelecidas para o uso do efluente do tanque séptico na descarga de vasos sanitários é a turbidez inferior a 10 uT e coliformes fecais abaixo de 500 NMP/100ml, valores bem acima do utilizado pela ANA. Considerando os limites da NBR13969/97 e os resultados obtidos, a água filtrada pelo modelo A estaria adequada ao uso desejado, diferente do que indica a análise feita seguindo as orientações da ANA.

4.4 ESPESSURA DA *RESERVOIR COURSE*

A espessura da *reservoir course*, camada de reservatório temporário do pavimento permeável, foi dimensionada conforme detalhado na seção 3.5, para um período de retorno de 5 anos. Aplicando a Equação 3.3, para durações entre 5 e 60 minutos obteve-se o resultado apresentado na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Altura de chuva total para diferentes durações

Duração (min)	Intensidade (mm/h)	Altura (mm)
5	266,0	22,2
10	215,0	35,8
15	182,6	45,6
30	130,0	65,0
45	103,4	77,6
60	87,1	87,1

Portanto a chuva de projeto escolhida para o pavimento proposto foi de período de retorno de 5 anos (T) e duração de 60 minutos (t), o que corresponde a uma intensidade de 87,1 mm/h (i).

O próximo passo foi a obtenção da vazão de saída específica (q_s), através da Equação 3.4. Para tanto, foi definida a vazão de saída constante (Q_s) de 19,96 m³/h, que corresponde à descarga do volume de 479,05 m³ de água em 24 horas. O volume de água é proveniente da altura de precipitação de projeto, 87,1 mm, incidente sobre a área drenada que é de 5.500 m². A área de drenagem efetiva (A_d), aquela coberta pelo pavimento permeável, é de 5.200 m². Definidas todas as grandezas, o valor calculado para a vazão de saída específica (q_s) foi de 3,84 mm/h.

A razão (R) entre a área drenada, de aproximadamente 5.500 m², e a área do pavimento permeável, que tem cerca de 5.200 m² foi de 1,06. Por fim, como já citado, o volume de vazios adotado para a *reservoir course* foi de 40%.

Após todos os parâmetros definidos, a Equação 3.2 resultou em uma espessura de 221 mm, que foi arredondada para 22 cm. Essa é a espessura mínima da *reservoir course* para que ela exerça adequadamente sua função de armazenamento temporário da água infiltrada durante a chuva de projeto.

4.5 VOLUME DO RESERVATÓRIO PERMANENTE

As simulações realizadas para os quatro cenários propostos geraram resultados bastante parecidos. Como já citado, nos cenários A e B foram utilizados os índices pluviométricos do período de janeiro de 2000 a agosto de 2012, sendo que apenas o cenário A possui pavimento permeável com *filter course*. Nos cenários C e D foram usados os índices pluviométricos do período de junho de 2013 a

dezembro de 2016, sendo que no cenário C o pavimento possui *filter course*, ao contrário do cenário D.

A presença da *filter course* interferiu no coeficiente de aproveitamento da água, um dos parâmetros de entrada do programa Netuno e que, como visto na seção 4.2, vale 0,701 para o modelo A (com *filter course*) e 0,800 para o modelo B. Além disso, verificou-se que para precipitações menores que 5 mm não foi possível coletar água dos modelos, assim, essas precipitações foram desconsideradas para o cálculo do reservatório.

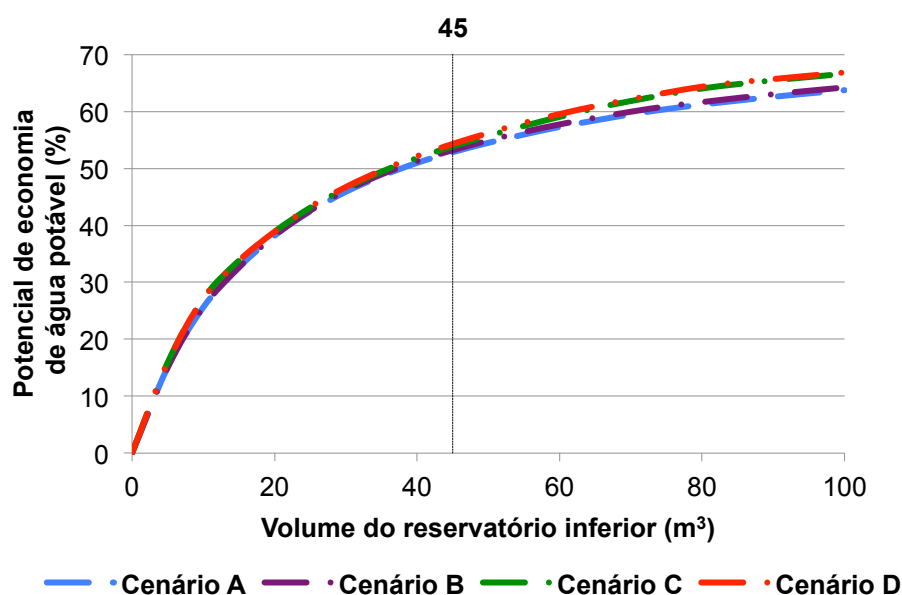
Os demais dados de entrada já foram discutidos e apresentados ao longo deste trabalho, com exceção do volume do reservatório superior, obtido a partir da demanda média diária de água não potável. Como o consumo médio diário de água potável ficou próximo de 6.440 litros e o percentual máximo de substituição por água não potável é de 69%, a demanda média diária de água proveniente do sistema de aproveitamento foi de 4.444 litros. Sendo assim, adotou-se reservatório superior de 5.000 litros. A Tabela 4.16 apresenta esse, e os demais dados de entrada utilizados para realizar as simulações no programa Netuno, e a Figura 4.5 mostra os resultados obtidos; o potencial de economia de água potável para os quatro cenários propostos, conforme a variação do volume do reservatório inferior.

Tabela 4.16 – Dados de entrada no Netuno

Variável de entrada	Valor
Dados diários de precipitação pluviométrica do local em análise	Variável*
Quantidade de descarte do escoamento inicial	0 mm
Área de captação da água pluvial	5.500 m ²
Demanda diária de água potável total	Variável**
População total atendida	1***
Percentual da demanda total de água que pode ser substituída por água não potável	69%
Coeficiente de aproveitamento da água	0,701/0,800
Volume máximo do reservatório inferior	100.000 L
Intervalo entre volumes do reservatório inferior	5.000 L
Volume do reservatório superior	5.000 L
Volume de água no reservatório superior abaixo do qual há recalque	10%

* Série de dados pluviométricos de dois períodos de tempo. Detalhes na seção 4.1.1
 ** Demanda correspondente às faturas da CASAN para o ano de 2016. Detalhes na seção 4.1.2
 *** Valor unitário adotado conforme explicado na seção 3.8.2

Figura 4.5 – Potencial de economia de água potável para os quatro cenários



O volume adotado para o reservatório inferior foi de 45.000 litros, o que, possivelmente, resultaria em uma economia de água potável entre 52,85 e 54,30%, dependendo da estrutura escolhida para o pavimento e da variação na quantidade de chuva ao longo dos anos. A escolha foi baseada a partir da avaliação da diferença de potencial de economia de água potável entre reservatórios subsequentes. No caso analisado, verificou-se que a curva não chegou a apresentar um patamar bem definido, mas que a partir do valor adotado, o ganho de economia com o aumento do reservatório foi considerado pouco significativo. A Tabela 4.17 mostra o potencial de economia de água potável decorrente do uso de um reservatório inferior de 45.000 litros, para os quatro cenários propostos.

Tabela 4.17 – Potencial de economia de água potável para reservatório inferior de 45.000 litros

Cenário	Potencial de economia de água potável (%)
A	52,85
B	53,20
C	53,87
D	54,30

A escolha do tipo de reservatório utilizado cabe ao projetista, que pode optar por caixas d'água de fibra de vidro ou polietileno ou um reservatório construído *in loco* em concreto armado, por exemplo. A Figura 4.6 mostra um exemplo de reservatório inferior composto por três caixas d'água de fibra, com capacidade de 15.000 litros cada, totalizando 45.000 litros. Cada caixa d'água tem aproximadamente 3 m de diâmetro e cerca de 3 m de altura.

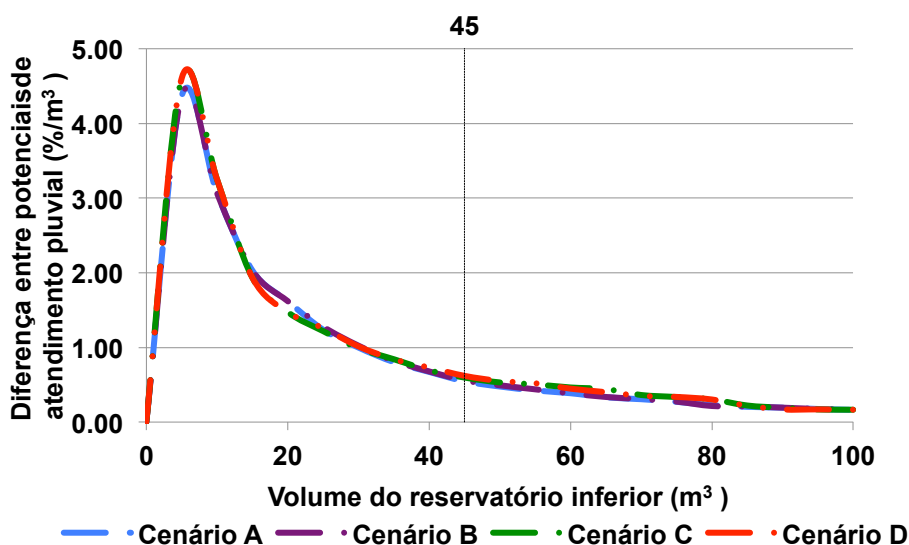
Figura 4.6 – Exemplo da disposição dos reservatórios inferiores



A partir da análise da diferença entre potenciais de atendimento pluvial em função do volume do reservatório, também é possível notar apenas um pequeno aumento na economia de água potável com a utilização de reservatórios maiores. A diferença entre potenciais de atendimento pluvial é dada em $\%/m^3$, e é calculada considerando o percentual máximo que pode ser substituído por água pluvial, nesse caso 69%. Esse parâmetro indica o aumento do percentual de utilização de água pluvial a cada m^3 acrescentado ao volume do reservatório inferior.

Na Figura 4.7 observa-se uma estabilização mais acentuada a partir do volume de 80.000 litros, em que o aumento do volume do reservatório gera quase nenhum acréscimo na economia de água potável. Contudo, para o caso estudado, esse volume foi considerado demasiadamente grande, optando-se, portanto, pelo volume de 45.000 litros.

Figura 4.7 – Diferença entre potenciais de atendimento pluvial

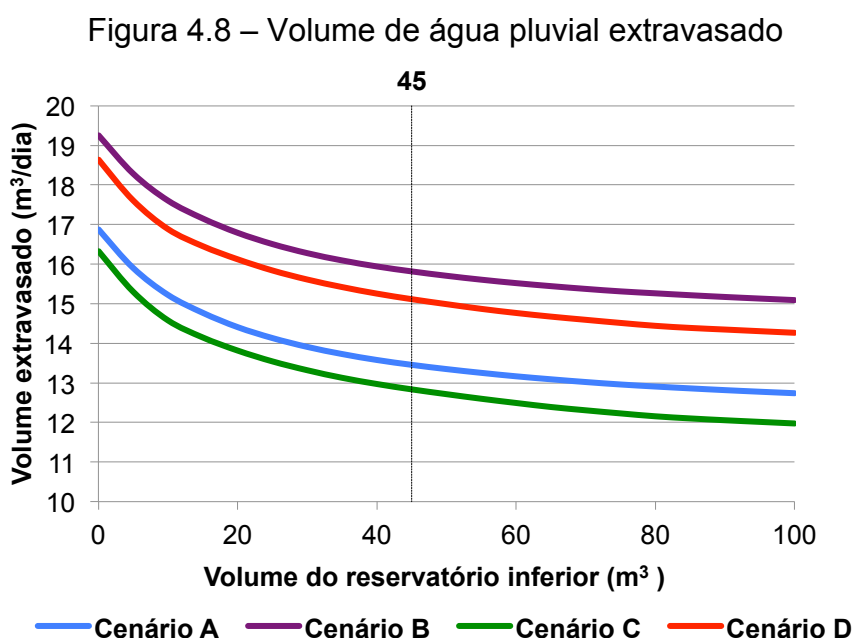


Com relação às diferenças observadas nos potenciais de economia de água potável para os diferentes cenários, é possível notar que os cenários C e D, cuja pluviosidade utilizada foi a do segundo período de dados, apresentam potenciais de economia ligeiramente maiores que os dos cenários A e B (primeiro período de dados).

Conforme visto na seção 4.1.1, embora a pluviosidade média anual para o segundo período analisado seja menor que o primeiro, a distribuição das chuvas durante o ano pode ter feito com que o potencial de economia de água potável para os sistemas de aproveitamento fossem maiores nas simulações utilizando os dados do segundo período. Observou-se que o mês mais seco do período de dados usados nos cenários C e D foi agosto, com pluviosidade média de 92 mm. Para o período de dados usado nos cenários A e B, o valor mínimo foi de 70 mm, para o mês de junho, e 81 mm, em julho; ambos abaixo da menor média obtida para o intervalo de tempo dos cenários C e D.

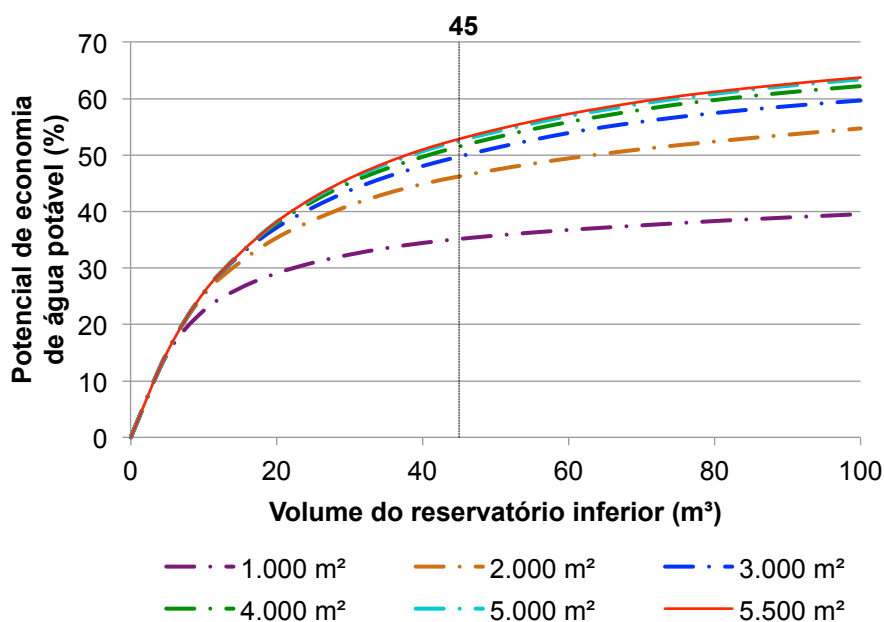
Com relação ao uso da *filter course* nos cenários A e C, o que implica em um coeficiente de aproveitamento de água menor, não foi observada diferença relevante em comparação aos resultados dos cenários B e D. Isso pode ser consequência da grande quantidade de água extravasada, observada em todos os cenários, de modo que o sistema apresenta uma folga entre a demanda de água e a quantidade disponível.

Mesmo para grandes volumes de reservatório, e conseqüentemente para um alto percentual de utilização de água pluvial, a quantidade de água extravasada ainda foi muito alta. A Figura 4.8 mostra os volumes extravasados conforme a variação dos volumes de reservatório para os quatro cenários. Nota-se que nos cenários A e C, devido a utilização da *filter course* reduzir o coeficiente de aproveitamento de água do pavimento, o volume médio extravasado por dia é um pouco menor, pois menos água é coletada pelo sistema. Contudo, ainda são valores altíssimos, que chegam a ser algumas vezes maior que a própria demanda média diária de água não potável.



Desse modo, acredita-se que para a pluviosidade do local e o volume adotado para o reservatório inferior, a área de coleta de água pluvial é maior que a necessária para atender grande parte da demanda do bloco central do CTC. Sendo assim, a instalação de um pavimento permeável apenas em parte do estacionamento já atenderia a uma boa parte do consumo do edifício. Esse fato pode ser verificado na Figura 4.9 que mostra as curvas do potencial de economia de água potável do cenário A (que apresentou o menor potencial de economia), para áreas de coleta de água pluvial menores que a utilizada, de 5.500 m².

Figura 4.9 – Potencial de economia de água potável para diferentes áreas de coleta da água pluvial



Observa-se que, adotando reservatório inferior de 45.000 litros, o potencial de economia cai de 52,85%, em 5.500 m², para 51,52%, considerando uma área de 4.000 m², e 49,73%, para uma área de 3.000 m². Diferença pouco significativa se comparada à redução da área. Nota-se, porém que com 1.000 m², há uma queda mais acentuada no potencial de economia, que passa para 35,13%.

Contudo, a função do pavimento permeável também é amortecer as vazões em caso de chuvas intensas e, no caso do pavimento do tipo C, é possível aproveitar a água infiltrada. Sendo assim, ao invés de reduzir a área de coleta, pode-se considerar a utilização da água coletada também nos prédios adjacentes, otimizando o sistema de aproveitamento e contribuindo na economia de água potável.

Outra possibilidade para minimizar o volume de água que é extravasado seria optar pela construção de um pavimento permeável do Tipo B, com infiltração parcial. Deve-se ressaltar que para essa opção deve ser avaliado o tipo de solo do subleito e se sua permeabilidade se adequa aos requisitos necessários.

Por fim, observou-se que, em geral, os maiores índices pluviométricos em Florianópolis ocorrem nos meses de verão, que coincidem com o período de férias da Universidade. Desta maneira, tem-se um grande volume de água disponível nesse período que não é utilizado. Em contrapartida, outros meses que possuem demanda de água mais elevada têm índice pluviométrico mais reduzido, como é o

caso de junho. Diante dessa realidade, acredita-se que em locais cuja variação da demanda de água durante o ano coincida com a distribuição das chuvas, o sistema de aproveitamento será ainda mais eficiente. Este seria, por exemplo, o caso de *shoppings* em Florianópolis, que recebem milhares de turistas durante o verão e cuja demanda de água não potável é bastante expressiva.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou o desempenho de um pavimento permeável quanto à quantidade e qualidade da água infiltrada, visando seu aproveitamento para uso não potável. Pode-se afirmar que os objetivos propostos foram alcançados, e o desenvolvimento deste trabalho mostrou a importância de se aprofundar ainda mais no assunto, devido aos inúmeros benefícios que o pavimento permeável pode trazer.

Através da análise da quantidade de água que pode ser coletada de um pavimento permeável, verificou-se um grande potencial de aproveitamento. O modelo A, construído com a camada filtrante de areia, reteve mais água, ainda assim, obteve infiltração média de 70,1%. O modelo B apresentou, em média, 80,0% da água precipitada disponível para ser coletada.

A análise da influência dos modelos de pavimento na qualidade da água infiltrada se mostrou inconclusiva com relação a alguns parâmetros, como foi o caso do nitrato, nitrogênio amoniacal e fósforo total para ambos os modelos, e do nitrito, DBO, cor e coliformes fecais para o modelo B. Contudo, sem levar em conta os limites adotados, foi observada uma boa redução nos sólidos suspensos, para os dois modelos, e para o modelo A, uma significativa redução da cor, turbidez e coliformes fecais. Também para o modelo A, foi verificada uma redução moderada na concentração de nitrito e na DBO, além de sua aparência ser bem próxima à da água potável.

De maneira geral, o modelo A se mostrou mais eficiente que o modelo B. A exceção foi o pH, que ficou dentro do limite para as amostras filtradas no modelo B, porém no caso do modelo A, ficou mais ácido que o permitido. Desta maneira, acredita-se que a camada de areia teve um impacto positivo para a qualidade da água. Contudo, mesmo que o modelo A tenha apresentado melhor desempenho, nenhum dos modelos cumpriu todos os requisitos de qualidade necessários. Portanto, a água captada de ambos os pavimentos precisaria passar por um tratamento adicional para se tornar adequada aos valores escolhidos como referência, indicados pela ANA.

É notória a necessidade da criação de uma regulamentação oficial, quanto aos parâmetros e valores limites que devem ser cumpridos, para a utilização de

fontes alternativas da água em atividades que permitam o uso de água não potável. As recomendações existentes até o momento não trazem todas as informações necessárias, e as exigências de qualidade divergem entre si. Esse fato foi observado durante a avaliação da água para o uso proposto neste trabalho, e se mostra como um obstáculo àqueles que pretendem fazer uso de fontes alternativas de água.

No exemplo de aplicação do pavimento permeável em um estacionamento da UFSC, a utilização de um período de retorno de 5 anos e duração da chuva de 60 minutos resultou em uma espessura mínima de 22 cm para a *reservoir course*, a camada de armazenamento temporário da água. A proposta de aproveitamento da água infiltrada pelo pavimento na descarga de vasos sanitários e mictórios do prédio central do Centro Tecnológico serviu para avaliar o potencial de economia de água potável que o uso da água pluvial pode proporcionar. A economia alcançada para um volume de reservatório proposto de 45.000 litros variou de 52,85 a 54,30%, conforme os cenários analisados, valor bastante expressivo.

Como já citado, a demanda de água do bloco central do CTC em 2016 representou apenas 0,6% do volume total consumido na UFSC. Com isso acredita-se que a economia que seria obtida com o aproveitamento de água em uma das edificações da Universidade, que já é bastante considerável, poderia ser muito maior caso o sistema de aproveitamento fosse estendido aos demais centros.

Por fim, acredita-se que a utilização de pavimentos permeáveis no Brasil ainda é pouco comum, tanto por motivos de desconhecimento dessa alternativa e de seus benefícios, quanto pela falta de planejamento e investimento em obras que, apesar de apresentarem um custo inicial mais elevado, podem trazer inúmeros benefícios à sociedade, às cidades e ao meio ambiente. Além disso, a popularização desse tipo de pavimento tornaria seu custo mais acessível, e assim, mais atrativo.

5.2 LIMITAÇÕES

- Não foi realizado o dimensionamento mecânico do pavimento, pois o objetivo principal desta pesquisa foi a análise do seu desempenho quanto ao aproveitamento e à qualidade da água;
- As caixas de acrílico utilizadas na montagem dos modelos impossibilitaram que a compactação das camadas granulares fosse a mesma realizada em

campo, de modo que os resultados obtidos podem ser um pouco diferentes do que acontece em uma situação real;

- Um pequeno número de eventos de chuva foi analisado. A partir dos resultados foi possível se ter apenas uma noção das concentrações normalmente encontradas e da influência do pavimento permeável nos parâmetros avaliados.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando dar continuidade e complementar o tema discutido neste trabalho, sugere-se:

- Projetar o pavimento permeável proposto, incluindo a disposição de drenos coletores e extravasores e as declividades;
- Avaliar o desempenho mecânico do pavimento permeável proposto, apontando possíveis modificações, caso necessárias;
- Estudar diferentes materiais para as camadas filtrantes e tratamentos adicionais para a água coletada, de modo a adequá-la às exigências para o aproveitamento;
- Realizar análise de viabilidade econômica a fim de determinar o volume de reservatório com melhor custo-benefício;
- Avaliar a utilização da água pluvial em outros prédios adjacentes ao bloco central do CTC.

REFERÊNCIAS

ABCP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND). Melhores Práticas:

Pavimentos Permeáveis. **Sistemas Construtivos**, 2010.

_____. Projeto Técnico: Pavimento permeável. **Programa Soluções para Cidades**, 2013.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 15527/07: Água de chuva – Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos**. 8 p., 2007.

_____. **NBR 13969/97: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação**. 60 p., 1997.

_____. **NBR 5564/11: Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio**. 26 p., 2011.

_____. **NBR 7211/2005: Agregados para concreto – Especificação**. 15 p., 2005.

ABUSTAN, I.; HAMZAH, M. O.; RASHID, M. A. Review of permeable pavement systems in Malaysia conditions. **OIDA International Journal of Sustainable Development**, v. 4, n. 02, p. 27-36, 2012.

ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 145 p., 2005.

ADAMS, M. C. et al. Porous Bituminous Pavement: A Stormwater Best Management Practice. In: **Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges**. p. 1-10, 2001.

AFNOR (ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION). **NF P98-254-2: Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés, partie 2**. Association Française de Normalisation, 1993.

ALMEIDA, R. G. de. Aspectos legais para a água de reúso. **Revista Vértices, Campos dos Goytacazes**, v. 13, n. 2, p. 31-43, 2011.

ANA; FIESP; SINDUSCON-SP (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS; FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; SÍNDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO). **Conservação e Reúso da água em Edificações**. Prol Editora Gráfica. São Paulo, 2005.

APHA (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21st ed. Washington, DC, New York, 2005.

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

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

BACK, Á. J. **Chuvas intensas e chuva para dimensionamento de estruturas de drenagem superficial para o Estado de Santa Catarina**. Epagri, Florianópolis, 2013.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto, e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. 2 ed. 318p. Porto Alegre: ABRH, 2011.

BERBEE, R. et al. Characterization and treatment of runoff from highways in the Netherlands paved with impervious and pervious asphalt. **Water Environment Research**, v. 71, n. 2, p. 183-190, 1999.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, Brasil: PETROBRÁS Asfaltos e ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos), 2008.

BOTELHO, A. N. **Estimativa dos Usos Finais de Água Potável na Universidade Federal de Santa Catarina**. Relatório de iniciação científica – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, 2011.

_____. Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece critérios gerais para reúso de água potável. **Diário Oficial da União**, 2006.

BRECHT, D. G. **Sistemas de pavimento drenante: potencial de captação e filtragem da água pluvial para aproveitamento em edificações**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

CAHILL, T. H.; ADAMS, M.; MARM, C. Stormwater management with porous pavements. **Government Engineering**, p. 14-19, 2005.

CALTRANS (CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION). Flexible Pavement Preservation. **Maintenance technical advisory guide**, v. 1 Califórnia, EUA: Division of Maintenance, 2008.

_____. **Open Graded Friction Course Usage Guide**. Califórnia, EUA: Division of Engineering Services, 2006.

CIRIA (CONSTRUCTION INDUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION). **The SUDS manual**. London, 2015.

CPPF (COMISSÃO PERMANENTE DE PLANEJAMENTO FÍSICO). **Planta básica do campus**: Setor 3 – Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

DNER (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM). DNER-ES 386/99: **Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito**. Brasil: Especificação de Serviço, 1999.

_____. DNER-ME 035/98: **Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**. Brasil: Método de Ensaio, 1998.

_____. DNER-ME 081/98: **Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. Brasil: Método de Ensaio, 1998.

_____. DNER-ME 089/94: **Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio**. Brasil: Método de Ensaio, 1994.

_____. DNER-ME 117/94: **Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente**. Brasil: Método de Ensaio, 1994.

DPAE (DEPARTAMENTO DE PROJETOS DE ARQUITETURA E ENGENHARIA). **Mapa com a rede do hidrômetro H33**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS) Water uses. **AQUASTAT website**. 2016. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm#db>. Acesso em: 18 fev. 2017.

FERGUSON, B. K. **Porous Pavements**: CRC Press, Boca Raton, FL., 2005.

FHWA (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION). Porous Asphalt Pavements with Stone Reservoirs. **FHWA Technical Brief**. (Pub. No. FHWA-HIF-15-009), 2015.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Universidade do Minho, Portugal: tese de Doutorado, 2009.

GARCIA, E. S. H. **Análise da redução da permeabilidade de misturas asfálticas drenantes em função da redução do volume de vazios**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

GHISI, E.; CORDOVA, M. M. **Netuno 4. Programa computacional**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/>. 2014.

GOOGLE MAPS. 2017. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-27.6001968-48.5179475,279m/data=!3m1!1e3?hl=en>>. Acesso em: 27 fev. 2017.

GUIMARÃES, J. M. F. **Concreto asfáltico drenante em asfaltos modificados por polímero SBS e borracha moída de pneus**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

HAFNER, A. V. **Conservação e reúso de água em edificações – experiências nacionais e internacionais**. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil - Programa de Pós-Graduação em Engenharias da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

HANSEN, K. Porous asphalt pavements for stormwater management. **National Asphalt Pavement Association (NAPA)**, Lanham, 2008.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Censo Demográfico de 2010**. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php>>. Acesso em: 24 mar. 2017.

JAMES, E. A literature review on the effect of porous asphalt roads on water pollution. **Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control**, 2003.

KOŁODZIEJ, V. M. **Estudo das propriedades acústicas, drenantes e mecânicas de revestimentos asfálticos porosos**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

MEURER FILHO, E. **Estudos de Granulometria para Concretos Asfálticos Drenantes**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

NAPA (NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION). **Design, Construction, and Maintenance of Open-graded Asphalt Friction Courses**. Asphalt Institute; National Asphalt Pavement Association, 2002.

NBWEST. Website. **Let it Rain..... It's Porous**. 2013 Disponível em: <<https://nbwest.com/let-it-rain-its-porous/>>. Acesso em: 20 mai. 2017.

NLT-327/00. **Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el permeámetro LCS**. Laboratorio Escuela de Caminos de Santander, 2000.

ONU (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS). **Água para uso industrial**. Conselho Econômico e Social. Relatório E / 3058STECA / 50. Nações Unidas, Nova York, 1958.

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

PRATT, C. J. Use of permeable, reservoir pavement constructions for stormwater treatment and storage for re-use. **Water science and technology**, v. 39, n. 5, p. 145-151, 1999.

PROENÇA, L. C. et al. Potential for electricity savings by reducing potable water consumption in a city scale. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 11, p. 960-965, 2011.

PURA-USP (PROGRAMA DE USO RACIONAL DA ÁGUA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO). **Considerações para o aproveitamento de águas pluviais**. Versão 1.11, 2011.

PUTMAN, B. J.; KLINE, L. C. Comparison of mix design methods for porous asphalt mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 11, p. 1359-1367, 2012.

RAMOS, C. L. et al. **Diretrizes básicas para projetos de drenagem urbana no município de São Paulo**. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, Prefeitura do Município de São Paulo, 1999.

ROSEEN, R. M. et al. Water quality and hydrologic performance of a porous asphalt pavement as a storm-water treatment strategy in a cold climate. **Journal of Environmental Engineering**, v. 138, n. 1, p. 81-89, 2011.

RWMWD (RAMSEY WASHINGTON METRO WATERSHED DISTRICT). **Porous Asphalt Parking Lot: Technical Series on District Office Demonstration Features**. Minnesota, EUA. 2006.

TOMAZ, P. **Poluição Difusa: Pavimento poroso**. Curso de Manejo de águas pluviais. 2009. Disponível em: <<http://pliniotomaz.com.br/livros-digitais/>>. Acesso em: 11 mai. 2017.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. **Drenagem urbana**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ABRH. 428p., 1995.

UNHSC (UNIVERSITY OF NEW HAMPSHIRE STORMWATER CENTER). **UNHSC Design Specifications for Porous Asphalt Pavement and Infiltrations Beds**. New Hampshire, USA: UNHSC Center, 2014.

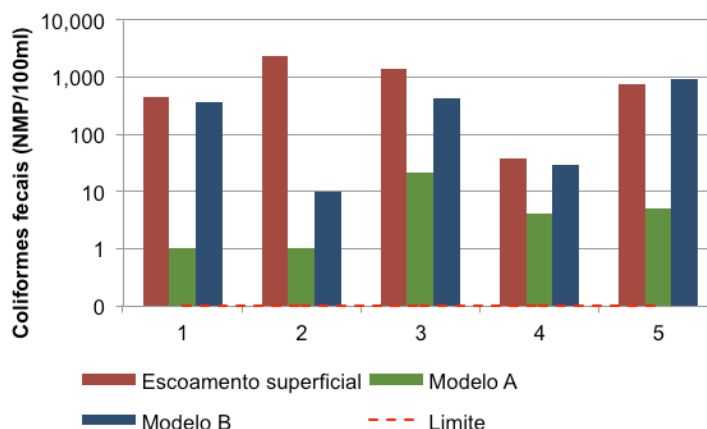
WILKEN, P.S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: Companhia Ambiental Do Estado De São Paulo (CETESB), 477p., 1978.

WSDOT (WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION). **Untreated Highway Runoff in Western Washington**. Washington, EUA: Washington State Department of Transportation, 2007.

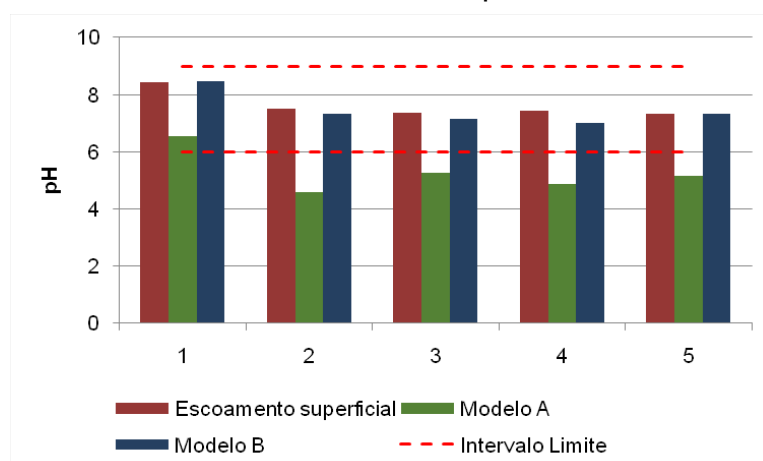
APÊNDICE

APÊNDICE A: Gráficos comparativos entre os resultados das amostras do escoamento superficial, filtradas pelo modelo A, pelo modelo B, e o limite recomendado pela Agência Nacional de Águas.

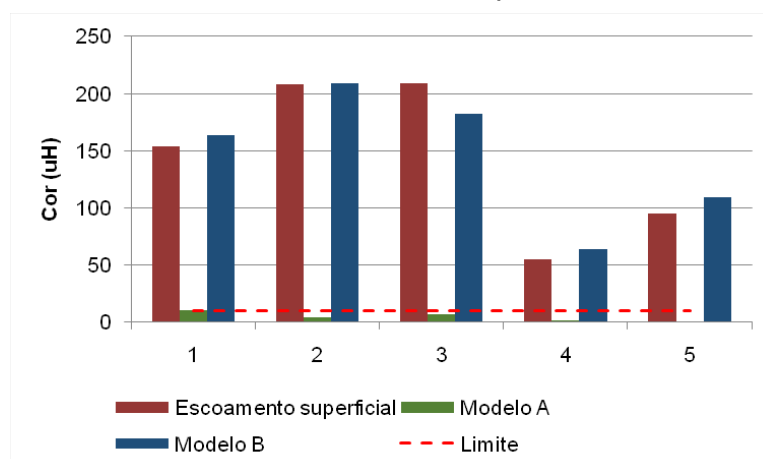
Apêndice A. 1 – Concentração de coliformes fecais das amostras do escoamento superficial, modelo A, modelo B, e o limite recomendado pela ANA



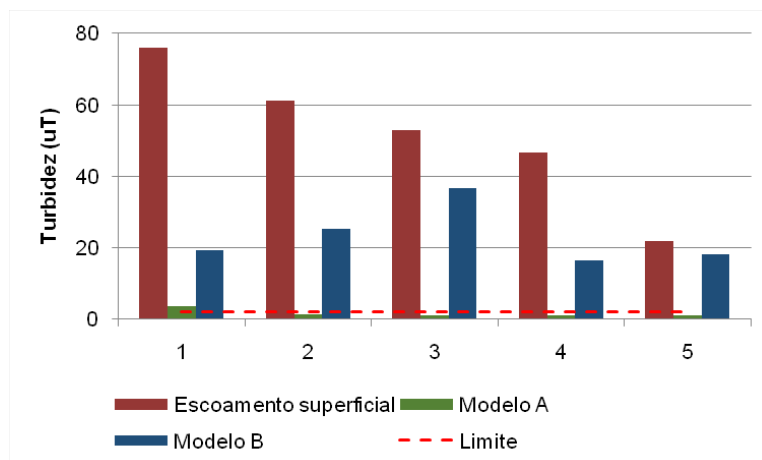
Apêndice A. 2 – pH das amostras do escoamento superficial, modelo A, modelo B, e o limite recomendado pela ANA



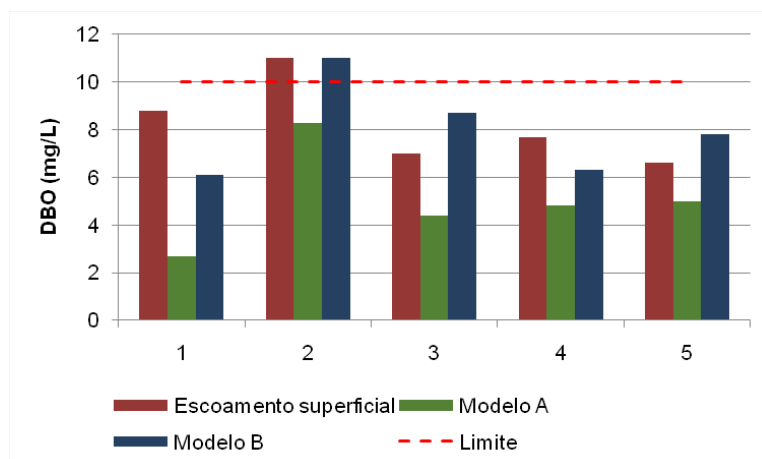
Apêndice A. 3 – Cor das amostras do escoamento superficial, modelo A, modelo B, e o limite recomendado pela ANA



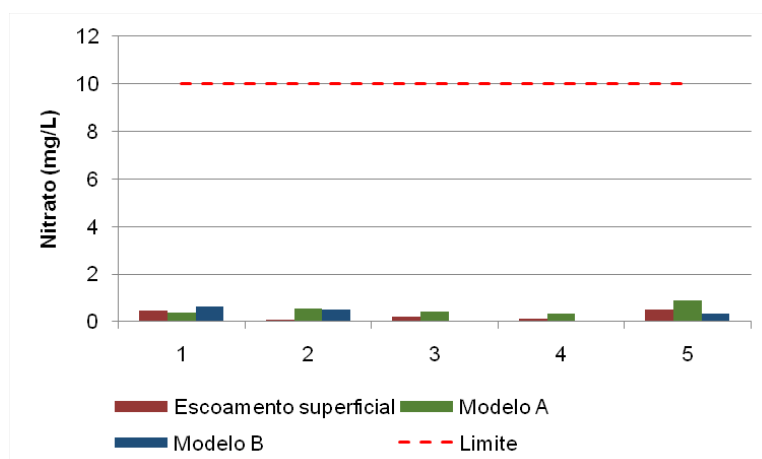
Apêndice A. 4 – Turbidez das amostras do escoamento superficial, modelo A, modelo B, e o limite recomendado pela ANA



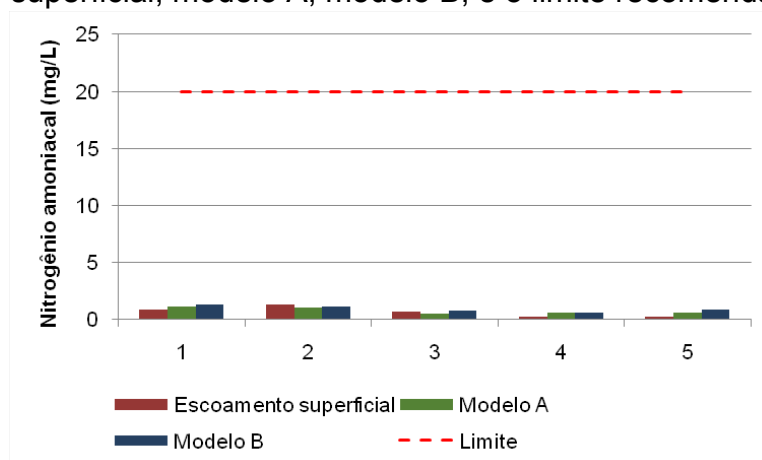
Apêndice A. 5 – Demanda bioquímica de oxigênio (DBO) das amostras do escoamento superficial, modelo A, modelo B, e o limite recomendado pela ANA



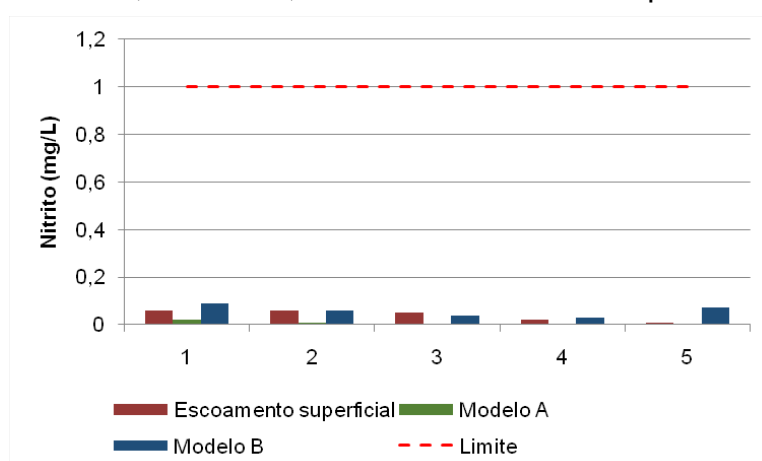
Apêndice A. 6 – Concentração de nitrato das amostras do escoamento superficial, modelo A, modelo B, e o limite recomendado pela ANA



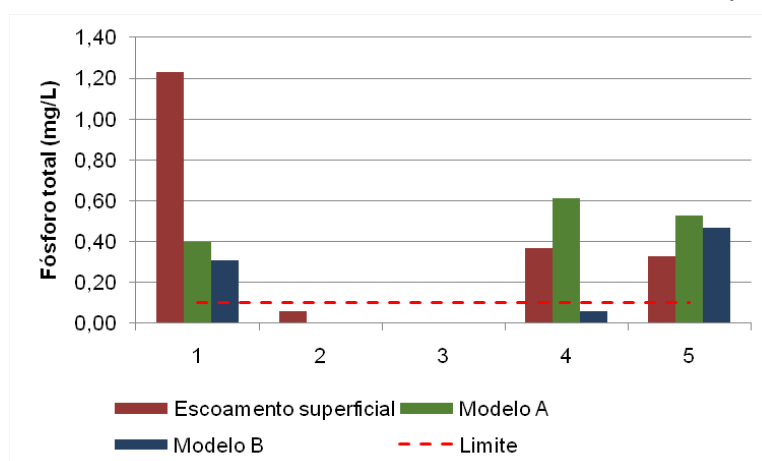
Apêndice A. 7 – Concentração de nitrogênio amoniaco das amostras do escoamento superficial, modelo A, modelo B, e o limite recomendado pela ANA



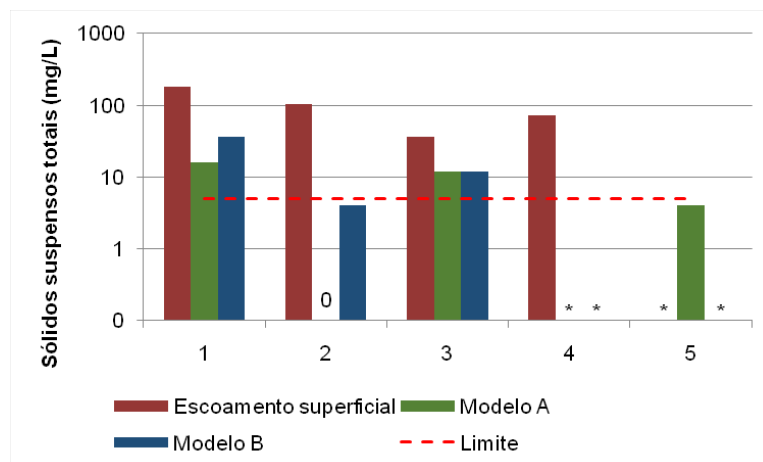
Apêndice A. 8 – Concentração de nitrito das amostras do escoamento superficial, modelo A, modelo B, e o limite recomendado pela ANA



Apêndice A. 9 – Concentração de fósforo total das amostras do escoamento superficial, modelo A, modelo B, e o limite recomendado pela ANA



Apêndice A. 10 Concentração de sólidos suspensos totais das amostras do escoamento superficial, modelo A, modelo B, e o limite recomendado pela ANA



*Resultados descartados ou inexistentes