



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**SISTEMAS DE PAVIMENTO DRENANTE: POTENCIAL DE
CAPTAÇÃO E FILTRAGEM DA ÁGUA PLUVIAL PARA
APROVEITAMENTO EM EDIFICAÇÕES**

DOUGLAS GHERARDT BRECHT

Florianópolis, dezembro de 2015.

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SISTEMAS DE PAVIMENTO DRENANTE: POTENCIAL DE CAPTAÇÃO E FILTRAGEM DA ÁGUA PLUVIAL PARA APROVEITAMENTO EM EDIFICAÇÕES

DOUGLAS GHERARDT BRECHT

Acadêmico

ENEDIR GHISI, PhD.

Orientador

LISEANE PADILHA THIVES, Dr^a.

Coorientadora

Trabalho de conclusão de curso
submetido à Universidade Federal de
Santa Catarina como parte dos requisitos
para a obtenção do título de Engenheiro
Civil.

Florianópolis, dezembro de 2015.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Brecht, Douglas Gherardt

Sistemas de Pavimento Drenante : Potencial de Captação e Filtragem da Água Pluvial para Aproveitamento em Edificações / Douglas Gherardt Brecht ; orientador, Enedir Ghisi ; coorientadora, Liseane Padilha Thives Fontes. - Florianópolis, SC, 2015.

156 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Pavimento drenante. 3. Qualidade da água de runoff. 4. Aproveitamento da água pluvial. 5. Filtragem da água de runoff. I. Ghisi, Enedir. II. Fontes, Liseane Padilha Thives. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

DOUGLAS GHERARDT BRECHT

**SISTEMAS DE PAVIMENTO DRENANTE: POTENCIAL DE CAPTAÇÃO E
FILTRAGEM DA ÁGUA PLUVIAL PARA APROVEITAMENTO EM EDIFICAÇÕES**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado como requisito
parcial para obtenção do título de
ENGENHEIRO CIVIL

Trabalho defendido e aprovado em 27/11/ 2015.

Banca examinadora:

A handwritten signature in blue ink, reading "E Ghisi", is positioned above a horizontal line.

Prof. EneDir Ghisi, PhD – Orientador.

Prof. Liseane Padilha Thives, Dr^a.

Ana Kelly Marinoski Ribeiro, Dr^a.

Agradecimentos

Ao universo, à natureza e à arte, que por meio do cinema e da música contempla a nossa existência e toda a vida que nos cerca, inspira, e muitas vezes nos permite compreender quem somos e aceitar o incompreensível.

À minha família e aos meus verdadeiros amigos, pela alegria da convivência, amizade e apoio durante os obstáculos enfrentados.

À instituição, UFSC, pelas oportunidades concedidas em relação à pesquisa e ensino, e pelo suporte disponibilizado aos estudantes.

Ao Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC, por conceder os equipamentos necessários para os testes de qualidade, em parceria com o projeto PIBIC, orientado pelo professor EneDir Ghisi.

Ao professor EneDir Ghisi, pela orientação acadêmica e compartilhamento de seu conhecimento, como também pelos conselhos oferecidos. E também por ser uma pessoa de caráter e comprometimento inspiradores, para quando buscamos em quem nos espelhar. Agradeço por ter concedido a mim a oportunidade de participar neste trabalho e em outros relacionados à sustentabilidade.

À professora Liseane Thives, que exerceu o papel de minha coorientadora, disponibilizando seu conhecimento de infraestrutura, e que foi atenciosa e prestativa em cada etapa deste trabalho. E, agradeço, principalmente, por acreditar que o progresso é feito com amizade, caráter, e compartilhamento de conhecimento. Sou grato pela amizade, pelo suporte emocional, pela paciência e por me inspirar a superar as adversidades momentâneas para dar espaço à perspectiva e à vontade de construir um futuro de realizações.

Ao meu novo amigo, Dario, pela colaboração com as coletas e com a análise dos parâmetros.

Às mestrandas Cristine e Mayara, pelos conhecimentos trocados, pelo auxílio no laboratório de pavimentação e pelos conselhos sobre meu trabalho e vida acadêmica.

E por fim, a todos aqueles que fizeram parte de minha vida e formação acadêmica no decorrer destes cinco anos.

Resumo

Este trabalho estuda a eficiência de sistemas de pavimento drenante quanto à capacidade de filtragem de poluentes, oriundos do tráfego e da atmosfera, e quanto à capacidade de infiltração de água pluvial, para aproveitamento em edificações. Também foi estudado o estado tensão-deformação de um pavimento drenante por meio de simulação computacional. A partir de granulometrias *open graded* foram confeccionadas três placas asfálticas. Posteriormente foram construídos dois sistemas multicamadas de pavimento drenante. Estes sistemas são compostos de agregados e placas asfálticas, que simulam a estrutura de um pavimento. Inicialmente foram analisadas as placas asfálticas, individualmente. Em seguida, foram montados os sistemas. Os sistemas foram expostos a eventos de chuva e estudados quantitativamente e qualitativamente, com os agregados, componentes de suas camadas, em seu estado natural. Posteriormente, o experimento foi repetido, mas com os agregados lavados, com o intuito de verificar se as camadas continham impurezas que contaminavam a água infiltrada. Nas placas e nos sistemas foi infiltrada água diretamente da precipitação e água do escoamento superficial (*runoff*) de vias públicas de Florianópolis. Na análise quantitativa foi medida a quantidade de água infiltrada nos sistemas e nas placas. No estudo qualitativo foram analisados os parâmetros pH, oxigênio dissolvido, amônia, nitrito, fósforo, ferro, alumínio, zinco, cobre e cromo, nas placas e nos sistemas. No experimento verificou-se que os sistemas de pavimento drenante infiltraram cerca de 90,0% da água de precipitação incidente, assim como as placas. Em relação à filtragem, ambos os sistemas, com os agregados lavados, tiveram resultados satisfatórios quanto à redução do nível de poluentes da água de *runoff*. A concentração média dos parâmetros na água infiltrada, com exceção do pH e oxigênio dissolvido, que não sofreram influência notória, reduziu de 17,0 a 100,0%. A amônia, por exemplo, reduziu cerca de 60,0%, e os parâmetros nitrito e fósforo reduziram de 51,0 a 81,0%. Deste modo, verificou-se que sistemas multicamadas de pavimento drenante têm potencial de filtragem de poluentes oriundos do tráfego de veículos, podendo ser utilizados como forma de captação e filtragem primária de água pluvial para uso não potável em edificações.

Palavras-chave: pavimento drenante, água pluvial, *runoff*, filtragem, aproveitamento de água pluvial.

Sumário

Agradecimentos	5
Resumo	6
Lista de figuras	10
Lista de tabelas	13
Lista de quadros	16
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Considerações iniciais.....	16
1.2 Objetivos	19
1.2.1 <i>Objetivo geral</i>	19
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	19
1.3 Estrutura do trabalho	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Pavimento flexível	22
2.1.1 <i>Estrutura do pavimento flexível e esforços solicitantes</i>	22
2.1.2 <i>Análise estrutural do pavimento flexível</i>	24
2.1.3 <i>Critérios de ruína do pavimento flexível</i>	26
2.2 Método empírico-mecanicista de análise do estado de tensão-deformação	27
2.3 Programa Bisar	28
2.3.1 <i>Tráfego e geometria</i>	29
2.3.2 <i>Módulo de elasticidade e Coeficiente de Poisson</i>	30
2.4 Pavimentos drenantes.....	33
2.5 Open Graded Friction Course	36
2.5.1 <i>Granulometria</i>	36
2.5.2 <i>Ligante asfáltico</i>	40
2.5.3 <i>Ligante asfáltico modificado por borracha de pneu moída</i>	41
2.6 Sistema de camadas drenantes	42
2.7 Sistemas de camadas drenantes para baixo volume de tráfego	43
2.8 Sistemas de camadas drenantes para maior volume de tráfego.....	48
2.8.1 <i>Pavimento drenante Tipo A e Tipo C</i>	51
2.8.2 <i>Pré-Misturado a Quente</i>	52
2.8.3 <i>Brita graduada simples</i>	53
2.9 Qualidade da água pluvial e de <i>runoff</i>	54

2.9.1 Principais fatores desencadeadores de poluentes no runoff	57
2.9.2 Experimentos realizados	59
2.10 Filtragem dos poluentes da água pluvial	62
2.11 Parâmetros de qualidade da água	63
2.12 Considerações finais	65
3 MATERIAIS E MÉTODO	66
3.1 Materiais utilizados no experimento	70
3.1.1 Agregado graúdo, miúdo e areia	71
3.1.2 Asfalto borracha	71
3.1.3 Caixa de acrílico, geotêxtil, grelhas e suportes metálicos	72
3.2 Sistemas de camadas drenantes	74
3.2.1 Placas asfálticas drenantes	75
3.2.2 Camadas drenantes	80
3.3 Sistemas de pavimento drenante A e B	82
3.3.1 Sistema de camadas drenantes A	83
3.3.2 Sistema de camadas drenantes B	84
3.4 Montagem dos sistemas, coleta e etapas de análise	85
3.5 Estudo quantitativo dos sistemas	90
3.6 Estudo qualitativo dos sistemas	90
3.7 Análise tensão-deformação	93
3.7.1 Sistemas de pavimento drenante C e D	93
3.7.2 Dados de entrada no Bisar	94
3.8 Análise dos dados	96
4 RESULTADOS	97
4.1 Placas asfálticas drenantes	98
4.2 Sistemas de camadas drenantes	102
4.3 Estudo quantitativo	105
4.3.1 Placas asfálticas	105
4.3.2 Sistemas A e B (sem lavagem dos materiais componentes das camadas)	
.....	106
4.3.3 Sistemas A e B (com lavagem dos materiais componentes das camadas)	
.....	107
4.4 Estudo qualitativo	107
4.4.1 Placas asfálticas	107

4.4.2 Sistemas A e B (sem lavagem dos materiais componentes das camadas)	111
4.4.3 Sistemas A e B (com lavagem dos materiais componentes das camadas)	115
4.4.4 Água de runoff (sem lavagem dos materiais componentes das camadas)	118
4.4.5 Água de runoff (com lavagem dos materiais componentes das camadas)	121
4.5 Contaminação da água dos sistemas	124
4.6 Análise tensão-deformação	130
4.7 Análise comparativa dos sistemas	132
4.7.1 Água pluvial	136
4.7.2 Água de runoff	143
5 CONCLUSÕES	148
5.1 Limitações do trabalho	150
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	151
Referências	152

Lista de figuras

Figura 2.1 – Diagrama esquemático do capítulo 2	21
Figura 2.2 – Sistema de camadas de um pavimento	24
Figura 2.3 – Tensões no pavimento	25
Figura 2.4 – Distribuição de tensões e deflexões no pavimento	25
Figura 2.5 – Esquema genérico da ação de um eixo-padrão	30
Figura 2.6 – Sistema típico de camadas de um pavimento drenante	35
Figura 2.7 – Pavimento drenante em condomínio horizontal	35
Figura 2.8 - Textura aparente típica de uma mistura de granulometria <i>open graded</i>	37
Figura 2.9 – Sistema de camadas drenantes do UNHSC (2009)	44
Figura 2.10 – Sistema de camadas drenantes do RWMWD (2006)	44
Figura 2.11 – Sistema de camadas drenantes (CIRIA)	51
Figura 2.12 – Sistema de camadas drenantes proposto pelo RLCS	51
Figura 2.13 – Sistema de camadas drenantes Tipo A	52
Figura 2.14 – Sistema de camadas drenantes Tipo C	52
Figura 3.1 – Diagrama esquemático do capítulo 3	66
Figura 3.2 – Fluxograma esquemático do método	67
Figura 3.3 – Agregados utilizados	71
Figura 3.4 – Asfalto borracha ECOFLEXPAVE	72
Figura 3.5 – Caixas dos sistemas e caixa de controle	72
Figura 3.6 – Suportes metálicos e grelha	74
Figura 3.7 – Camada envolvida por geotêxtil	74
Figura 3.8 – Placa DNER	77
Figura 3.9 – Placa Caltrans	77
Figura 3.10 – Placa PMQ	77
Figura 3.11 – Limites da faixa do Caltrans (2007)	79
Figura 3.12 – Limites da faixa I do DNER-ES 386 (1999)	79
Figura 3.13 – Limites da faixa I do PMSP/SP ESP10 (1992)	80
Figura 3.14 – Limites da faixa C do DNIT (2009)	82
Figura 3.15 – Sistema de camadas drenantes A	84
Figura 3.16 – Sistema de camadas drenantes B	84
Figura 3.17 – Esquema de montagem do experimento	87
Figura 3.18 – Sistemas montados	87

Figura 3.19 – Amostras de areia e brita graduada simples	89
Figura 3.20 – Exemplo de coleta.....	89
Figura 3.21 – Experimento montado	89
Figura 3.22 – Fotocolorímetro e materiais utilizados.....	92
Figura 3.23 – Exemplo de comparação colorimétrica	92
Figura 3.24 – Sistema de pavimento drenante C	94
Figura 3.25 – Sistema de pavimento drenante D	94
Figura 4.1 – Organização esquemática do capítulo	97
Figura 4.2 – Curva média adotada para a Placa Caltrans enquadrada entre os limites da faixa do Caltrans (2007)	99
Figura 4.3 – Curva média adotada para a Placa DNER enquadrada entre os limites da faixa do DNER-ES 386 (1999)	99
Figura 4.4 – Curva média adotada para a Placa PMQ enquadrada entre os limites da faixa I do PMSP/SP ESP10 (1992)	100
Figura 4.5 – Placas confeccionadas e suas dimensões.....	101
Figura 4.6 – Camadas componentes do sistema A.....	103
Figura 4.7 – Camadas componentes do sistema B.....	103
Figura 4.8 – Experimento completo montado.....	104
Figura 4.9 – Coloração da água dos sistemas antes da lavagem dos agregados ..	125
Figura 4.10 – Coloração no fundo da caixa dos sistemas antes da lavagem dos agregados e pé metálico do suporte enferrujado	126
Figura 4.11 – Água das lavagens das amostras de areia e brita.....	126
Figura 4.12 – Resultado das lavagens das camadas dos sistemas	128
Figura 4.13 – Coloração da água dos sistemas após a lavagem dos agregados ..	128
Figura 4.14 – Representação gráfica das reflexões obtidas para os sistemas, em ordem crescente.....	131
Figura 4.15 – Concentração média dos parâmetros para água pluvial	134
Figura 4.16 – Concentração média dos parâmetros para água de <i>runoff</i>	135
Figura 4.17 – Concentração de amônia e nitrito no sistema B antes da lavagem dos agregados, ao longo do tempo.....	136
Figura 4.18 – Concentração média dos parâmetros amônia e nitrito	137
Figura 4.19 – Concentração de fósforo nos sistemas A e B antes da lavagem dos agregados, ao longo do tempo.....	138
Figura 4.20 – Concentração média dos parâmetros fósforo e ferro	138

Figura 4.21 – Concentração de fósforo no sistema B após a lavagem dos agregados, ao longo do tempo.....	138
Figura 4.22 – Concentração de ferro nos sistemas A e B antes da lavagem dos agregados, ao longo do tempo.....	139
Figura 4.23 – Concentração de alumínio nos sistemas A e B antes da lavagem dos agregados, ao longo do tempo.....	140
Figura 4.24 – Concentração média dos parâmetros alumínio e zinco.....	141
Figura 4.25 – Concentração média dos parâmetros oxigênio e pH.....	141
Figura 4.26 – Concentração média dos parâmetros cobre e cromo.....	142
Figura 4.27 – Concentração média dos parâmetros amônia e nitrito no <i>runoff</i>	143
Figura 4.28 – Concentração de alumínio nos sistemas A e B antes da lavagem dos agregados, ao longo do tempo.....	144
Figura 4.29 – Concentração média dos parâmetros alumínio e zinco no <i>runoff</i>	144
Figura 4.30 – Concentração média dos parâmetros fósforo e ferro no <i>runoff</i>	144
Figura 4.31 – Concentração média dos parâmetros cobre e cromo no <i>runoff</i>	145
Figura 4.32 – Concentração média dos parâmetros pH e oxigênio no <i>runoff</i>	145

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Classificação das vias de acordo a PMSP	30
Tabela 2.2 – Módulos de elasticidade de misturas investigadas no Brasil	31
Tabela 2.3 – Módulos de elasticidade usuais.....	32
Tabela 2.4– Módulo dinâmico de algumas misturas asfálticas drenantes.....	32
Tabela 2.5 – Características de pavimentos drenantes típicos	39
Tabela 2.6 – Faixa granulométrica recomendada pela <i>Federal Highway Administration</i> (FHWA).....	39
Tabela 2.7 – Faixa granulométrica recomendada pelo Caltrans para agregado máximo de 12,5 mm.....	39
Tabela 2.8 – Faixas granulométricas recomendadas pelo DNER (ES 386/99)	39
Tabela 2.9 – Teor ótimo de ligante e volume de vazios	41
Tabela 2.10 – Grau de compactação para camadas granulares.....	45
Tabela 2.11 – Faixas granulométricas recomendadas pelo UNHSC (2009)	45
Tabela 2.12 – Faixas granulométricas para PMQ (DER/SP).....	53
Tabela 2.13 – Faixas granulométricas para BGS.....	53
Tabela 2.14 – Faixas granulométricas para BGS.....	54
Tabela 2.15 – Resultados dos parâmetros analisados na água de <i>runoff</i> em Munique, Alemanha	56
Tabela 2.16 – Parâmetros de qualidade da água.....	59
Tabela 2.17 – Comparativo dos poluentes encontrados (valores médios) no pavimento drenante e tradicional na França, em g/ha	60
Tabela 2.18 – Qualidade da água da chuva na cidade de Florianópolis	61
Tabela 2.19 – Qualidade da água de <i>runoff</i> na cidade de Florianópolis (valores médios)	61
Tabela 2.20 – Limites admissíveis para potabilidade e águas doces.....	64
Tabela 3.1 – Sistemas de camadas drenantes	75
Tabela 3.2 - Faixas Granulométricas <i>open graded</i> recomendadas pelos Caltrans e (2007) DNER-ES 386 (1999).....	78
Tabela 3.3 - Faixa Granulométrica PMSP/SP ESP10 (1992).....	80
Tabela 3.4 – Faixas granulométricas recomendadas pelo UNHSC (2009)	81
Tabela 3.5 - Faixas Granulométricas para BGS, DNIT (2009)	82
Tabela 3.6 – Parâmetros de qualidade da água.....	91

Tabela 3.7 – Espessuras das camadas	95
Figura 3.8 – Módulo de elasticidade, Coeficiente de <i>Poisson</i> e pontos de análise ...	95
Tabela 4.1 – Granulometria <i>open graded</i> adotada para a Placa Caltrans	98
Tabela 4.2 – Granulometria <i>open graded</i> adotada para a Placa DNER.....	98
Tabela 4.3 – Granulometria <i>open graded</i> adotada para a Placa PMQ.....	100
Tabela 4.4 – Teor de ligante e volume de vazios das placas asfálticas	101
Tabela 4.5 – Composição granulométrica adotada para o sistema A	102
Tabela 4.6 – Composição granulométrica adotada para o sistema B	102
Tabela 4.7 – Infiltração nas placas testadas individualmente.....	105
Tabela 4.8 – Infiltração nos sistemas A e B (sem lavagem dos agregados)	106
Tabela 4.9 – Infiltração nos sistemas A e B (após lavagem dos agregados)	107
Tabela 4.10 – Média e desvio padrão dos parâmetros analisados	108
Tabela 4.11 – Variação percentual média dos parâmetros analisados	108
Tabela 4.12 – Concentração de oxigênio e pH na precipitação e na água infiltrada	109
Tabela 4.13 – Concentração de amônia e nitrito na precipitação e na água infiltrada	109
Tabela 4.14 – Concentração de fósforo e ferro na precipitação e na água infiltrada	110
Tabela 4.15 – Concentração de alumínio e zinco na precipitação e na água infiltrada	110
Tabela 4.16 – Concentração de cobre e cromo na precipitação e na água infiltrada	111
Tabela 4.17 – Média e desvio padrão dos parâmetros analisados	111
Tabela 4.18 – Concentração de oxigênio e pH na precipitação e na água infiltrada	112
Tabela 4.19 – Concentração de amônia e nitrito na precipitação e na água infiltrada	113
Tabela 4.20 – Concentração de fósforo e ferro na precipitação e na água infiltrada	113
Tabela 4.21 – Concentração de alumínio e zinco na precipitação e na água infiltrada	114
Tabela 4.22 – Concentração de cobre o cromo na precipitação e na água infiltrada	114

Tabela 4.23 – Média e desvio padrão dos parâmetros analisados	115
Tabela 4.24 – Concentração de oxigênio e pH na precipitação e na água infiltrada	116
Tabela 4.25 – Concentração de amônia e nitrito na precipitação e na água infiltrada	116
Tabela 4.26 – Concentração de fósforo e ferro na precipitação e na água infiltrada	117
Tabela 4.27 – Concentração de alumínio e zinco na precipitação e na água infiltrada	117
Tabela 4.28 – Concentração de cobre e cromo na precipitação e na água infiltrada	118
Tabela 4.29 – Média e desvio padrão dos parâmetros analisados	118
Tabela 4.30 – Concentração de oxigênio e pH no <i>runoff</i> e na água infiltrada	119
Tabela 4.31 – Concentração de amônia e nitrito no <i>runoff</i> e na água infiltrada	119
Tabela 4.32 – Concentração de fósforo e ferro no <i>runoff</i> e na água infiltrada	120
Tabela 4.33 – Concentração de alumínio e zinco no <i>runoff</i> e na água infiltrada	120
Tabela 4.34 – Concentração de cobre e cromo no <i>runoff</i> e na água infiltrada	121
Tabela 4.35 – Média e desvio padrão dos parâmetros analisados	121
Tabela 4.36 – Concentração de oxigênio e pH no <i>runoff</i> e na água infiltrada	122
Tabela 4.37 – Concentração de amônia e nitrito no <i>runoff</i> e na água infiltrada	122
Tabela 4.38 – Concentração de fósforo e ferro no <i>runoff</i> e na água infiltrada	123
Tabela 4.39 – Concentração de alumínio e zinco no <i>runoff</i> e na água infiltrada	123
Tabela 4.40 – Concentração de cobre e cromo no <i>runoff</i> e na água infiltrada	124
Tabela 4.41 – Resultados das análises das lavagens dos agregados	127
Tabela 4.42 – Resultados para tensão-deformação dos sistemas	131
Tabela 4.43 – Comparação dos resultados dos sistemas lavados com padrão de potabilidade	146
Tabela 4.44 – Comparação dos resultados dos sistemas lavados com padrão de águas doces destinadas ao consumo humano	147

Lista de quadros

Quadro 2.1 - Poluentes típicos do <i>runoff</i>	55
Quadro 2.2 – Classificação dos poluentes típicos do <i>runoff</i>	57
Quadro 2.3 – Principais origens de poluentes oriundos do tráfego de veículos	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O número de áreas impermeáveis aumenta a cada dia com o processo de urbanização. A transformação e ocupação do meio ambiente por meio da construção de estradas, de estacionamentos, de áreas de passeio, de edificações, dentre outros, afeta e modifica o funcionamento de ecossistemas inteiros (KLENZENDORF *et al.*, 2012).

A relação entre o homem e o meio ambiente é perturbada pelo desenvolvimento urbano ineficiente. Quando ocorre precipitação em uma região de centro urbano, com muitas áreas impermeáveis, a água pluvial não é capaz de infiltrar no solo e, conseqüentemente, não abastece os mananciais de águas subterrâneas. Deste modo surgem aumentos de pico de vazão e da velocidade do escoamento superficial. Esta é uma das causas principais de enchentes e inundações problemas de drenagem nas cidades (LEGRET *et al.*, 1996).

Na cidade de São Paulo o solo é pouco permeável, restando somente 40% da sua vegetação original. Deste modo, a maior parte das águas pluviais integra-se ao escoamento superficial, sendo direcionada aos rios e córregos, ocasionando enchentes ao superar a capacidade de vazão dos mesmos (BIS, 2012).

O pavimento drenante é uma das soluções indicadas para se atenuar os efeitos do aumento das áreas impermeáveis. Este tipo de pavimento combate o escoamento superficial e as enchentes, como também promove um aumento na qualidade da água que infiltra no solo (KLENZENDORF *et al.*, 2012).

No Brasil, aproximadamente 80% das estradas não são pavimentadas. O país possui somente cerca de 12% de suas estradas pavimentadas, as quais concentram-se nos centros urbanos, onde muitas vezes a drenagem é ineficiente. Tendo em vista que a tendência é o aumento das áreas pavimentadas, inclusive em virtude do baixo percentual atual pavimentado, é prudente se pensar em técnicas que proporcionem mais áreas permeáveis, característica que o pavimento convencional não oferece (BENEVIDES, 2014).

Segundo Dumke (2005), o pavimento drenante, além de permitir a infiltração da água, também promove a redução do ruído do tráfego devido ao atrito pneu-pavimento e reduz o efeito de *spray* e aquaplanagem. Este tipo de pavimento,

devido ao seu potencial de filtração, permite que água de melhor qualidade infiltre no solo e integre-se ao ciclo hidrológico. Também é possível coletar esta água no próprio pavimento e aproveitá-la para uso doméstico não-potável e industrial (KLENZENDORF *et al.*, 2012).

Segundo SCGOV (2015), a cidade de Chapecó, oeste de Santa Catarina, sofre com a falta de água, especialmente no verão, devido à estiagem. Os moradores das regiões mais afetadas optam pela construção de poços artesianos para amenizar a escassez. Outro problema preocupante é a poluição nesta região, causada pela rede industrial (HOROSTECKI, 2000).

O pavimento drenante, se empregado na malha municipal de estradas de Chapecó, proporcionaria uma redução dos poluentes da água pluvial que infiltra no solo. Além de, é claro, ser uma técnica com grande potencial para solucionar a escassez de água da região, uma vez que a água pluvial pode ser captada e aproveitada.

As superfícies de estradas são carregadas de poluentes advindos do meio urbano e industrial. O pavimento drenante filtra uma variedade destes poluentes. Segundo Klenzendorf *et al.* (2012), o emprego deste tipo de pavimento promove uma redução dos sólidos suspensos e de metais encontrados no escoamento superficial de pavimentos convencionais. As principais categorias de poluentes encontrados no escoamento da água pluvial em estradas são: sólidos suspensos, nutrientes de fertilizantes, metais pesados, compostos orgânicos, bactérias e deposições de poluentes da atmosfera. Em pavimentos convencionais, impermeáveis, a água contaminada atinge mananciais superficiais e subterrâneos (WSDOT, 2007).

Existem diversas formas de realizar a coleta e filtração das águas pluviais. Algumas destas formas de coleta e filtração são encontradas no Desenvolvimento de Baixo Impacto (traduzido de *Low Impact Development*), que visam amenizar os efeitos das áreas impermeáveis e da escassez de água. No Desenvolvimento de Baixo Impacto destacam-se os telhados verdes e sistemas de pavimento drenante. Segundo Klenzendorf *et al.* (2012), estas técnicas vêm sendo empregadas no Texas (EUA), trazendo bons resultados em relação a qualidade e quantidade de água aproveitada.

Os pavimentos drenantes podem ser classificados em dois tipos principais: camada porosa de atrito (do inglês *Permeable Friction Course*), que consiste em

uma camada única de asfalto drenante de granulometria *open graded*, e o pavimento drenante constituído de um sistema de camadas drenantes sobrepostas sucessivamente. Essas camadas são apoiadas sobre o solo de fundação (subleito), o qual pode ou não ser impermeabilizado, permitindo a coleta de água pluvial no pavimento ou sua infiltração no subleito (FHWA, 1992).

Neste trabalho, além de analisar a qualidade e quantidade de água possível de ser infiltrada em um pavimento drenante, se tem como objetivo a caracterização mecânica do sistema de camadas de um pavimento drenante, por meio da avaliação da análise tensão-deformação com auxílio de *software*. Assim, é possível se obter a melhor combinação de espessura e material em função da qualidade da água infiltrada, da condutividade hidráulica e do seu desempenho mecânico.

O pavimento asfáltico é submetido a tensões normais de compressão e tração com a passagem dos rodados e pela ação de intempéries, sendo que as camadas asfálticas são as que resistem a praticamente toda tensão de tração. As camadas inferiores são submetidas primariamente à compressão, uma vez que as camadas, em geral, granulares, não resistem à tração. Contudo, no caso dos pavimentos drenantes, como estes são empregados como camada de desgaste, resistindo principalmente à compressão, as camadas inferiores devem promover a resistência à tração do sistema (BERNUCCI *et al.*, 2008; BRANCO *et al.*, 2005; FONTES, 2009).

Para o estudo do estado de tensões nos pavimentos são utilizados métodos empírico-mecanicistas de dimensionamento, os quais se aplicam tanto para camadas cujos materiais têm comportamento linear, quanto não linear. Esta análise é realizada com o auxílio de programas de cálculo automático que, a partir de métodos empírico-mecanicistas, calculam o estado de tensão-deformação de um pavimento. Um destes programas é o Bisar, abordado neste trabalho em sua versão 3.0 (BRANCO *et al.*, 2005; FONTES, 2009).

O aproveitamento da água pluvial é imprescindível à população e à indústria para se garantir água para consumo doméstico e para os mais variados setores da economia. O emprego da técnica de pavimentos drenantes permite a coleta e filtragem da água, tornando-a preparada para um segundo tratamento ou utilização direta em algumas atividades domésticas e industriais. A captação da água pluvial de pavimentos é uma técnica promissora, pois a tendência é as cidades ampliarem sua malha viária a cada dia. O pavimento drenante pode ajudar a amenizar a

escassez dos recursos hídricos e os problemas de drenagem. (KLENZENDORF *et al.*, 2012; LEGRET *et al.*, 1996).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como principal objetivo o estudo da qualidade da água pluvial infiltrada em sistemas multicamadas de pavimentos drenantes, da quantidade possível de ser coletada nestes sistemas para aproveitamento em edificações, e do estado tensão-deformação de estradas constituídas deste tipo de pavimento.

1.2.2 Objetivos específicos

Este trabalho tem por objetivos específicos:

- Elaborar modelos de pavimentos drenantes, constituídos de camada de mistura asfáltica drenante e de subcamadas drenantes, asfálticas ou não, com volume de vazios adequado, que permita a infiltração da água pluvial incidente;
- Elaborar modelos de pavimentos drenantes, constituídos de camada de mistura asfáltica drenante e de subcamadas drenantes que promovam um aumento na qualidade da água pluvial infiltrada;
- Apurar a quantidade de água pluvial infiltrada no sistema de camadas drenantes do pavimento;
- Determinar a qualidade da água pluvial infiltrada nos sistemas de pavimento drenante, sendo esta água oriunda da precipitação incidente diretamente sobre os sistemas;
- Determinar a qualidade da água de escoamento superficial de estradas da malha municipal de Florianópolis antes e depois de ser infiltrada no sistema de pavimento drenante;
- Analisar o estado tensão-deformação dos sistemas de camadas drenantes por meio de simulação computacional;

- Testar diferentes composições de camadas do pavimento drenante em termos de espessura e material. Assim, se torna possível realizar a análise do desempenho do pavimento quanto à filtragem, infiltração e resistência mecânica.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho foi dividido em cinco capítulos. O capítulo 1 introduz ao leitor o tema sobre o aproveitamento da água pluvial e do uso de pavimentos drenantes como técnica de filtragem e captação dessas águas.

No capítulo 2 são apresentados conceitos necessários para a compreensão da temática do trabalho e de seus objetivos. Neste capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica que introduz os tipos de sistemas de pavimentos drenantes e seu potencial de filtragem de poluentes. Neste capítulo também foi abordado o comportamento mecânico de um pavimento e o programa Bisar, para análise tensão-deformação por meio de método empírico-mecanicista.

No capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados na pesquisa e o método empregado. O capítulo 3 é disposto em itens e subitens que facilitam a leitura e compreensão do seu conteúdo, sendo dividido nos seguintes tópicos principais: placas asfálticas, sistemas de camadas drenantes, análise quantitativa, qualitativa e análise tensão-deformação.

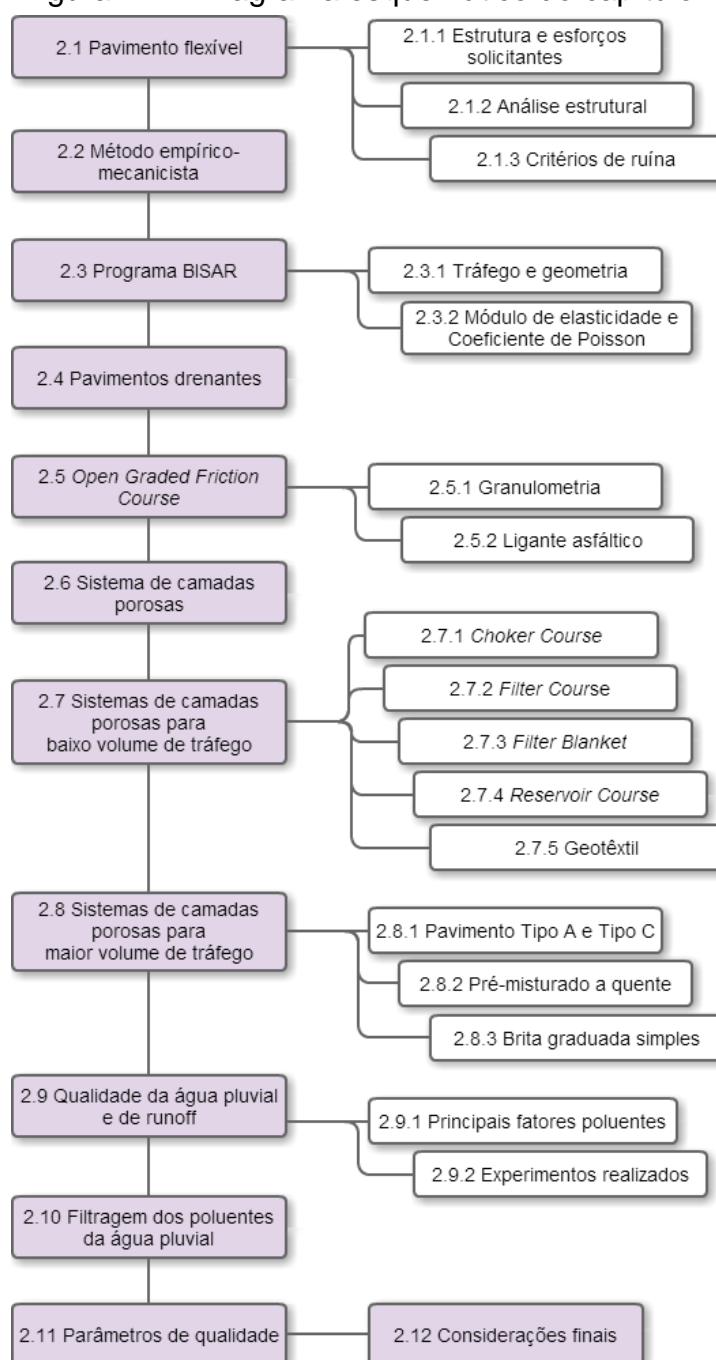
No capítulo 4 são apresentados os resultados do trabalho. Foram dispostos de maneira semelhante ao capítulo 3, contudo, estruturados de modo a facilitar a visualização dos dados. Foram organizados por desempenho dos sistemas quanto à filtragem da água de precipitação e da água do *runoff* antes e depois da lavagem dos materiais componentes das camadas.

No capítulo 5 são apresentadas conclusões acerca da pesquisa, limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na Figura 2.1 é mostrado o diagrama esquemático deste capítulo. Inicialmente são apresentados conceitos fundamentais sobre pavimento flexível e sua estrutura, bem como sobre pavimento drenante. O próximo tema abordado é sobre a qualidade da água pluvial captada em pavimentos drenantes, onde são mostrados os principais poluentes e como podem ser filtrados.

Figura 2.1 – Diagrama esquemático do capítulo 2



2.1 Pavimento flexível

O pavimento flexível é a modalidade de pavimento mais empregada no sistema rodoviário brasileiro. O modo rodoviário é o principal utilizado para transporte de produtos da indústria e de passageiros.

O comportamento mecânico de um pavimento flexível, considerado em um modelo elástico (teoria da elasticidade), quando solicitado pelas tensões atuantes é determinado pela rigidez da camada superficial de rolamento e das camadas subjacentes (camadas finitas), bem como pela rigidez (capacidade de suporte) do subleito (camada infinita). O desempenho estrutural do pavimento está relacionado diretamente às características de suas camadas (individualmente) e à interação da combinação de sucessivas camadas (sistema de camadas) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Neste trabalho são estudados pavimentos drenantes constituídos de uma ou mais camadas de misturas asfálticas, combinadas com camadas granulares. A seguir são apresentadas algumas definições acerca do comportamento mecânico e das solicitações mecânicas atuantes em pavimentos flexíveis.

2.1.1 Estrutura do pavimento flexível e esforços solicitantes

O pavimento flexível é constituído de uma ou mais camadas de mistura asfáltica, apoiadas sobre camadas estruturais sobrepostas umas às outras. Estas camadas adjacentes ao revestimento asfáltico são assentadas sobre o solo de fundação (subleito). Em geral, a estrutura de um pavimento flexível é constituída pelas seguintes camadas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (CALTRANS, 2008).

O comportamento mecânico de um pavimento é determinado por uma série de fatores, sendo os principais: ações do tráfego, ações climáticas e a constituição do pavimento. Por constituição do pavimento entende-se o número de camadas construídas, suas espessuras, as características dos materiais empregados, e por fim as características do subleito (camada considerada infinita) (PEREIRA *et al.*, 1999 *apud* FRANCISCO, 2012).

As principais ações climáticas são a precipitação, água do solo¹ e temperatura do ambiente. A temperatura do ambiente determina a temperatura das camadas do pavimento. Isto condiciona a rigidez das camadas asfálticas, pois o ligante (em geral o cimento asfáltico do petróleo – CAP) é um material que tem seu comportamento mecânico dependente da temperatura (susceptibilidade térmica). Por sua vez a água, advinda da precipitação ou do solo de fundação (subleito), quando impregna nas camadas do pavimento, reduz a resistência mecânica das mesmas. Quanto maior for a quantidade de água, menor é a resistência (BERNUCCI *et al.*, 2008; FONTES, 2009).

Em relação à ação do tráfego, durante a passagem do rodado de veículos sobre o pavimento ocorre a repetição de uma variedade de carregamentos (conforme os tipos de eixo e veículos). Estes carregamentos geram esforços solicitantes na camada superficial de rolamento, que são transmitidos, de modo atenuado, às camadas subjacentes do pavimento. Estas solicitações originam um estado bidimensional de tensões, e a repetição das cargas leva à fadiga. O carregamento imposto pelo tráfego e as elevadas temperaturas conduzem ao aparecimento de deformações permanentes não recuperáveis (CALTRANS, 2008; FONTES, 2009).

Os carregamentos oriundos do tráfego são expressos por uma pressão vertical e por uma ação tangencial. A pressão vertical é considerada uniforme e aplicada em uma área circular, enquanto que a ação tangencial é aplicada horizontalmente no plano entre o pneu e o pavimento (corresponde à reação necessária para o veículo se mover e às ações de frenagem). Na Figura 2.2 é mostrado um esquema de um pavimento com as ações atuantes sobre o mesmo, e as tensões solicitantes geradas (BRANCO *et al.*, 2005; VASSOLER *et al.*, 2011).

A Figura 2.2 mostra que cada camada possui determinada espessura e rigidez², sendo que a rigidez é função, sobretudo, do módulo de elasticidade (E) e do coeficiente de *Poisson* (ν). Outro fator determinante ao dimensionamento de pavimentos é a capacidade de suporte do subleito (CBR³). Estes parâmetros

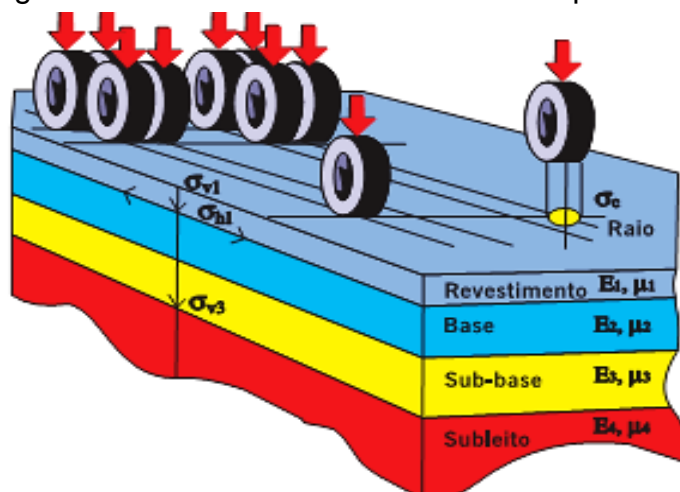
¹ Água do lençol freático e/ou advinda do acúmulo de água nas camadas subjacentes do pavimento devido a um sistema de drenagem ineficiente.

² Rigidez é a capacidade de resistir aos esforços solicitantes sem deformação excessiva.

³ CBR – *California Bearing Ratio* (Índice de Suporte Califórnia).

asseguram que a distribuição de tensões entre as camadas e que as deformações ocorram dentro do intervalo admissível (FRANCISCO, 2012; FONTES, 2009).

Figura 2.2 – Sistema de camadas de um pavimento



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

2.1.2 Análise estrutural do pavimento flexível

Na Figura 2.3 observa-se que o pavimento é submetido a tensões normais de compressão (σ_z) e de tração⁴ (σ_t). As camadas asfálticas são as que resistem praticamente a todo o esforço de tração. As camadas inferiores são em geral submetidas à compressão e, dependendo do material empregado, também à tração (FONTES, 2009).

Na Figura 2.4 (a) é mostrada a distribuição típica de tensões verticais devido à passagem de uma roda de um veículo. A superfície de contato entre o pneu e o pavimento assume, aproximadamente, uma forma elíptica, cujas dimensões dependem do tipo de pneu, da pressão de enchimento e do carregamento do veículo. Na Figura 2.4 (b) é mostrada a deflexão de um pavimento, que varia conforme as características de deformabilidade de seus materiais, e as tensões de tração resultantes nas camadas asfálticas (BRANCO *et al.*, 2005; MOTTA *et al.*, 2006).

⁴ Tensões devidas à flexão da camada de revestimento.

Figura 2.3 – Tensões no pavimento

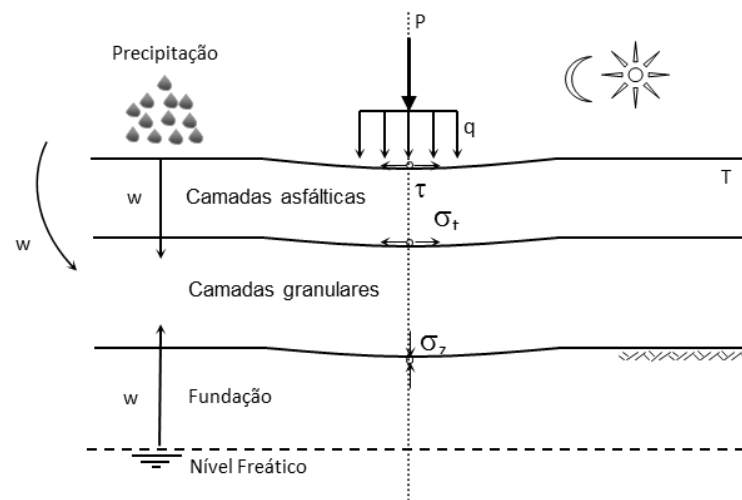
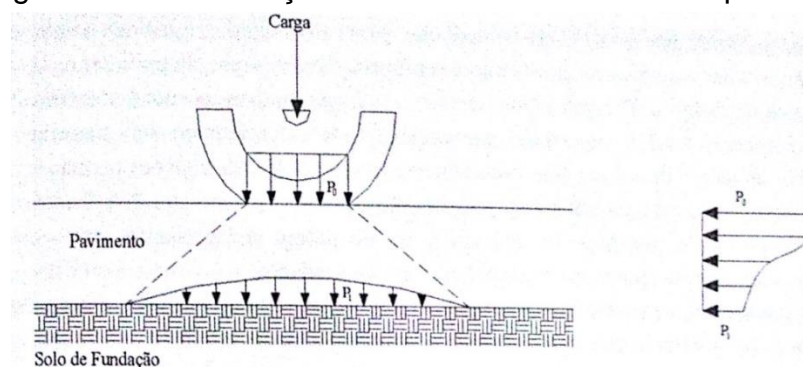
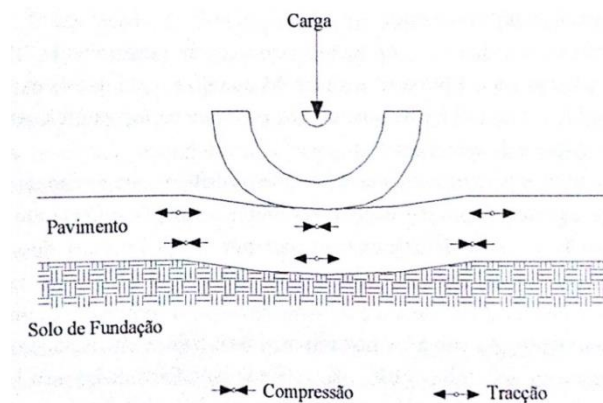
Fonte: Branco *et al.*, 2005

Figura 2.4 – Distribuição de tensões e deflexões no pavimento



(a) distribuição de tensões verticais devido à passagem das rodas



(b) efeito esquemático da deflexão no pavimento sob a ação do tráfego

Fonte: Branco *et al.* (2005)

No emprego sucessivo, por exemplo, de duas camadas de misturas asfálticas, estas devem ser ligadas por uma fina camada de ligante (emulsões betuminosas) para se obter um efeito de “colagem” entre camadas. Deste modo, as camadas se comportam como uma única camada, ou seja, as tensões de tração

atingem seu valor máximo na camada subjacente à de desgaste, em seu lado inferior. No caso do pavimento drenante, para um tráfego moderado a alto, é a camada inferior que resiste à fadiga (tensões de tração), pois a primeira camada é projetada para resistir somente à deformação permanente (camada de desgaste). A tensão máxima vertical (tensão de compressão) ocorre na parte superior da camada de desgaste (BRANCO *et al.*, 2005; GUIMARÃES, 2013).

Para o caso de as camadas de mistura asfáltica não possuírem camada de ligação, em cada camada desenvolvem-se tensões máximas de compressão na face superior e tensões máximas de tração na face inferior (BRANCO *et al.*, 2005).

2.1.3 Critérios de ruína do pavimento flexível

Os principais critérios que definem a ruína de um pavimento são relacionados à fadiga e à deformação permanente. A fadiga de um material pode ser expressa por uma lei de fadiga. Esta lei relaciona o valor da deformação ocorrida para um carregamento com o número de vezes que este carregamento pode ser repetido até a ruína do material (BODIN *et al.*, 2002; GOSSAIN *et al.*, 2005).

A degradação da deformação permanente ocorre devido à sucessiva aplicação de cargas sobre o pavimento, onde deformações permanentes (não resilientes) se acumulam no topo das camadas asfálticas. Em alguns países, como Portugal, este fenômeno é um critério de ruína do pavimento, considerado nos métodos de dimensionamento e de análise de tensões (BRANCO *et al.*, 2005).

O fenômeno da deformação permanente pode ser expresso por uma lei de deformação permanente, que associa a deformação que ocorre no topo da camada de determinado material ao número de vezes que um carregamento pode ser repetido até a ruína do material (BRANCO *et al.*, 2005).

No Brasil, a partir da tensão e ou deformação (deflexão) causados no pavimento a cada passagem do eixo-padrão se determina, através das leis de fadiga (critério de ruína de um pavimento flexível no Brasil quando da utilização de metodologia empírico-mecanicista), o número máximo (admissível) de passagens do eixo-padrão (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O eixo padrão é um eixo simples de roda dupla, o qual é empregado pela AAHSTO e foi aderido por países como Portugal e Brasil (USACE - Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos). O eixo simples possui um rodado em

cada extremo, afastados por determinada distância, sendo que cada pneu possui uma área de contato (definida pelo raio) e uma pressão de contato com o pavimento (pressão de enchimento dos pneus) (BRANCO *et al.*, 2005; DNIT, 2006).

O número máximo (admissível) de passagens do eixo-padrão é comparado com o número de eixos-padrão previstos para a vida útil do pavimento. Se o número de passagens durante a vida útil for semelhante e um pouco inferior ao número admissível o pavimento está bem dimensionando. Caso seja muito inferior (menos de 80% do valor admissível), considera-se que o pavimento está superdimensionado; quando for superior, a estrutura está subdimensionada (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.2 Método empírico-mecanicista de análise do estado de tensão-deformação

Os métodos empírico-mecanicistas de dimensionamento de pavimento aplicam-se tanto para camadas cujos materiais têm comportamento linear, quanto não linear, de acordo com a teoria da elasticidade. Há casos em que embora o material tenha comportamento não linear se admite, para fins de cálculo, que seja linear (FONTES, 2009).

De acordo com a SHELL (1998), algumas considerações para uma análise linear, baseadas na teoria da elasticidade, são adotadas nos métodos empírico-mecanicistas:

- As propriedades do material de determinada camada são homogêneas, considerando-se cada camada como isotrópica;
- Cada camada, exceto a última, tem uma espessura finita;
- Cada camada tem uma dimensão infinita na direção transversal;
- As camadas podem ser consideradas solidárias entre si (fricção total), ou não;
- A relação tensão-deformação, e, portanto o comportamento mecânico dos materiais das camadas, é caracterizado por duas constantes: o módulo de deformabilidade e o coeficiente de *Poisson*.

No caso de pavimentos flexíveis com camadas asfálticas finas (espessuras inferiores a 15 cm), e com grandes espessuras de materiais granulares (materiais, de modo geral, com comportamento mecânico não linear), o comportamento global do pavimento é regido pelas camadas granulares (relação não linear) (BRANCO *et al.*, 2005).

Os métodos empírico-mecanicistas consideram que o comportamento global do pavimento é regido pelas camadas asfálticas quando estas são mais espessas e as granulares mais finas. Deste modo, a aproximação do estado de tensão-deformação por meio de métodos empírico-mecanicistas para sistemas de pavimento, onde as camadas granulares têm maiores espessuras, pode ser menos representativa (BRANCO *et al.*, 2005).

Existem alguns programas computacionais que, a partir das considerações citadas anteriormente, calculam o estado tensão-deformação de um pavimento. Alguns dos programas mais conhecidos são o ELSYM5, criado pela Universidade da Califórnia, e o Bisar, da empresa petrolífera *Shell*.

2.3 Programa Bisar

O programa Bisar (*Bitumen Stress Analysis in Roads*), versão 3.0, determina o módulo de deformabilidade (caso de retroanálise) das camadas de um pavimento, bem como seu estado de tensão-deformação (deflexões e deformações de tração). Este programa de cálculo automático tem como base o modelo de *Burmister*, que considera o pavimento composto por um conjunto de camadas horizontais, contínuas, homogêneas, isotrópicas e elástico-lineares. Estas camadas, por sua vez, são assentes sobre o subleito (considerado um meio semi-infinito). O modelo de *Burmister* também considera que sobre a superfície das camadas atua uma força vertical distribuída uniformemente em uma área circular (ALVES, 2007).

O Bisar também permite que se faça uma análise considerando que as condições de contato entre as interfaces das camadas podem variar, desde uma perfeita aderência (efeito de camadas “coladas” umas às outras) até um estado considerado sem atrito (camadas “não coladas”), deslizando umas sobre as outras (ALVES, 2007).

Existem diversos trabalhos e pesquisas que fizeram uso do Bisar. Francisco (2012) empregou o programa Bisar, versão 3.0, para a determinação do módulo de elasticidade de camadas. O módulo de elasticidade pode ser determinado por meio da retroanálise. Neste método, se realiza um processo iterativo e de comparação de deslocamentos reais em campo com os deslocamentos obtidos em um programa de simulação até que se atinja uma convergência das bacias de deformação estudadas (RIBAS, 2013).

No trabalho de Francisco (2012), através das medidas com Viga Benkelman⁵, foram determinadas as deflexões em nove trechos de uma estrada da cidade de Bragança, originando as bacias de deflexão dos trechos. Com o auxílio do programa de cálculo automático Bisar 3.0 foram determinados, por retroanálise, os módulos de elasticidade das camadas do pavimento através de um processo iterativo. O módulo de elasticidade foi definido quando as deflexões obtidas por meio do Bisar se assemelhavam às bacias de deflexões encontradas *in situ*. Uma vez que os valores apurados para os módulos foram compatíveis com os encontrados na literatura, a eficiência do Bisar foi verificada.

No programa de cálculo automático, Bisar, as principais características definidas são: geometria do rodado (distância dos eixos, carga do pneu), carregamento, espessuras das camadas do pavimento, seus módulos de elasticidade e coeficientes de *Poisson*. A partir da definição das ações no pavimento e de suas características é possível se calcular as tensões e deformações atuantes em diversos pontos do pavimento (BRANCO *et al.*, 2005).

Para se realizar a análise tensão-deformação por meio de um método empírico-mecanicista é necessária apuração de algumas características dos materiais componentes do pavimento, como o módulo de rigidez e o coeficiente de *Poisson*. A seguir são indicadas as características que devem ser conhecidas para o uso do programa Bisar (FRANCISCO, 2012).

2.3.1 Tráfego e geometria

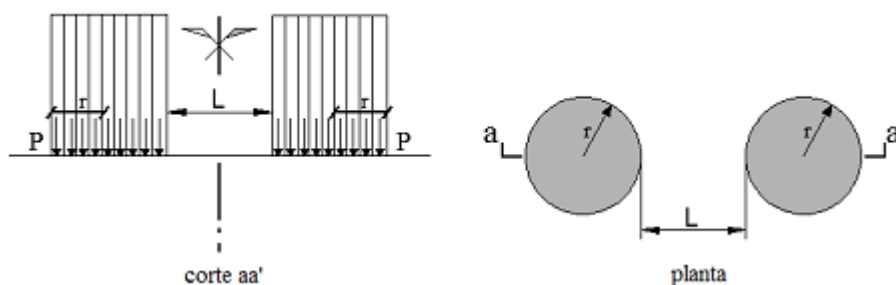
O tráfego é constituído por vários tipos de veículos e diversos tipos de carga. As tensões e deformações ocasionadas pelo tráfego atuante são fatores determinantes do dimensionamento do pavimento. A vida útil de um pavimento depende do tipo de veículo, da carga e do número de passagens dos veículos, sendo considerados apenas os comerciais. A diversidade de tipos de veículos e de cargas pode ser representada através de sua equivalência em valor de eixo padrão (DNIT, 2006).

A distribuição da superfície de contato sobre o pavimento é mostrada na Figura 2.5. Conforme indicado pelo método de dimensionamento de pavimentos da

⁵ Equipamento que permite realizar medições deflectométricas de um pavimento.

Shell, para um eixo-padrão de 80 kN a distância “L” e o raio “r” têm o valor igual a 105 mm, e a pressão de enchimento dos pneus é de 0,6 MPa. É considerado que a carga de 80 kN se distribui igualmente entre os quatro pneus, sendo uma carga de 20 kN para cada rodado (DNIT, 2006).

Figura 2.5 – Esquema genérico da ação de um eixo-padrão



Fonte: Francisco (2012).

Na Tabela 2.1 é mostrada a classificação de vias em função do tráfego, elaborada pela Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP), apresentada no documento IP-02/2004.

Tabela 2.1 – Classificação das vias de acordo a PMSP

Função predominante	Tráfego previsto	Vida de projeto	Volume de tráfego ¹ (por dia)		Número ² característico N
			Veículo Leve	Caminhão/Ônibus	
Via local	Leve	10	100 a 400	4 a 20	1×10^5
Via Local e Coletora	Médio	10	401 a 1500	21 a 100	5×10^5
Vias Coletoras e Estruturais	Meio pesado	10	1501 a 5000	101 a 300	2×10^6
	Pesado	12	5001 a 10000	301 a 1000	2×10^7
	Muito pesado	12	>10000	1001 a 2000	5×10^7
Faixa Exclusiva de Ônibus	Volume médio	12	-	< 500	1×10^7
	Volume pesado	12	-	> 500	5×10^7

¹ Número de automóveis por faixa de tráfego.

² Número de repetição de solicitações do eixo padrão simples (80kN) na vida de projeto.

Fonte: Adaptado de PMSP (2004)

2.3.2 Módulo de elasticidade e Coeficiente de Poisson

Em um sistema de pavimento todas as camadas são dotadas de um módulo de elasticidade (ou módulo dinâmico) que expressa sua rigidez e capacidade de resistir às tensões solicitantes. É comum, para efeitos práticos, se considerar o

módulo de elasticidade numericamente igual ao dinâmico. De acordo com Soares *et al.* (2005), isto é comum quando se assume que as misturas asfálticas e camadas granulares se comportam de maneira elástica linear.

Segundo Branco *et al.* (2005), os módulos de resiliência do subleito de um pavimento variam entre 30 e 150 MPa, de acordo com o tipo de solo. A rigidez de camadas granulares é expressa usualmente por um módulo de resiliência (equivalente ao módulo de elasticidade). No caso da brita graduada simples este módulo pode variar de 100 a 400 MPa, o que depende da compactação, da graduação, da tensão de confinamento, do tráfego incidente e da natureza dos agregados.

De acordo com Branco *et al.* (2005), alguns valores típicos de módulo de elasticidade para camadas asfálticas são entre 2000 e 8000 MPa à temperatura de uso de 25°C. Para misturas asfálticas modificadas por polímero se assumem valores mais baixos e para misturas convencionais mais altos. Para as misturas asfálticas utiliza-se o módulo dinâmico (norma do módulo complexo), determinado em ensaios de flexão alternada no domínio da frequência.

Existe uma vasta variedade de módulos empregados nos materiais da pavimentação asfáltica. Bernucci *et al.* (2008) assumem que para solo do tipo arenoso fino laterítico, mistura de argila e areia, o módulo de resiliência varia entre 100 e 500 MPa. Solos de comportamento laterítico podem ser empregados para todos os volumes de tráfego. Em São Paulo são mais de 8000 Km de rodovias de baixo volume de tráfego com este material em sua composição. Nas Tabelas 2.2 e 2.3 são mostrados alguns módulos de deformabilidade usuais em camadas de pavimento.

Tabela 2.2 – Módulos de elasticidade de misturas investigadas no Brasil

Mistura asfáltica/ Ligante	Módulo de resiliência a 25°C (MPa)
Concreto asfáltico CAP 30/45	3000 a 5200
Concreto asfáltico CAP 50/60	3000 a 4500
Concreto asfáltico CAP 85/100	1400 a 1700
Asfalto borracha	2300 a 2500

Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.*, (2008)

Tabela 2.3 – Módulos de elasticidade usuais

Camada	Módulo de deformabilidade (MPa)
Revestimento asfáltico trincado	5000 a 6000 (T=20°C)
Base granular britada	150 a 300
Sub-base granular britada	100 a 200
Solos selecionados	60 a 100

Fonte: Adaptado de EP-JAE, 1995 *apud* Francisco (2012)

Segundo Bernucci *et al.* (2008), misturas asfálticas de módulo de elasticidade elevado são empregadas usualmente à camada de base, proporcionando maior resistência à estrutura do pavimento. Estas misturas asfálticas têm módulo variando entre 12000 e 20000 MPa.

De acordo com Schaus (2007), para as misturas asfálticas drenantes PG 64-28 e 70-28, o módulo dinâmico deste tipo de mistura pode variar 700 a aproximadamente 3400 MPa à temperatura de 21,1°C. Na Tabela 2.4 são mostrados alguns valores do módulo dinâmico.

Tabela 2.4– Módulo dinâmico de algumas misturas asfálticas drenantes

Ligante	Frequência (Hz)	Módulo dinâmico a 21,1°C (MPa)
PG 64-28	25,0	3370
	10,0	2580
	5,0	2100
	1,0	1300
	0,5	1100
	0,1	750
PG 64-29	25,0	4350
	10,0	3250
	5,0	2600
	1,0	1550
	0,5	1250
	0,1	800

Fonte: Adaptado de Schaus (2007)

Para o caso de misturas asfálticas drenantes modificadas por polímero (borracha moída) o módulo dinâmico pode ser mais baixo. Conforme Wang *et al.* (2011), para uma mistura realizada com ligante do tipo PG 76-22 foi encontrado um módulo no valor máximo de 4141 MPa para uma temperatura de 4°C e frequência de 25 Hz, o que é metade do valor do módulo de um asfalto convencional. Ao considerar uma temperatura de 45°C e uma frequência menor que 1 Hz o módulo decresce (valores não foram indicados).

Segundo Wang *et al.* (2011), para uma camada *Open Graded Friction Course* (OGFC) o módulo dinâmico varia aproximadamente entre 4700 e 7500 MPa, de acordo com a temperatura, frequência e velocidade do tráfego considerada. Também foi indicado que camadas de maiores espessuras possuem maiores módulos.

Uma estrutura de pavimento drenante abordada em Wang *et al.* (2011), é composta por uma camada de base granular de 15 cm com um módulo resiliente de aproximadamente 200 MPa. Para esta estrutura foi considerado um solo de fundação (subleito) com módulo resiliente de aproximadamente 100 MPa.

Em relação ao subleito, os valores mais usuais para o coeficiente de *Poisson* variam entre 0,35 e 0,45. Para o caso de camadas granulares os coeficientes variam entre 0,30 e 0,40 (CLAESSEN *et al.*, 1977 *apud* BRANCO *et al.*, 2005). No caso da camada asfáltica se adota usualmente um coeficiente de *Poisson* de 0,35 (Brown *et al.*, 1985 *apud* BRANCO *et al.*, 2005).

Segundo Bernucci *et al.* (2008), o coeficiente de *Poisson* pode ser considerado independente do tipo de carregamento, variando somente com a temperatura. O seu valor varia entre 0,35 (baixas temperaturas) e 0,50 (altas temperaturas). No Brasil, o usual é se assumir o valor de 0,35 para camadas asfálticas.

2.4 Pavimentos drenantes

Um pavimento drenante é aquele que permite a passagem de água em seus vazios comunicantes. Este pode ser constituído de uma única camada drenante sobreposta a um conjunto de camadas estruturais impermeáveis, ou até mesmo por várias camadas drenantes assentadas diretamente sobre o subleito.

O *Permeable Friction Course* denominado no Brasil, camada porosa de atrito (CPA), constitui o tipo mais simples de pavimento drenante. Esta camada de asfalto drenante tem espessura variável entre 2,5 e 5,0 cm, sendo sobreposta a um sistema de camadas impermeáveis, conforme Klenzendorf *et al.* (2012).

Segundo Caltrans (2006), além de *Permeable Friction Course*, existe outra designação para esta camada porosa de atrito, também em inglês, *Open Graded Friction Course*. Ambas as referências são empregadas neste trabalho.

De acordo com FHWA (1992), um pavimento drenante também pode ser constituído de um sistema de camadas drenantes, sendo geralmente uma camada drenante superficial de revestimento e camadas subjacentes drenantes de base e sub-base. A camada drenante de asfalto (camada superficial) atua como uma camada de desgaste.

Conforme FHWA (2007), uma camada asfáltica drenante é caracterizada pela sua condutividade hidráulica ou vazão, volume de vazios, espessura da camada e granulometria. Os principais fatores considerados no dimensionamento de pavimentos drenantes são a precipitação da região, as características de permeabilidade do asfalto drenante (granulometria, volume de vazios interconectados), o suporte e permeabilidade subleito e o nível do lençol freático (ARAÚJO *et al.*, 2000).

A capacidade de drenagem de um pavimento está diretamente ligada ao seu volume de vazios interconectados. Assim, se deve empregar granulometrias abertas que garantam a drenagem da água nas camadas drenantes, atendendo às previsões de precipitação no local de implantação da rodovia (SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2006).

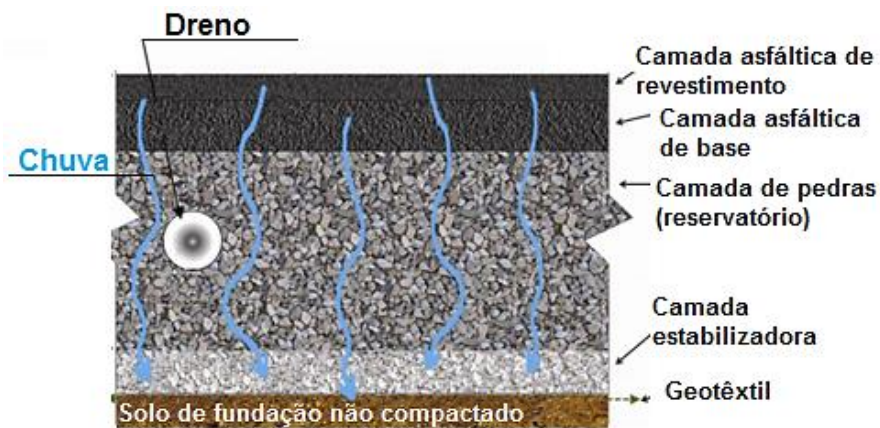
O pavimento drenante reduz consideravelmente o escoamento superficial de uma região. O escoamento superficial também é conhecido por *runoff*, o qual indica o deslocamento de água sobre a superfície da terra, e varia de acordo com a região estudada. O escoamento superficial é expresso pelo coeficiente de escoamento. Os pavimentos drenantes podem reduzir o valor deste coeficiente assemelhando-o aos valores de zonas de mata e campos naturais, que possuem coeficientes bem menores do que áreas urbanizadas (quanto mais urbanizada a região maior é o escoamento superficial) (MARCHIONI, 2014).

O pavimento drenante proporciona um aumento na qualidade da água pluvial infiltrada, pois é capaz de filtrar alguns tipos de poluentes (ferro, zinco, amônia, alumínio, etc.) e de reduzir a quantidade de sólidos suspensos e metais na água pluvial (KLENZENDORF *et al.*, 2012).

Para os Sistemas de Drenagem Sustentáveis (*Sustainable Drainage Systems*), um conjunto de técnicas fundamentadas em ideais sustentáveis que visam a drenagem da água pluvial, sua captação e aproveitamento, o principal objetivo de um sistema de pavimento drenante não consiste somente na coleta da água pluvial, mas também em seu tratamento. Os pavimentos drenantes também

promovem maior infiltração dos escoamentos superficiais no subsolo, o que recarrega os mananciais subterrâneos. Na Figura 2.6 é mostrado um conjunto de camadas típico de um pavimento drenante e na Figura 2.7 é mostrado um exemplo de uso de pavimento drenante em condomínio horizontal (SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2006).

Figura 2.6 – Sistema típico de camadas de um pavimento drenante



Fonte: Adaptado de Hub (2015)

Figura 2.7 – Pavimento drenante em condomínio horizontal



Fonte: Taydal (2015)

2.5 Open Graded Friction Course

A *Open Graded Friction Course*, ou camada drenante de atrito, é uma mistura asfáltica drenante constituída de agregados minerais de granulometria uniforme, ou seja, uma granulometria formada com agregados praticamente do mesmo tamanho. A *Open Graded Friction Course* possui pouco ou nenhum agregado fino, o que garante os espaços vazios que conferem a sua propriedade de material drenante (CALTRANS, 2006).

Esta camada tem uma vida útil que varia entre 2 e 10 anos (em geral de 4 a 6 anos), a qual está diretamente ligada aos tipos de intempéries e ao volume de tráfego (CALTRANS, 2007).

A *Open Graded Friction Course* promove a drenagem da água superficial e é utilizada como camada de desgaste (pelo tráfego), protegendo as camadas subjacentes do pavimento. Esta camada denominada “sacrifício” proporciona maior segurança ao usuário aumentando o contato entre o pneu e o pavimento, pois o pavimento drenante remove a água da superfície sem deixá-la acumular na estrada. Assim, se reduz o efeito de *Spray* e *Splash*⁶, bem como o da hidroplanagem.

A *Open Graded Friction Course* também reduz o ruído gerado pela passagem do rodado do veículo de 3 a 5 dB em relação a uma camada de asfalto de granulometria densa (CALTRANS, 2006).

2.5.1 Granulometria

As misturas asfálticas de pavimentos drenantes são compostas de granulometria *open graded*, ou em português, granulometria aberta. Neste trabalho é utilizado o termo *open graded* para a mistura asfáltica drenante. Esta granulometria proporciona uma estrutura drenante cheia de vazios. A granulometria *open graded*, além de variar de acordo com o tipo de agregado e com as características da mistura, varia com autores e departamentos (órgãos) de transporte. Deste modo, cada país ou cada estado, possui sua própria granulometria *open graded* para os pavimentos drenantes (CALTRANS, 2007).

⁶*Spray* é uma “cortina” d’água e *Splash* é uma “nuvem” d’água, ambos resultantes da passagem de veículos sobre pontos do pavimento onde há acumulação de água pluvial. Estes efeitos resultam em perda de visibilidade do motorista.

Segundo Caltrans (2006), a granulometria composta de agregados graúdos é a que proporciona maior volume de vazios e, inclusive, aumenta a resistência à deformação permanente no caso de pavimentos drenantes. O volume de vazios de uma camada asfáltica drenante varia entre 15 e 25%.

De acordo com FHWA (2007), outro fator determinante da capacidade de drenagem de um pavimento é o percentual de finos da mistura asfáltica. Ensaio realizados na Flórida, EUA, indicaram que as misturas com menor percentual de agregados finos (4,75 mm) têm as maiores condutibilidades hidráulicas.

No entanto, conforme FHWA (2007), há estudos que indicam um bom desempenho de misturas drenantes com mais de 20% de agregado fino passante na peneira de 4,75 mm. Neste caso se realiza adição de polímeros nas misturas asfálticas, o que aprimora as suas propriedades físicas e mecânicas, proporcionando um volume de vazios adequado para um pavimento drenante.

O percentual de finos afeta diretamente a macro e microtextura de uma camada de revestimento asfáltico. As misturas de granulometria densa têm sua macrotextura promovida pelo agregado graúdo e a microtextura pelo agregado fino. Nas misturas asfálticas drenantes, onde há pouca quantidade de agregado miúdo, o próprio agregado graúdo deve promover a micro e a macrotextura adequada. Os agregados devem ser graúdos, duros, resistentes à abrasão, à deformação e ao entupimento, e também devem possuir grande contato entre si (contato agregado-agregado), o que garante um bom desempenho mecânico da mistura (CALTRANS, 2006). Na Figura 2.8 é mostrada a diferença de textura entre uma mistura de granulometria aberta do tipo *Open Graded* e uma de granulometria densa.

Figura 2.8 - Textura aparente típica de uma mistura de granulometria *open graded*



a) Granulometria densa

b) Granulometria aberta

Fonte: WSDOT (2015)

Uma vez que a camada asfáltica drenante *Open Graded Friction Course* não tem como principal objetivo resistir primordialmente às solicitações de tensão decorrentes do tráfego (principalmente tensões de tração) ou de intempéries, as camadas subjacentes devem ser preparadas de modo a resistirem aos esforços solicitantes (CALTRANS, 2006).

As misturas asfálticas drenantes são projetadas para resistência à deformação permanente, uma vez que atuam como camadas de “sacrifício”. Pelo elevado volume de vazios, não são projetadas para resistir a esforços de fadiga.

A granulometria requerida pelo Departamento de Transporte da Califórnia, em inglês *California Department of Transportation* (Caltrans), para misturas *Open Graded Friction Course* está presente no *Standard Special Provisions* (CALTRANS, 2007).

De acordo com Caltrans (2006), as principais características que devem ser garantidas em uma camada asfáltica drenante são a macrotextura e a capacidade interna de drenagem. Os agregados graúdos utilizados pelo Caltrans são 3/8 (9,5 mm) e 1/2 (12,7 mm) de polegada. É recomendado um percentual máximo de agregado fino passante na peneira de número quatro (4,88 mm) de 15,0%.

A granulometria de um *Open Graded Friction Course* também depende de dois fatores: a espessura da camada e a temperatura de serviço. Por exemplo, para temperaturas atmosféricas maiores que 71°F (aproximadamente 21°C) durante a confecção da camada de rolamento, se utilizam agregados de graduação 3/8 (9,5 mm) e 1/2 (12,7 mm) de polegada. Também, comumente se utiliza uma granulometria de 1/2 de polegada para uma camada de espessura de até 3,0 cm (SCDOT, 2012).

Outro tipo de mistura asfáltica drenante é a *large Stone* (agregado grande), que proporciona uma mistura mais durável e forte que a *open Graded Friction Course*. Isto se atribui ao fato de o atrito entre os agregados ser maior para granulometrias mais abertas, pois há maior intertravamento. A mistura de *large stone* possui agregados de tamanhos máximos entre 25,0 e 63,0 mm (SCDOT, 2012).

Na Tabela 2.5 são mostradas características típicas de alguns pavimentos drenantes. Nas Tabelas 2.6 a 2.8 são mostradas algumas faixas granulométricas para misturas *open graded* encontradas na literatura, inclusive faixas brasileiras.

Tabela 2.5 – Características de pavimentos drenantes típicos

Local	Condutividade Hidráulica	Volume de vazios (%)	Espessura da camada (mm)	Tamanho máximo dos agregados (mm)
Alemanha	17,0 a 40,0 mm/h	19,0	40,0	-
Geórgia (EUA)	100,0 mm/dia	10,0 a 20,0	30,0	12,5,0
Florida (EUA)	1,2 cm/s	18,0 a 22,0	35,0	10,0

Fonte: Adaptado de FHWA (2007)

Tabela 2.6 – Faixa granulométrica recomendada pela *Federal Highway Administration (FHWA)*

Peneira		Percentual passante (%)
Polegadas (Pol)	Milímetros (mm)	
3/4	19,0	-
1/2	12,5	100
3/8	9,5	95 a 100
Nº 4	4,8	30 a 50
Nº 8	2,4	5 a 15
Nº 200	0,075	2 a 5

Fonte: Adaptado de Faghri (2002)

Tabela 2.7 – Faixa granulométrica recomendada pelo Caltrans para agregado máximo de 12,5 mm

Peneira		Percentual passante (%)	Tolerâncias (±)
Polegadas (Pol)	Milímetros (mm)		
3/4	19,0	100	-
1/2	12,5	95 a 100	6
3/8	9,5	78 a 89	6
Nº 4	4,8	28 a 37	7
Nº 8	2,4	7 a 18	5
Nº 30	0,6	0 a 10	4
Nº 200	0,075	0 a 3	2

Fonte: Adaptado de Caltrans (2007)

Tabela 2.8 – Faixas granulométricas recomendadas pelo DNER (ES 386/99)

Peneira de malha quadrada		Faixas					
		Percentagem passante, em massa					
ABNT	Abertura mm	I	II	III	IV	V	Tol. (±)
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

Fonte: Adaptado de DNER (1999)

2.5.2 Ligante asfáltico

São comumente utilizados dois tipos de ligante nos Estados Unidos da América: *softer binder* e *harder binder*. O *softer binder* proporciona um aumento da durabilidade da camada asfáltica, sendo o mais recomendado para pavimentos drenantes. Sobre a concentração de ligante, segundo Caltrans (2006), a mesma varia de acordo com a superfície específica do agregado graúdo e com as equações empregadas (baseadas em resultados encontrados em campo) para ajustar o valor da concentração.

Os pavimentos drenantes apresentam resistência mecânica muito suscetível ao teor de ligante. Isto ocorre em virtude de sua grande porosidade, característica mais proeminente do pavimento drenante, reduzir a coesão entre as partículas e o ligante que as envolve. Uma falha no teor de ligante (erro de dosagem), em uma mistura asfáltica drenante, comumente implica falta de aderência agregado-ligante, causando desagregamento (compromete a estrutura da camada asfáltica). O teor de ligante depende não somente do volume de vazios, mas também do tipo de agregado e sua absorção de ligante (SCDOT, 2012).

Para os pavimentos drenantes é fundamental que a concentração de ligante asfáltico permita a existência de vazios interligados entre os agregados, garantindo a drenabilidade da mistura asfáltica. A partir de cerca de 18% de volume de vazios se obtém boa drenabilidade, enquanto que para índices de vazios abaixo de 15% a drenabilidade é comprometida (CALTRANS, 2006).

Em países desenvolvidos, como os Estados Unidos da América, todos os Departamentos de Transporte, em geral, utilizam ligantes com desempenho superior ao dos ligantes típicos para pavimentos drenantes. Isto porque a especificação adotada de classificação dos ligantes é preconizada pela metodologia SUPERPAVE® (*Superior Performing Asphalt Pavements*), cujos asfaltos recebem a denominação PG (*Performance Grading*) (SCDOT, 2012; UNHSC, 2009).

Na Tabela 2.9 são mostrados teor de ligante e volume de vazios, comumente recomendados, de sete Departamentos de Transporte dos Estados Unidos da América.

Tabela 2.9 – Teor ótimo de ligante e volume de vazios

Departamento de transporte	Teor de ligante (%)	Volume de vazios (%)
New Mexico DOT	6,5	-
Georgia DOT	-	≥ 18
North Carolina DOT	-	≥ 18
Mississippi DOT	-	≥ 15
Missouri DOT	≥ 6,0	≥ 18
Nebraska DOR	5,8 a 6,8	18 ± 1
Virginia DOT	5,75 a 7,25	≥ 16

i - DOT - Department of Transportation

ii- DOR -Department of Roads

Fonte: Adaptado de SCDOT (2012)

2.5.3 Ligante asfáltico modificado por borracha de pneu moída

A borracha triturada de pneus pode ser incorporada às misturas asfálticas por meio de dois métodos: processo seco e processo úmido. No processo úmido, a borracha é triturada até a forma de partículas finas as quais são adicionadas ao asfalto aquecido. O processo úmido é dividido em sistema *continuous blending* (não estocável) e sistema *terminal blending* (estocável). No *terminal blending* obtém-se um ligante estável e homogêneo, sendo que sua fabricação em terminal especial permite um melhor controle de qualidade (FONTES, 2009).

A adição de polímero (borracha) ao asfalto, que afeta diretamente a viscosidade do ligante, aumenta a resistência do ligante de fluir por entre os agregados, o que evita o escorrimento do ligante até o fundo da mistura. Isto ocorre devido às propriedades elastoméricas da borracha aumentarem o poder de aglutinação do ligante, que por sua vez aprimora as propriedades mecânicas da mistura asfáltica. Assim, a vida de serviço do pavimento é aumentada, pois a durabilidade da mistura asfáltica é função não somente da espessura da camada, mas também da viscosidade inicial do ligante (CALTRANS, 2006, 2007).

O emprego da borracha possibilita a construção de camadas mais finas de rolamento, pois misturas asfálticas modificadas de granulometria aberta têm menos suscetibilidade térmica e resistem mais ao fenômeno da fadiga (FONTES, 2009).

As misturas drenantes também requerem um ligante mais resistente devido ao fenômeno da oxidação, um dos processos de envelhecimento do ligante. Tendo em vista que o pavimento drenante possui alta porosidade, a entrada de ar é contínua, o que acelera o envelhecimento, reduzindo sua vida útil. O emprego de um

agente polimérico também aumenta a resistência à abrasão da mistura (CALTRANS, 2007).

Em seus manuais, o Caltrans (2006) não faz considerações aprofundadas acerca da capacidade estrutural do pavimento drenante, pois estas camadas são projetadas primeiramente como camadas de “sacrifício”, que visam a drenagem de águas pluviais.

Sobre o teor de ligante, segundo Caltrans (2007), a mesma varia de 1,0 a 2,0%, de acordo com dados empíricos de ensaios *in situ* de misturas semelhantes. Uma vez que as propriedades aglutinantes do ligante modificado são melhoradas pela borracha, o teor de ligante é menor do que para ligantes puros não-modificados.

Para outros autores o teor de ligante modificado em misturas drenantes assume valores iguais ou até maiores do que os de ligantes convencionais. Segundo Dumke (2005), para asfaltos modificados por polímero (borracha moída de pneu a 20,0% em relação ao ligante) o teor de ligante varia entre 3,0 e 5,0%. No entanto, em sua dissertação, o próprio autor adotou um teor de ligante de 5,5% em suas misturas. As placas confeccionadas por Dumke (2005) foram dimensionadas para um volume de vazios de 20,0% e condutividade hidráulica 0,6 cm/s. Para garantir a permeabilidade das placas, foi determinado um tamanho máximo do agregado de 12,5 mm, espessura da camada de 5,0 cm e declividade transversal de 2,5%.

2.6 Sistema de camadas drenantes

Um sistema de camadas drenantes possui duas ou mais camadas drenantes, sendo comum a todos a camada de rolamento designada *Open Graded Friction Course*. O sistema de filtragem mais genérico e básico é formado por duas camadas (ARAÚJO *et al.*, 2000).

O sistema de camadas de um pavimento é assentado sobre o subleito, o qual pode ou não receber água. Quando o subleito deve ser protegido da água, o sistema de camadas do pavimento contém uma camada impermeabilizante. Sobre esta camada impermeabilizante é realizada a drenagem da água infiltrada nas camadas drenantes. Quando o solo do subleito possuir determinadas características (resistência e coeficiente de permeabilidade adequados), e o tráfego sobre a via for baixo, a água infiltrada pode penetrar diretamente no solo de fundação (subleito).

Independente do tipo de solo do subleito, o pavimento drenante pode ser dotado de tubulação para drenagem, que conduz as águas pluviais a uma rede maior ou diretamente para a captação e aproveitamento (FHWA, 1992).

No Item 2.7 são introduzidos sistemas de camadas drenantes para baixo volume de tráfego e condições de pouca frenagem e aceleração, por exemplo, estacionamentos e vias locais. No Item 2.8 são apresentados exemplos de pavimentos drenantes aplicáveis a condições de maior volume de tráfego.

2.7 Sistemas de camadas drenantes para baixo volume de tráfego

O Centro de Pesquisa em Água Pluvial de *New Hampshire (University of New Hampshire Stormwater Center)* realizou em 2009 um estudo sobre pavimentos drenantes para estacionamentos e vias públicas de distritos residenciais. Um estudo semelhante foi realizado em 2006 pelo Departamento de Bacias Hidrográficas de *Washington (Ramsey - Washington Metro Watershed District)* (RWMWD, 2006).

Segundo UNHSC (2009), o centro de pesquisa de *New Hampshire* propõe especificações para a camada drenante de asfalto e para as camadas drenantes subjacentes. Este sistema de pavimento drenante é voltado para um baixo volume de tráfego. As espessuras e materiais empregados nos pavimentos drenantes, de acordo com as especificações de UNHSC (2009), são indicados na Figura 2.9. Embora a estrutura apresentada tenha sido idealizada para estacionamentos, ela pode ser facilmente adaptada para estradas urbanas.

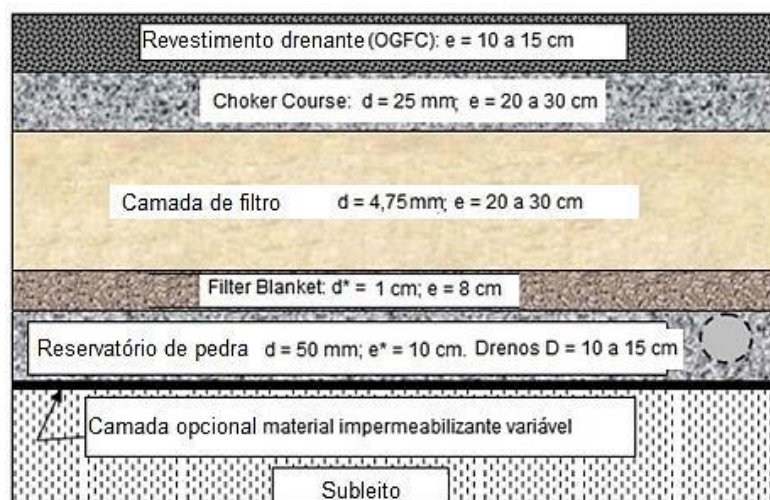
A primeira camada do sistema proposto pelo UNHSC (2009) é uma camada de asfalto drenante de granulometria *open graded* (a *Open Graded Friction Course*), seguido das camadas de base e sub-base.

Em geral, segundo Araújo *et al.* (2000), a camada de base é constituída de agregado fino ou médio (filtro granular), e a sub-base de agregado graúdo (reservatório de pedra). A camada de base é constituída de duas subcamadas com finalidade estrutural e de filtragem. A primeira é denominada de *Choker Course* e a segunda de *Filter Course*. A camada de sub-base também é dividida em subcamadas. A primeira é a *Filter Blanket*, uma camada intermediária, divisora de águas entre os diferentes materiais. A segunda é a camada *Reservoir Course*, que visa o armazenamento da água infiltrada a ser drenada do pavimento (UNHSC, 2009).

O Sistema de camadas drenantes idealizado pelo RWMWD (2006) também prevê uma granulometria mais aberta e livre de finos (*open graded*) na camada de rolamento. Esta camada, por sua vez, é apoiada sobre camadas de base e sub-base drenantes, as quais proporcionam estabilidade à camada de rolamento e possibilitam a filtragem de poluentes das águas pluviais.

Na Figura 2.9 é mostrado o sistema de camadas drenantes do UNHSC (2009) e na Figura 2.10 é mostrado o esquema de um sistema de camadas drenantes de acordo com RWMWD (2006).

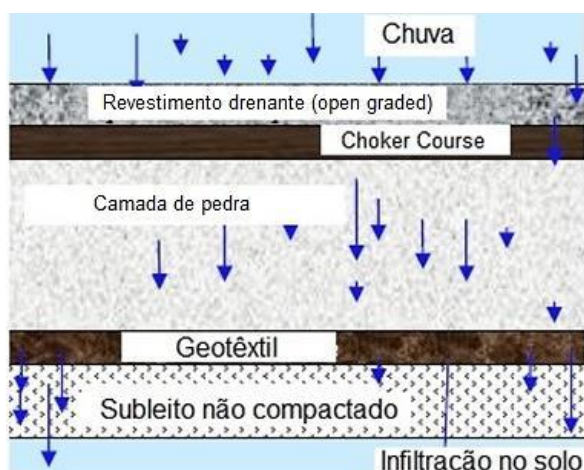
Figura 2.9 – Sistema de camadas drenantes do UNHSC (2009)



d – diâmetro máximo do agregado da camada;
 e – espessura da camada;
 d* – diâmetro único;
 e* – espessura mínima da camada;

Fonte: Adaptado de UNHSC (2009)

Figura 2.10 – Sistema de camadas drenantes do RWMWD (2006)



Fonte: Adaptado de RWMWD (2006)

Na Tabela 2.10 é mostrada a compactação necessária para cada camada drenante, conforme UNHSC (2009). A compactação é um processo cuidadoso para pavimentos drenantes, pois dependendo do grau de compactação pode ocorrer perda do potencial drenante. Na Tabela 2.11, segundo UNHSC (2009), é apresentada a faixa granulométrica das camadas filtrantes.

Tabela 2.10 – Grau de compactação para camadas granulares

Camadas	<i>Choker Course</i>	<i>Filter Course</i>	<i>Reservoir Course</i>	<i>Reservoir Course</i> (Alternativo)
Compactação (%)	95	95	95	95

Fonte: UNHSC (2009)

Tabela 2.11 – Faixas granulométricas recomendadas pelo UNHSC (2009)

Peneira		Percentual Passante (%)			
Nº/Polegada	Milímetros (mm)	<i>Choker Course</i>	<i>Filter Course</i>	<i>Reservoir Course</i>	<i>Reservoir Course</i> (Alternativo)
2 1/2	63,0	-	-	100	-
2	50,0	-	-	90 a 100	-
1 1/2	37,5	100	-	35 a 70	100
1	25,0	95 a 100	-	0 a 15	90 a 100
3/4	19,0	-	-	-	20 a 55
1/2	12,5	25 a 60	-	0 a 5	0 a 10
3/8	9,5	-	100	-	0 a 5
Nº 4	4,8	0 a 10	70 a 100	-	-
Nº 8	2,4	0 a 5	-	-	-
Nº 200	0,075	-	0 a 6	-	-

Fonte: Adaptado de UNHSC (2009)

A seguir são apresentadas as características das camadas drenantes do sistema proposto pelo UNHSC (2009) e pelo RWMWD (2006).

2.7.1 *Choker Course*

A *Choker Course*, camada imediatamente subjacente à camada de asfalto drenante, tem como principal função conferir estabilidade à camada de rolamento. Espessuras maiores que 20,0 cm são preferíveis para proporcionar maior alívio das solicitações da camada de revestimento drenante (RWMWD, 2006; UNHSC, 2009).

Para UNHSC (2009), o diâmetro mínimo do agregado desta camada é de 25,0 mm, enquanto que para RWMWD (2006) esta camada é composta de um único tamanho de agregado, geralmente de 1/2 polegada (12,5 mm). Segundo UNHSC

(2009), a *Choker Course* pode ter espessuras entre 20,0 e 30,0 cm (com espessura requerida mínima entre 10,0 e 20,0 cm), composta de pedra britada.

2.7.2 Filter Course

A *Filter Course* é uma camada drenante de espessura entre 20 e 30 cm que tem como principal função a filtragem da água pluvial. Esta camada é constituída de areia má graduada de diâmetro máximo de 4,75 mm (UNHSC, 2009).

De acordo com UNHSC (2009), esta camada de agregado fino, com menor condutividade hidráulica, também tem como função o atraso do processo de infiltração da água no sistema de camadas do pavimento. Este tempo de atraso é necessário para que a água do reservatório seja coletada (o volume de água que entra no reservatório de pedras deve ser menor ou igual ao volume possível de ser drenado).

O sistema de camadas desenvolvido pelo *Ramsey Washington Metro Watershed District* (2006) não possui camada de agregado fino (areia). Deste modo, a camada seguinte a *Choker Course* é de pedra (*Reservoir Course*).

2.7.3 Filter Blanket

É uma camada cuja principal função é evitar que o material da camada de areia se misture ao material da camada de reservatório. A *Filter Blanket* é uma camada intermediária entre a camada *Filter Course* (areia) e a *Reservoir Course* (pedra britada). De acordo com UNHSC (2009), a entrada de agregados finos entre os agregados graúdos do reservatório pode acarretar perda da sua capacidade de armazenamento, uma vez que o agregado fino preencheria os espaços vazios.

A *Filter Blanket* tem espessura mínima de 8,0 cm, sendo composta de *pea gravel* (cascalho) de diâmetro único de 3/8 de polegada (9,5 mm) (UNHSC, 2009).

O sistema idealizado pelo RWMWD (2006) não possui camada de agregado fino (areia). Portanto, não se faz uso de camada separadora.

2.7.4 Reservoir Course

Segundo RMWMD (2006), a *Reservoir Course* armazena temporariamente toda a água pluvial incidente sobre o pavimento. Esta camada também é conhecida por *Stone Recharge Bed*. A água pode ser coletada nessa camada para eventual utilização em edifícios, ou pode ficar armazenada temporariamente até infiltrar no subleito, integrando-se às águas de mananciais subterrâneos.

De acordo com UNHSC (2009), a *Reservoir Course* é composta de pedra britada de agregado com diâmetro máximo de 50 mm. Enquanto que para RMWMD (2006), é composta de agregado graúdo de tamanho único (graduação uniforme).

A espessura mínima desta camada é de 10 cm, conforme UNHSC (2009). A coleta da água infiltrada é realizada através de drenos de 10 a 15 cm de diâmetro, colocados no reservatório. A espessura da camada e o diâmetro dos drenos são função da quantidade de água que deve ser armazenada (suficiente para reduzir o escoamento superficial sobre o pavimento). O potencial de armazenamento da *Reservoir Course* é maximizado pela graduação uniforme dos agregados, que aumenta o volume de vazios.

De acordo com RMWMD (2006), a porcentagem de vazios desta camada é de cerca de 40%, o que permite que a água seja coletada por drenos ou gradualmente infiltrada no subleito. Um percentual alto de 40% é atingido devido as grandes espessuras, o que encarece os custos de escavação. Para o RMWMD, as espessuras variam entre 18 e 36 polegadas (aproximadamente 46 e 92 cm).

A espessura do reservatório está ligada à permeabilidade do solo quando o subleito não é impermeabilizado, pois para solos permeáveis a espessura do reservatório é uma função direta da capacidade de infiltração do solo de subleito somada à capacidade de drenagem de drenos (caso existam). Por outro lado, existem solos de baixa permeabilidade, ou estradas em que determinadas camadas do pavimento e o subleito devem ser protegidos da infiltração. Para estes casos a camada de reservatório deve possuir uma espessura que retenha toda a água infiltrada até que esta escoe por meio de algum dispositivo de drenagem (UNHSC, 2009).

Não somente a espessura da camada de reservatório depende da impermeabilização do subleito, como também o diâmetro dos drenos, pois neste

caso toda a água infiltrada é armazenada na camada de reservatório até ser drenada somente por tubulações (UNHSC, 2009).

No caso de RMWMD (2006), o sistema de camadas drenantes foi idealizado para um solo de subleito permeável e não compactado, onde todas as camadas do sistema de pavimento são drenantes. O solo permanece no estado nativo, com sua compactação natural e alta permeabilidade, infiltrando toda a água da camada de armazenamento.

2.7.5 Geotêxtil

Este material é empregado para separar camadas quando necessário, e também para melhorar a estabilização de cortes na escavação e do subleito. Além de ser empregado sobre o subleito para evitar a segregação de material, outra função do geotêxtil é permitir a infiltração da água pluvial quando o solo é permeável (RWMWD, 2006; UNHSC, 2009).

2.8 Sistemas de camadas drenantes para maior volume de tráfego

A *Residential and Light Commercial Standards* (RLCS), em 2009, e, de acordo com Tomaz (2009), a *Construction Industry Research and Information Association* (CIRIA), elaboraram sistemas de camadas drenantes com um maior enfoque na estrutura do elemento. Foram idealizados sistemas resistentes a um maior volume de tráfego, destinados, além de estacionamentos, a vias públicas urbanas.

Segundo RLSC (2009), o sistema de pavimento drenante deve ser composto de uma camada de base granular entre o subleito e as demais camadas. A base granular de agregado mineral permite a percolação da água sem se contrair ou expandir. É mais estável do que areia. Esta camada de base granular estabiliza o sistema de camadas, uma vez que uma das maiores causas da falha da estrutura de um pavimento é a movimentação do solo do subleito. Esta movimentação, na maioria das vezes, ocorre devido à movimentação da água no subleito mal compactado, pois existem espaços vazios do solo. Tendo em vista que a camada de asfalto é flexível, a mesma se deforma junto ao solo que se movimenta com o deslocamento de água.

Além das considerações sobre a estabilidade do solo, outro fator importante é a sua condutividade hidráulica. Embora, em primeira instância, a condutividade hidráulica da camada de rolamento e das subcamadas garanta que não haja escoamento superficial, o principal fator limitante de cálculo é a condutividade hidráulica do solo. A condutividade hidráulica do solo é analisada quando se deseja que a água infiltre na fundação (subleito). Quando ocorre um evento de chuva é necessário que a condutividade hidráulica do conjunto de camadas, bem como do solo, seja maior que a intensidade da precipitação (TOMAZ, 2009).

Por outro lado, quando a água não infiltra no solo e é inteiramente captada por dutos de drenagem, na última camada sobrejacente ao subleito, o fator limitante é a taxa com que o sistema de drenagem capta e retira a água pluvial do reservatório do pavimento (TOMAZ, 2009).

As camadas do pavimento drenante podem ser divididas em duas camadas: *wearing course* e *base course*. A *wearing course* se subdivide em uma camada superficial fina de rolamento e uma subsequente mais espessa. A *base course* é uma camada única com espessura variável de acordo com o material empregado, com o design e de acordo com o comportamento mecânico do subleito. No caso de baixo volume de tráfego, a espessura da camada do pavimento asfáltico é de 10,0 cm. No caso de maior volume de tráfego ou de um subleito mole, com baixa capacidade de suporte, o valor da espessura aumenta até 15,0 cm (RLCS, 2009).

A *Construction Industry Research and Information Association* (CIRIA), em suas especificações para os Sistemas de Drenagem Sustentáveis (*Sustainable Drainage Systems*), elaborou sistemas de camadas drenantes de pavimento para três situações. O pavimento Tipo A é aplicado quando toda a água pluvial é infiltrada no solo. O Tipo B é para quando parte da água é infiltrada no solo e o restante é coletado por tubulações de drenagem. O último tipo, o Tipo C, é empregado quando o solo do subleito é totalmente impermeabilizado, ou seja, toda água pluvial é coletada de alguma forma (TOMAZ, 2009).

Os três tipos de pavimento possuem uma camada superficial de rolamento drenante, a qual deve possuir cerca de 20% de vazios depois de compactada e uma espessura que varia de 6,5 a 10,0 cm. A camada seguinte é a de filtro granular, que tem a função principal de estabilizar a camada de asfalto, mas também é um agente filtrante. O filtro granular é constituído de agregados de único tamanho (13,0 mm), e

possui uma espessura de 2,5 a 5,0 cm, de acordo com o nível de solicitações do tráfego (TOMAZ, 2009).

Para Tomaz (2009) e RLCS (2009) o reservatório de pedras é a camada mais espessa do conjunto, pois tem a função de armazenar temporariamente a água pluvial infiltrada, de acordo com a taxa de infiltração do solo ou de drenagem por meio de tubulações. O tempo de armazenagem deve ser o suficiente para que a água não transborde na superfície. De acordo com Tomaz (2009), a camada de reservatório é constituída de pedra britada (nº 3 e nº 4) com diâmetro de 40,0 a 75,0 mm e com espessura entre 60,0 e 120,0 cm.

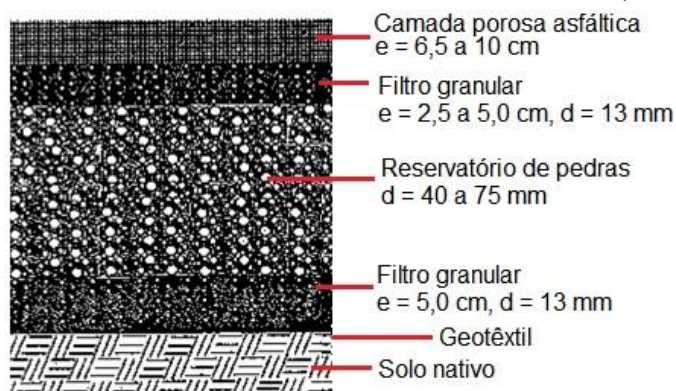
Em contraste com o sistema da RLSC (2009), em que a camada de reservatório é a última, segundo Tomaz (2009), há uma última camada após o reservatório. Esta tem função de filtragem e cerca de 5,0 cm de espessura, constituída de agregados de tamanho único (13,0 mm). Na Figura 2.11 é apresentado o sistema genérico de camadas drenantes proposto pela CIRIA em 2007 (TOMAZ, 2009).

Na Figura 2.12 é apresentado o sistema de camadas drenantes proposto pelo *Residential and Light Commercial Standards* (2009), com camada de reforço feita de mistura asfáltica (*binder course*) para melhorar a resistência do pavimento.

Para maior volume de tráfego ou para quando o solo do subleito tem baixa capacidade de suporte, tanto a resistência à flexão da base, quanto a sua espessura, devem ser aumentadas para suportar as solicitações de carregamento. O emprego de asfalto na base granular pode dobrar a sua capacidade de distribuição de carga. A grelha geotêxtil empregada entre a camada de base e o subleito também aumenta a estabilidade do sistema RLCS (2009).

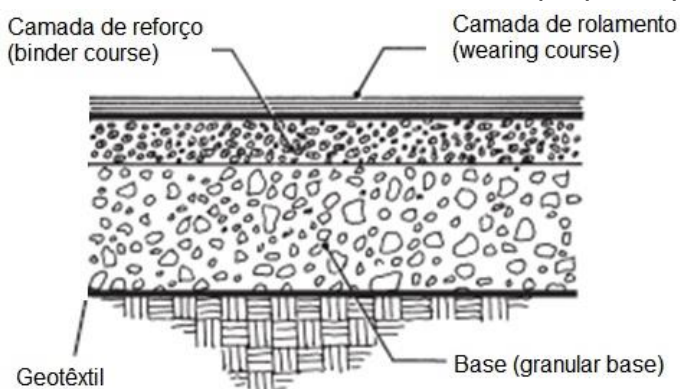
No item seguinte são apresentados os pavimentos Tipo A e Tipo C, elaborados pela *Construction Industry Research and Information Association*. Os pavimentos Tipo B não são abordados neste trabalho, pois são sistemas que requerem dimensionamento hidráulico.

Figura 2.11 – Sistema de camadas drenantes (CIRIA)



Fonte: Adaptado de Tomaz (2009)

Figura 2.12 – Sistema de camadas drenantes proposto pelo RLCS



Fonte: Adaptado de RLCS (2009)

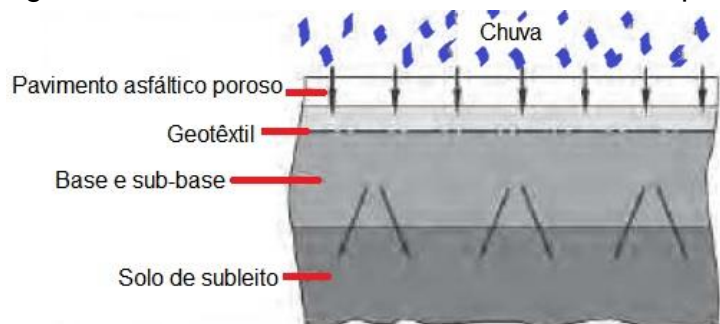
2.8.1 Pavimento drenante Tipo A e Tipo C

No pavimento Tipo A toda a água pluvial infiltra no subleito. Neste pavimento se faz uso de grelha geotêxtil para evitar a mistura de material entre as camadas. A água fica armazenada no reservatório de pedras por um período de 24 a 72 horas, e infiltra de acordo com a permeabilidade do solo do subleito (TOMAZ, 2009).

No pavimento Tipo C toda a água infiltrada no sistema de camadas é captada por dispositivos de drenagem (tubulações) no seu reservatório, a água não infiltra no solo. A camada de rolamento deve ser drenante o suficiente para garantir a rápida infiltração da água. A camada subjacente à camada de rolamento é constituída de agregado de 12,5 mm de diâmetro e espessura de cerca de 2,0 cm. A próxima camada é o reservatório, constituído de agregados de 38 a 76 mm de diâmetro. A água é coletada a partir do reservatório e o solo do subleito é impermeabilizado (TOMAZ, 2009).

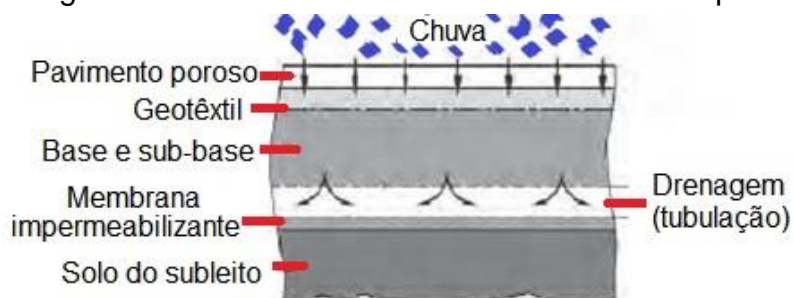
No pavimento Tipo C é colocada uma membrana impermeabilizante entre o subleito e a última camada de agregado mineral. Esta membrana garante a estabilidade do solo do subleito. Na Figura 2.13 é mostrado o esquema de camadas do pavimento Tipo A. Na Figura 2.14 é mostrado o sistema de camadas de um pavimento Tipo C (TOMAZ, 2009).

Figura 2.13 – Sistema de camadas drenantes Tipo A



Fonte: Adaptado de Tomaz (2009)

Figura 2.14 – Sistema de camadas drenantes Tipo C



Fonte: Adaptado de Tomaz (2009)

2.8.2 Pré-Misturado a Quente

A camada de base, constituída de agregado e asfalto, citada pela RLCS (2009), pode ser considerada equivalente a uma camada de Pré-Misturado a Quente (PMQ). De acordo com DER/SP (2006), a camada de Pré-Misturado a Quente é composta de agregado e ligante asfáltico. Esta camada é uma mistura usinada e executada a quente que pode ser empregada como camada de ligação, *binder*, base ou de regularização. Na Tabela 2.12 são mostradas as quatro faixas granulométricas da especificação técnica do DER/SP (2006).

Tabela 2.12 – Faixas granulométricas para PMQ (DER/SP)

Peneira		Percentual Passante (%)				Tolerância (±)
Polegadas (Pol)	Milímetros (mm)	Faixa I	Faixa II	Faixa III	Faixa IV	
1½	37,5	100				
1	25,0	95 - 100	100		100	7
¾	19,0	-	-	100	95 - 100	7
½	12,5	25 - 60	45 - 75	65 - 95	-	7
3/8	9,5	-	-	-	45 - 70	7
Nº 4	4,75	0 - 10	5 - 30	5 - 35	20 - 40	5
Nº 10	2,0	0 - 4	0 - 6	0 - 10	10 - 25	5
Nº 200	0,075	0 - 2	0 - 2	0 - 2	0 - 8	2

Fonte: Adaptado de DER/SP (2006)

2.8.3 Brita graduada simples

A brita graduada simples é um dos materiais mais utilizados no Brasil como base e sub-base de pavimentos. A brita graduada simples (BGS) tem distribuição granulométrica bem-graduada, com diâmetro máximo dos agregados de 38 mm e material passante na peneira de abertura 0,075 mm (ASTM) entre 3 e 9%, que confere uma boa resistência e intertravamento dos grãos (BERNUCCI, 2008).

Segundo DER/PR (2005), a composição granulométrica de uma brita graduada simples (BGS) deve ser enquadrada em uma das três faixas apresentadas na Tabela 2.13. Ao atender uma das faixas se obtém uma camada de material granular mais resistente (DER/PR, 2005).

Tabela 2.13 – Faixas granulométricas para BGS

Peneira		Percentual Passante (%)		
Polegadas (Pol)	Milímetros (mm)	Faixa I	Faixa II	Faixa III
1 1/2	38,1	90 - 100	100	100
1	25,4	-	-	77 - 100
¾	19,1	50 - 85	60 - 95	66 - 88
3/8	9,5	35 - 65	40 - 75	46 - 71
Nº 4	4,8	25 - 45	25 - 60	30 - 56
Nº 10	2	18 - 35	15 - 45	20 - 44
Nº 40	0,42	8 - 22	8 - 25	8 - 25
Nº 200	0,074	3 - 9	2 - 10	5 - 10

Fonte: Adaptado de DER/PR (2005)

Na Tabela 2.14 são mostradas as faixas granulométricas do DNIT para brita graduada simples.

Tabela 2.14 – Faixas granulométricas para BGS

Peneira ASTM	Faixas Granulométricas (% passante)				Tolerância
	A	B	C	D	
2"	100	100	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	±7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	±5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	±5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	±2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	±2

Fonte: Adaptado de DNIT (2009)

2.9 Qualidade da água pluvial e de *runoff*

A precipitação carrega consigo diversos poluentes oriundos da atmosfera, principalmente de grandes cidades, os quais são conduzidos até a superfície da terra e contaminam o solo e mananciais. Dentre estes poluentes estão os gases emitidos por indústrias e pela combustão de automóveis, e resíduos sólidos das mais diversas atividades humanas. O emprego de pavimentos drenantes é uma forma de filtrar grande parte dos poluentes encontrados na água pluvial contaminada (GILBERT; CLAUSEN, 2006; YUEN *et al.*, 2012).

Segundo WSDOT (2007), normalmente se determina a qualidade da água pluvial incidente sobre as estradas a partir de amostras coletadas em suas extremidades. Nas extremidades ocorre o acúmulo de água do escoamento superficial, também conhecido por *runoff*.

Alguns dos poluentes mais encontrados nas águas de *runoff* são: sólidos suspensos, nutrientes, metais pesados, componentes orgânicos, produtos do petróleo, bactérias, e também ocorre a redução de oxigênio. Essas águas contaminadas podem colocar em risco a vida de alguns organismos aquáticos. O Quadro 2.1 mostra os poluentes de maior ocorrência nas águas de *runoff* (WSDOT, 2007).

Quadro 2.1 - Poluentes típicos do *runoff*

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 de nitrogênio Nitrogênio total Nitrogênio total Kjeldahl Fósforo Total Fósforo ortofosfato
Componentes Orgânicos	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos Óleo e graxa Hidrocarbonetos totais de petróleo Pesticidas e Herbicidas
Bactérias	Coliformes totais Coliformes fecais
Carência de oxigênio	Demanda Biológica de Oxigênio (5 dias) Demanda química de oxigênio
Parâmetros convencionais	Sódio, Cloreto pH e Turbidez Condutividade de dureza

Fonte: Adaptado de WSDOT (2007)

Helmreich *et al.* (2010) estudaram durante dois anos a qualidade da água de *runoff* de vias de alto volume de tráfego na cidade de Munique, Alemanha. Foram analisadas amostras de 63 eventos de chuva, onde se encontraram metais dissolvidos como cobre, chumbo, cádmio, níquel e zinco. Na Tabela 2.15 são mostrados alguns dos parâmetros analisados por Helmreich *et al.* (2010), e seus resultados.

Tabela 2.15 – Resultados dos parâmetros analisados na água de *runoff* em Munique, Alemanha

Parâmetro	Unidade	Valor médio
Cádmio total	µg/L	< 0,5
Cobre total	µg/L	191
Níquel total	µg/L	55
Chumbo total	µg/L	56
Zinco total	µg/L	847
Sólidos suspensos	mg/L	355
pH	-	7,5

Fonte: Adaptado de Helmereich *et al.* (2010)

De acordo com Yuen *et al.* (2012), os poluentes carregados pela precipitação e depositados sobre a estrada ficam retidos em seus poros, sendo que alguns destes permanecem e entopem os mesmos. Isto reduz a eficiência de drenagem e filtragem do pavimento.

Existem algumas técnicas de limpeza para evitar o entupimento da estrada. Segundo James (2000), recomenda-se que se faça a limpeza dos poros do pavimento a cada dois anos, ou em uma frequência maior, conforme os níveis de poluição da região. A limpeza pode ser feita com sucção a vácuo ou com biodegradação. Na biodegradação os poluentes são removidos com a adição de um óleo que é retido pelos poros e é degradado em componentes menos nocivos do que as partículas sólidas e poluentes.

Segundo James (2000), outra forma de limpeza, mais lenta e menos eficiente, ocorre de forma natural durante o uso da estrada. Quando os veículos passam sobre o pavimento, a passagem do rodado bombeia ar para os poros do pavimento, removendo poluentes e partículas. Embora muitas partículas e poluentes sejam retidos pelo pavimento alguns poluentes solúveis, como nitratos e cloretos, não ficam retidos e infiltram no solo.

As origens dos poluentes da água de *runoff* podem ser classificadas nas seguintes categorias: deposição atmosférica, veículos (combustível e emissões de escape), e deposição direta e indireta. O Quadro 2.2 mostra a classificação dos poluentes (WSDOT, 2007).

Quadro 2.2 – Classificação dos poluentes típicos do *runoff*

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 - bifenilos policlorados

PAHS - hidrocarbonetos aromáticos policíclicos

Fonte: Adaptado de WSDOT (2007)

Os poluentes provenientes do ar, que se depositam no pavimento, configuram a categoria de deposição atmosférica. Estes poluentes podem ser secos ou úmidos. Os poluentes secos são provenientes da atmosfera local, e os úmidos são aqueles carregados de longe através da precipitação, podendo ter sua origem, por exemplo, de distantes distritos industriais (WSDOT, 2007).

Na categoria veículos, os poluentes são resíduos provenientes do desgaste do motor e escape, lubrificantes, ferrugem e desgaste dos pneus e outras peças de veículos. Os principais poluentes encontrados são zinco, cobre e chumbo. Os principais fatores que colaboram com a deposição destes poluentes são as altas velocidades, o uso de pneus velhos e a rugosidade da superfície da estrada (YUEN *et al.*, 2012; WSDTO, 2007).

A categoria de deposição direta e indireta inclui os poluentes oriundos da manutenção da área de passeio (pesticidas e herbicidas) e da estrada (reparos), e de dejetos de animais (WSDOT, 2007).

2.9.1 Principais fatores desencadeadores de poluentes no *runoff*

As condições climáticas e meteorológicas são muito influentes no tempo de vida útil de um pavimento. Por exemplo, a ocorrência de congelamento e degelo, de neve e areia fina em excesso, compromete a estrutura drenante do pavimento. A existência de ervas daninhas, além de causar entupimento, polui de forma indireta, pois são empregados herbicidas e pesticidas para removê-las. Outro fator importante é a proximidade da estrada da indústria ou do campo, pois o setor industrial e a atividade agropecuária são grandes geradores de poluentes (JAMES, 2000; WSDOT, 2007).

Segundo James (2000), alguns dos principais fatores desencadeadores de poluentes nas estradas são o volume de tráfego (gases de combustão liberados), o tipo de tráfego (industrial, construção, passeio) e o congestionamento (frenagem e desgaste de pneus e pavimento). No Reino Unido, por exemplo, da quantidade de zinco encontrada nas rodovias 23% são provenientes do tráfego. De acordo com WSDOT (2007), outro fator determinante dos níveis de poluição nas águas de *runoff* das estradas diz respeito à precipitação, em termos de duração e intensidade de um evento de chuva.

De acordo com Yuen *et al.* (2012), em Singapura foi realizada a análise de sedimentos depositados nas estradas de quinze distritos industriais. O objetivo foi determinar os níveis de poluição das estradas devido às atividades de seu parque industrial. Os principais poluentes encontrados na água pluvial de origem de atividades humanas foram: alumínio, cobre, cromo, ferro, níquel, chumbo, escândio, estíbio, silício e zinco. Nos distritos industriais foram encontradas maiores concentrações de cobre, cromo, ferro e níquel do que nas zonas residenciais.

Os principais poluentes inorgânicos encontrados nas estradas, oriundos do tráfego de veículos, são listados no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Principais origens de poluentes oriundos do tráfego de veículos

Origem	Metal
Freios	Cádmio, cromo, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo, zinco e estíbio
Pneus	Cádmio, cromo, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo, zinco e estíbio
Combustível e óleos	Bismuto, cádmio, cromo, cobre, níquel e zinco
Corpo do veículo	Chumbo
Catalisadores	Paládio e platina
Desgaste do motor	Cromo, cobre, manganês e níquel
Desgaste da superfície da estrada	Cádmio, cobre, manganês, níquel, chumbo e zinco
Marcas rodoviárias	Chumbo
Equipamento rodoviário	Zinco

Fonte: Adaptado de Yuen *et al.* (2012).

2.9.2 Experimentos realizados

Na França foi realizado um experimento na rodovia de Nantes, região metropolitana, onde foi analisada uma seção inicialmente de pavimento convencional. Posteriormente a camada de rolamento foi substituída por uma camada drenante de asfalto de 3,0 cm de espessura. Nesta seção foram estudadas a condutividade hidráulica e o nível de poluentes na água de *runoff*, comparando-se os valores entre a camada asfáltica convencional e a drenante. No estudo foram encontrados sedimentos suspensos na água de *runoff*, em sua maioria areias finas, como também os seguintes poluentes: cádmio, cobre, zinco e chumbo (PAGOTTO, 2000).

Segundo Pagotto (2000), na nova seção de pavimento drenante foi observada uma redução do percentual, maior que 70%, para todos os metais e sólidos suspensos na água de *runoff*. O emprego de pavimento drenante reduziu cerca de até 90% da concentração dos parâmetros em análise, com exceção do pH e da condutividade. Os melhores resultados foram para a concentração de hidrocarbonetos e sólidos suspensos, com uma redução da concentração de 81 e 92%, respectivamente. Para os metais totais, os resultados indicaram uma redução de 35% (cobre) até 78% (chumbo). Na Tabela 2.16 são mostrados os parâmetros e seus resultados para o experimento realizado.

Tabela 2.16 – Parâmetros de qualidade da água

Parâmetro	Pavimento convencional	Pavimento drenante
pH	7,4	7,6
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	285,0	305,0
Sólidos totais suspensos (mg/l)	46,0	8,7
Oxigênio dissolvido (mg O_2 /l)	80,0	80,0
Nitrogênio orgânico dissolvido (mg N/l)	2,1	1,2
Hidrocarbonetos totais (mg/l)	1,2	0,09
Chumbo Total ($\mu\text{g}/\text{l}$)	40,0	8,7
Cobre Total ($\mu\text{g}/\text{l}$)	30,0	20,0
Cádmio Total ($\mu\text{g}/\text{l}$)	0,88	0,28
Zinco Total ($\mu\text{g}/\text{l}$)	228,0	77,0

Fonte: Adaptado de Pagotto (2000)

De acordo com Eck *et al.* (2012), em Austin (Texas) e no leste da Carolina do Norte (Estados Unidos da América), foram coletadas amostras da água de *runoff* durante seis e dois anos, respectivamente, para o estudo da sua qualidade. Foram

coletadas cerca de 1570 amostras de água pluvial, onde se verificou que a concentração de sólidos suspensos totais no pavimento drenante reduziu em mais de 90%. Em relação ao pavimento convencional, também se observou uma considerável redução dos níveis de concentração de fósforo, cobre, zinco e chumbo totais. No Texas, se verificou uma redução de cerca de 90% dos sólidos totais, de 60% do cobre total, de 90% do chumbo e do zinco, e de 75% do fósforo.

Na França, Legret *et al.* (1999) estudaram a qualidade da água de *runoff* de um pavimento drenante e de um pavimento tradicional (impermeável). Na Tabela 2.17 são mostrados os resultados de Legret *et al.* (1999) em um comparativo entre o valor médio das concentrações dos poluentes encontrados no pavimento drenante e no pavimento convencional.

Tabela 2.17 – Comparativo dos poluentes encontrados (valores médios) no pavimento drenante e tradicional na França, em g/ha

Parâmetro	Pavimento drenante	Pavimento tradicional
Sólidos suspensos	3500,00	8500,00
Chumbo	0,88	5,60
Cobre	3,00	3,00
Cádmio	0,08	0,35
Zinco	11,30	41,80

Fonte: Adaptado de Legret *et al.* (1999)

Na pesquisa de Antunes (2014) foi avaliada a qualidade da água da chuva e da água de escoamento superficial (*runoff*) de vias públicas em Florianópolis. Foram utilizadas quatro placas asfálticas drenantes, as quais foram expostas a eventos de chuva entre fevereiro e abril de 2014. Na Tabela 2.18 são mostrados os resultados de Antunes (2014) com relação à qualidade da água coletada diretamente da chuva e coletada após infiltrar nas placas drenantes. As placas 1 e 2 apresentadas na Tabela 2.18 são constituídas de ligante modificado com borracha moída de pneus, e as placas 3 e 4 são constituídas de ligante modificado com polímero SBS (Estireno-Butadieno-Estireno).

Observa-se na Figura 2.18 que a concentração de fósforo e nitrito aumentou na água infiltrada nas placas em relação à água coletada diretamente da chuva. No que se refere à amônia, a concentração reduziu em cerca de 50% na água infiltrada nas placas 1 e 2, enquanto que a concentração aumentou nas placas 3 e 4. A

concentração de oxigênio dissolvido e o pH não apresentaram variação significativa no estudo.

Tabela 2.18 – Qualidade da água da chuva na cidade de Florianópolis

Parâmetros		Amônia (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Nitrito (mg/L)	O.D. ¹ (mg/L)	pH
Água diretamente da chuva		0,41	0,14	0,002	9,0	5,4
Água após infiltração nas placas	Placa 1	0,22	0,46	0,006	9,0	5,5
	Placa 2	0,20	0,40	0,007	9,0	5,8
	Placa 3	0,59	0,78	0,007	8,9	5,8
	Placa 4	0,71	0,69	0,006	8,9	5,6

¹ Oxigênio Dissolvido

Fonte: Adaptado de Antunes (2014)

Na Figura 2.19 são mostrados os resultados de Antunes (2014) referentes à qualidade da água coletada diretamente do escoamento superficial de vias públicas de Florianópolis.

Tabela 2.19 – Qualidade da água de *runoff* na cidade de Florianópolis (valores médios)

Parâmetro	Valor
Alumínio (mg/L)	0,23
Amônia (mg/L)	0,11
Cobre (mg/L)	0,12
Cromo (mg/L)	0,08
Ferro (mg/L)	1,41
Fósforo (mg/L)	2,11
Nitrito (mg/L)	0,02
O.D (mg/L)	9,0
pH	6,7
Zinco (mg/L)	0,13

Fonte: Adaptado de Antunes (2014)

2.10 Filtragem dos poluentes da água pluvial

O potencial de filtragem do *Open Graded Friction Course* é semelhante ao de um filtro de areia, onde os poluentes em forma de partículas são filtrados, e poluentes dissolvidos têm menor ou nenhuma retenção no filtro. As demais camadas subjacentes também têm a função de filtro. As subcamadas são compostas de agregado fino (areia grossa) e agregado graúdo (pedras) (ECK *et al.*, 2012).

É importante citar a utilização da borracha como filtro, a qual pode ser inserida em alguma camada do pavimento. De acordo com Tang *et al.* (2008), a borracha moída pode ser utilizada como uma primeira etapa de filtragem, o que melhora a eficiência das próximas etapas. O filtro consiste em uma camada de borracha de pneu moída, cuja espessura da camada tem pouca influência na filtragem da água. Ao contrário da espessura, o tamanho das partículas de borracha tem grande influência; quanto menores, maior é a filtragem.

Segundo Tang *et al.* (2008), a borracha moída de pneu pode ser utilizada como filtro para águas de lastro e para águas residuais. Em sua pesquisa, Tang *et al.* (2005) verificou que o filtro de borracha moída reduz as partículas suspensas e a turbidez da água de lastro, como também é capaz de filtrar o fitoplâncton. Segundo Xie *et al.* (2008), o filtro de borracha moída também é efetivo para águas residuais, pois promove boa filtragem de sólidos suspensos e redução da turbidez da água.

A eficiência de um filtro de borracha é maior do que a de um filtro de areia, pois os filtros de borracha moída atingem um desempenho semelhante ao de areia com uma espessura menor (XIE *et al.*, 2008).

2.11 Parâmetros de qualidade da água

A água potável deve estar em conformidade com o padrão de parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos estabelecidos pelo Ministério da Saúde, por meio do CONAMA.

A Portaria número 1469/MS (2000) aprovou a Norma de Qualidade da Água para Consumo Humano, que dita o padrão de aceitação da água potável para consumo humano.

Na Norma são estabelecidos Valores Máximos Permitidos (VMP) dos parâmetros de potabilidade da água para consumo. A norma não somente especifica o padrão de potabilidade, como também os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água destinada ao consumo humano (Portaria 1469/MS, 2000).

A Norma de Qualidade da Água para Consumo Humano também padroniza os níveis de substâncias orgânicas e inorgânicas nas águas doces destinadas ao consumo humano, após tratamento.

Na Tabela 2.20 são apresentados os limites admissíveis, ou Valores Máximos Permitidos (VMP), de alguns dos parâmetros de qualidade de água ditados pelo CONAMA (2005), para água potável e águas doces. Toda a água destinada ao consumo humano deve obedecer ao padrão de potabilidade mostrado na Tabela 2.20.

Observa-se que as águas doces de Classe I demandam somente de desinfecção, como tratamento com cloro, por exemplo, para eliminar coliformes totais, cianobactérias, cianotoxinas, entre outros, pois apresentam baixos níveis de substâncias químicas, dispensando outros tratamentos. As águas doces de Classes II, III e IV, além do tratamento de desinfecção, demandam a redução de parâmetros físicos e químicos, exigindo tratamento simplificado (Classe II), convencional (Classe III) ou avançado (Classe IV).

Embora esta norma seja aplicada a todo território nacional, outros autores, como Pereira (2004), defendem outros padrões de qualidade e níveis de tratamento. Segundo Pereira (2004), as águas doces Classe II são destinadas ao consumo humano após tratamento convencional, e não tratamento simplificado, como consta na norma.

Tabela 2.20 – Limites admissíveis para potabilidade e águas doces

Parâmetro	Unidade	Água potável ¹	Águas doces destinadas ao consumo humano			
			Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
Valor máximo permitido						
Alumínio	mg/L	0,2	0,1	0,1	0,2	-
Amônia	mg/L	1,5	-	-	-	-
Chumbo	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,033	-
Cobre	mg/L	2,0	0,009	0,009	0,013	-
Cromo	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	-
Ferro	mg/L	0,3	0,3	0,3	5,0	-
Fósforo total	mg/L		0,02	0,05	0,075	-
Nitrito	mg/L	1,0	1,0	1,0	1,0	-
O.D. ²	mg/L	-	> 6,0	> 5,0	> 4,0	> 2,0
pH	-	6,0 a 9,5	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0
Selênio	mg/L	0,01	-	-	-	-
S.D.T. ³	mg/L	1.000	-	-	-	-
Zinco	mg/L	5,0	0,18	0,18	5,0	-

¹ Padrão obrigatório para todo território nacional

² S.D.T. - Sólidos dissolvidos totais

³ O.D. - Oxigênio dissolvido

Classe I - Necessita somente de desinfecção para consumo humano

Classe II - Necessita de tratamento simplificado para consumo humano

Classe III - Necessita de tratamento convencional para consumo humano

Classe IV - Necessita de tratamento avançado para consumo humano

Fonte: Adaptado de Conama (2005)

Existem padrões de qualidade não somente para a água destinada ao consumo humano, mas também para a água destinada ao contato primário com o corpo humano. A resolução número 274 (ano 2000) do CONAMA, que define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras por meio de parâmetros e indicadores específicos, assegura condições de balneabilidade. Contudo, nesta resolução são definidos somente critérios microbiológicos relacionados à existência de microrganismos, como algas, e de bactérias, como coliformes fecais. Os parâmetros inorgânicos, como concentração de ferro e nitrito, não são avaliados nesta resolução (RESOLUÇÃO 274, 2000).

2.12 Considerações finais

A filtragem de poluentes inorgânicos da água pluvial captada em pavimentos drenantes a torna apropriada para aproveitamento em edificações, sem que exista contato humano direto, como aproveitamento na descarga de vasos sanitários. Para utilização em atividades em que haja contato direto com o corpo humano, como por exemplo, para banho, é necessária a avaliação dos padrões microbiológicos da água.

A capacidade de filtragem de poluentes inorgânicos do pavimento drenante também elimina poluentes que são conduzidos a rios e mananciais subterrâneos. O pavimento drenante, além de função ambiental, tem função socioeconômica, pois promove o aproveitamento da água, diminuindo os efeitos da escassez, como também reduz risco de enchentes.

Além de promover uma ação ambiental, o pavimento drenante também melhora a segurança nas estradas, uma vez que elimina grande parte da água acumulada na superfície do asfalto, fator gerador de acidentes.

A partir do conhecimento dos principais tipos de pavimentos drenantes e dos materiais empregados, das composições de camadas, das espessuras e das granulometrias, é possível idealizar novas combinações de sistemas de camadas drenantes. Também é possível analisar o efeito do emprego de novos materiais nos níveis de filtragem das águas de escoamento superficial.

Após um tratamento primário oferecido pelo pavimento drenante, o nível da qualidade da água pluvial pode ser melhorado, uma vez que existem tratamentos secundários, como tratamentos de desinfecção, que viabilizam o aproveitamento dessa água para várias formas de consumo.

3 MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo são apresentados o método empregado e os materiais utilizados no trabalho. Inicialmente são feitas considerações iniciais sobre o capítulo 3, resumindo-se o método. Em seguida são apresentados os materiais utilizados e o método. Na Figura 3.1 é mostrado o diagrama esquemático deste capítulo. Na Figura 3.2 é mostrado o fluxograma esquemático do método desta pesquisa.

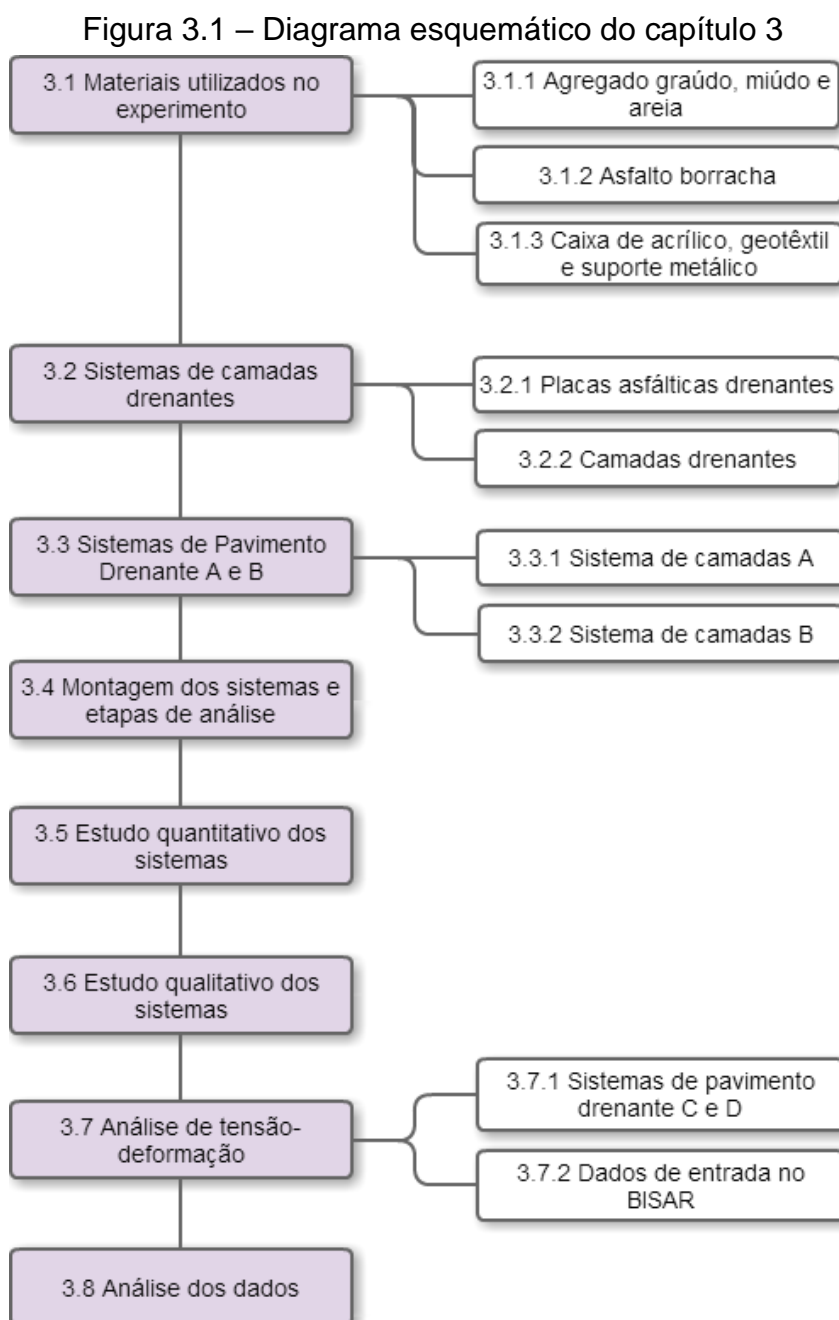
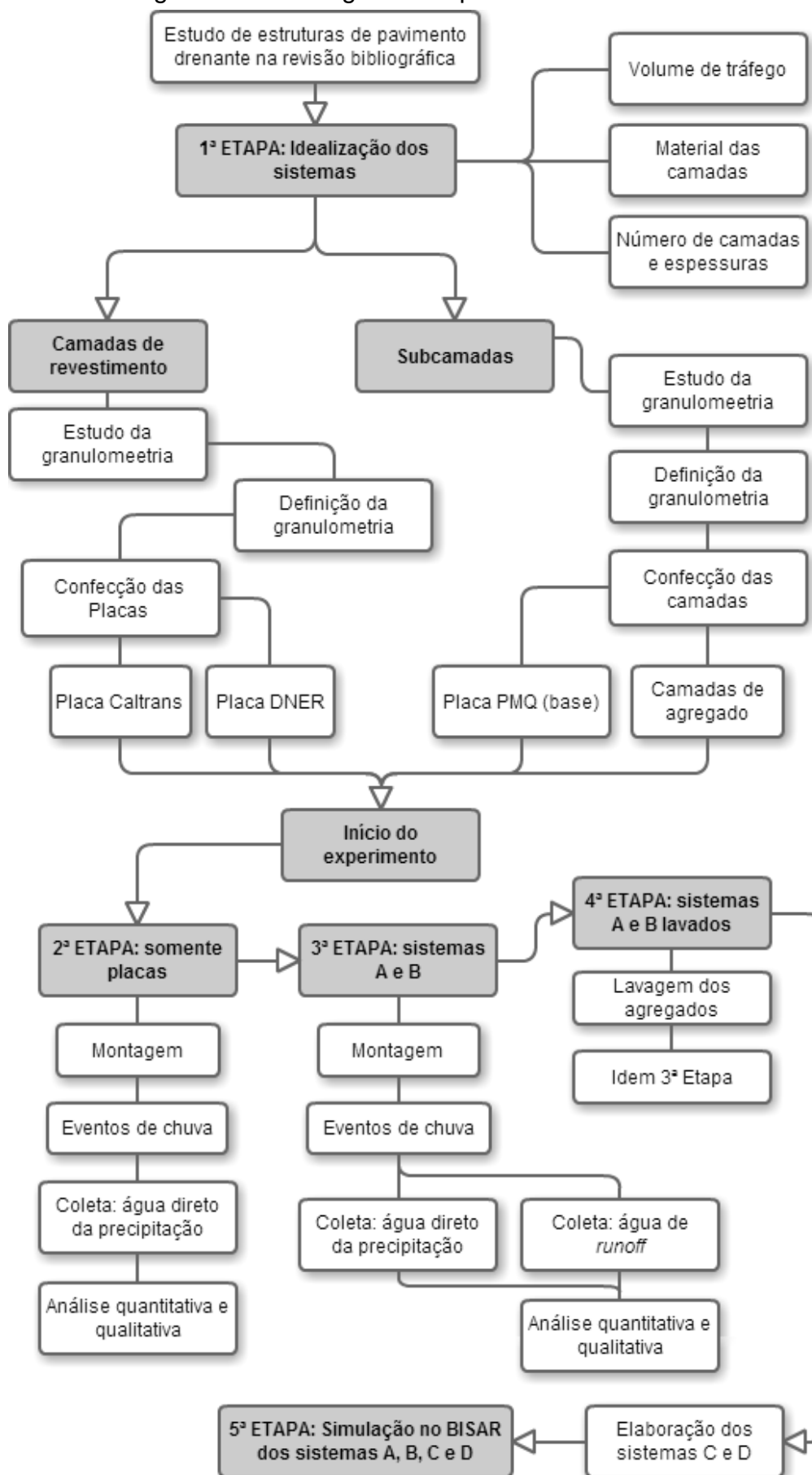


Figura 3.2 – Fluxograma esquemático do método



A execução deste trabalho demandou o uso de alguns materiais, equipamentos e procedimentos. Uma vez que este trabalho pretende verificar a influência de um sistema de pavimento drenante sobre a qualidade da água pluvial e de *runoff*, foram necessários, além dos materiais empregados nos sistemas, materiais e equipamentos para a análise da qualidade da água.

Após a realização do estudo sobre pavimentos drenantes e de seu potencial filtrante foram idealizados sistemas de pavimentos drenantes com multicamadas. Alguns destes sistemas foram construídos e estudados em cinco etapas principais.

A primeira etapa consiste na confecção de três placas asfálticas drenantes, denominadas neste trabalho como: Placa Caltrans, Placa DNER e Placa PMQ. Esta etapa da pesquisa, assim como as outras quatro, será detalhada nos próximos itens deste capítulo.

A segunda, terceira e quarta etapas correspondem à montagem dos modelos e de sua exposição a eventos de chuva ocorridos no ano de 2015, na cidade de Florianópolis, entre os meses de janeiro a novembro. Os meses de maior intensidade pluviométrica foram os meses de janeiro a março, seguidos dos meses de setembro a novembro. Os meses de abril a agosto tiveram a menor intensidade pluviométrica.

Na segunda etapa foi estudado o desempenho individual das placas asfálticas drenantes denominadas Placa DNER e Placa PMQ, com relação à quantidade de água pluvial infiltrada e sua qualidade. Nesta etapa do trabalho foi somente coletada (infiltrada) água diretamente da chuva (precipitação incidente diretamente sobre as placas). Não foram realizadas coletas de água de *runoff*.

Na terceira etapa do trabalho foram construídos modelos de sistemas de pavimento drenante com multicamadas. Estes modelos construídos na terceira etapa foram denominados sistema A e sistema B. Inicialmente os sistemas foram expostos a eventos de chuva, sendo que para cada evento de precipitação a água infiltrada no sistema foi coletada para análise. Foi medida a quantidade de água infiltrada e sua qualidade.

Após as coletas de água pluvial diretamente da chuva, antes de entrarem em contato com alguma superfície (estradas, solo, etc.), foram realizadas coletas da água de escoamento superficial de estradas, ou seja, da água de *runoff*. A água pluvial de vias públicas de Florianópolis foi coletada e armazenada em garrafas

plásticas para posterior infiltração nos sistemas de pavimentos construídos e análise de sua qualidade.

As amostras de *runoff* foram coletadas diretamente sobre a Rua Lauro Linhares, uma das principais vias do bairro Trindade, em Florianópolis (Santa Catarina). A água de *runoff* coletada foi despejada da garrafa plástica sobre o sistema de pavimento drenante e infiltrada.

Na quarta etapa foram realizados os mesmos passos da terceira etapa. Contudo, na quarta etapa todas as camadas de agregado empregadas na terceira etapa (camadas dos sistemas A e B) foram lavadas em água corrente. A lavagem foi necessária devido à possibilidade dos agregados finos contidos em todas as camadas de agregado contaminar a água coletada. Portanto, na quarta etapa os sistemas foram montados e estudados novamente, mas com o excesso de finos removido.

A qualidade da água foi verificada por meio de indicadores que determinam o nível de alguns poluentes dissolvidos. Estes indicadores são parâmetros para procedimentos de comparação colorimétrica e para métodos que fazem uso do equipamento Fotocolorímetro.

A partir da análise da qualidade da água coletada diretamente da precipitação, da água coletada sobre a superfície de vias públicas (*runoff*), e da qualidade da água da chuva e do *runoff* após ser infiltrada nos sistemas, foi possível fazer uma análise comparativa entre estes resultados.

Além da análise da qualidade da água foi medido o volume de precipitação infiltrado nos sistemas e nas camadas individuais. Também foi medido o volume de precipitação global para se comparar com a quantidade infiltrada nos sistemas. Assim, foi possível verificar a drenabilidade das placas, individualmente, e dos sistemas. O estudo quantitativo não se aplica às águas de *runoff*.

As placas asfálticas confeccionadas na primeira etapa foram realizadas no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os experimentos realizados na segunda, terceira e quarta etapa se deram nas dependências do Departamento de Engenharia Civil da universidade. Os sistemas foram montados na cobertura da extensão externa do Laboratório de Materiais, localizado no Bloco B do Departamento de Engenharia Civil.

A quinta etapa consiste na análise mecânica dos sistemas multicamadas por meio de simulação computacional. Nesta etapa foi realizada uma análise de tensão-

deformação dos sistemas estudados através do programa Bisar. Nesta etapa do trabalho foram elaborados mais dois sistemas para serem comparados com o desempenho mecânico dos sistemas A e B. Os novos sistemas foram denominados: sistema C, elaborado para ser o mais resistente dos quatro sistemas; e sistema D, elaborado para ser o sistema mais eficiente em filtragem, mas conseqüentemente o menos resistente dos quatro sistemas. Os quatro sistemas A, B, C e D foram analisados no Bisar. Os sistemas C e D não foram construídos e testados. Portanto, não há resultados quantitativos e qualitativos com relação aos sistemas C e D.

É importante ressaltar, sobre a análise da água infiltrada nos sistemas, que na maioria das vezes a água coletada (chuva ou *runoff*) não foi analisada imediatamente após a coleta. A água infiltrada da chuva, coletada nas caixas, foi armazenada em garrafas plásticas para posterior análise dos parâmetros de qualidade. Isto foi necessário devido os eventos de chuva ocorrerem em diversos horários do dia, impossibilitando a coleta e análise imediata.

A dificuldade de acesso ao local onde os sistemas foram montados também impossibilitou a coleta imediata, pois como o experimento estava em cima de uma cobertura era necessário o uso de escada, a qual nem sempre estava disponível e, em dias chuvosos, dificultava a coleta. A água de *runoff* foi armazenada em garrafas pelos mesmos motivos da água de precipitação, pois a cada coleta no escoamento da rua, era necessário filtrar essa água nos sistemas, localizados na cobertura.

3.1 Materiais utilizados no experimento

Para a confecção das placas asfálticas foram utilizados agregado graúdo, agregado fino e ligante asfáltico. As subcamadas drenantes são constituídas de areia (agregado miúdo) ou pedra (agregado fino e ou graúdo), com exceção de um modelo, que possui uma camada de Pré-Misturado a Quente (PMQ) como base.

Para os experimentos, as placas asfálticas e camadas de agregado foram montadas dentro de caixas de acrílico. Foram utilizados suportes metálicos para maior estabilidade e assentamento das camadas. Todas as camadas drenantes foram envolvidas por geotêxtil. A água infiltrada foi coletada no fundo das caixas de acrílico, através de mangueiras, e armazenada em garrafas plásticas.

3.1.1 Agregado graúdo, miúdo e areia

Os agregados graúdo (pedras) e miúdo (pó de pedra) foram concedidos pela pedreira local Santa Bárbara, localizada em Palhoça, Santa Catarina. Os agregados são de origem granítica e foram recebidos nos seguintes tamanhos: brita 0, diâmetro máximo de 9,5 mm; brita 1, diâmetro máximo de 19,0 mm; brita 2, com diâmetro máximo de 32,0 mm; e pó de pedra, diâmetro máximo de 4,75 mm.

A areia é do tipo grossa (que apresenta diâmetro máximo de 5,0 mm), e foi adquirida no comércio local do município de Florianópolis. Todos os tamanhos de agregado citados e areia foram empregados na confecção das camadas drenantes.

Na confecção das placas asfálticas foram empregados somente brita 0, brita 1, e pó de pedra. As britas 0 e 1 foram ensaiadas conforme normativa DNER-ME 081/98, e o pó de pedra conforme normativa DNER-ME 084/95. Na Figura 3.3 são mostrados os agregados utilizados, da esquerda para direita: brita 0, areia grossa, brita graduada simples (mistura de brita 0, brita 1 e pó de pedra), e brita 2.

Figura 3.3 – Agregados utilizados



3.1.2 Asfalto borracha

As placas asfálticas, placas de revestimento (placas DNER e Caltrans) e de base (Placa PMQ), foram confeccionadas com ligante modificado por polímero. O polímero empregado foi borracha moída de pneu. O asfalto utilizado foi o ECOFLEXPAVE (AB8 ECOFLEX B), fornecido pela empresa Greca Asfaltos. Foi utilizado asfalto borracha do tipo *terminal blend* - com 15,0% de borracha incorporada. Na Figura 3.4 é mostrado o asfalto borracha utilizado.

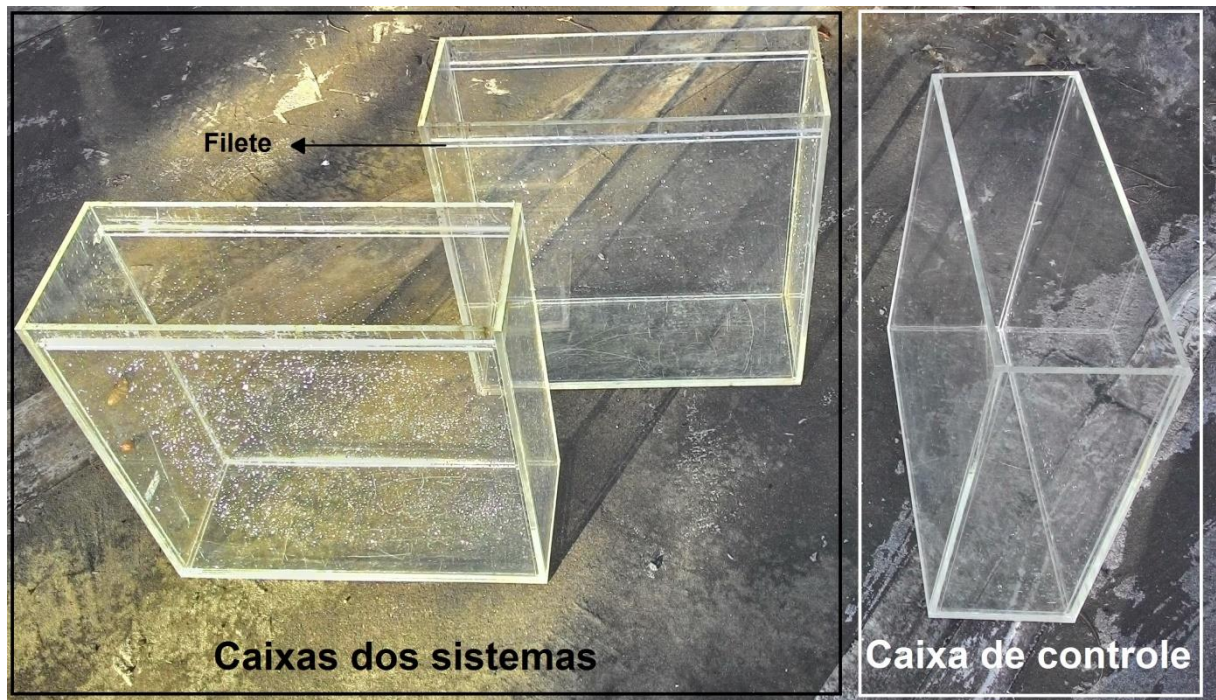
Figura 3.4 – Asfalto borracha ECOFLEXPAVE



3.1.3 Caixa de acrílico, geotêxtil, grelhas e suportes metálicos

Neste trabalho foram utilizadas três caixas de acrílico cristal, com vedação à água, de 8,0 mm de espessura. Destas, duas caixas foram destinadas a comportar as placas asfálticas e os sistemas de pavimento drenante. A outra caixa foi utilizada para controle da quantidade de água precipitada (volume global) e de sua qualidade. A Figura 3.5 mostra as caixas utilizadas no trabalho.

Figura 3.5 – Caixas dos sistemas e caixa de controle



As duas caixas destinadas a receber os sistemas de camadas têm a mesma dimensão e foram denominadas “caixas dos sistemas”. Estas caixas possuem uma base interna de 50,0 x 18,0 cm e altura de 53,0 cm, com suportes (filetes de acrílico) para a colocação da grelha que comporta a placa de concreto asfáltico drenante. Os filetes são inclinados e garantem 2,5% de declividade transversal para a placa asfáltica, a qual simula o efeito das inclinações das estradas sobre o escoamento transversal da água de *runoff*.

A terceira caixa, denominada “caixa de controle”, foi utilizada para medir o volume total precipitado (volume global) para cada evento de chuva. Esta caixa possui uma base interna de 50,0 x 18,0 cm e altura de 50,0 cm.

Nas caixas dos sistemas são utilizados suportes metálicos removíveis que sustentam o peso das camadas. Estes suportes são constituídos de pés metálicos unidos por uma base. A altura dos pés é regulável e na base são apoiadas grelhas metálicas, onde as camadas são assentadas. Os suportes ajustáveis permitem que sejam feitos modelos de sistemas de pavimento drenante com camadas de várias espessuras. Na Figura 3.6 são mostrados os suportes com pés reguláveis, base fixa e grelha metálica.

Também foi utilizada manta geotêxtil para envolver as camadas de agregado, com o propósito de separar o material das diferentes camadas, evitando que o material mais fino, como areia, se misturasse, por exemplo, com camadas de brita, entupindo seus vazios. Em uma estrutura de pavimento real, o geotêxtil além de evitar a mistura dos diferentes materiais das camadas, melhora a estabilidade do pavimento. Na Figura 3.7 é mostrada uma camada envolvida por geotêxtil.

Figura 3.6 – Suportes metálicos e grelha

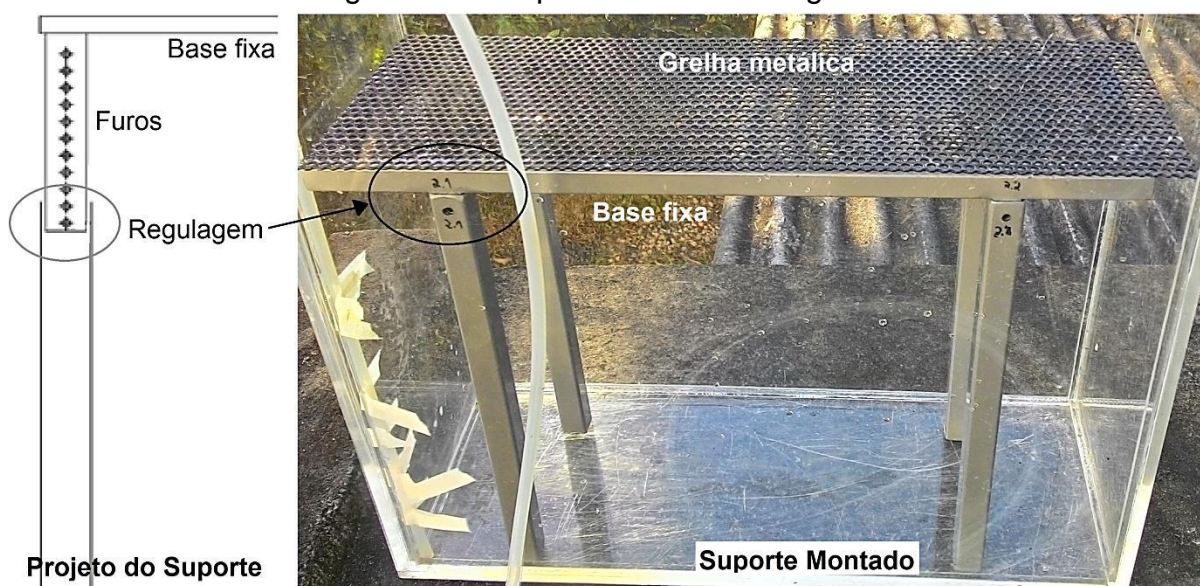


Figura 3.7 – Camada envolvida por geotêxtil



3.2 Sistemas de camadas drenantes

A partir dos sistemas de camadas drenantes apresentados no capítulo 2 foram elaborados dois modelos de sistemas de camadas drenantes para serem testados ao ar livre, sistema A e sistema B, sendo expostos a eventos de chuva. Estes sistemas foram escolhidos considerando o uso do pavimento em relação ao volume de tráfego e de acordo com as limitações físicas impostas pela natureza do trabalho e pelos materiais disponíveis.

Também foram elaborados outros dois modelos, sistema C e sistema D, com o propósito de serem realizadas simulações de deformação no programa Bisar. Os sistemas C e D não foram construídos e testados, foram somente empregados na

simulação mecânica feita no Bisar. Os quatro sistemas idealizados possuem as seguintes camadas:

- Camada asfáltica drenante (em todos os sistemas);
- Camada estabilizadora *choker* (em todos os sistemas);
- Camada de filtro de areia (nos sistemas B e D);
- Camada de reservatório (nos sistemas A, B e D).

É esperado que os sistemas A e C tenham o melhor desempenho mecânico, pois possuem menos camadas drenantes de agregado, as quais têm módulos de elasticidade menores. Em relação aos sistemas B e D é esperado o melhor desempenho na filtragem da água pluvial e de *runoff*, pois possuem maior número de camadas de agregado (também mais espessas), as quais supostamente são responsáveis pela maior filtragem dos poluentes.

Neste trabalho foram elaborados sistemas de pavimento drenante para volumes de tráfego baixo (sistemas B e D) a intermediário (sistemas A e C). Estacionamentos e vias locais (vias de distritos residenciais) têm um baixo volume de tráfego, enquanto vias urbanas do centro ou proximidades são mais movimentadas, com um maior volume de tráfego. Na Tabela 3.2 são indicadas as camadas de cada sistema e quais sistemas foram construídos e testados no experimento exposto a eventos de chuva.

Tabela 3.1 – Sistemas de camadas drenantes

Camadas/ sistemas	Sistemas construídos ¹		Sistemas não construídos ²	
	Sistema A	Sistema B	Sistema C	Sistema D
Camada asfáltica	X	X	X	X
Camada <i>choker</i>	X	X	X	X
Camada de areia		X		X
Camada de reservatório	X	X		X
Simulação mecânica	Todos os sistemas A, B, C e D foram simulados			

¹Refere-se aos sistemas construídos e testados (em termos de qualidade/quantidade).

²Refere-se aos sistemas não construídos.

3.2.1 Placas asfálticas drenantes

As camadas drenantes de revestimento foram confeccionadas em laboratório para serem utilizadas nos experimentos deste trabalho. Ao todo foram construídas três placas asfálticas, sendo duas dimensionadas para simularem o revestimento

asfáltico superficial de uma estrada, e uma placa dimensionada para simular uma camada de base para o revestimento.

As placas foram denominadas:

- Placa Caltrans (camada drenante para revestimento);
- Placa DNER (camada drenante para revestimento);
- Placa PMQ (camada drenante para base de Pré-Misturado a Quente).

As duas placas de revestimento, Caltrans e DNER, foram combinadas com a placa de base, Placa PMQ, e com as demais camadas de agregado, constituindo sistemas de pavimentos drenantes.

Primeiramente foram confeccionados dois corpos de prova para verificação da drenabilidade das misturas asfálticas, sendo compactados na prensa giratória de cisalhamento (corpo de prova PCG), dosado de acordo com a metodologia SUPERPAVE®.

No capítulo 2 foi visto que o volume de vazios esperado de uma mistura asfáltica drenante varia entre 15,0 e 25,0%. Após a verificação do volume de vazios e da drenabilidade dos corpos de prova foram confeccionadas as placas asfálticas para execução do experimento. As placas asfálticas foram confeccionadas conforme especificações e metodologia francesa. Para a mistura dos materiais utilizou-se um misturador mecânico e para a compactação a mesa compactadora. Não foram realizados ensaios mecânicos, pois o objetivo principal desta pesquisa é a análise da qualidade da água.

As três placas asfálticas possuem as dimensões do molde da mesa compactadora: base de 50,0 x 18,0 cm. A espessura das placas asfálticas de revestimento, Caltrans e DNER, é de 7,0 cm. Esta espessura foi adotada a fim de melhorar a resistência mecânica das placas, pois uma camada drenante necessita de uma maior espessura, em relação ao revestimento convencional. A espessura da placa de base, Placa PMQ, é de 5,0 cm.

Na confecção das placas asfálticas foi empregado asfalto modificado pela incorporação de borracha moída de pneu. O uso de ligante modificado por polímero, um ligante de maior qualidade, é justificado pelos mesmos motivos das maiores espessuras, ou seja, para conferir maior resistência à placa asfáltica drenante, e conseqüentemente ao sistema de pavimento.

Nas Figuras 3.8 a 3.10 são apresentadas as três placas confeccionadas, denominadas: Placa DNER, Placa Caltrans, Placa PMQ.

Figura 3.8 – Placa DNER



Figura 3.9 – Placa Caltrans



Figura 3.10 – Placa PMQ



Uma etapa importante deste trabalho foi a definição das granulometrias das placas asfálticas, uma vez que é a granulometria *open graded* que confere o seu aspecto drenante. As faixas granulométricas *open graded* do Departamento de Transporte da Califórnia (Caltrans) e da Geórgia (GDOT), assim como a faixa do

DNER-ES 386/99, foram as mais adequadas ao trabalho de acordo com os agregados disponíveis.

Para as camadas superficiais de revestimento asfáltico foram escolhidas as faixas do Caltrans (2007) e do DNER-ES 386 (1999). A faixa do Caltrans foi empregada na Placa Caltrans, e a primeira faixa do DNER-ES 386/99 na Placa DNER. A curva alvo foi determinada pela curva média entre os limites das faixas escolhidas. A curva alvo é a curva granulométrica dos agregados disponíveis enquadrada nos limites da faixa granulométrica escolhida. Os agregados foram peneirados com lavagem para a confecção da curva granulométrica média.

Na Tabela 3.3 são mostradas as faixas granulométricas *open graded* propostas pelo Caltrans (2007) e pelo DNER-ES 386 (1999).

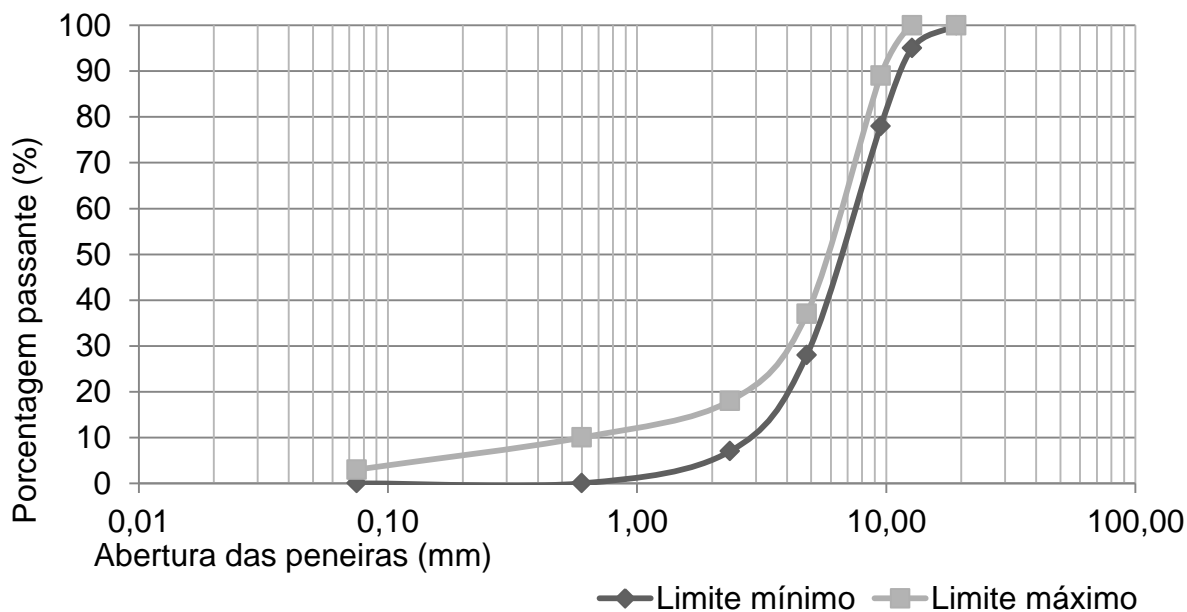
Tabela 3.2 - Faixas Granulométricas *open graded* recomendadas pelos Caltrans e (2007) DNER-ES 386 (1999)

Peneira		Faixa Caltrans (2007)		Faixa I DNER-ES 386 (1999)	
Nº/ polegada	Milímetros (mm)	(%) passante	Tol. (±)	(%) passante	Tol. (±)
3/4"	19,0	100	-	-	-
1/2"	12,5	95 a 100	6	100	7
3/8"	9,5	78 a 89	6	80 a 100	7
Nº 4	4,8	28 a 37	7	20 a 40	5
Nº 8	2,4	7 a 18	5	-	-
Nº 10	2,0	-	-	12 a 20	5
Nº 30	0,6	0 a 10	4	-	-
Nº 40	0,42	-	-	8 a 14	5
Nº 200	0,075	0 a 3	2	3 a 5	2

Fonte: Adaptado de Caltrans (2007) e DNER-ES 386 (1999)

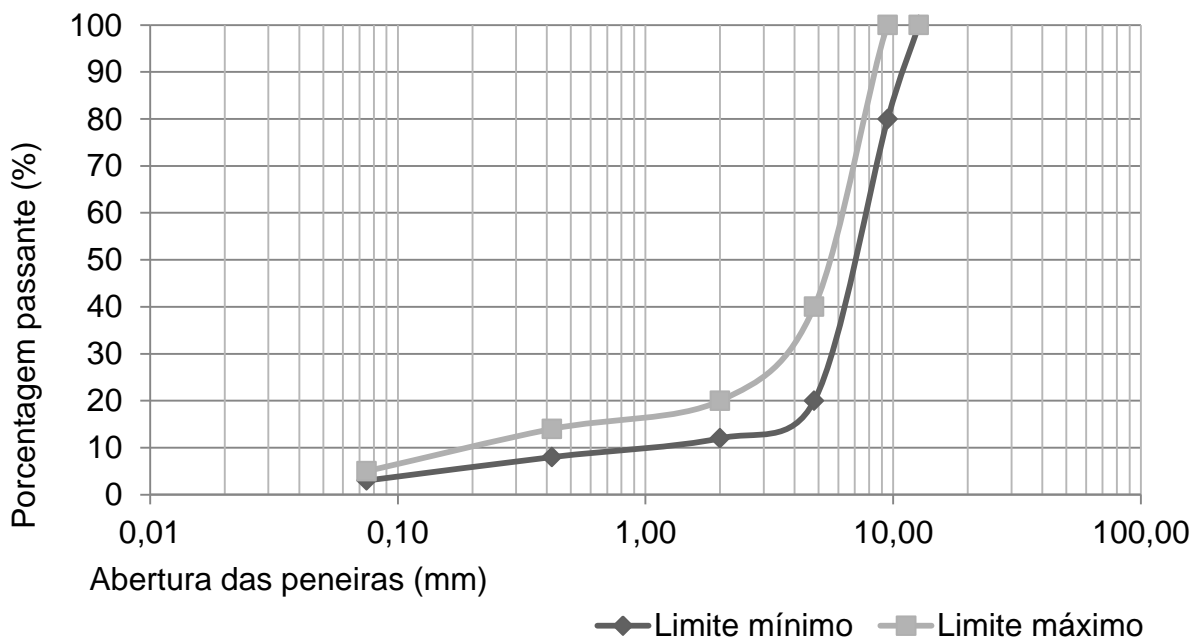
Nas Figuras 3.11 e 3.12 são mostrados os limites das faixas granulométricas recomendadas pelo Caltrans (2007) e pelo DNER-ES 386 (1999), respectivamente.

Figura 3.11 – Limites da faixa do Caltrans (2007)



Fonte: Adaptado de Caltrans (2007)

Figura 3.12 – Limites da faixa I do DNER-ES 386 (1999)



Fonte: Adaptado de DNER-ES 386 (1999)

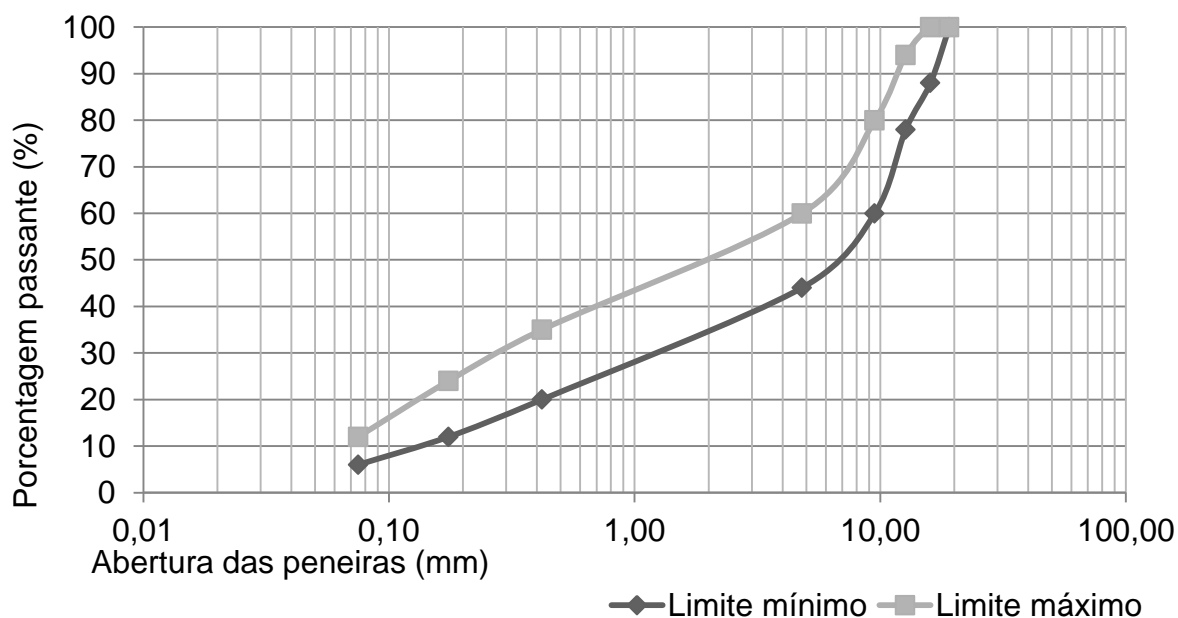
Na placa de Pré-Misturado a Quente (Placa PMQ), foi utilizada a granulometria aberta da faixa I proposta pela PMSP/SP ESP10 (1992) - especificação ESP 10/92 da Prefeitura do Município de São Paulo. Na Tabela 3.4 são mostradas as faixas da especificação ESP 10/92. Na Figura 3.13 são mostrados os limites da faixa I da especificação ESP 10/92.

Tabela 3.3 - Faixa Granulométrica PMSP/SP ESP10 (1992)

Peneira		Percentual Passante (%)	
Número/ polegada	Milímetros (mm)	Faixa I	Faixa II
3/4"	19,0	100	-
5/8"	16,0	88 a 100	100
1/2"	12,5	78 a 94	92 a 100
3/8"	9,52	60 a 80	74 a 90
Nº 4	4,8	44 a 60	60 a 80
Nº 10	2,0	-	-
Nº 40	0,42	20 a 35	30 a 50
Nº 80	0,175	12 a 24	16 a 32
Nº 200	0,075	6 a 12	6 a 12

Fonte: Adaptado de PMSP/SP ESP10 (1992)

Figura 3.13 – Limites da faixa I do PMSP/SP ESP10 (1992)



Fonte: Adaptado de PMSP/SP ESP10 (1992)

3.2.2 Camadas drenantes

Em ordem, da superfície ao subleito, as camadas drenantes construídas para este estudo são:

- Camada de revestimento asfáltico drenante: Placa Caltrans e Placa DNER;
- Camada *choker*: espessura de 5,0 cm, dentro do intervalo 2,5 e 5,0 cm, proposto por Tomaz (2009);
- Camada de filtro de areia: espessura de 12,0 cm, a qual está fora dos limites propostos pelos autores no capítulo 2. As espessuras

recomendadas por UNHSC (2009), por exemplo, eram maiores (20,0 a 30,0 cm), e devido a limitações físicas foram reduzidas no experimento;

- Camada de reservatório: espessura de 16,0 cm, em conformidade com UNHSC (2009), que propõe uma espessura mínima de 10,0 cm. Contudo, a espessura de 16,0 cm está abaixo dos limites propostos por outros autores, como RMWMD (2006) que recomenda espessuras entre 46,0 e 92,0 cm.

Foram confeccionados dois tipos de camada *choker*: uma feita de mistura asfáltica e outra composta de brita. A Placa PMQ de 5,0 cm de espessura foi a mistura asfáltica empregada como camada *choker*. A camada *choker* de pedra foi feita com a faixa granulométrica proposta pela UNHSC (2009), mostrada na Tabela 3.5.

As camadas de filtro de areia e de reservatório também foram confeccionadas conforme as composições granulométricas propostas pela UNSC (2009). No entanto, a camada de reservatório de pedra foi realizada com brita graduada simples para um dos sistemas de pavimento drenante construídos.

A brita graduada simples (BGS) foi produzida de acordo com a faixa C especificada pelo DNIT (2009). Na Tabela 3.6 são mostradas algumas das faixas recomendadas pelo DNIT (2009). Na Figura 3.14 são mostrados os limites da faixa C, onde foi enquadrada a curva média (curva alvo) para confecção da brita graduada simples.

Tabela 3.4 – Faixas granulométricas recomendadas pelo UNHSC (2009)

Peneira		Percentual Passante (%)			
Nº/Polegada	Milímetros	<i>Choker</i>	<i>Filter</i>	<i>Reservoir I</i>	<i>Reservoir II</i>
2 1/2	63,0	-	-	100	-
2	50,0	-	-	90 a 100	-
1 1/2	37,5	100	-	35 a 70	100
1	25,0	95 a 100	-	0 a 15	90 a 100
3/4	19,0	-	-	-	20 a 55
1/2	12,5	25 a 60	-	0 a 5	0 a 10
3/8	9,5	-	100	-	0 a 5
Nº 4	4,8	0 a 10	70 a 100	-	-
Nº 8	2,4	0 a 5	-	-	-
Nº 200	0,075	-	0 a 6	-	-

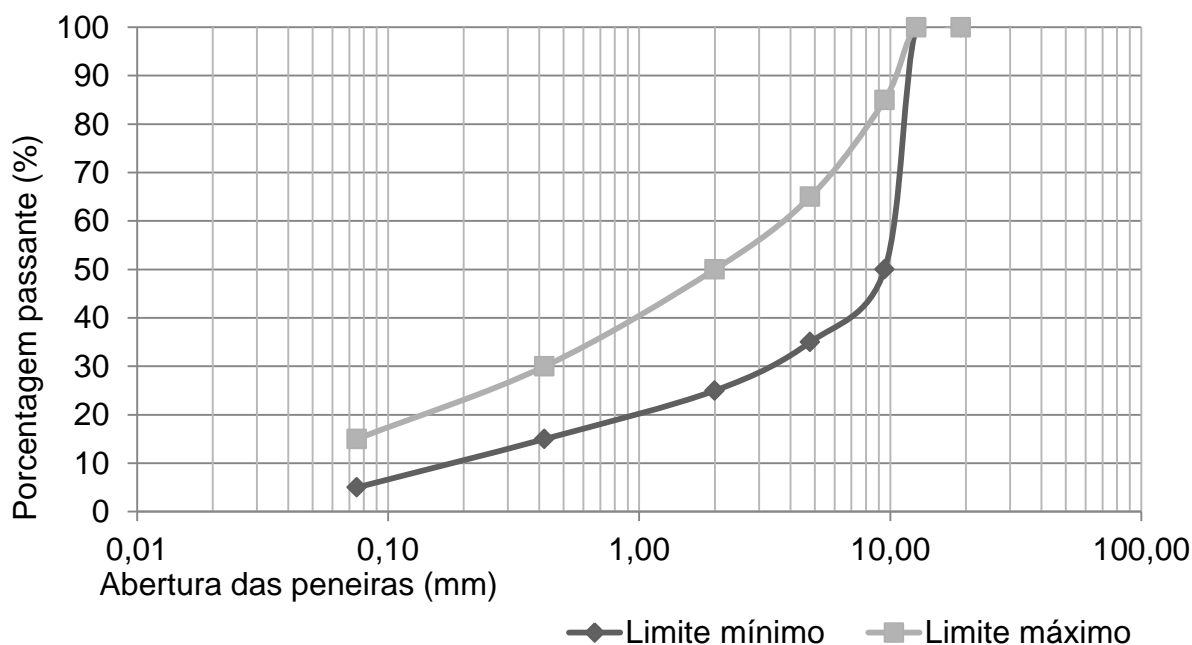
Fonte: Adaptado de UNHSC (2009)

Tabela 3.5 - Faixas Granulométricas para BGS, DNIT (2009)

Peneira		Faixas (% passante)			Tolerância (±)
Nº/ polegada	Milímetros (mm)	A	B	C	
2"	50,8	100	100	-	7
1"	25,4	-	75 a 90	100	7
3/8"	9,52	30 a 65	40 a 75	50 a 85	7
Nº 4	4,8	25 a 55	30 a 60	35 a 65	5
Nº 10	2	15 a 40	20 a 45	25 a 50	5
Nº 40	0,42	8 a 20	15 a 30	15 a 30	2
Nº 200	0,075	2 a 8	5 a 15	5 a 15	2

Fonte: Adaptado de DNIT (2009)

Figura 3.14 – Limites da faixa C do DNIT (2009)



Fonte: Adaptado de DNIT (2010)

3.3 Sistemas de pavimento drenante A e B

Uma vez que os sistemas de camadas drenantes propostos nesta pesquisa atendem a pavimentos drenantes de regiões de maior e de menor volume de tráfego, foi possível verificar diversas combinações que podem ser implantadas nas mais variadas regiões urbanas, atendendo a critérios de viabilidade mecânica e econômica. A diversidade de combinações proporciona uma melhor análise do potencial de filtragem e de drenagem de cada camada.

Os sistemas foram idealizados considerando que quando implantados em uma via pública, a água pluvial seria coletada por drenos na camada de reservatório, antes de infiltrar no solo. Neste caso, o subleito é impermeabilizado.

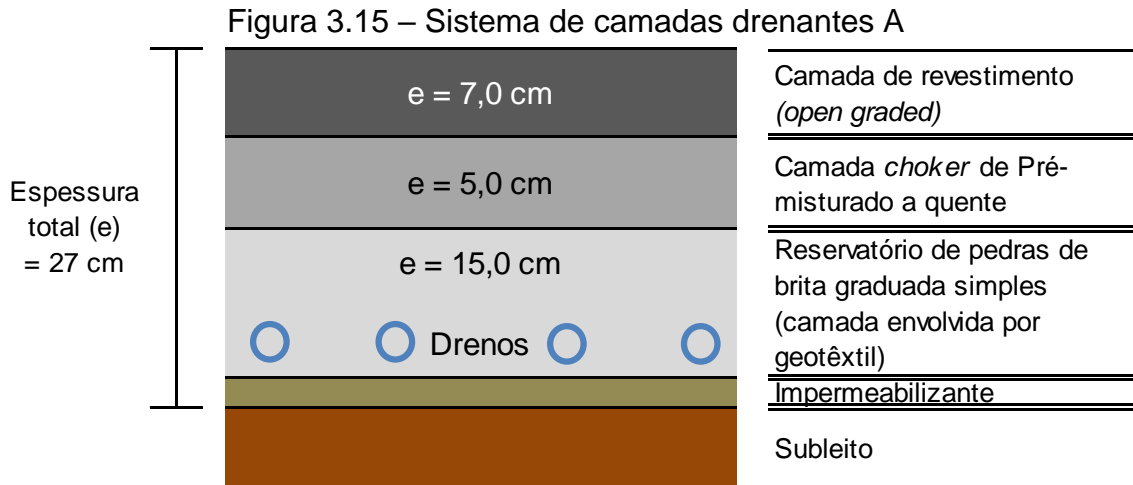
Os sistemas A e B serão apresentados esquematicamente nos itens seguintes deste capítulo, de modo a representá-los em uma instalação real de pavimento drenante, ou seja, são mostrados os tubos drenantes, as camadas impermeabilizantes e o solo do subleito. Contudo, neste trabalho não foram instalados tubos drenantes na camada de reservatório dos modelos testados, pois a água foi coletada no fundo da caixa de acrílico. E, também não foi utilizado impermeabilizante, pois não foi utilizado solo no experimento.

Todas as camadas de agregado do experimento foram envolvidas por geotêxtil para evitar a mistura entre materiais de camadas diferentes e aumentar a estabilidade dos sistemas, assim como em uma instalação real de sistema de pavimento drenante.

Os sistemas C e D serão abordados somente no item deste capítulo que se refere à análise tensão-deformação através da simulação mecânica com o programa Bisar, pois estes sistemas não foram construídos.

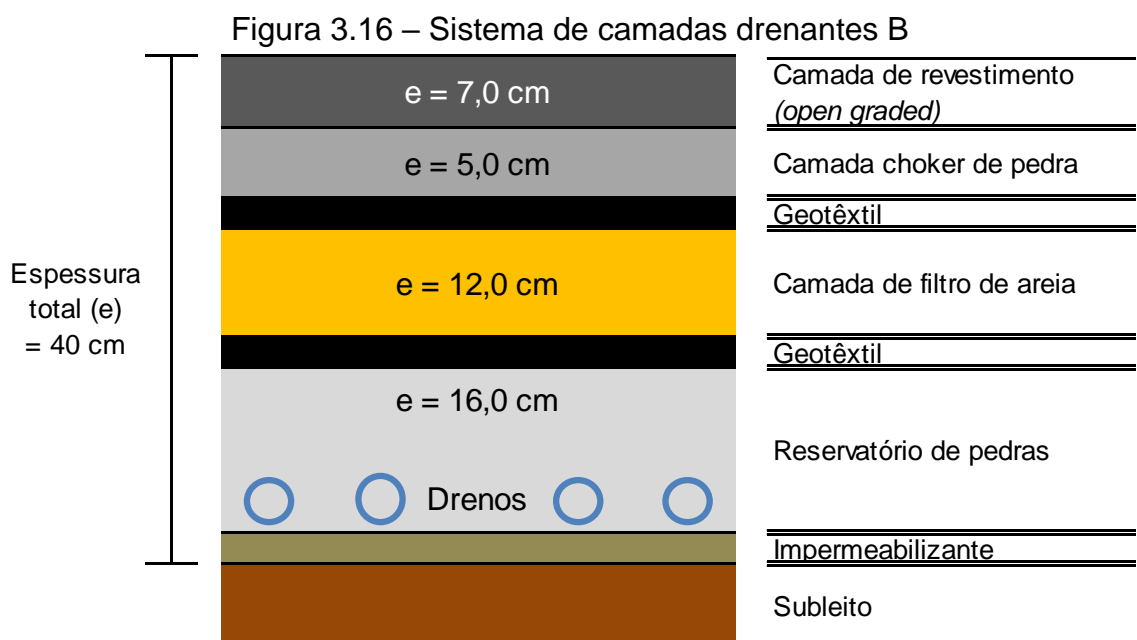
3.3.1 Sistema de camadas drenantes A

O sistema de camadas A atende a volumes de tráfego intermediário em vias urbanas. O sistema possui uma camada de revestimento asfáltico drenante, seguida de uma camada *choker* de Pré-Misturado a Quente (PMQ). A camada de PMQ tem o papel de base do sistema, conferindo mais resistência e estabilidade à camada de revestimento, sendo mais resistente que uma camada granular. A terceira camada tem função de sub-base e de reservatório de água. Esta última camada é constituída de brita graduada simples. O sistema A é mostrado na Figura 3.15.



3.3.2 Sistema de camadas drenantes B

O sistema de camadas B foi elaborado para atender vias locais de baixo volume de tráfego, estacionamentos e pavimentação de conjuntos habitacionais. Após a camada de revestimento asfáltico drenante, o sistema também conta com uma camada de base *choker*. Esta camada é menos resistente que a do modelo A, pois é constituída somente de agregado graúdo, sem ligante. Este sistema conta com uma camada de filtro de areia, logo abaixo da camada *choker*. A última camada, constituída de agregado graúdo, é a camada de reservatório da água. O sistema B é mostrado na Figura 3.16.



Obs.: camadas de agregado envolvidas por geotêxtil.

3.4 Montagem dos sistemas, coleta e etapas de análise

Os sistemas A e B foram testados simultaneamente. As camadas drenantes de pedra e areia, envolvidas por geotêxtil, foram montadas diretamente dentro das caixas de acrílico, pois não foram compactadas.

Em campo, as camadas de pedra devem ser compactadas até determinado grau de compactação. No entanto, as camadas não foram compactadas neste trabalho devido a limitações físicas, uma vez que não há molde para compactar as camadas granulares e transportá-las até o local do experimento sem que haja perda da tensão de confinamento. Na montagem dos sistemas apenas se “assentou” as camadas com uma leve compactação manual.

Nos experimentos utilizou-se uma mangueira flexível para remoção da água do fundo das caixas. A mangueira foi fixada à parede interna da caixa até seu fundo. Assim o sistema não precisou ser desmontado a cada coleta de água.

Uma vez que as camadas de areia e pedra não foram devidamente compactadas, as placas asfálticas não se apoiam diretamente sobre estas camadas, pois estas são extremamente deformáveis, não oferecendo estabilidade às placas asfálticas. Assim, as placas asfálticas DNER e Caltrans, são apoiadas sobre as grelhas metálicas, o que evita sua flambagem excessiva. Na Figura 3.17 é mostrado um esquema de montagem do experimento. Observa-se a mangueira no canto da caixa e o suporte metálico com a grelha. A montagem de um sistema pode ser resumida nos seguintes passos:

- Montar o suporte metálico, ajustando a altura dos pés, e colocar a grelha metálica inferior sobre a base do suporte;
- Fixar a mangueira para coleta de água;
- Colocar a manta de geotêxtil sobre a grelha;
- Colocar os agregados sobre o geotêxtil;
- Assentar a camada compactando com a mão (baixa energia de compactação);
- Fechar a parte superior da camada com geotêxtil;
- Continuar assentando camada sobre camada, até a última camada de agregado;

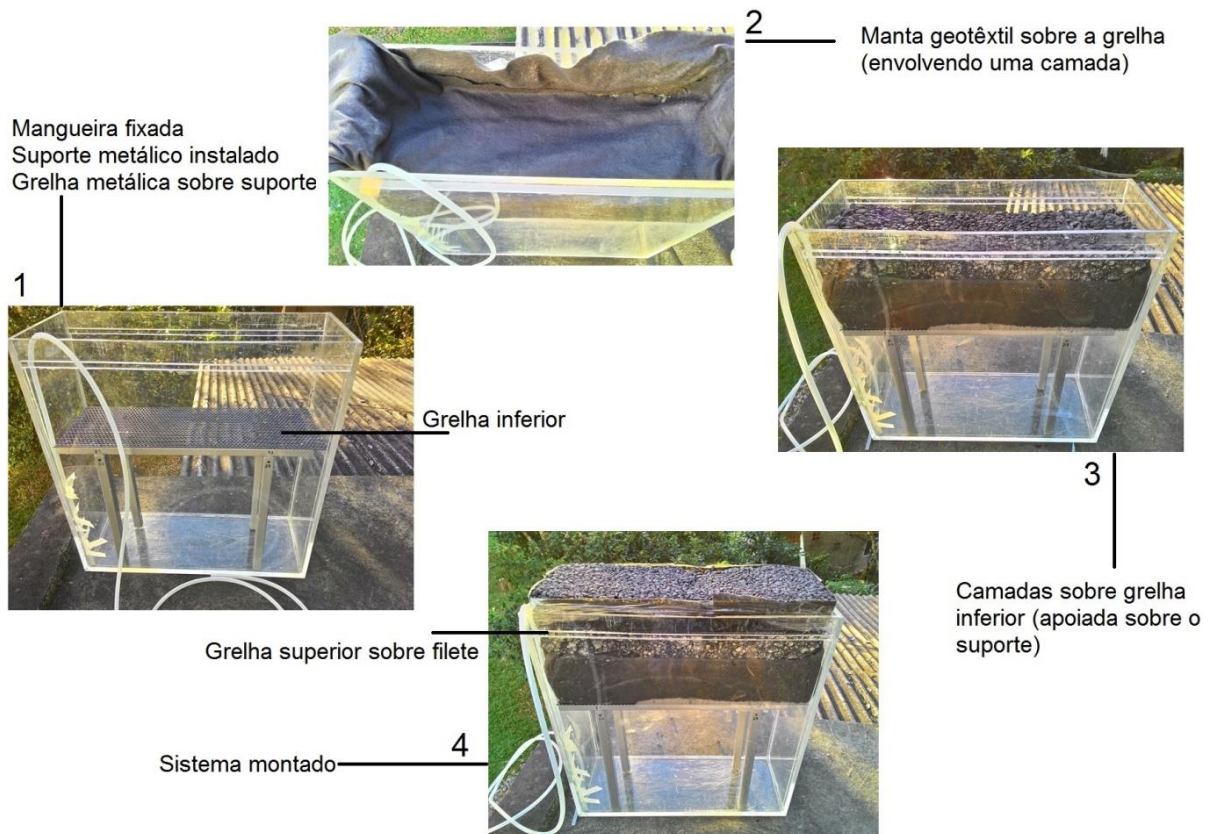
- Após a última camada de agregado é colocada a grelha metálica superior, apoiada nos filetes da caixa;
- Colocar a placa asfáltica que simula o revestimento sobre a grelha superior.

Inicialmente foram testadas duas placas individualmente: Placa DNER e Placa PMQ. Foram medidos os volumes de precipitação infiltrados e analisados alguns parâmetros de qualidade. Nesta etapa do experimento não foram utilizadas águas de *runoff* nas placas.

Após os testes individuais das placas, foram montados os sistemas A e B. Os agregados foram utilizados em seu estado natural, como recebidos pelo fornecedor. Nesta etapa do trabalho foi analisada a água diretamente da chuva e a água de *runoff*. Uma vez concluídos os estudos qualitativos e quantitativos, os sistemas foram removidos. O uso de geotêxtil, além de preservar os materiais facilitou na desmontagem dos sistemas.

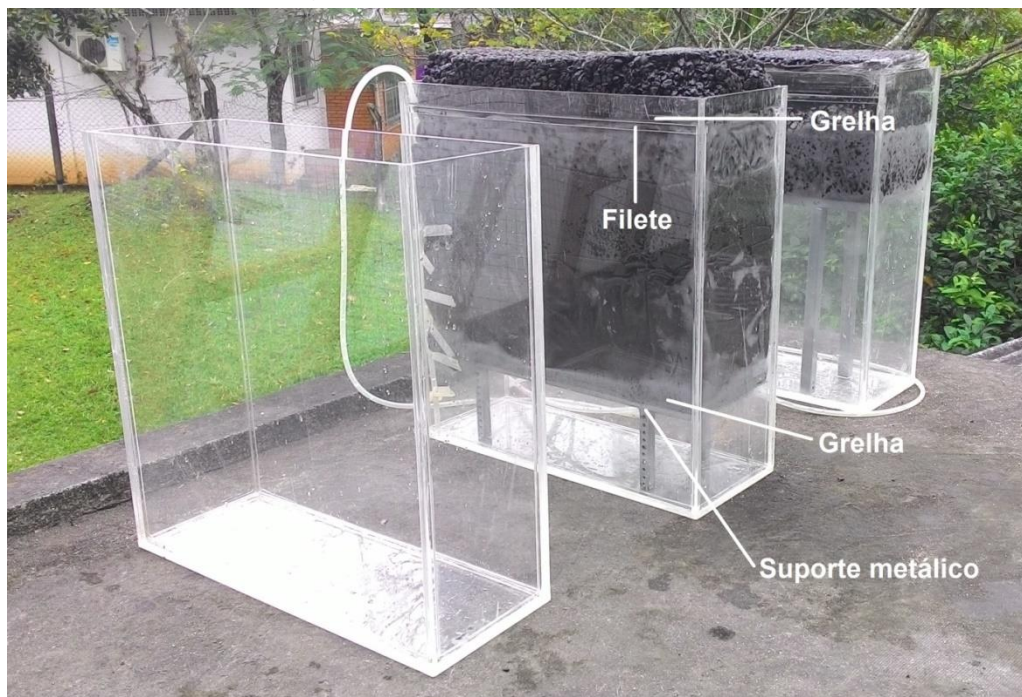
Na próxima etapa do trabalho, os sistemas A e B foram montados e estudados novamente. Foram empregados os mesmos agregados usados na etapa anterior, mas desta vez lavados para remoção do excesso de finos. A lavagem foi necessária devido à possibilidade dos finos contidos nas camadas de agregados contaminarem a água coletada.

Figura 3.17 – Esquema de montagem do experimento



Na Figura 3.18 é mostrado um dos experimentos com indicação dos componentes do suporte metálico.

Figura 3.18 – Sistemas montados



A partir de uma amostra de 300 g da camada de areia e uma amostra também de 300 g da camada de brita graduada simples, foram realizadas análises da qualidade da água de lavagem. Para cada amostra foram realizadas quatro lavagens, verificando-se os níveis de poluentes em cada uma. Na Figura 3.19 são mostradas as amostras de areia e pedra que foram lavadas.

Como o experimento é de curta duração, existe a possibilidade de as camadas não serem limpas com o pequeno número de eventos de chuva ocorridos. Assim, se fez necessário a lavagem dos agregados, simulando a lavagem natural ocorrida na vida inicial de um pavimento drenante.

Nesta etapa, os sistemas foram novamente analisados em termos de qualidade da água e quantidade de água infiltrada. Nesta etapa também foi coletada água diretamente da chuva e água de *runoff* de vias públicas de Florianópolis.

Na Figura 3.20 são mostradas fotos da realização de uma coleta, como também do lançamento da água de *runoff* sobre os sistemas. Observa-se que a água de runoff é despejada de uma garrafa plástica sobre o sistema. A água de runoff foi captada com a garrafa diretamente da sarjeta da estrada, pois esta foi a melhor forma disponível para se realizar a captação. Na Figura 3.21 é mostrado o experimento montado: caixa de controle (coletora de água da chuva), caixa com o sistema A e caixa com o sistema B, com agregados lavados.

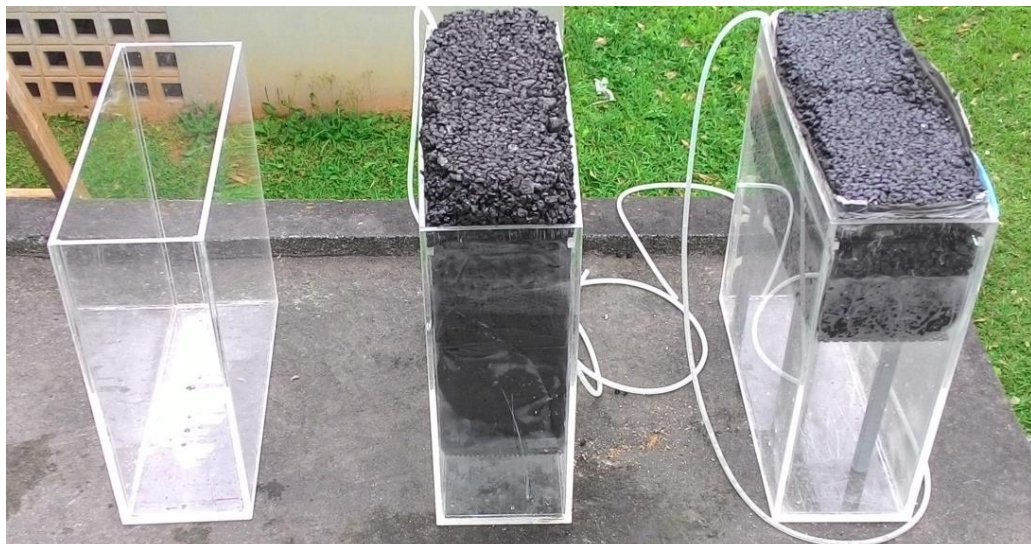
Figura 3.19 – Amostras de areia e brita graduada simples



Figura 3.20 – Exemplo de coleta



Figura 3.21 – Experimento montado



3.5 Estudo quantitativo dos sistemas

O potencial de infiltração dos sistemas foi determinado comparando-se a precipitação global, ou seja, a água depositada na caixa de controle, com a água depositada no fundo das caixas dos sistemas (água infiltrada). O potencial de infiltração dos sistemas pode ser calculado a partir da Equação 3.1.

$$I = \frac{h_1}{h_2} \cdot 100\% \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde:

I é a infiltração de água no sistema analisado (%);

h_1 é a altura da coluna de água infiltrada na caixa do sistema (cm);

h_2 é a altura da coluna de água precipitada na caixa de controle (cm).

O potencial de infiltração de um sistema é entendido como o percentual de água infiltrada no sistema em relação à quantidade precipitada no evento de chuva. Esta afirmação é verdadeira considerando-se que chove igualmente sobre a área superficial (camada de revestimento) das três caixas. É importante ressaltar que as três caixas possuem a mesma área de exposição ao ar livre. Deste modo a infiltração nas caixas dos sistemas em relação à precipitação global é obtida comparando-se as alturas das colunas de água entre as caixas dos sistemas e a caixa de controle.

3.6 Estudo qualitativo dos sistemas

No capítulo 2 foram apresentados os principais poluentes encontrados nas águas pluviais incidentes sobre pavimentos e alguns limites admissíveis dos parâmetros de qualidade da água.

A análise da qualidade da água foi feita com base nestes valores encontrados na literatura e com o auxílio do material disponibilizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), da Universidade Federal de Santa Catarina.

Neste trabalho foram escolhidos dez parâmetros para a análise da qualidade da água pluvial incidente sobre os pavimentos. Os parâmetros escolhidos foram amônia, fósforo, nitrito, oxigênio dissolvido, pH, alumínio, cobre, cromo, ferro e zinco. Os testes destes parâmetros foram executados de acordo com as preconizações dos ensaios da empresa fornecedora dos reagentes químicos, a Alfakit. O equipamento utilizado foi o Fotocolorímetro AT 100P. Alguns dos parâmetros são realizados por comparação colorimétrica, dispensando o uso do Fotocolorímetro. Na Tabela 3.6 são apresentados os parâmetros escolhidos para o estudo da qualidade da água pluvial.

A resolução do aparelho Fotocolorímetro AT 100P é de 0,01 mg/L, com uma margem de erro de 3,0% e precisão relativa de 2,0%. Os ensaios foram realizados de acordo com as instruções de execução para cada parâmetro, encontradas nos manuais de testes da empresa Alfakit.

Na Figura 3.22 é mostrado o equipamento Fotocolorímetro e materiais utilizados nos testes de qualidade, na bancada de análise. Na Figura 3.23 é mostrado um exemplo de comparação colorimétrica.

Tabela 3.6 – Parâmetros de qualidade da água

Parâmetro	LQS ¹	Método de análise	LED ²	(nm)
Alumínio (Al)	1	Eriocromocianina	Verde	λ 535
Amônia (NH ₃)	-	Comparação colorimétrica	-	-
Cobre (Cu)	3	Ditiocarbamato	Azul	440
Cromo (Cr)	3	Difenilcarbazida	Verde	540
Ferro (Fe)	3	Tiocianato	Azul	480
Fósforo (P)	3	Vanadomolibdico	Azul	415
Nitrito (NO ₂ ⁻)	0,3	Naftilamina	Verde	520
Zinco (Zn)	3	Zincon	Amarela	620
Oxigênio Dissolvido (O.D.)	-	Comparação colorimétrica	-	-
pH	-	Comparação colorimétrica	-	-

¹LQS - Limite de quantificação superior que define a faixa linear de trabalho de cada curva dos métodos utilizados pela Alfakit.

²LED - Diodo emissor de luz do equipamento.

Figura 3.22 – Fotocolorímetro e materiais utilizados

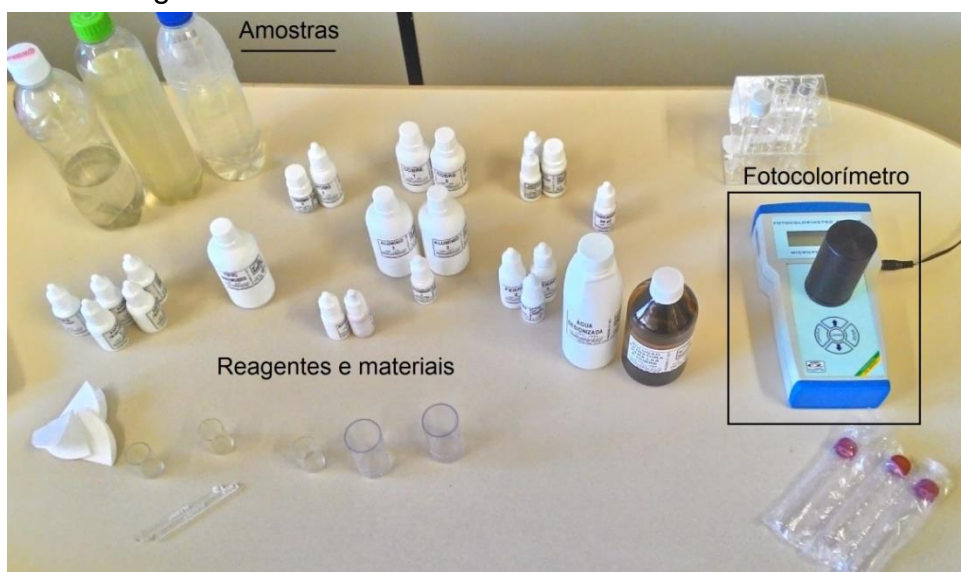


Figura 3.23 – Exemplo de comparação colorimétrica



O potencial de filtragem dos sistemas de pavimentos drenantes foi verificado em duas etapas: água coletada diretamente da chuva e água coletada de *runoff*. Para a água coletada diretamente da chuva, foi analisada a qualidade da água da caixa de controle, onde a chuva incide diretamente, e a qualidade da água infiltrada nos sistemas. Uma análise semelhante foi realizada com as águas de *runoff*. Foi analisada a qualidade da água coletada diretamente do *runoff* e da água de *runoff* infiltrada nos sistemas. A água foi coletada em garrafas plásticas e lançada sobre os sistemas para ser infiltrada.

A partir dos resultados dos testes de qualidade da água coletada podem ser feitas as seguintes comparações:

- Comparações entre os resultados dos sistemas propostos;
- Comparações entre os resultados dos sistemas e os resultados de pavimentos drenantes de outros autores encontrados na revisão de literatura;
- Comparações entre os resultados dos sistemas e os parâmetros de potabilidade das águas.

3.7 Análise tensão-deformação

Na análise tensão-deformação utilizou-se o programa Bisar, versão 3.0. O programa Bisar foi disponibilizado pela Universidade Federal de Santa Catarina.

As características do tráfego, da geometria e dos materiais das camadas, necessários para se executar a análise com o Bisar, são mostrados nos próximos itens. A partir dessas características o programa determinou as deformações e tensões de tração e compressão para os pontos requeridos das camadas (pontos em relação à profundidade).

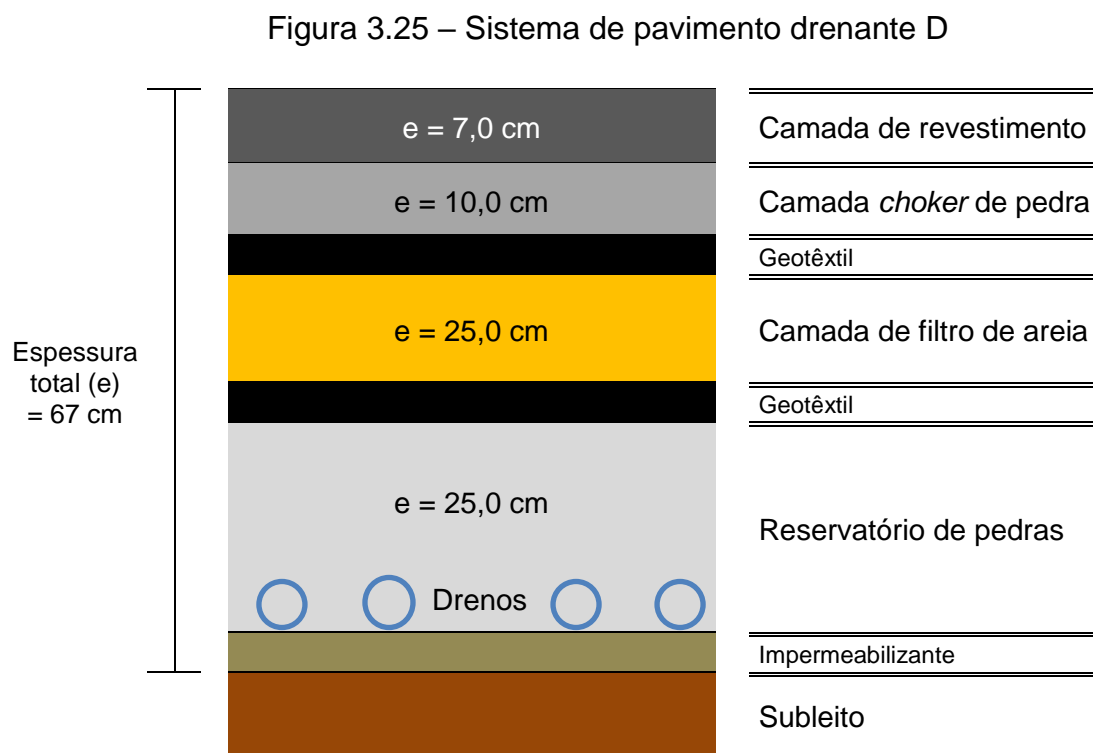
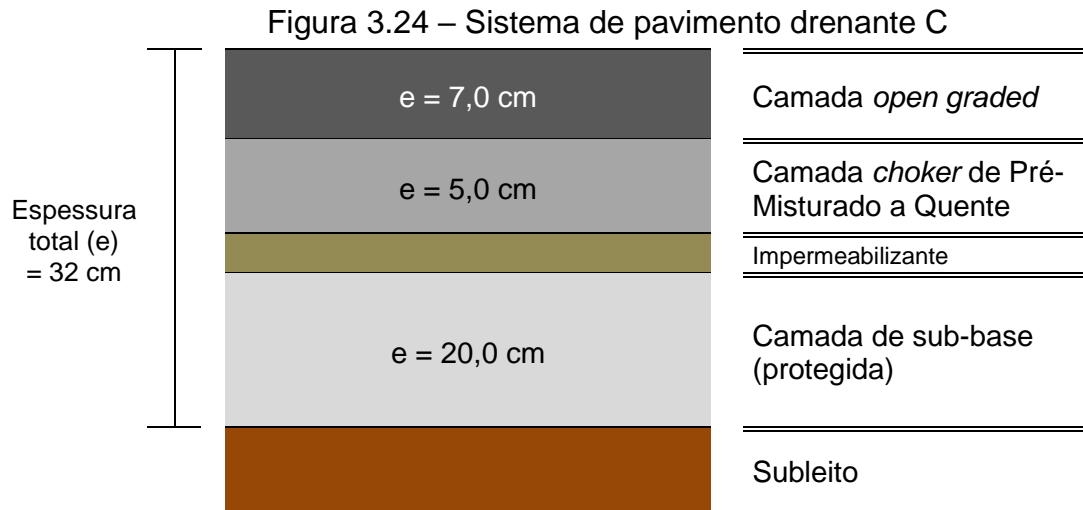
No Bisar, além dos sistemas A e B, foram testados os sistemas C e D. Os sistemas C e D são apresentados a seguir.

3.7.1 Sistemas de pavimento drenante C e D

O sistema C é um pavimento mais rígido, pois possui somente duas camadas drenantes (módulos de elasticidade menores). O sistema foi idealizado pensando-se em atender a maiores volumes de tráfego. As duas camadas drenantes são misturas asfálticas (camada de revestimento e base de Pré-Misturado a Quente). A camada de sub-base é impermeabilizada e constituída de brita graduada simples. Para este pavimento a coleta da água é feita nas sarjetas ou outro dispositivo lateral de drenagem, dispensando o uso de drenos “dentro” do pavimento, como nos outros sistemas. Na Figura 3.24 é mostrado o sistema C.

O sistema D é esperado como o menos resistente dos pavimentos estudados, pois possui camadas mais espessas de agregado, e sua camada de base (*choker*) também é constituída de agregado e não de mistura asfáltica. Desta forma, por ser o sistema menos resistente, o sistema D é voltado a vias locais de distritos

residenciais, estacionamentos e ruas de condomínios. Na Figura 3.25 é mostrado o sistema D.



3.7.2 Dados de entrada no Bisar

Os dados de entrada no Bisar para a realização da análise de tensão-deformação em relação à geometria do rodado são: 105 mm de distância (L) entre

as rodas; 105 mm de raio da área de contato entre roda e o pavimento; 20 kN de carga do pneu, considerando-se o eixo-padrão de 80 kN (carga de 80kN distribuída entre os pneus). Em relação ao travamento entre as camadas, as mesmas foram consideradas camadas ligadas (“coladas”) umas às outras.

Na Tabela 3.8 são mostradas as espessuras e na Tabela 3.9 os módulos de elasticidade e coeficientes de *Poisson* utilizados no Bisar. Na Tabela 3.9 também são indicados os pontos (profundidade) onde foi calculado o estado tensão-deformação nas camadas. Todos os valores destes parâmetros (espessura, módulos e *Poisson*) foram estimados de acordo com os valores encontrados na literatura, pois não foram realizados ensaios mecânicos para determinação destes parâmetros, uma vez que o principal propósito deste trabalho é o estudo da influência do pavimento drenante sobre a qualidade da água infiltrada.

Tabela 3.7 – Espessuras das camadas

Sistemas	Sistema A	Sistema B	Sistema C	Sistema D
Camadas	Espessura (cm)			
Revestimento	7	7	7	7
Base <i>choker</i>	5	5	5	10
Filtro ¹	-	12	20 ³	25
Reservatório ²	15	16		25
Subleito considerado infinito				
Espessuras totais	27	40	32	67

¹Camada de areia

²Camada de agregado (pedra)

³Camada de sub-base impermeabilizada

Figura 3.8 – Módulo de elasticidade, Coeficiente de *Poisson* e pontos de análise

Sistema/ camada	Sistema A		Sistema B		Sistema C		Sistema D		Pontos de análise
	M (MPa)	<i>P</i>	M (MPa)	<i>P</i>	M (MPa)	<i>P</i>	M (MPa)	<i>P</i>	
Revestimento	3000	0,35	2500	0,35	3500	0,35	2000	0,35	Fundo
Base <i>choker</i>	1500 (PMQ)	0,35	250	0,40	2300 (PMQ)	0,35	200	0,40	Fundo
Filtro de areia	-	-	100	0,40	-		80	0,40	-
Reservatório	300 (BGS)	0,40	200	0,40	400 (BGS) sub-base protegida	0,40	100	0,40	-
Subleito	150	0,45	100	0,45	200	0,45	100	0,45	-

Obs.: os materiais de cada camada foram apresentados anteriormente.

Obs.: os pontos de análise se referem à posição no topo ou no fundo da camada.

M – Módulo de elasticidade

P – *Poisson*

3.8 Análise dos dados

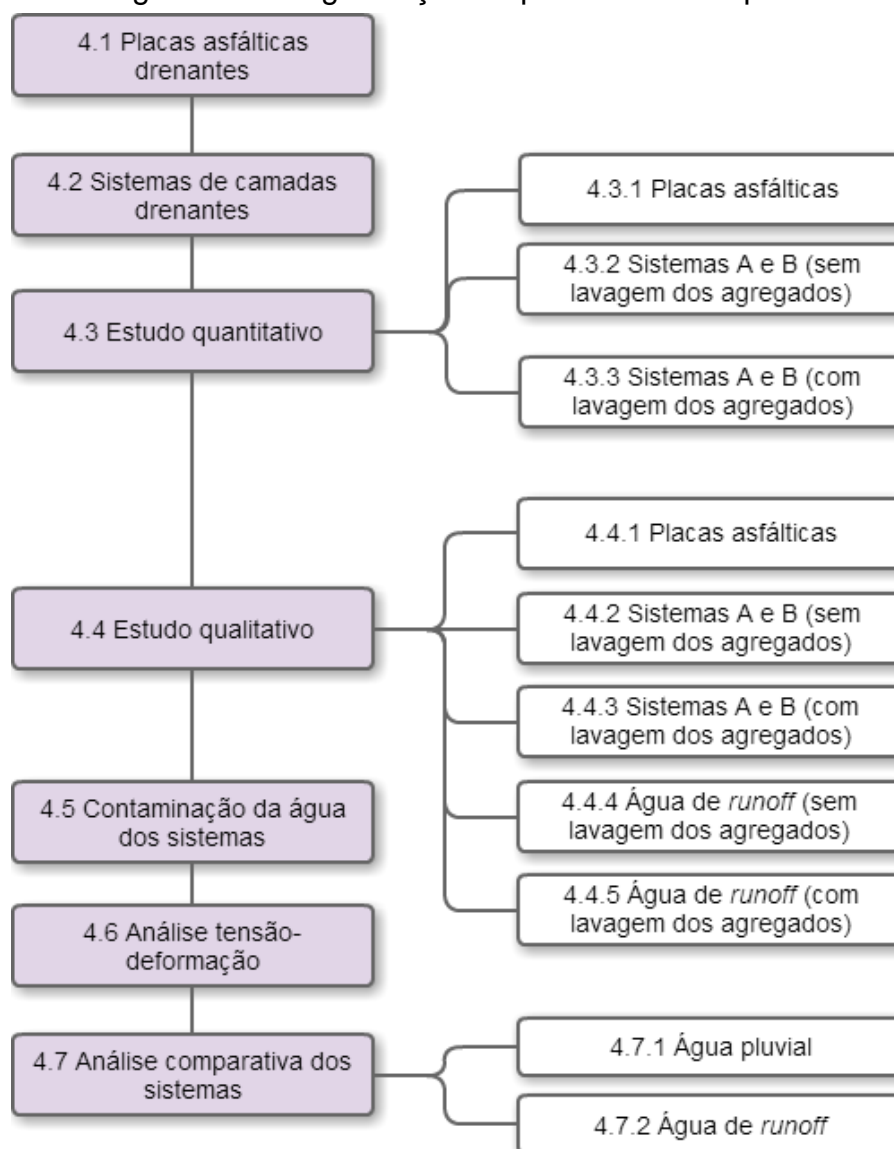
Os dados qualitativos desta pesquisa, referentes aos parâmetros avaliados nos sistemas A e B, foram analisados pelo Método dos Quartis para evidenciar os possíveis pontos que são potenciais dados espúrios e podem ser eliminados do estudo. Deste modo é possível identificar dados que podem ter valores discrepantes em detrimento de erros sistemáticos ou de operação.

De acordo com Fernandes *et al.* (2015), o método dos quartis consiste em analisar o quão distantes estão os mínimos e máximos da sua base de dados do primeiro e do terceiro quartil. O dado pode ser considerado espúrio se for maior que o terceiro quartil somado a $3/2$ da amplitude interquartil e se for menor que o primeiro quartil subtraído de $3/2$ da amplitude interquartil. A amplitude interquartil é a diferença entre o quartil superior (terceiro quartil) e o quartil inferior (primeiro quartil) (HIMMELBLAU, 1970, *apud* CONDIÇÃO, 2015).

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do trabalho. Inicialmente são mostrados os resultados dos procedimentos necessários para a elaboração dos modelos (sistemas), como as composições granulométricas para a confecção das placas asfálticas e a definição das espessuras e materiais utilizados nos modelos de pavimento drenante construídos. Também são apresentados os resultados do estudo quantitativo e qualitativo dos dois sistemas construídos e testados. Estes resultados são comparados e discutidos. Os resultados da análise tensão-deformação também são mostrados neste capítulo. Na Figura 4.1 é apresentada a organização esquemática do capítulo.

Figura 4.1 – Organização esquemática do capítulo



4.1 Placas asfálticas drenantes

As curvas granulométricas das três placas asfálticas confeccionadas foram enquadradas nas faixas escolhidas. As curvas enquadradas são as curvas médias (média entre o limite inferior e superior das faixas escolhidas). Nas placas Caltrans e DNER, que simulam o revestimento asfáltico drenante, e na Placa PMQ, que simula a camada de base, foram utilizadas granulometrias do tipo *open graded*.

Na Tabela 4.1 é mostrada a curva adotada (curva média) e os limites superior e inferior da faixa do Caltrans (2007), onde a curva adotada para a Placa Caltrans foi enquadrada. Na Tabela 4.2 é apresentada a curva média adotada para a Placa DNER, assim como os limites superior e inferior da faixa do DNER-ES 386 (1999), onde foi enquadrada a curva média adotada.

Tabela 4.1 – Granulometria *open graded* adotada para a Placa Caltrans

Peneira (abertura)		Percentual passante - faixa do Caltrans (2007) (%)		Percentual passante adotado (%)
Nº/ Polegada	ASTM (mm)	Limite inferior	Limite superior	
3/4"	19,1	-	100,0	100
1/2"	12,7	95,0	100,0	97,5
3/8"	9,5	78,0	89,0	83,5
Nº 4	4,8	28,0	37,0	32,5
Nº8	2,36	7,0	18,0	12,5
Nº 30	0,6	0,0	10,0	5,0
Nº 200	0,075	0,0	3,0	1,5

Na Figura 4.2 é mostrada a curva média adotada para a Placa Caltrans enquadrada entre os limites da faixa do Caltrans (2007). Na Figura 4.3 é mostrada a curva média adotada para a Placa DNER enquadrada entre os limites da faixa do DNER-ES 386 (1999).

Tabela 4.2 – Granulometria *open graded* adotada para a Placa DNER

Peneira (abertura)		Percentual passante - faixa do DNER-ES 386 (1999) (%)		Percentual passante adotado (%)
Nº/ Polegada	ASTM (mm)	Limite inferior	Limite superior	
1/2"	12,7	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,5	80,0	100,0	90,0
Nº 4	4,8	20,0	40,0	30,0
Nº 10	2,0	12,0	20,0	16,0
Nº 40	0,42	8,0	14,0	11,0
Nº 200	0,075	3,0	5,0	4,0

Figura 4.2 – Curva média adotada para a Placa Caltrans enquadrada entre os limites da faixa do Caltrans (2007)

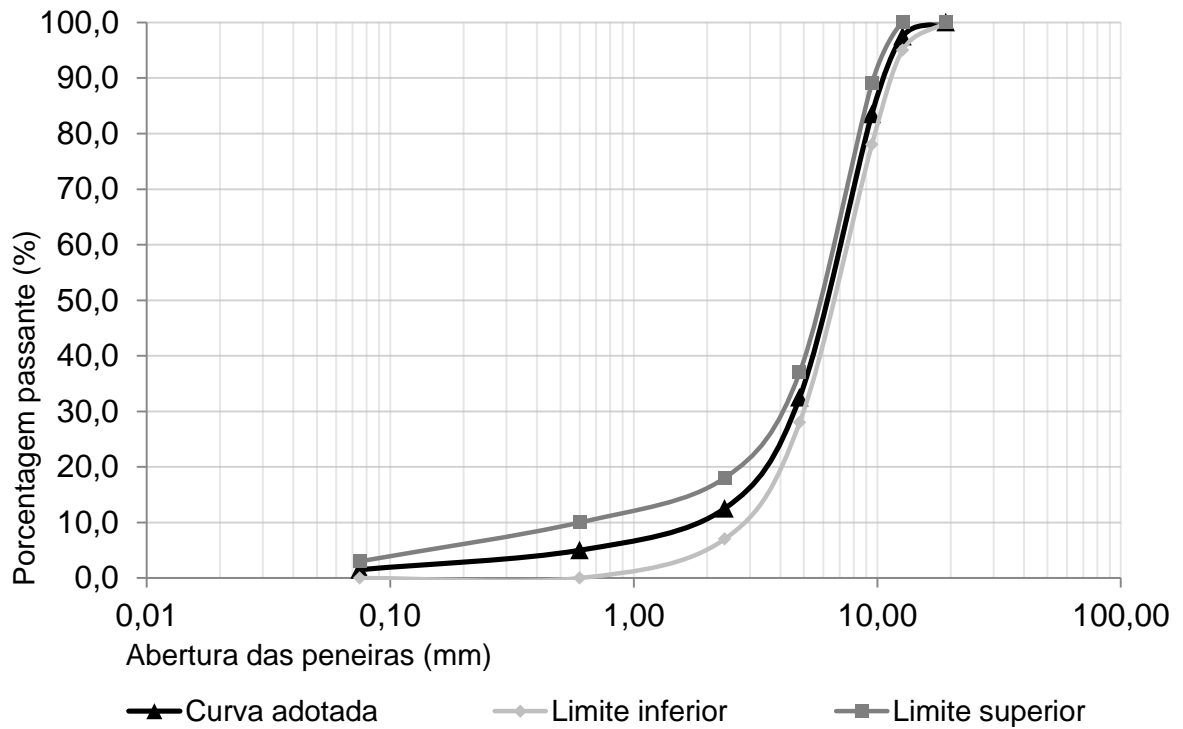
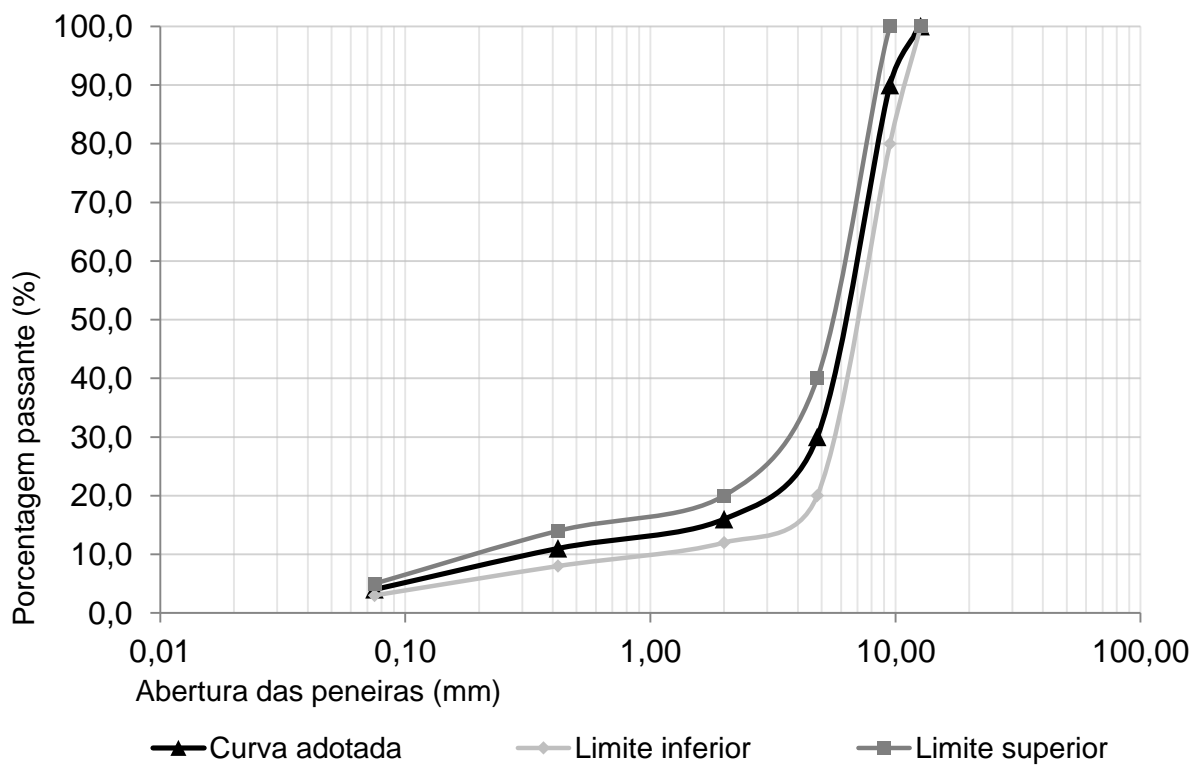


Figura 4.3 – Curva média adotada para a Placa DNER enquadrada entre os limites da faixa do DNER-ES 386 (1999)



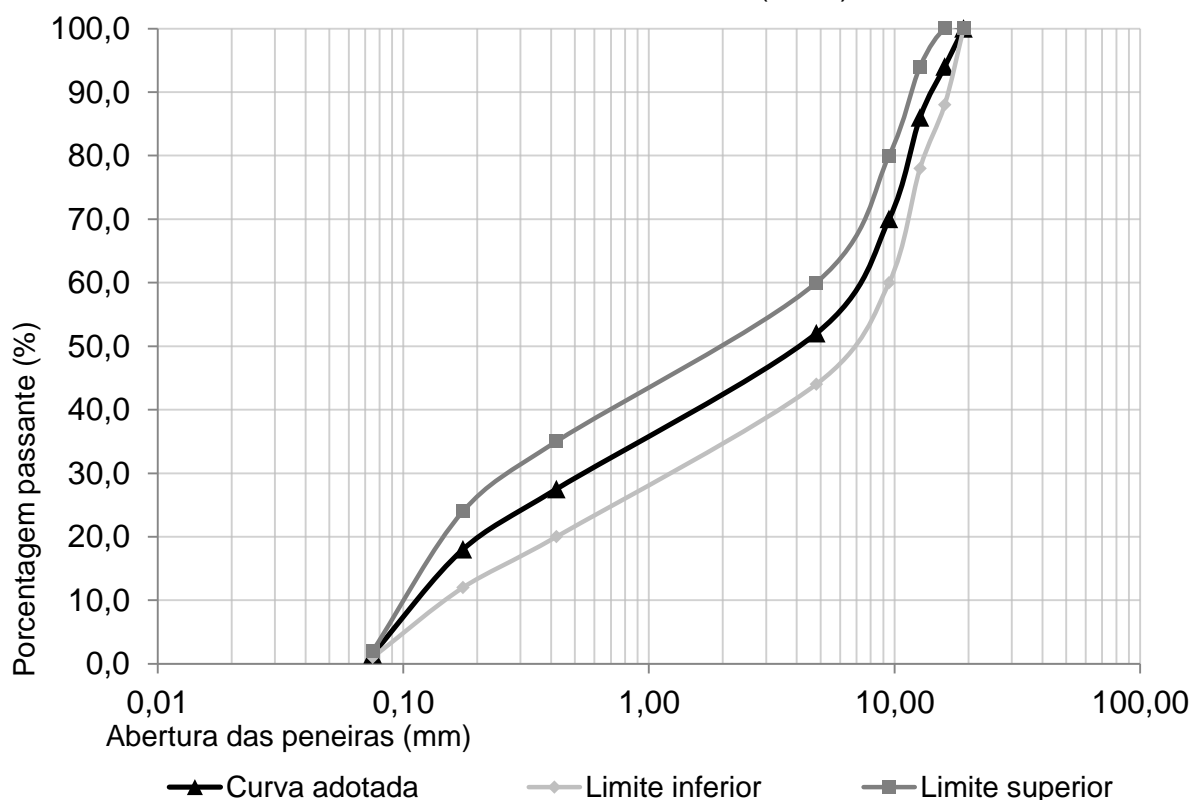
Na Tabela 4.3 é mostrada a curva média adotada para a Placa PMQ, assim como os limites da faixa I do PMSP/SP ESP10 (1992). Na Figura 4.4 é mostrada a

curva média adotada para a Placa PMQ enquadrada entre os limites superior e inferior da faixa I do PMSP/SP ESP10 (1992).

Tabela 4.3 – Granulometria *open graded* adotada para a Placa PMQ

Peneira (abertura)		Percentual passante - faixa I do PMSP/SP ESP10 (1992) (%)		Percentual passante adotado (%)
Nº/ Polegada	ASTM (mm)	Limite inferior	Limite superior	
3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0
5/8"	16,0	88,0	100,0	94,0
1/2"	12,7	78,0	94,0	86,0
3/8"	9,5	60,0	80,0	70,0
Nº 4	4,8	44,0	60,0	52,0
Nº 40	0,42	20,0	35,0	27,5
Nº 80	0,175	12,0	24,0	18,0
Nº 200	0,075	1,0	2,0	1,5

Figura 4.4 – Curva média adotada para a Placa PMQ enquadrada entre os limites da faixa I do PMSP/SP ESP10 (1992)



Na confecção das placas asfálticas foi empregado ligante modificado por polímero. O ligante asfáltico tinha 15,0% de polímero modificador incorporado (borracha moída de pneu). O tipo de asfalto borracha (ligante) utilizado foi *terminal blend*. Na Tabela 4.4 são mostrados os teores de ligante utilizados nas placas asfálticas. Na Tabela 4.4 também é mostrado o volume de vazios das placas.

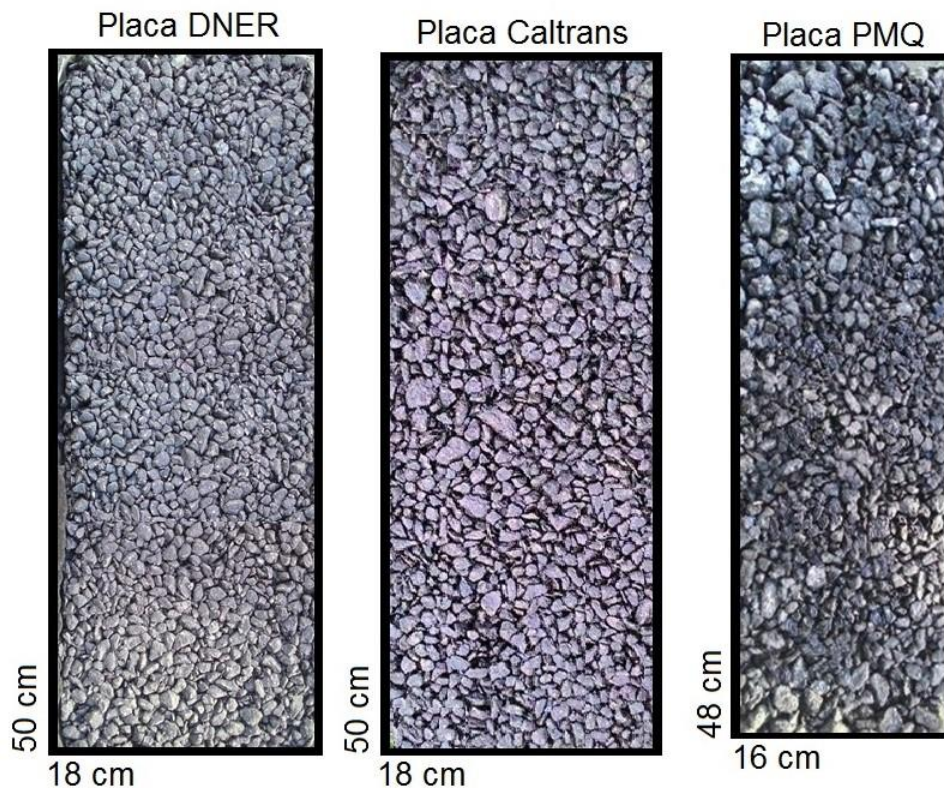
Observa-se que para todas as placas foi obtido volume de vazios maior que 20%, e como as três placas drenaram com excelência a água incidente nos testes realizados, verificou-se que os vazios são interconectados, conferindo característica drenantes às placas.

Tabela 4.4 – Teor de ligante e volume de vazios das placas asfálticas

Placas	Placa PMQ	Placa Caltrans	Placa DNER
Teor de ligante (%)	3,5	3,5	4,5
Volume de vazios (%)	29,0	23,0	25,0

Na Figura 4.5 são mostradas as três placas confeccionadas e suas dimensões. As placas foram moldadas com as mesmas dimensões, mas como a Placa PMQ foi empregada como camada de base nos modelos, a qual fica abaixo do filete da caixa de acrílico, a mesma foi cortada para melhor ajuste dentro da caixa. As dimensões passaram a ser 16,0 cm de base e 48,0 cm de largura.

Figura 4.5 – Placas confeccionadas e suas dimensões



4.2 Sistemas de camadas drenantes

Os dois sistemas drenantes construídos possuem em comum a camada asfáltica que representa o revestimento asfáltico de um pavimento, sendo a Placa DNER utilizada no sistema A e a Placa Caltrans no sistema B. No sistema A foi empregado a Placa de PMQ para simular uma camada de base de Pré-Misturado a Quente. As outras camadas dos sistemas A e B são compostas de agregados, cujas composições granulométricas encontram-se nas Tabelas 4.5 e 4.6. Nas Tabelas 4.5 e 4.6 também são mostradas as espessuras e diâmetros máximos dos agregados.

Nas Figuras 4.6 e 4.7 são mostrados os sistemas A e B construídos, e o material componente de suas camadas, como também a espessura das camadas.

Tabela 4.5 – Composição granulométrica adotada para o sistema A

Camada	Espessura (cm)	Granulometria	Diâmetro máximo do agregado (mm)
<i>Open Graded</i> (Placa DNER)	7,0	Faixa do DNER-ES 386 (1999)	6,4
<i>Choker</i> (Placa PMQ)	5,0	Faixa I do PMSP/SP ESP10 (1992)	19,0
Reservatório de brita graduada simples	15,0	Faixa C do DNIT (2009)	25,4
Espessura total	27,0	-	-

Obs.: As camadas de agregado foram envolvidas por manta geotêxtil.

Tabela 4.6 – Composição granulométrica adotada para o sistema B

Camada	Espessura (cm)	Granulometria	Diâmetro máximo do agregado (mm)
<i>Open Graded</i> (Placa Caltrans)	7,0	Faixa do Caltrans (2007)	12,7
<i>Choker</i>	5,0	Faixa do UNHSC (2009)	25,0
Filtro de Areia	15,0	Faixa do UNHSC (2009)	4,8
Reservatório	16,0	Faixa do UNHSC (2009)	25,0
Espessura total	43,0	-	-

Obs.: As camadas de agregado foram envolvidas por manta geotêxtil.

Nas representações dos sistemas A e B no capítulo 3 foi ilustrado o emprego de camadas de geotêxtil, impermeabilizante, drenos e também do subleito, mostrando como seria a implantação esquemática de um pavimento drenante. Nas representações dos sistemas A e B nas Figuras 4.6 e 4.7 deste capítulo, observa-se que no experimento não foi utilizado impermeabilizante e drenos, pois a água foi captada no fundo da caixa de acrílico.

Figura 4.6 – Camadas componentes do sistema A

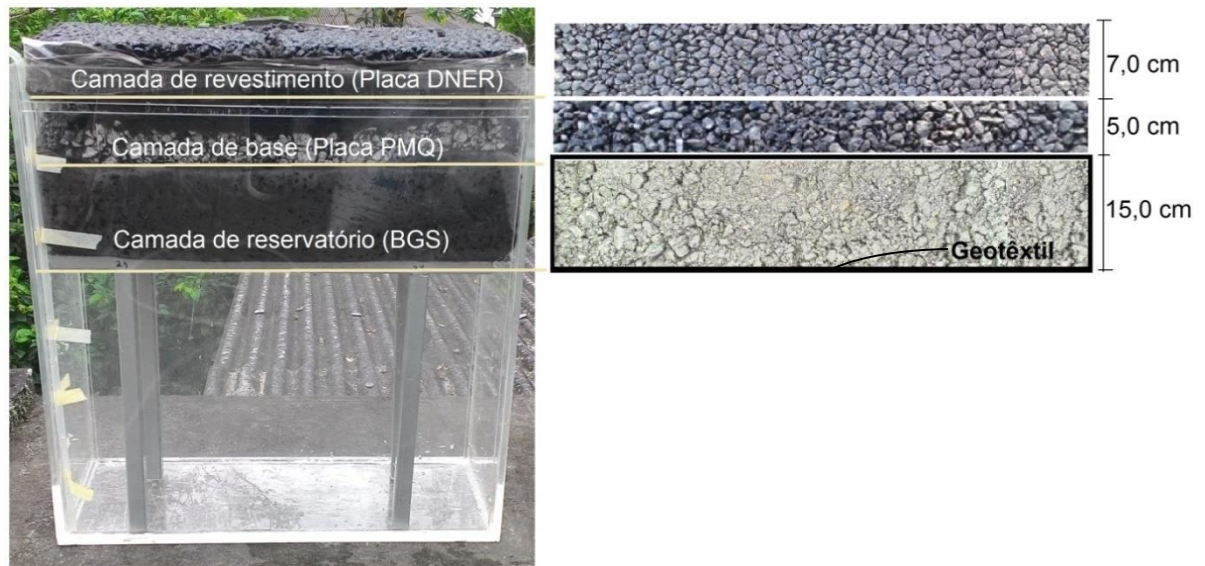
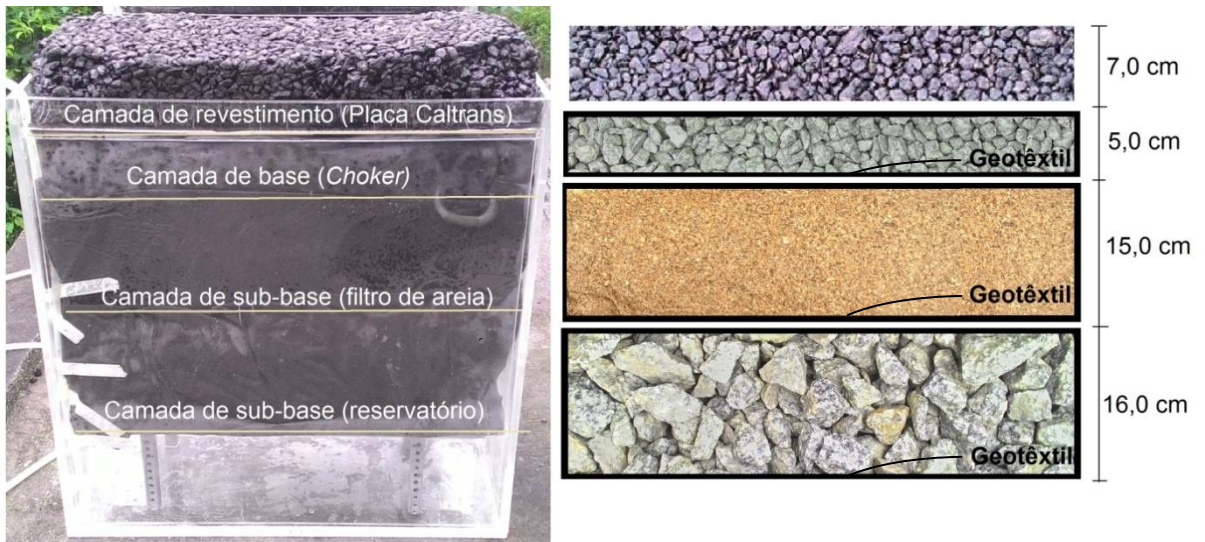
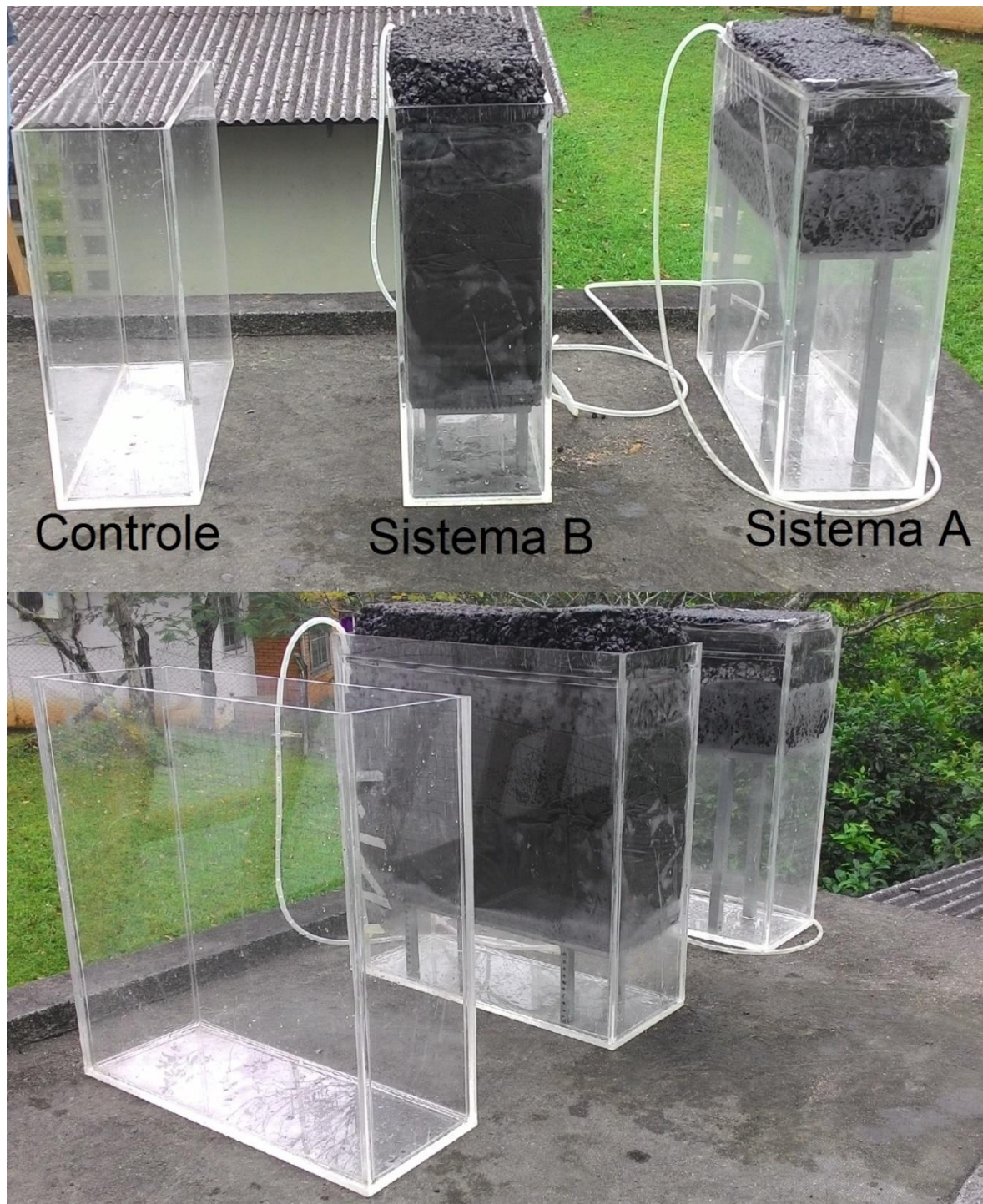


Figura 4.7 – Camadas componentes do sistema B



Na Figura 4.8 é mostrado o experimento por completo montado, incluindo os sistemas A e B, como também a caixa de controle.

Figura 4.8 – Experimento completo montado



As fotos da Figura 4.8 foram tiradas após a lavagem do material componente das camadas dos sistemas A e B. Os sistemas A e B antes e depois da lavagem do material possuem as mesmas características.

4.3 Estudo quantitativo

No estudo quantitativo são apresentados os resultados referentes ao potencial de infiltração ou potencial de drenagem das placas. O estudo quantitativo foi realizado com as placas asfálticas individualmente e nos sistemas A e B, antes e depois da lavagem dos materiais componentes das camadas.

A Placa Caltrans não foi testada individualmente devido a Placa DNER já ter representado o desempenho da camada de revestimento. Nos sistemas A e B foi somente medida a quantidade de água infiltrada advinda diretamente da chuva. A quantidade de água de *runoff* infiltrada não foi medida, pois se considerou que o potencial de infiltração dos sistemas quanto à água de *runoff* seria semelhante ao potencial de infiltração dos sistemas quanto à água incidente diretamente da chuva.

4.3.1 Placas asfálticas

No estudo foram testadas individualmente as placas DNER, que simula a camada de revestimento asfáltico de desgaste, e PMQ, que simula uma camada de base. Na Tabela 4.7 é apresentado o quantitativo de infiltração das placas em relação à quantidade precipitada na “caixa controle”. Na Tabela 4.7, “controle” se refere à água coletada diretamente da precipitação na caixa de acrílico denominada “caixa de controle”.

Tabela 4.7 – Infiltração nas placas testadas individualmente

Nº da amostra	Controle	Placa DNER		Placa PMQ	
	Precipitação global (mm)	Infiltração (mm)	Infiltração (%)	Infiltração (mm)	Infiltração (%)
1	47,00	47,00	100,00	42,00	89,36
2	29,00	25,00	86,21	23,00	79,31
3	27,00	24,00	88,89	22,00	81,48
4	12,00	9,00	75,00	6,00	50,00
5	156,00	155,00	99,36	142,00	91,03
6	26,00	25,00	96,15	22,00	84,62
7	28,00	25,00	89,29	22,00	78,57
Infiltração média (%)		90,70		79,20	
Desvio padrão		8,79		13,73	

Na Tabela 4.7 observa-se que ambas as placas obtiveram resultados semelhantes. Embora a diferença da média do percentual de infiltração entre as

placas seja de somente cerca de 10,0%, a Placa DNER drenou (infiltrou) uma quantidade maior de água que a Placa PMQ em todos os eventos de chuva. As duas placas apresentaram bons resultados de infiltração, contudo, o desvio padrão foi alto para as duas, 8,79 e 13,73% para a Placa DNER e Placa PMQ, respectivamente.

4.3.2 Sistemas A e B (sem lavagem dos materiais componentes das camadas)

Na Tabela 4.8 são mostrados os resultados de infiltração para os sistemas A e B antes da lavagem dos materiais utilizados nas camadas. Embora os resultados tenham sido semelhantes, a infiltração no sistema A foi menor que no sistema B, com uma diferença aproximada de 3,0%. A precipitação global nas dez coletas realizadas foi baixa, menor que 4,0 mm na maioria dos dias. O desvio padrão foi de aproximadamente 18,0% para os dois sistemas. Para as duas primeiras coletas do sistema A (amostras 8 e 9) e para a primeira coleta do sistema B (amostra 8) pouca água da precipitação foi infiltrada. A baixa infiltração inicial pode ser devida aos sistemas estarem secos e reterem parte considerável da água da chuva, pois a infiltração foi alta para todas as amostras seguintes.

Tabela 4.8 – Infiltração nos sistemas A e B (sem lavagem dos agregados)

Nº da amostra	Controle	Sistema A		Sistema B	
	Precipitação global (mm)	Infiltração (mm)	Infiltração (%)	Infiltração (mm)	Infiltração (%)
8	2,70	1,30	48,15	1,00	37,04
9	4,30	2,50	58,14	4,10	95,35
10	3,80	3,50	92,11	3,70	97,37
11	1,60	1,50	93,75	1,40	87,50
12	8,70	8,70	100,00	8,70	100,00
13	8,65	8,60	99,42	8,35	96,53
14	1,80	1,40	77,78	1,50	83,33
15	1,10	1,10	100,00	1,10	100,00
16	4,60	3,55	77,17	3,70	80,43
17	1,10	1,00	90,91	0,95	86,36
Infiltração média (%)		83,74		86,39	
Desvio padrão		18,25		18,73	

4.3.3 Sistemas A e B (com lavagem dos materiais componentes das camadas)

A Tabela 4.9 mostra os resultados de infiltração para os sistemas A e B após a lavagem dos materiais (agregados) das camadas. Os resultados foram aproximadamente iguais, com infiltração da precipitação de cerca de 90,0% para os dois sistemas. A precipitação global coletada na “caixa controle” foi superior a 2,0 mm em todas as coletas. O desvio padrão foi baixo, 4,35 e 5,26% para os sistemas A e B, respectivamente.

Tabela 4.9 – Infiltração nos sistemas A e B (após lavagem dos agregados)

Nº da amostra	Controle	Sistema A		Sistema B	
	Precipitação global (mm)	Infiltração (mm)	Infiltração (%)	Infiltração (mm)	Infiltração (%)
18	7,20	6,40	88,89	6,40	88,89
19	2,30	2,00	86,96	2,10	91,30
20	8,20	7,20	87,80	6,80	82,93
21	11,10	10,90	98,20	10,60	95,50
22	2,40	2,20	91,67	2,00	83,33
23	3,50	3,00	85,71	3,00	85,71
24	3,40	3,20	94,12	3,30	97,06
25	5,52	4,78	86,59	4,85	87,86
Infiltração média (%)		89,99		89,07	
Desvio padrão		4,35		5,26	

4.4 Estudo qualitativo

Neste item são apresentados os resultados referentes às análises da qualidade da água coletada, sendo a água coletada diretamente da precipitação e da água de *runoff*. Nos sistemas A e B, antes e depois dos agregados das camadas serem lavados, e nas placas asfálticas, individualmente, foram analisados os parâmetros oxigênio dissolvido (mg/L), pH, amônia (mg/L), nitrito (mg/L), fósforo (mg/L), ferro (mg/L), alumínio (mg/L), zinco (mg/L), cobre (mg/L) e cromo (mg/L), com seus resultados apresentados a seguir.

4.4.1 Placas asfálticas

Na Tabela 4.10 são mostradas a média e o desvio padrão dos resultados referentes às análises de qualidade da água pluvial infiltrada nas placas DNER e

PMQ. Na Tabela 4.11 é mostrado o percentual de variação do parâmetro avaliado da água infiltrada nas placas em relação à água da precipitação da “caixa controle”.

Tabela 4.10 – Média e desvio padrão dos parâmetros analisados

Parâmetro	Controle (precipitação)		Placa DNER		Placa PMQ	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Oxigênio (mg/L)	8,86	0,35	8,86	0,35	8,86	0,35
pH	5,50	0,00	5,79	0,39	5,93	0,53
Amônia (mg/L)	0,14	0,07	0,26	0,18	0,26	0,18
Nitrito (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fósforo (mg/L)	0,15	0,15	0,14	0,15	0,14	0,16
Ferro (mg/L)	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03	0,03
Alumínio (mg/L)	0,03	0,02	0,04	0,02	0,04	0,04
Zinco (mg/L)	0,06	0,09	0,05	0,09	0,06	0,10
Cobre (mg/L)	0,24	0,45	0,32	0,47	0,32	0,60
Cromo (mg/L)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Através das Tabelas 4.10 e 4.11, nota-se que o oxigênio dissolvido praticamente não sofreu influência das placas, com média de 8,86 mg/L de oxigênio dissolvido para a água pluvial e para a água infiltrada nas placas, com um desvio padrão pequeno de 0,35 para as duas placas. O pH subiu 5,19 e 7,79% para as placas DNER e PMQ, respectivamente, em relação à água da precipitação. A água infiltrada nas duas placas apresentou pH de aproximadamente 6,00. Na Tabela 4.12 é mostrado o resultado de cada amostra em relação ao oxigênio dissolvido e pH.

Tabela 4.11 – Variação percentual média dos parâmetros analisados

Parâmetro	Placa DNER (%)	Placa PMQ (%)
Oxigênio (mg/L)	0,00	0,00
pH	5,19	7,79
Amônia (mg/L)	80,00	80,00
Nitrito (mg/L)	0,00	0,01
Fósforo (mg/L)	-6,73	-8,65
Ferro (mg/L)	92,31	76,92
Alumínio (mg/L)	30,43	21,74
Zinco (mg/L)	-15,91	-2,27
Cobre (mg/L)	33,14	31,36
Cromo (mg/L)	-12,50	-50,00

Obs.: valores negativos representam redução do valor do parâmetro

Tabela 4.12 – Concentração de oxigênio e pH na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Placa DNER		Placa PMQ	
	Oxigênio (mg/L)	pH	Oxigênio (mg/L)	pH	Oxigênio (mg/L)	pH
1	9,00	5,50	9,00	6,50	9,00	7,00
2	9,00	5,50	9,00	6,00	9,00	6,00
3	9,00	5,50	9,00	5,50	9,00	6,00
4	8,00	5,50	8,00	6,00	8,00	6,00
5	9,00	5,50	9,00	5,50	9,00	5,50
6	9,00	5,50	9,00	5,50	9,00	5,50
7	9,00	5,50	9,00	5,50	9,00	5,50
Média	8,86	5,50	8,86	5,79	8,86	5,93
Desvio padrão	0,38	0,00	0,38	0,39	0,38	0,53

A Tabela 4.11 mostra que a amônia teve um aumento de 80,0% na água infiltrada nas placas. Na Tabela 4.13 nota-se que a concentração de amônia na água de precipitação foi 10,0 mg/L na maioria das coletas, com exceção de duas. Na água infiltrada nas placas, a concentração de amônia manteve-se a mesma ou maior, o que ocorreu na maioria das coletas, mas nunca reduziu.

A Tabela 4.13 também mostra os resultados de concentração de nitrito, o qual não sofreu muita influência das placas, com um pequeno aumento em algumas das amostras, dentro da margem de erro do equipamento Fotocolorímetro.

Tabela 4.13 – Concentração de amônia e nitrito na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Placa DNER		Placa PMQ	
	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)
1	0,25	0,01	0,50	0,00	0,50	0,00
2	0,10	0,00	0,25	0,01	0,25	0,01
3	0,10	0,00	0,10	0,00	0,25	0,01
4	0,25	0,00	0,50	0,01	0,50	0,01
5	0,10	0,00	0,10	0,00	0,10	0,00
6	0,10	0,00	0,10	0,00	0,10	0,00
7	0,10	0,00	0,25	0,00	0,10	0,01
Média	0,14	0,00	0,26	0,00	0,26	0,01
Desvio padrão	0,07	0,00	0,18	0,00	0,18	0,01

Na Tabela 4.11 se observa que a concentração de fósforo reduziu 6,73 e 8,65% para a água infiltrada nas placas DNER e PMQ, respectivamente. Contudo, como observado na Tabela 4.14, o desvio padrão foi alto, mas isto pode ser justificado pelo fato de a concentração de fósforo na atmosfera mudar, devido fatores pluviométricos (seca), entre os dias de coleta.

Na Tabela 4.14 se observa que na maioria das amostras a concentração de fósforo reduziu, com exceção da última, onde houve um aumento discrepante deste parâmetro na água infiltrada nos dois sistemas. Esta amostra discrepante é considerada um espúrio pelo método dos quartis.

Tabela 4.14 – Concentração de fósforo e ferro na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Placa DNER		Placa PMQ	
	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)
1	0,32	0,04	0,19	0,07	0,24	0,05
2	0,36	0,00	0,20	0,00	0,07	0,00
3	0,20	0,00	0,17	0,00	0,24	0,00
4	0,00	0,04	0,00	0,05	0,00	0,08
5	0,03	0,05	0,00	0,03	0,00	0,03
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
7	0,13	0,00	0,41	0,10	0,40	0,00
Média	0,15	0,02	0,14	0,04	0,14	0,03
Desvio padrão	0,15	0,02	0,15	0,04	0,16	0,03

Na Tabela 4.15 pode se observar que a concentração de alumínio e zinco teve um grande desvio padrão tanto para a água da precipitação quanto para a água infiltrada nas placas. Em geral, a concentração de alumínio aumentou e a de zinco diminuiu na água infiltrada.

Tabela 4.15 – Concentração de alumínio e zinco na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Placa DNER		Placa PMQ	
	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)
1	0,05	0,02	0,05	0,01	0,04	0,02
2	0,00	0,10	0,02	0,06	0,00	0,06
3	0,02	0,05	0,02	0,05	0,00	0,06
4	0,03	0,00	0,05	0,00	0,03	0,02
5	0,03	0,25	0,03	0,24	0,03	0,27
6	0,03	0,00	0,06	0,00	0,09	0,00
7	0,07	0,02	0,07	0,01	0,09	0,00
Média	0,03	0,06	0,04	0,05	0,04	0,06
Desvio padrão	0,02	0,09	0,02	0,09	0,04	0,10

Na Tabela 4.16 se observa que a concentração de cobre variou muito, aumentando em geral. A variação pode ser justificada devido à dificuldade em realizar os testes com o cobre. A concentração de cromo foi baixa em quase todas as amostras de precipitação, sendo zero na maioria das vezes. Contudo, quando detectado, teve sua concentração reduzida em todas as placas.

Tabela 4.16 – Concentração de cobre e cromo na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Placa DNER		Placa PMQ	
	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)
1	0,27	0,03	0,65	0,01	0,27	0,01
2	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,23	0,00	1,22	0,00	1,65	0,00
4	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,19	0,01	0,00	0,01	0,30	0,01
7	0,00	0,02	0,38	0,02	0,00	0,02
Média	0,24	0,01	0,32	0,01	0,32	0,01
Desvio padrão	0,45	0,01	0,47	0,01	0,60	0,01

4.4.2 Sistemas A e B (sem lavagem dos materiais componentes das camadas)

Neste item são apresentados os resultados de filtragem dos sistemas A e B, sem a lavagem dos materiais componentes das suas camadas, em relação à água incidente diretamente da chuva sobre os sistemas.

Na Tabela 4.17, que mostra as médias e desvios padrão de todos os parâmetros analisados, nota-se um aumento considerável dos parâmetros nitrito, fósforo, ferro, alumínio e zinco na água infiltrada nos sistemas, em relação à água da precipitação.

Tabela 4.17 – Média e desvio padrão dos parâmetros analisados

Parâmetro	Controle (precipitação)		Sistema A		Sistema B	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Oxigênio (mg/L)	9,00	0,00	8,80	0,40	8,80	0,40
pH	5,80	0,26	7,70	0,26	7,05	0,28
Amônia (mg/L)	0,14	0,08	0,07	0,08	0,14	0,10
Nitrito (mg/L)	0,01	0,01	0,02	0,01	0,04	0,02
Fósforo (mg/L)	0,20	0,18	0,54	0,47	0,94	0,47
Ferro (mg/L)	0,02	0,03	0,35	0,41	0,54	0,44
Alumínio (mg/L)	0,03	0,03	0,12	0,11	0,08	0,05
Zinco (mg/L)	0,01	0,01	0,05	0,06	0,04	0,04
Cobre (mg/L)	0,00	0,00	0,03	0,08	0,00	0,00
Cromo (mg/L)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02

Ao observar a Tabela 4.18 nota-se que a concentração de oxigênio dissolvido não sofreu muita influência dos sistemas, com uma média de aproximadamente 9,0 mg/L para ambos os sistemas, assim como a água coletada diretamente da precipitação.

Na Tabela 4.18 também é mostrado o resultado para o nível de pH, o qual subiu para os dois sistemas, mantendo-se aproximadamente neutro na água infiltrada no sistema B. No sistema A, o pH médio subiu em quase uma unidade, de 5,80 para 7,70.

A Tabela 4.19 mostra que a concentração de amônia média reduziu para o sistema A e se manteve igual para o sistema B. No sistema A, a concentração de amônia aumentou somente na primeira coleta (amostra número 8), o que deve ter ocorrido devido alguma impureza que foi eliminada do sistema, pois a partir da segunda coleta (amostra número 9) a concentração diminuiu em todas as análises.

No sistema B, a concentração de amônia aumentou nas primeiras cinco coletas, o que também deve ter ocorrido devido alguma impureza no sistema que foi eliminada no decorrer do tempo, pois a partir da sexta coleta (amostra número 13) a concentração se manteve igual ou diminuiu.

Na Tabela 4.19 também é mostrada a concentração de nitrito, que aumentou para os dois sistemas, principalmente nas primeiras coletas. No sistema B, a concentração teve um aumento mais significativo nas primeiras quatro coletas (amostras número 8 a 12), devido provavelmente às impurezas nas camadas dos sistemas, pois a concentração reduziu ao longo do tempo.

Tabela 4.18 – Concentração de oxigênio e pH na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Sistema A		Sistema B	
	Oxigênio (mg/L)	pH	Oxigênio (mg/L)	pH	Oxigênio (mg/L)	pH
8	9,00	6,00	9,00	7,50	9,00	7,00
9	9,00	5,50	9,00	7,50	9,00	7,00
10	9,00	6,00	9,00	8,00	9,00	7,50
11	9,00	6,00	9,00	8,00	9,00	7,50
12	9,00	5,50	8,00	7,50	8,00	7,00
13	9,00	6,00	9,00	7,50	9,00	6,50
14	9,00	5,50	8,00	7,50	8,00	7,00
15	9,00	6,00	9,00	8,00	9,00	7,00
16	9,00	5,50	9,00	7,50	9,00	7,00
17	9,00	6,00	9,00	8,00	9,00	7,00
Média	9,00	5,80	8,80	7,70	8,80	7,05
Desvio padrão	0,00	0,26	0,42	0,26	0,42	0,28

Tabela 4.19 – Concentração de amônia e nitrito na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Sistema A		Sistema B	
	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)
8	0,10	0,02	0,25	0,04	0,25	0,04
9	0,10	0,00	0,00	0,02	0,25	0,04
10	0,10	0,00	0,10	0,01	0,25	0,09
11	0,10	0,01	0,00	0,01	0,25	0,04
12	0,05	0,01	0,00	0,01	0,10	0,03
13	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10	0,03
14	0,25	0,01	0,10	0,02	0,10	0,02
15	0,25	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02
16	0,10	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02
17	0,25	0,02	0,10	0,01	0,10	0,02
Média	0,14	0,01	0,07	0,02	0,14	0,04
Desvio padrão	0,08	0,01	0,08	0,01	0,10	0,02

Conforme a Tabela 4.20, a média das concentrações de fósforo e ferro aumentaram significativamente nos sistemas. A concentração de fósforo aumentou muito nas primeiras coletas do sistema A, e no sistema B em todas as coletas, com exceção das duas últimas. A concentração de ferro foi zero na maioria das amostras de precipitação, com exceção de três amostras, contudo, aumentou consideravelmente nos dois sistemas. No sistema A, as últimas quatro amostras já não sofreram influência (aumento), mas no sistema B, das primeiras às últimas coletas se detectou grande aumento.

Tabela 4.20 – Concentração de fósforo e ferro na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Sistema A		Sistema B	
	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)
8	0,06	0,00	1,57	1,32	0,33	0,00
9	0,38	0,00	0,95	0,33	0,94	0,28
10	0,00	0,00	0,55	0,36	1,68	0,55
11	0,46	0,00	0,26	0,00	0,96	0,67
12	0,01	0,09	0,75	0,42	1,32	0,77
13	0,25	0,02	0,64	0,41	1,18	1,04
14	0,32	0,07	0,14	0,65	0,95	1,20
15	0,37	0,00	0,30	0,00	0,92	0,03
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,11	0,00	0,19	0,00	1,07	0,84
Média	0,20	0,02	0,54	0,35	0,94	0,54
Desvio padrão	0,18	0,03	0,47	0,41	0,47	0,44

Na Tabela 4.21 são mostradas as concentrações de zinco e alumínio, as quais aumentaram nos dois sistemas, com grande variação, sem seguir “padrão”

aparente. As concentrações destes parâmetros foram baixas na água de precipitação, variando aleatoriamente.

Na Tabela 4.22, se observa que houve pouca influência dos sistemas sobre o parâmetro cobre. Não houve detecção de cobre em nenhuma amostra da precipitação e do sistema B, indicando que o aumento da sua concentração no sistema A, em uma única amostra, pode ser devido a algum erro nos procedimentos de análise, pois a análise do cobre era a mais difícil. Pelo método dos quartis este dado é considerado um espúrio. A concentração de cromo aumentou na maioria das amostras dos dois sistemas, com bastante variação.

Tabela 4.21 – Concentração de alumínio e zinco na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Sistema A		Sistema B	
	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)
8	0,00	0,01	0,19	0,08	0,04	0,01
9	0,06	0,02	0,14	0,19	0,11	0,12
10	0,00	0,03	0,28	0,05	0,07	0,03
11	0,06	0,00	0,06	0,00	0,07	0,00
12	0,00	0,00	0,32	0,00	0,13	0,05
13	0,00	0,00	0,04	0,05	0,04	0,02
14	0,05	0,01	0,06	0,05	0,12	0,06
15	0,03	0,00	0,05	0,09	0,09	0,03
16	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
17	0,06	0,03	0,04	0,00	0,14	0,04
Média	0,03	0,01	0,12	0,05	0,08	0,04
Desvio padrão	0,03	0,01	0,11	0,06	0,05	0,04

Tabela 4.22 – Concentração de cobre e cromo na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Sistema A		Sistema B	
	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)
8	0,00	0,02	0,00	0,05	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01
10	0,00	0,02	0,00	0,04	0,00	0,04
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
12	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00	0,04
14	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03
15	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,03
16	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,02
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Média	0,00	0,01	0,03	0,02	0,00	0,02
Desvio padrão	0,00	0,01	0,08	0,02	0,00	0,02

4.4.3 Sistemas A e B (com lavagem dos materiais componentes das camadas)

Neste item são apresentados os resultados de filtragem dos sistemas A e B, com lavagem dos materiais componentes das suas camadas. A água infiltrada refere-se à água coletada diretamente da precipitação incidente sobre os sistemas, não da água de *runoff* (coletada na via pública e posteriormente infiltrada nos sistemas).

Na Tabela 4.23 são mostradas as médias e desvios padrão de todos os parâmetros analisados. Alguns parâmetros como o cromo e o cobre sofreram pouca influência na concentração média, enquanto que a amônia apresentou considerável redução e o zinco considerável aumento, na concentração média.

Tabela 4.23 – Média e desvio padrão dos parâmetros analisados

Parâmetro	Controle (precipitação)		Sistema A		Sistema B	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Oxigênio (mg/L)	9,00	0,00	9,00	0,00	9,00	0,00
pH	5,81	0,37	7,44	0,42	6,94	0,32
Amônia (mg/L)	0,44	0,47	0,11	0,10	0,09	0,11
Nitrito (mg/L)	0,01	0,01	0,02	0,04	0,01	0,01
Fósforo (mg/L)	0,35	0,15	0,11	0,14	0,52	0,53
Ferro (mg/L)	0,08	0,12	0,46	0,40	0,12	0,14
Alumínio (mg/L)	0,12	0,12	0,13	0,09	0,13	0,09
Zinco (mg/L)	0,10	0,12	0,19	0,28	0,33	0,59
Cobre (mg/L)	0,04	0,11	0,00	0,00	0,06	0,16
Cromo (mg/L)	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03

Na Tabela 4.24 nota-se que a concentração de oxigênio dissolvido não sofreu muita influência dos sistemas, com média de 9,0 mg/L para os dois sistemas. Na Tabela 4.24 também é mostrado o pH, o qual aumentou para os dois sistemas, mantendo-se quase neutro (6,94) na água do sistema B.

Tabela 4.24 – Concentração de oxigênio e pH na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Sistema A		Sistema B	
	Oxigênio (mg/L)	pH	Oxigênio (mg/L)	pH	Oxigênio (mg/L)	pH
18	9,00	6,50	9,00	8,00	9,00	7,00
19	9,00	5,50	9,00	7,00	9,00	6,50
20	9,00	5,50	9,00	7,00	9,00	6,50
21	9,00	6,00	9,00	7,50	9,00	7,00
22	9,00	6,00	9,00	7,00	9,00	7,00
23	9,00	5,50	9,00	7,50	9,00	7,00
24	9,00	5,50	9,00	8,00	9,00	7,50
25	9,00	6,00	9,00	7,50	9,00	7,00
Média	9,00	5,81	9,00	7,44	9,00	6,94
Desvio padrão	0,00	0,37	0,00	0,42	0,00	0,32

Na Tabela 4.25 nota-se que a concentração de amônia média reduziu significativamente nos sistemas A e B. Em ambos os sistemas a concentração de amônia na água infiltrada reduziu ou se manteve igual à água da precipitação, em todas as amostras, exceto na de número 20 (terceira coleta desta etapa), onde houve um aumento, provavelmente, devido a um erro sistemático. Este dado foi considerado espúrio pelo método dos quartis.

Na Tabela 4.25 também é mostrada a concentração de nitrito, a qual a concentração média aumentou somente no sistema A. Contudo, este aumento pode ser justificado devido à amostra número 20, considerada um dado espúrio pelo método dos quartis, que apresentou uma concentração de nitrito muito maior que a concentração detectada em outras amostras. A concentração média de nitrito no sistema B reduziu, contudo, nas primeiras quatro amostras desta etapa a concentração aumentou na água infiltrada.

Tabela 4.25 – Concentração de amônia e nitrito na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Sistema A		Sistema B	
	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)
18	0,10	0,01	0,10	0,00	0,10	0,01
19	1,00	0,01	0,25	0,00	0,00	0,02
20	0,10	0,00	0,25	0,12	0,25	0,04
21	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02
22	1,00	0,03	0,10	0,03	0,00	0,00
23	0,10	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
24	0,10	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01
25	1,00	0,03	0,10	0,01	0,25	0,00
Média	0,44	0,01	0,11	0,02	0,09	0,01
Desvio padrão	0,47	0,01	0,10	0,04	0,11	0,01

Os resultados para os parâmetros fósforo e ferro são mostrados na Tabela 4.26. A concentração média do fósforo diminuiu no sistema A, sendo que em praticamente todas as amostras houve uma redução da concentração. No sistema B, a concentração de fósforo aumentou, principalmente nas primeiras amostras, reduzindo gradativamente, indicando que possivelmente ainda haja alguma impureza no sistema B.

A concentração de ferro aumentou nos dois sistemas, principalmente no sistema A, sendo que praticamente em todas as amostras foi detectado aumento da concentração de ferro na água dos sistemas.

Na Tabela 4.27 são mostradas as concentrações médias do zinco e alumínio, as quais aumentaram nos dois sistemas, variando bastante. As concentrações destes parâmetros também variaram na água de precipitação. Nas quatro primeiras amostras a concentração de zinco diminuiu nos dois sistemas, aumentando de modo discrepante nas três amostras seguintes.

Tabela 4.26 – Concentração de fósforo e ferro na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Sistema A		Sistema B	
	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)
18	0,18	0,06	0,33	1,24	1,43	0,24
19	0,24	0,00	0,00	0,70	1,19	0,00
20	0,48	0,00	0,00	0,35	0,65	0,00
21	0,59	0,31	0,00	0,59	0,32	0,13
22	0,50	0,23	0,20	0,33	0,22	0,29
23	0,20	0,00	0,29	0,00	0,09	0,00
24	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,36	0,02	0,08	0,47	0,23	0,33
Média	0,35	0,08	0,11	0,46	0,52	0,12
Desvio padrão	0,15	0,12	0,14	0,40	0,53	0,14

Tabela 4.27 – Concentração de alumínio e zinco na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Sistema A		Sistema B	
	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)
18	0,08	0,20	0,18	0,16	0,20	0,21
19	0,00	0,01	0,00	0,00	0,03	0,00
20	0,05	0,05	0,08	0,02	0,06	0,01
21	0,21	0,02	0,20	0,00	0,20	0,00
22	0,31	0,01	0,29	0,00	0,29	0,02
23	0,01	0,00	0,09	0,56	0,07	0,55
24	0,05	0,34	0,11	0,71	0,09	1,71
25	0,23	0,18	0,08	0,96	0,12	1,98
Média	0,12	0,10	0,13	0,30	0,13	0,56
Desvio padrão	0,12	0,12	0,09	0,39	0,09	0,82

Na Tabela 4.28, que mostra os resultados para os parâmetros cobre e cromo, observa-se que houve pouca influência dos sistemas em ambos os parâmetros. Na água da precipitação e do sistema B houve somente detecção de cobre em uma amostra, o que pode ser devido ao erro do equipamento ou na análise. A concentração de cromo reduziu na maioria das amostras dos sistemas ou manteve-se igual à concentração da precipitação.

Tabela 4.28 – Concentração de cobre e cromo na precipitação e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (precipitação)		Sistema A		Sistema B	
	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,32	0,01	0,00	0,02	0,45	0,04
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
21	0,00	0,08	0,00	0,08	0,00	0,04
22	0,00	0,06	0,00	0,06	0,00	0,09
23	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
24	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02
25	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,02
Média	0,04	0,03	0,00	0,02	0,06	0,03
Desvio padrão	0,11	0,03	0,00	0,03	0,16	0,03

4.4.4 Água de runoff (sem lavagem dos materiais componentes das camadas)

Neste item são apresentados os resultados referentes à qualidade da água de *runoff*, coletada em via pública e infiltrada nos sistemas A e B. De modo geral, como observado na Tabela 4.29, a concentração média de todos os parâmetros aumentou nos dois sistemas, com exceção da amônia.

Tabela 4.29 – Média e desvio padrão dos parâmetros analisados

Parâmetro	Controle (<i>runoff</i>)		Sistema A		Sistema B	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Oxigênio (mg/L)	8,42	0,61	8,75	0,38	8,67	0,47
pH	6,83	0,26	7,58	0,20	6,78	0,16
Amônia (mg/L)	0,50	0,27	0,24	0,02	0,17	0,08
Nitrito (mg/L)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,01
Fósforo (mg/L)	0,89	0,91	1,63	1,35	3,64	0,61
Ferro (mg/L)	0,49	0,49	1,00	0,87	2,26	0,39
Alumínio (mg/L)	0,02	0,04	0,11	0,09	0,16	0,09
Zinco (mg/L)	0,02	0,04	0,05	0,05	0,09	0,03
Cobre (mg/L)	0,36	0,53	0,40	0,48	0,50	0,38
Cromo (mg/L)	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,02

Na Tabela 4.30 são apresentados os resultados referentes ao pH e oxigênio dissolvido. O sistema A teve maior influência no pH da água de *runoff*, aumentando em quase uma unidade, enquanto que o sistema B reduziu o pH da água em apenas 0,05. O oxigênio dissolvido aumentou para ambos os sistemas. Contudo, não se conclui que este aumento foi devido à ação dos sistemas, mas devido, possivelmente, ao lançamento da água de *runoff* (coletada em garrafa plástica) sobre os sistemas, pois ao infiltrar nas camadas a água é agitada, surgindo bolhas – aumentando a concentração de oxigênio nas amostras.

Tabela 4.30 – Concentração de oxigênio e pH no *runoff* e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (<i>runoff</i>)		Sistema A		Sistema B	
	Oxigênio (mg/L)	pH	Oxigênio (mg/L)	pH	Oxigênio (mg/L)	pH
26	9,00	7,00	9,00	7,50	9,00	6,80
27	9,00	7,00	9,00	7,50	9,00	6,80
28	8,00	7,00	8,00	7,50	8,00	7,00
29	8,00	7,00	9,00	8,00	9,00	6,80
30	7,50	6,50	8,50	7,50	8,00	6,80
31	9,00	6,50	9,00	7,50	9,00	6,50
Média	8,42	6,83	8,75	7,58	8,67	6,78
Desvio padrão	0,66	0,26	0,42	0,20	0,52	0,16

Na Tabela 4.31 é mostrada a concentração de amônia e de nitrito para as amostras estudadas. É notável a redução da concentração de amônia nos dois sistemas, sendo que em todas as amostras infiltradas nos sistemas houve redução da concentração, com exceção de uma onde a concentração se manteve igual. Por outro lado, a concentração de nitrito aumentou para os dois sistemas. No entanto, no sistema A, embora se tenha observado um aumento médio do nitrito, nas últimas três amostras se verificou uma redução de sua concentração.

Tabela 4.31 – Concentração de amônia e nitrito no *runoff* e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (<i>runoff</i>)		Sistema A		Sistema B	
	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)
26	0,25	0,00	0,20	0,02	0,10	0,04
27	0,50	0,03	0,25	0,02	0,10	0,05
28	0,50	0,02	0,25	0,05	0,25	0,04
29	0,25	0,01	0,25	0,00	0,10	0,05
30	1,00	0,01	0,25	0,00	0,20	0,04
31	0,50	0,01	0,25	0,02	0,25	0,01
Média	0,50	0,01	0,24	0,02	0,17	0,04
Desvio padrão	0,27	0,01	0,02	0,02	0,08	0,01

Na Tabela 4.32, onde são mostradas as análises dos parâmetros fósforo e ferro, se verifica que ambos os parâmetros tiveram aumento significativo nos sistemas A e B, mostrando grande influência dos sistemas sobre a água infiltrada. É notório que o maior aumento para os dois parâmetros foi nas amostras do sistema B, indicando que o sistema B pode ter contaminado a água muito mais que o sistema A.

Tabela 4.32 – Concentração de fósforo e ferro no *runoff* e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (<i>runoff</i>)		Sistema A		Sistema B	
	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)
26	0,69	0,31	4,21	2,64	4,19	2,55
27	2,69	1,46	1,63	1,30	3,77	2,76
28	0,60	0,23	0,67	0,59	2,70	1,83
29	0,09	0,23	0,58	0,44	3,86	2,51
30	0,66	0,21	0,98	0,32	3,11	1,97
31	0,58	0,48	1,69	0,73	4,20	1,94
Média	0,89	0,49	1,63	1,00	3,64	2,26
Desvio padrão	0,91	0,49	1,35	0,87	0,61	0,39

A Tabela 4.33 apresenta os resultados para os parâmetros alumínio e zinco, os quais também aumentaram significativamente nos dois sistemas, principalmente no sistema B, assim como os parâmetros ferro e fósforo.

Tabela 4.33 – Concentração de alumínio e zinco no *runoff* e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (<i>runoff</i>)		Sistema A		Sistema B	
	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)
26	0,03	0,00	0,24	0,13	0,27	0,15
27	0,10	0,09	0,15	0,08	0,21	0,09
28	0,01	0,02	0,15	0,00	0,18	0,07
29	0,00	0,01	0,00	0,03	0,10	0,09
30	0,00	0,00	0,13	0,01	0,17	0,05
31	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,08
Média	0,02	0,02	0,11	0,05	0,16	0,09
Desvio padrão	0,04	0,04	0,09	0,05	0,09	0,03

A concentração de cobre e cromo, apresentadas na Tabela 4.34, também aumentou em ambos os sistemas. Na maioria das amostras houve aumento das concentrações dos dois parâmetros, principalmente no sistema B. Para os dois parâmetros avaliados se nota uma variação aleatória, que pode ser devida ao nível de poluição local da atmosfera e ao número de veículos que circulavam no período.

Tabela 4.34 – Concentração de cobre e cromo no *runoff* e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (<i>runoff</i>)		Sistema A		Sistema B	
	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)
26	1,36	0,04	0,35	0,13	1,13	0,09
27	0,11	0,06	1,30	0,03	0,64	0,09
28	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,07
29	0,00	0,00	0,29	0,00	0,34	0,04
30	0,13	0,01	0,45	0,01	0,32	0,06
31	0,53	0,05	0,00	0,04	0,56	0,08
Média	0,36	0,03	0,40	0,04	0,50	0,07
Desvio padrão	0,53	0,03	0,48	0,05	0,38	0,02

4.4.5 Água de *runoff* (com lavagem dos materiais componentes das camadas)

Neste item são apresentados os resultados referentes à qualidade da água de *runoff*, coletada em via pública e infiltrada nos sistemas A e B após a lavagem dos materiais componentes das camadas. Ao observar a Tabela 4.35, nota-se que de modo geral a concentração média de todos os parâmetros diminuiu nos dois sistemas.

Tabela 4.35 – Média e desvio padrão dos parâmetros analisados

Parâmetro	Controle (<i>runoff</i>)		Sistema A		Sistema B	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Oxigênio (mg/L)	8,86	0,35	9,00	0,00	8,86	0,35
pH	6,64	0,38	6,57	0,45	6,93	0,45
Amônia (mg/L)	0,25	0,00	0,10	0,00	0,10	0,00
Nitrito (mg/L)	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
Fósforo (mg/L)	1,22	1,21	0,60	0,67	0,36	0,37
Ferro (mg/L)	0,93	0,94	0,77	0,90	0,40	0,42
Alumínio (mg/L)	0,06	0,05	0,03	0,05	0,03	0,03
Zinco (mg/L)	0,16	0,05	0,06	0,06	0,13	0,06
Cobre (mg/L)	0,95	0,75	0,00	0,00	0,49	0,48
Cromo (mg/L)	0,06	0,05	0,02	0,02	0,04	0,03

Na Tabela 4.36 verifica-se que houve pouca influência dos sistemas sobre a concentração de oxigênio dissolvido, enquanto que no sistema A, o pH apresentou uma pequena redução e no sistema B um pequeno aumento.

Tabela 4.36 – Concentração de oxigênio e pH no *runoff* e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (<i>runoff</i>)		Sistema A		Sistema B	
	Oxigênio (mg/L)	pH	Oxigênio (mg/L)	pH	Oxigênio (mg/L)	pH
32	9,00	6,50	9,00	7,00	9,00	7,00
33	9,00	6,50	9,00	7,00	9,00	7,50
34	9,00	7,50	9,00	6,50	8,00	7,00
35	9,00	6,50	9,00	6,00	9,00	7,00
36	9,00	6,50	9,00	6,50	9,00	6,00
37	8,00	6,50	9,00	6,00	9,00	7,00
38	9,00	6,50	9,00	7,00	9,00	7,00
Média	8,86	6,64	9,00	6,57	8,86	6,93
Desvio padrão	0,38	0,38	0,00	0,45	0,38	0,45

A Tabela 4.37 mostra a concentração de amônia e de nitrito das amostras. A redução da concentração de amônia nos dois sistemas foi significativa, sendo que em todas as amostras infiltradas nos sistemas houve redução da concentração. A concentração de nitrito também reduziu ou se manteve igual para todas as amostras dos sistemas.

Tabela 4.37– Concentração de amônia e nitrito no *runoff* e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (<i>runoff</i>)		Sistema A		Sistema B	
	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrito (mg/L)
32	0,25	0,05	0,10	0,00	0,10	0,00
33	0,25	0,02	0,10	0,01	0,10	0,00
34	0,25	0,03	0,10	0,02	0,10	0,01
35	0,25	0,02	0,10	0,02	0,10	0,00
36	0,25	0,06	0,10	0,03	0,10	0,02
37	0,25	0,05	0,10	0,03	0,10	0,02
38	0,25	0,04	0,10	0,02	0,10	0,00
Média	0,25	0,04	0,10	0,02	0,10	0,01
Desvio padrão	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01

Na Tabela 4.38, onde são mostradas as análises dos parâmetros fósforo e ferro, verifica-se que ambos os parâmetros tiveram uma redução notável nos sistemas A e B. Os sistemas influenciaram de tal modo que em algumas amostras as concentrações de fósforo e ferro reduziram em mais de 100,0% do valor da água de *runoff*. O sistema A obteve os melhores resultados.

Tabela 4.38 – Concentração de fósforo e ferro no *runoff* e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (<i>runoff</i>)		Sistema A		Sistema B	
	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Ferro (mg/L)
32	1,52	2,18	1,40	1,43	0,85	0,32
33	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,07
34	2,56	2,20	0,76	1,76	0,57	0,68
35	0,00	1,00	0,00	1,97	0,00	1,22
36	1,76	0,07	1,56	0,03	0,76	0,00
37	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,20
38	2,68	0,85	0,49	0,21	0,33	0,32
Média	1,22	0,93	0,60	0,77	0,36	0,40
Desvio padrão	1,21	0,94	0,67	0,90	0,37	0,42

As concentrações de zinco e alumínio, indicadas na Tabela 4.39, também reduziram significativamente, sendo que a concentração de zinco reduziu para todas as amostras.

Tabela 4.39 – Concentração de alumínio e zinco no *runoff* e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (<i>runoff</i>)		Sistema A		Sistema B	
	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)	Alumínio (mg/L)	Zinco (mg/L)
32	0,00	0,13	0,00	0,05	0,00	0,11
33	0,13	0,17	0,03	0,00	0,07	0,15
34	0,11	0,22	0,13	0,18	0,05	0,19
35	0,04	0,06	0,00	0,00	0,06	0,00
36	0,07	0,20	0,01	0,09	0,00	0,18
37	0,00	0,15	0,00	0,06	0,00	0,14
38	0,06	0,16	0,03	0,05	0,05	0,14
Média	0,06	0,16	0,03	0,06	0,03	0,13
Desvio padrão	0,05	0,05	0,05	0,06	0,03	0,06

As concentrações de cobre e cromo reduziram consideravelmente em ambos os sistemas. Na Tabela 4.40, observa-se que para todas as amostras analisadas houve redução das concentrações destes parâmetros. Contudo, possivelmente ocorreu algum erro nas análises do cobre nas amostras do sistema A, pois todas as amostras infiltradas neste sistema resultaram em concentração zero.

Tabela 4.40 – Concentração de cobre e cromo no *runoff* e na água infiltrada

Nº da amostra	Controle (<i>runoff</i>)		Sistema A		Sistema B	
	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)
32	1,20	0,06	0,00	0,00	0,55	0,04
33	1,90	0,00	0,00	0,00	0,79	0,00
34	1,47	0,09	0,00	0,06	1,02	0,04
35	0,00	0,06	0,00	0,04	0,00	0,04
36	1,47	0,10	0,00	0,00	1,02	0,08
37	0,63	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
38	0,00	0,11	0,00	0,03	0,00	0,08
Média	0,95	0,06	0,00	0,02	0,49	0,04
Desvio padrão	0,75	0,05	0,00	0,02	0,48	0,03

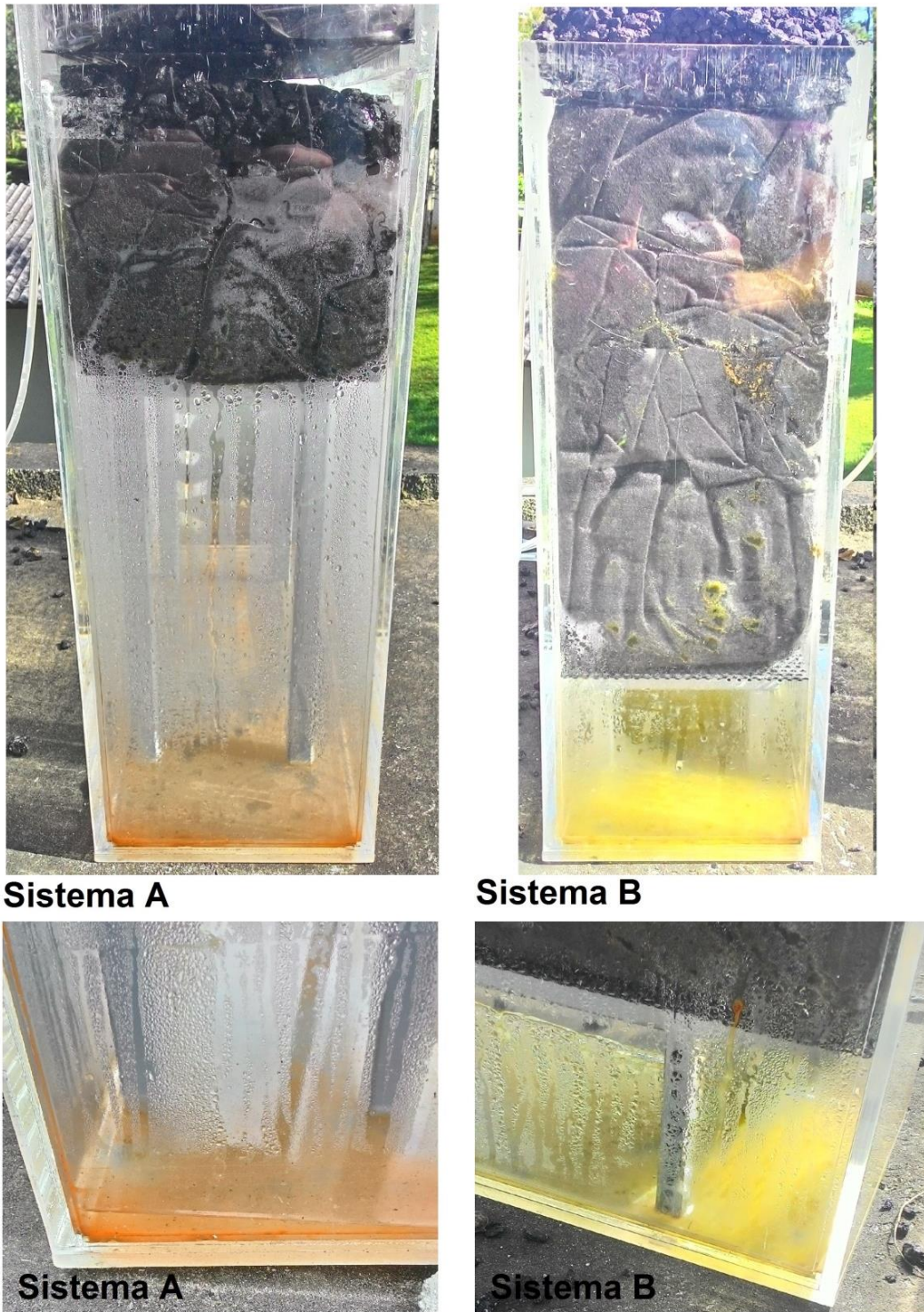
4.5 Contaminação da água dos sistemas

Nas análises realizadas de qualidade da água nos sistemas A e B, antes da lavagem dos componentes das camadas, se verificou que em geral todos os parâmetros considerados aumentaram nas amostras de água infiltrada em ambos os sistemas, principalmente para o sistema B, em relação à água da precipitação (caixa controle). Isto ocorreu tanto para as coletas de água infiltrada diretamente da precipitação incidente sobre os sistemas, quanto para a água de *runoff*.

Desta forma, inferiu-se que, possivelmente, a causa do aumento da concentração de praticamente todos os parâmetros foi devido a impurezas contidas nas camadas, e também pelo fato de o fundo das caixas nunca ser completamente esvaziado e limpo entre as coletas de eventos de chuva, pois a caixa é fechada. O único modo de remoção da água era com o auxílio da mangueira.

Na Figura 4.9 são mostradas as caixas dos sistemas no segundo mês do experimento, sem lavagem dos agregados. Verifica-se que há predominância de coloração alaranjada (ou avermelhada) na caixa do sistema A, e de coloração esverdeada na caixa do sistema B. Na Figura 4.10 é mostrado o fundo da caixa, onde se percebe que há ferrugem na caixa no formato dos pés metálicos do suporte, os quais também apresentam indícios de ferrugem em suas extremidades.

Figura 4.9 – Coloração da água dos sistemas antes da lavagem dos agregados



Na Figura 4.11 é mostrado o aspecto da água após as lavagens realizadas, na amostra de brita e de areia, a fim de verificar se havia alguma relação entre o aumento do valor de alguns dos parâmetros analisados, considerados mais críticos, e a “sujeira” das camadas. Na primeira lavagem a água é mais escura para as duas amostras, areia e brita, tendo sua tonalidade clareada no decorrer das lavagens.

Figura 4.10 – Coloração no fundo da caixa dos sistemas antes da lavagem dos agregados e pé metálico do suporte enferrujado



Figura 4.11 – Água das lavagens das amostras de areia e brita



Na Tabela 4.41 são mostrados os resultados das “lavagens” realizadas nas amostras de areia e brita. Ao observar a Tabela 4.41 se percebe que nas primeiras lavagens o valor de todos os parâmetros foi acima do detectável pelo Fotocolorímetro, ou seja, havia alta concentração, com exceção do zinco contido na água da areia. A redução da concentração foi notória para todos os parâmetros ao longo das cinco lavagens, com exceção do ferro, que reduziu, mas não muito, sendo o parâmetro analisado nas lavagens menos influenciado pelas impurezas das camadas.

Tabela 4.41 – Resultados das análises das lavagens dos agregados

Amostra		Areia					
Parâmetro	Controle ¹	1 ^a lavagem	2 ^a lavagem	3 ^a lavagem	4 ^a lavagem	5 ^a lavagem	LQS
Ferro	0,32	> LQS	> LQS	> LQS	2,49	2,29	3,00
Fósforo	0,05	> LQS	> LQS	> LQS	3,33	2,61	5,00
Alumínio	0,04	> LQS	0,83	0,30	0,25	0,23	1,00
Zinco	0,00	1,43	0,40	0,07	0,04	0,01	3,00
Amostra		Brita graduada simples					
Ferro	0,38	> LQS	> LQS	> LQS	2,38	1,49	3,00
Fósforo	0,00	> LQS	> LQS	3,32	1,36	0,00	5,00
Alumínio	0,00	> LQS	> LQS	0,26	0,16	0,00	1,00
Zinco	0,00	> LQS	0,77	0,07	0,05	0,01	3,00

¹Controle - refere-se à água "limpa", antes de ser utilizada na lavagem.

²LQS - Limite de Quantificação Superior, é o valor máximo detectado pelo aparelho Fotocolorímetro.

Ao verificar que a lavagem das duas amostras teve grande influência no valor dos parâmetros, reduzindo-os, foram lavados todos os agregados componentes das camadas dos sistemas A e B. Na Figura 4.12 é mostrado o aspecto da água durante a lavagem das camadas.

Na Figura 4.13 são mostrados os sistemas, com os agregados lavados, após aproximadamente dois meses de experimento. Nota-se que não há predominância expressiva de coloração esverdeada ou avermelhada nas caixas. Ambas as caixas estão com coloração semelhante, sendo que a coloração do sistema B está ligeiramente mais opaca.

Figura 4.12 – Resultado das lavagens das camadas dos sistemas

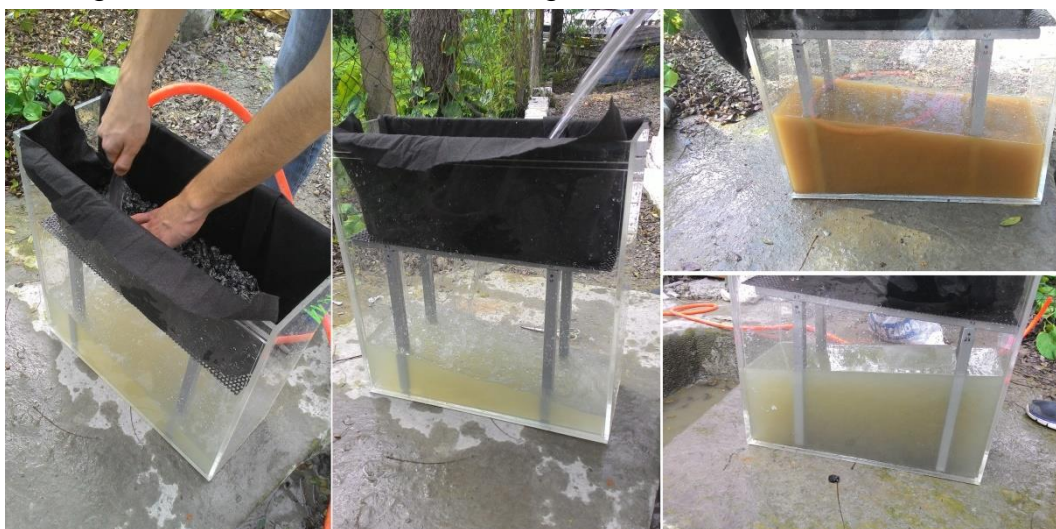
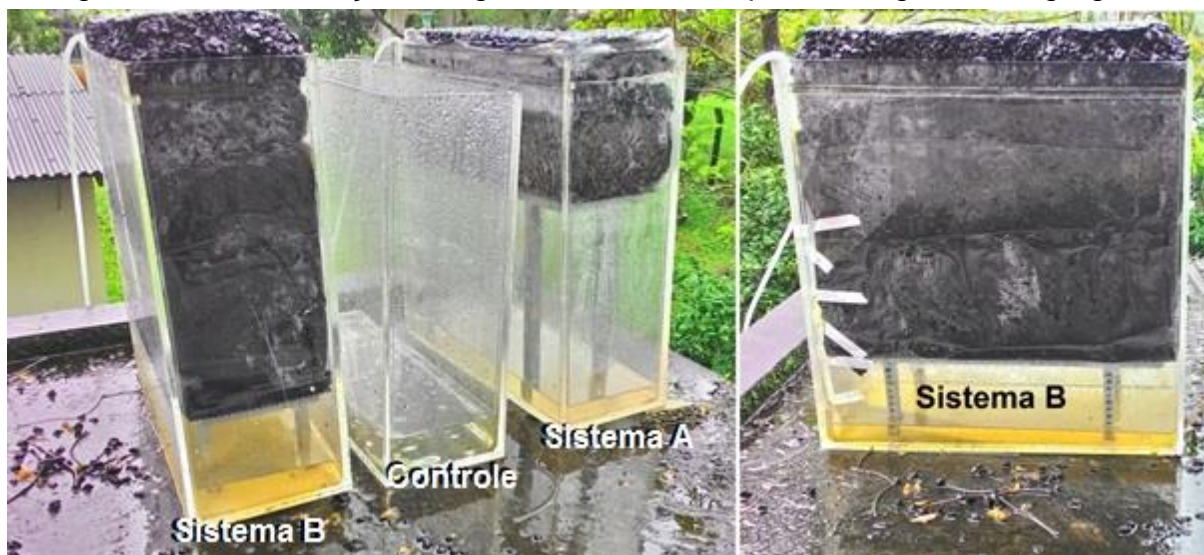


Figura 4.13 – Coloração da água dos sistemas após a lavagem dos agregados



Após a lavagem das camadas de agregado ambos os sistemas apresentaram melhora nos resultados. A redução da concentração dos parâmetros na água de precipitação incidente sobre as placas foi pequena, contudo, a melhora da água de *runoff* infiltrada foi significante.

A redução dos parâmetros ferro, alumínio e zinco pode ser justificada pela remoção do excesso da parte fina dos agregados durante a lavagem, pois as britas são de origem granítica, compostas essencialmente de quartzo, mica e feldspato. Estes são compostos em geral, de acordo com UNESP (2015), por silício, ferro, magnésio, cálcio e alumínio, dentre outros. O zinco, que também teve sua concentração reduzida após a lavagem, apresenta, segundo Zinc (2015), nível variando normalmente entre 10 e 300 miligramas por quilo de solo e de rocha.

A alta concentração de ferro, principalmente no sistema A, antes da lavagem dos agregados, o qual apresentou coloração avermelhada da água, pode ter ocorrido devido à ferrugem do suporte metálico. A corrosão ocorreu principalmente na base dos pés do suporte, onde há o corte da barra de metal desprotegido de tratamento (pintura) e onde há presença de água. A coloração castanha avermelhada é característica da presença de óxido de ferro, produto da corrosão dos pés metálicos (PALMA *et al.*, 2003).

A coloração predominantemente esverdeada do sistema B, antes da lavagem dos agregados, pode ser justificada, inicialmente, pela presença de impurezas nas camadas, principalmente de matéria orgânica na areia.

Segundo Embrapa (2015), a água pode adquirir coloração esverdeada devido à existência de muita matéria orgânica dissolvida ou devido ao fitoplâncton. O fitoplâncton possui clorofila, responsável pela fotossíntese, de pigmentação verde, e produz o plâncton, também de cor esverdeada.

De acordo com Galli (2015), quando há excesso de matéria orgânica na água também ocorre a eutrofização, processo pelo qual o ambiente aquático é enriquecido com nutrientes, principalmente pelo fosfato (decompondo-se em fósforo) e nitrato, o que justifica o grande aumento da concentração de fósforo no sistema B.

A água eutrofizada (muita matéria orgânica) não somente aumenta os níveis de fósforo e nitrato, como também aumenta a ocorrência de amônia e nitrito (EMBRAPA, 2015).

De acordo com Pereira (2013), como o crescimento de fitoplâncton está associado à disponibilidade de nutrientes na água, provenientes da matéria orgânica e da eutrofização, pode ter ocorrido um grande crescimento dessas algas no fundo da caixa do sistema B, sendo que a principal fonte de matéria orgânica provavelmente foi a areia. A areia, segundo Meier (2011), pode conter torrões de argila e impurezas orgânicas.

Quanto à concentração alta de amônia na água coletada diretamente da precipitação na “caixa controle”, pode-se dizer que existe uma influência da região litorânea, pois a água das chuvas pode conter amônia, oriunda da excreção de peixes (EMBRAPA, 2015).

O parâmetro pH, que em geral aumentou em todas as amostras, pode ter sido influenciado também pela presença do fitoplâncton na água, que torna a água mais alcalina (EMBRAPA, 2015).

4.6 Análise tensão-deformação

Na Tabela 4.42 são apresentados os resultados referentes à análise tensão-deformação realizada com o auxílio programa Bisar 3.0. Esta análise foi realizada para os sistemas A e B, construídos e testados neste trabalho, e para os sistemas C e D, elaborados exclusivamente para a simulação mecânica, com o intuito de verificar o desempenho de pavimentos com menos e com mais camadas em relação aos sistemas A e B.

O sistema C obteve o melhor resultado, seguido do sistema A. O sistema C foi idealizado com camada de sub-base e subleito impermeabilizados. Este sistema também possui os maiores valores para o módulo de elasticidade. A menor deflexão de todos os sistemas, na parte inferior da camada de revestimento, ocorreu no sistema C, sendo esta $2,40E+02$ μm .

No sistema A, que teve o segundo melhor desempenho, a deflexão no fundo da camada de revestimento foi de $3,32E+02$ μm , aproximadamente 30,0% maior que a deflexão do sistema C neste ponto. As características adotadas para as camadas dos sistemas são mostradas no capítulo 3 detalhadamente.

O sistema D obteve o pior desempenho, contudo, as altas deflexões eram esperadas, pois as camadas deste sistema possuem os menores módulos de elasticidade e as maiores espessuras. O sistema B, elaborado com o mesmo propósito do sistema D, mas mais resistente, teve uma deflexão cerca de 15,0% menor que o sistema D, no fundo da camada de revestimento.

O sistema C é o modelo de pavimento, dentre os quatro estudados, recomendado para maior volume de tráfego, seguido do sistema A. Estes sistemas podem resistir adequadamente a tráfegos médio e meio pesado, com número N de $5,00E+05$ a $2,00E+06$. Os sistemas B e D, com mais camadas de agregados – e mais espessas, são recomendados para volume de tráfego leve, até $1,00E+05$, especialmente para estacionamentos e regiões residenciais com pouca ou nenhuma passagem de veículos pesados, como caminhões.

Na Figura 4.14 são ilustradas as deflexões ocorridas nos sistemas, da menor para maior deflexão, calculadas pelo Bisar. Uma vez que a camada asfáltica drenante de revestimento não tem o propósito de resistir à fadiga, e sim à deformação permanente, não existem curvas de fadiga que associem a deformação ocorrida de uma passagem do eixo padrão ao número N para este tipo de

pavimento. Também não foram encontradas curvas de deformação permanente, embora haja registro na literatura da existência deste tipo de curva.

Tabela 4.42 – Resultados para tensão-deformação dos sistemas

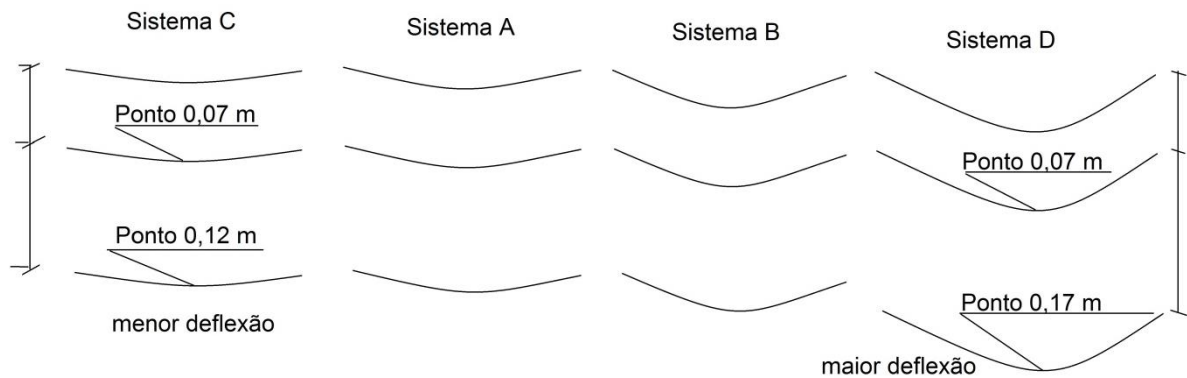
Sistema	Ponto ¹	Localização	Deflexão UZ ² (μm)	Tensão ZZ ³ (MPa)
Sistema A	Ponto 0,07m	Fundo da Placa DNER	3,32E+02	-1,07E-01
	Ponto 0,12m	Fundo da Placa PMQ	3,26E+02	-1,25E-01
Sistema B	Ponto 0,07m	Fundo da Placa Caltrans	5,67E+02	-1,50E-01
	Ponto 0,12m	Fundo da camada <i>choker</i>	5,39E+02	-1,48E-01
Sistema C	Ponto 0,07m	Fundo da camada asfáltica	2,40E+02	-1,02E-01
	Ponto 0,12m	Fundo da camada <i>choker</i>	2,36E+02	-1,29E-01
Sistema D	Ponto 0,07m	Fundo da camada asfáltica	6,63E+02	-1,43E-01
	Ponto 0,17m	Fundo da camada <i>choker</i>	5,94E+02	-1,18E-01

¹Ponto - refere-se a profundidade onde as tensões foram analisadas

²UZ - refere-se ao eixo vertical

³ZZ - refere-se ao eixo vertical

Figura 4.14 – Representação gráfica das reflexões obtidas para os sistemas, em ordem crescente



4.7 Análise comparativa dos sistemas

As comparações seguintes limitam-se ao aspecto qualitativo, pois se considera que a lavagem dos agregados não influenciou significativamente na drenabilidade dos sistemas. Isto porque houve diferença considerável de infiltração somente nas primeiras coletas dos sistemas “não lavados”, ou seja, quando estavam completamente secos, sendo que provavelmente as camadas foram responsáveis por reter parte da água. Também se considerou que o desempenho drenante dos sistemas foi semelhante entre si, com aproximadamente 90,0% de infiltração da água incidente sobre os sistemas antes e depois da lavagem do material (desconsiderando-se a primeira amostra de cada sistema no estado “seco”, consideradas espúrios).

A infiltração de 90,0% da água precipitada mostra que ambos os sistemas drenaram a água com excelência. Uma vez que os sistemas permitiram que grande parte da água precipitada infiltrasse, verifica-se que ambos são eficientes para serem utilizados como forma de captação da água pluvial. A utilização de pavimentos drenantes para captação da água pluvial em condomínios horizontais, por exemplo, é recomendada, pois a área de pavimentação é geralmente maior ou igual à área de cobertura das edificações.

Os sistemas são aplicáveis a vários tipos pavimentação para captação da água pluvial para aproveitamento em edificações, desde pavimentação de condomínio à pavimentação de distritos residenciais e urbanos, pois resistem adequadamente a volume de tráfego leve (sistemas B e D) a intermediário (sistemas A e C).

Neste item são discutidos os resultados entre os sistemas antes e depois dos materiais componentes serem lavados. A principal forma de avaliação destes dados se deu através das concentrações médias, as quais foram obtidas a partir da base dados com os espúrios eliminados pelo método dos quartis. Embora os dados espúrios tenham sido eliminados ainda se observa grande variabilidade das amostras de água infiltrada em alguns dos gráficos apresentados. Isto porque a variação dos dados não foi sempre devida a erros sistemáticos, mas também à variabilidade da concentração do parâmetro avaliado na água de precipitação ou de *runoff*.

A variação dos níveis de concentração dos parâmetros na chuva pode ser associada às condições climáticas, como períodos de estiagem, onde ocorre concentração de poluentes na atmosfera. Também pode estar associada ao volume de tráfego. Por exemplo, a atmosfera encontra-se menos carregada de poluentes no final de semana, onde há menos circulação de veículos nos arredores do local de coleta da água da precipitação e de *runoff*. Todavia esses fatores não foram controlados e estão fora da análise devido grande incerteza.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 são apresentadas as concentrações médias, livres de espúrios, para todos os parâmetros, exceto pH e oxigênio dissolvido, mostrando os parâmetros na mesma escala. Desta forma é possível se observar os níveis usuais de concentração entre os diferentes parâmetros. Posteriormente, neste capítulo, serão apresentados os gráficos das concentrações médias para cada dois parâmetros, com a finalidade de mostrar a variação das concentrações entre os sistemas para um mesmo parâmetro. A Figura 4.15 mostra os parâmetros para água infiltrada diretamente da precipitação, e a Figura 4.16 para a água infiltrada do escoamento superficial (*runoff*) da Rua Lauro Linhares.

Inicialmente, independente dos sistemas, alguns parâmetros tiveram alta concentração nas primeiras amostras. Em geral, pode-se associar este aumento nos níveis de concentração a possíveis impurezas contidas nas camadas de agregado. As impurezas dos agregados em seu estado natural seriam eliminadas durante determinado número de eventos de chuva. Contudo, nos sistemas estudados a água não era removida por completo, pois o fundo da caixa não é removível, o que não permitiu a correta limpeza da caixa a cada coleta. Deste modo, a água infiltrada sofreu influência dos eventos anteriores, devido acumulação de poluentes, e devido à ocorrência de processos bioquímicos, como a eutrofização e corrosão, por falta de limpeza das caixas de acrílico.

Nos subitens seguintes são apresentadas as concentrações médias em gráficos, comparando os sistemas entre si em termos da concentração dos poluentes em função da lavagem dos agregados.

Figura 4.15 – Concentração média dos parâmetros para água pluvial

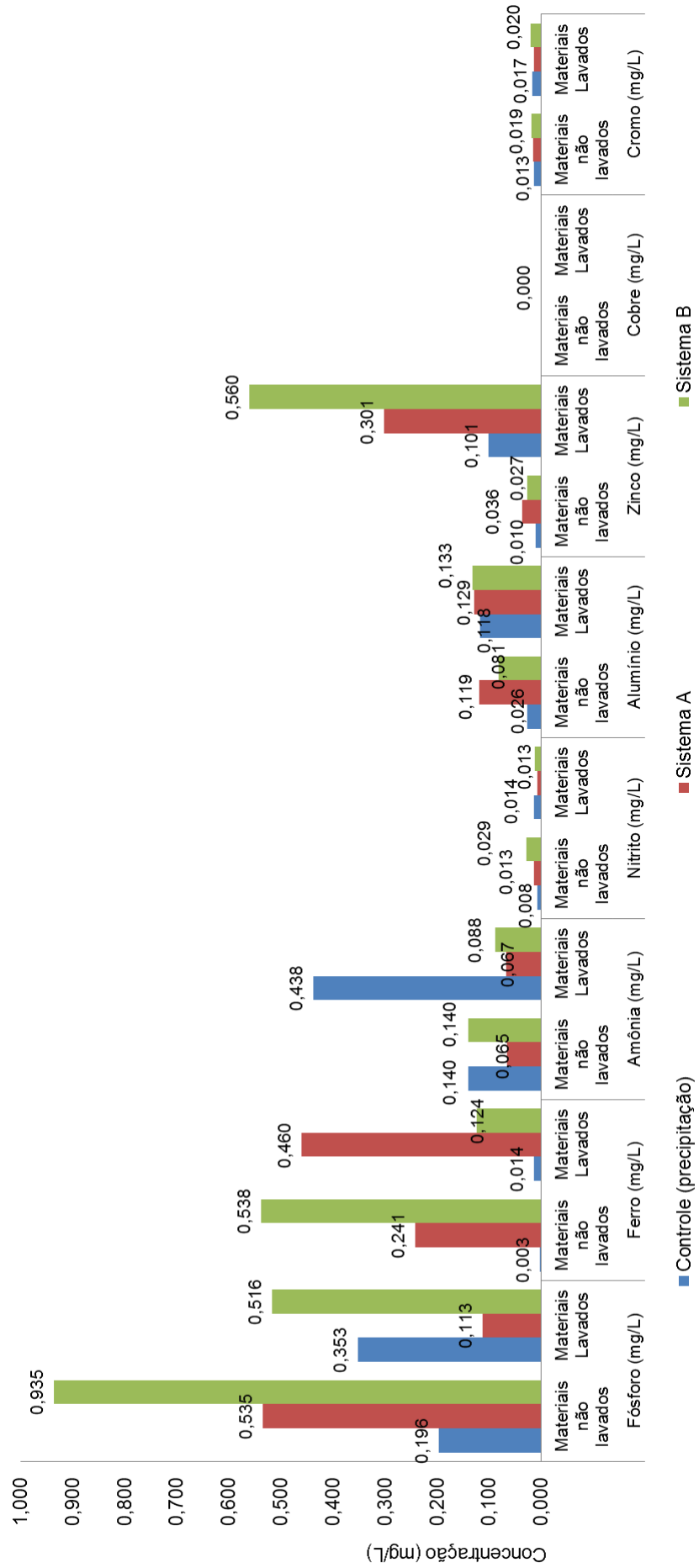
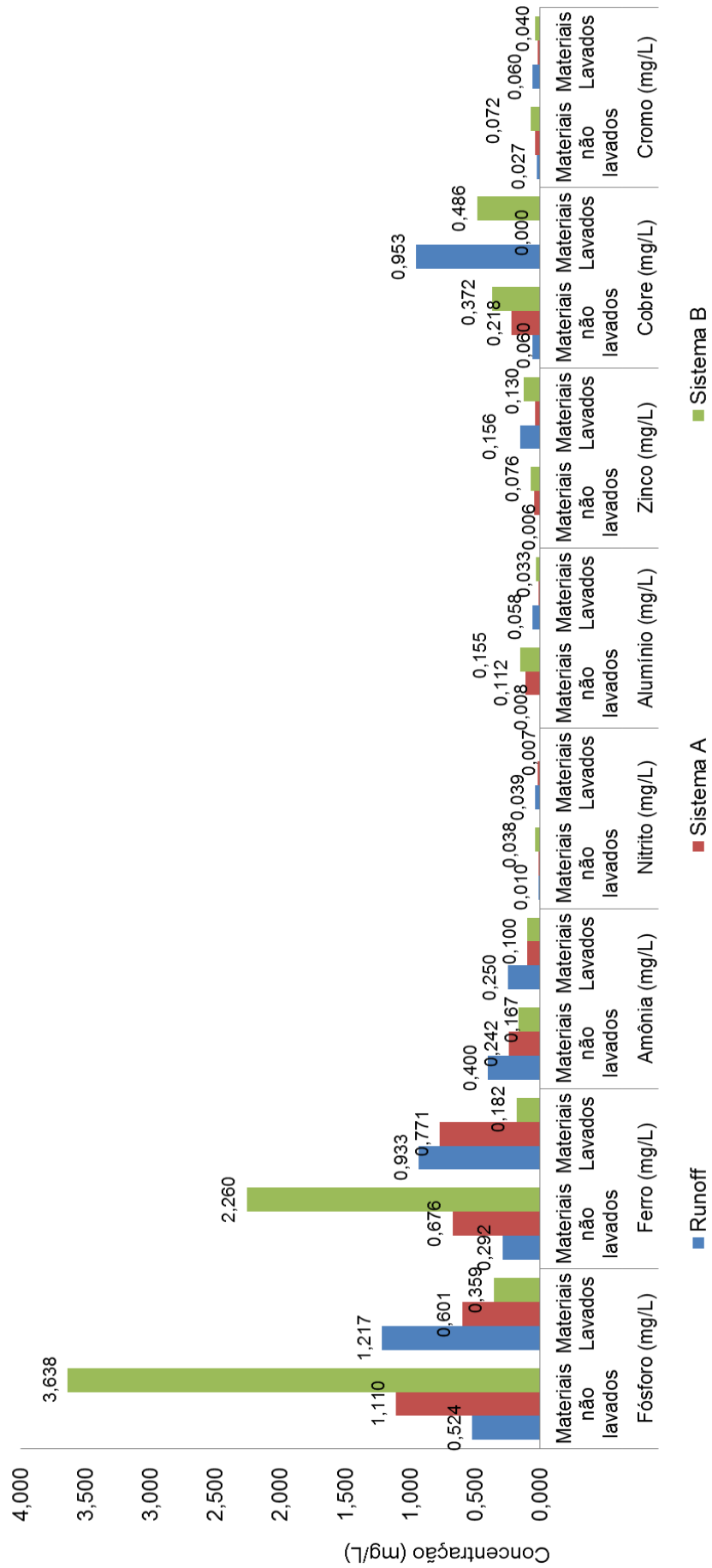


Figura 4.16 – Concentração média dos parâmetros para água de runoff



4.7.1 Água pluvial

No sistema B – “não lavado”, em relação à água da precipitação, verificou-se o aumento da concentração de nitrito e amônia nas primeiras amostras, o que pode indicar contaminação da água pelo sistema, como também a ocorrência de eutrofização, que aumenta os níveis destes parâmetros no ambiente aquático. Na Figura 4.17 podem ser verificados os níveis de amônia e nitrito ao longo do tempo para o sistema B – “não lavado”.

A eutrofização, que possivelmente influenciou no aumento dos parâmetros amônia, nitrito e fósforo no sistema B – “não lavado”, tornou o ambiente rico em nutrientes, originando fitoplâncton, que provavelmente conferiu a coloração esverdeada da água.

Os parâmetros amônia e nitrito do sistema B, após a lavagem dos materiais das camadas, não apresentaram aumento na concentração média e nem nas amostras iniciais, como antes da lavagem, mostrando que a lavagem foi efetiva para esses parâmetros. O sistema A – “lavado”, assim como antes da lavagem dos materiais, não apresentou aumento inicial da concentração dos parâmetros.

Contudo, como se observa na Figura 4.18, para o sistema A – “lavado”, além da redução da concentração média de amônia, houve redução da concentração média de nitrito, o qual havia aumentado antes da lavagem. Após a lavagem dos materiais das camadas, ambos os parâmetros reduziram na água infiltrada nos dois sistemas, em relação à água coletada diretamente da precipitação.

Figura 4.17 – Concentração de amônia e nitrito no sistema B antes da lavagem dos agregados, ao longo do tempo

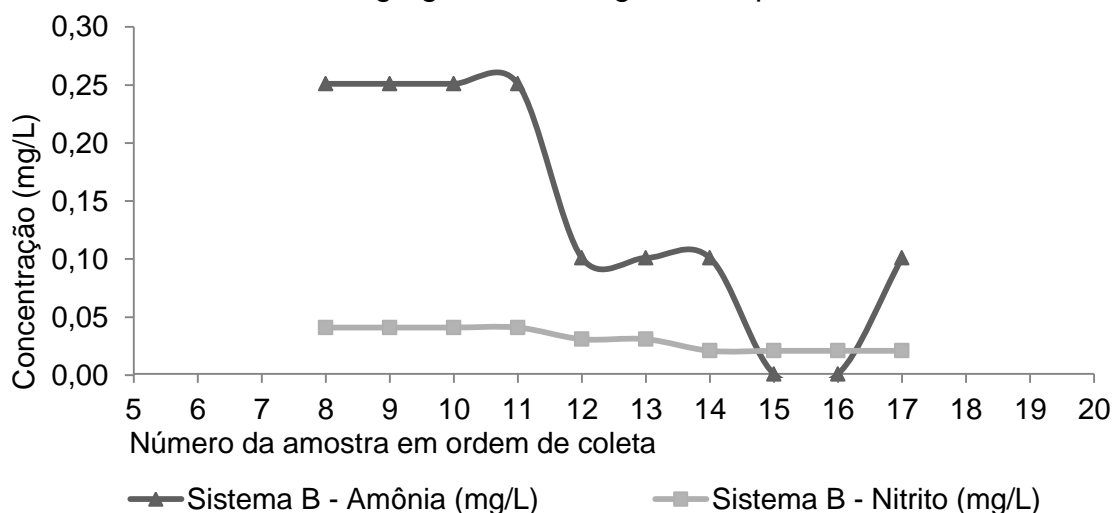
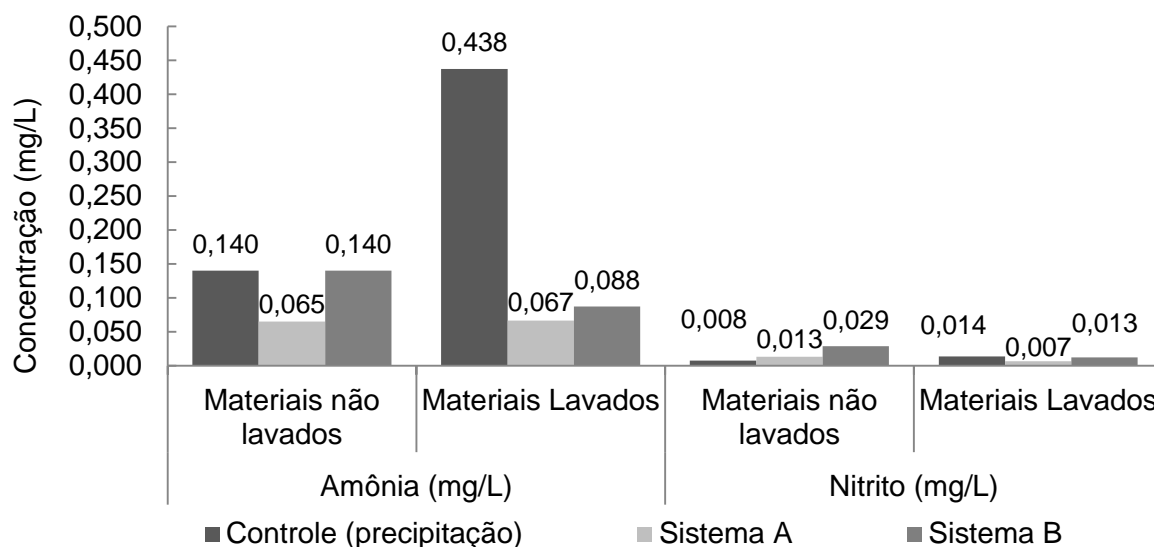


Figura 4.18 – Concentração média dos parâmetros amônia e nitrito



A Figura 4.19 mostra que a concentração de fósforo foi alta nas primeiras amostras do sistema A – “não lavado”, reduzindo ao longo das análises com alguns picos, mas com tendência de queda. Esta tendência de redução da concentração indicou que pode ter ocorrido contaminação inicial da água por impurezas contidas nas camadas do sistema. Na Figura 4.20, se observa que depois de lavado, o sistema A reduziu a concentração média de fósforo, confirmando que havia presença de matéria orgânica em excesso antes da lavagem. A água infiltrada também não apresentou um aumento inicial como antes da lavagem.

No sistema B – “não lavado”, que possui o maior número de camadas de agregado, o aumento geral da concentração de fósforo pode estar relacionado à presença de matéria orgânica nas suas camadas, principalmente na camada de areia, pois com excesso de matéria orgânica ocorre a eutrofização, que aumenta os níveis de fósforo.

Na Figura 4.20 se observa que depois da lavagem dos materiais do sistema B, os níveis de fósforo da água infiltrada continuaram aumentando em comparação à água da chuva, indicando que ainda havia presença de matéria orgânica em excesso.

Contudo, na Figura 4.21 nota-se uma diminuição progressiva da concentração de fósforo ao longo dos experimentos no sistema B “lavado”, indicando que o sistema B pode ter sido “lavado” novamente, mas desta vez pela água da chuva.

Figura 4.19 – Concentração de fósforo nos sistemas A e B antes da lavagem dos agregados, ao longo do tempo

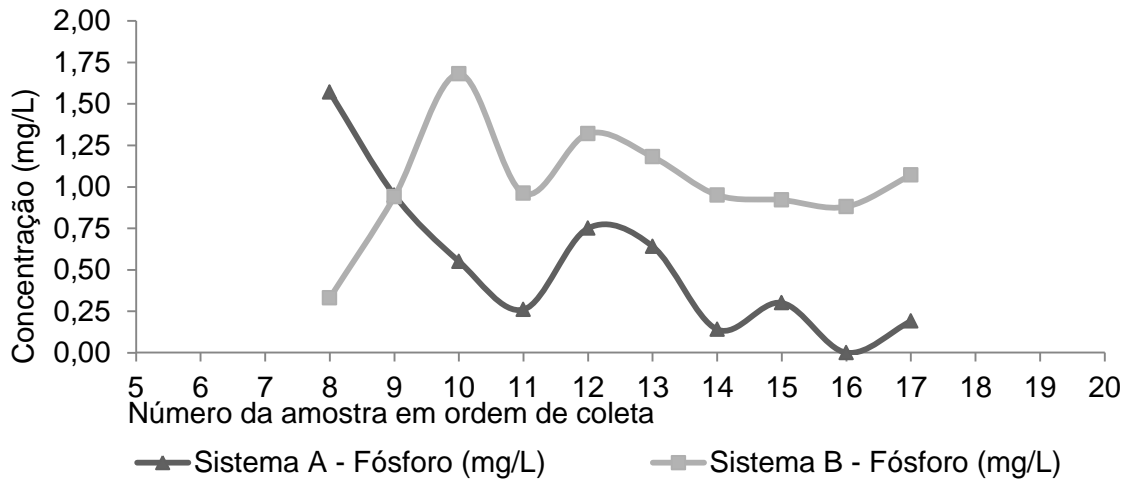


Figura 4.20 – Concentração média dos parâmetros fósforo e ferro

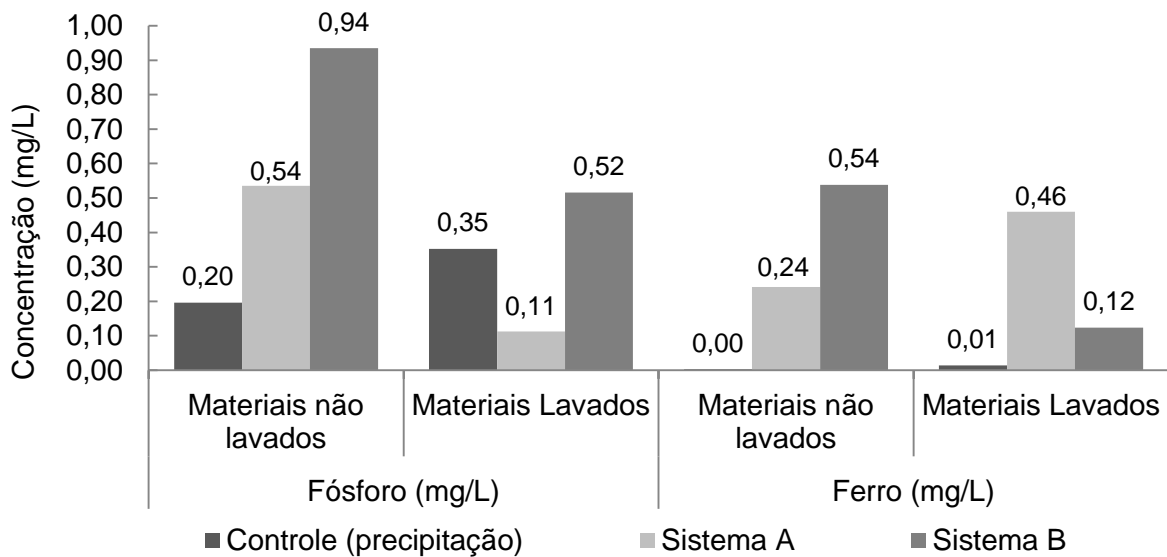
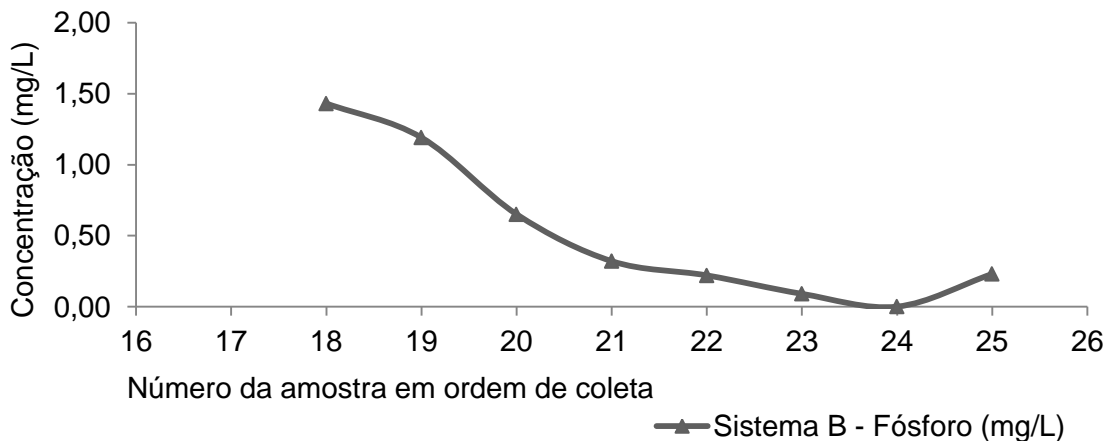


Figura 4.21 – Concentração de fósforo no sistema B após a lavagem dos agregados, ao longo do tempo

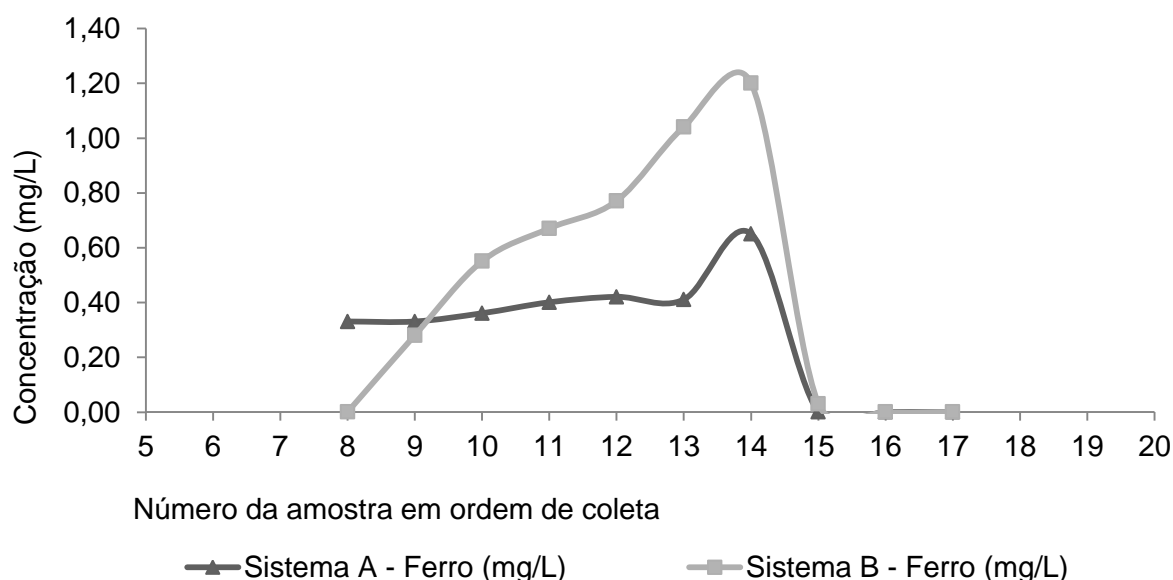


A Figura 4.22 mostra que a concentração de ferro no sistema A – “não lavado”, reduziu nas quatro últimas amostras, após aumento gradativo. A redução da concentração de ferro, em relação ao total de amostras, indica que pode ter ocorrido contaminação inicial da água por impurezas contidas nas camadas do sistema. Por outro lado, o aumento inicial da concentração de ferro, em relação à precipitação, também pode estar relacionado à oxidação dos pés metálicos do suporte utilizado, devido à predominância da coloração avermelhada na água.

No sistema B – “não lavado”, a concentração de ferro aumentou gradativamente nas primeiras amostras, indicando possível oxidação dos pés metálicos ao longo do tempo, embora a coloração predominante fosse esverdeada.

Após a lavagem dos agregados, ambos os sistemas não apresentaram maiores níveis de ferro nas primeiras amostras, como antes. Contudo, de acordo com a Figura 4.20, a concentração média de ferro ainda foi maior que à concentração na água de precipitação.

Figura 4.22 – Concentração de ferro nos sistemas A e B antes da lavagem dos agregados, ao longo do tempo



Na Figura 4.23 foi notado um aumento inicial na concentração de alumínio no sistema A – “não lavado”, em relação à água de precipitação, que reduziu nas últimas amostras, indicando que inicialmente as camadas contaminaram a água com alguma impureza que foi eliminada nos primeiros eventos de chuva. No sistema B não foi verificada esta tendência, sendo que este sistema possui somente uma

camada asfáltica e o sistema A duas. A presença de alumínio pode estar associada às camadas asfálticas, mas não há evidências que afirmem esta associação, ao menos não foram descobertas no estudo realizado com as placas individualmente.

Depois de lavados os materiais do sistema A, este não apresentou aumento inicial dos níveis de alumínio, assim como o sistema B. Contudo, a concentração deste parâmetro na água infiltrada ainda foi maior que na água da precipitação. Na Figura 4.24 observa-se que a concentração de alumínio aumentou nos dois sistemas em relação à água de precipitação, antes e depois da lavagem dos agregados das camadas. O mesmo ocorreu com o parâmetro zinco, principalmente no sistema B - após a lavagem dos materiais. Contudo, vale ressaltar que a concentração de zinco na água de precipitação foi dez vezes maior nas coletas em que os agregados haviam sido lavados. Deste modo, o grande aumento deste parâmetro na água infiltrada pode estar relacionado a fatores externos não observados neste trabalho, como a variação dos níveis de poluição local da atmosfera de Florianópolis.

Figura 4.23 – Concentração de alumínio nos sistemas A e B antes da lavagem dos agregados, ao longo do tempo

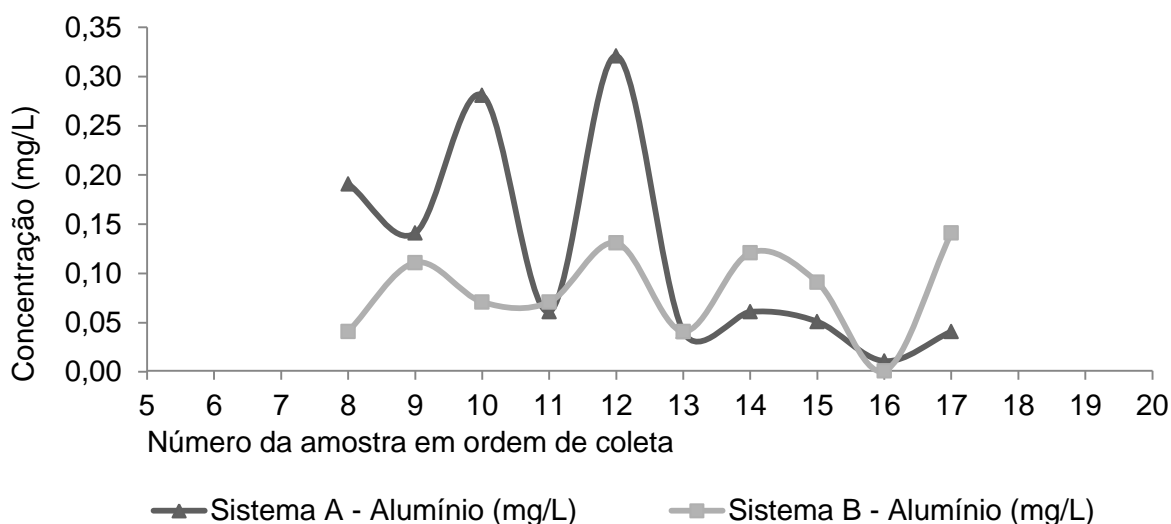
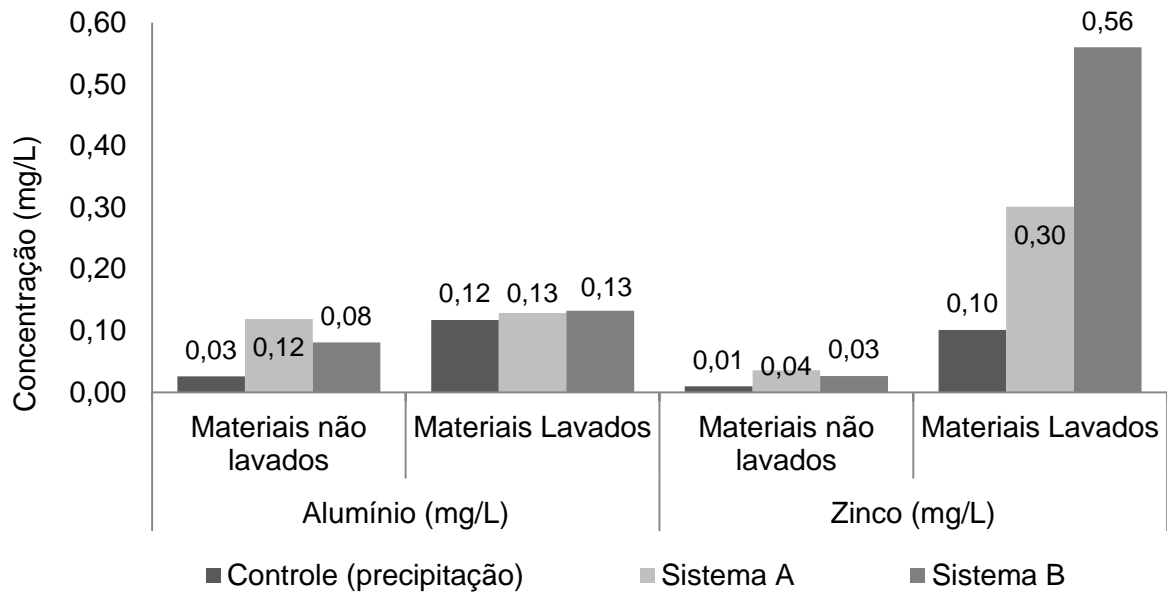


Figura 4.24 – Concentração média dos parâmetros alumínio e zinco



Em relação ao pH, concentração de oxigênio dissolvido e cobre, não detectou-se diferença significativa antes e depois de lavados os agregados. As Figuras 4.25 e 4.26 mostram a concentração média dos parâmetros pH, oxigênio dissolvido, cobre e cromo.

Figura 4.25 – Concentração média dos parâmetros oxigênio e pH

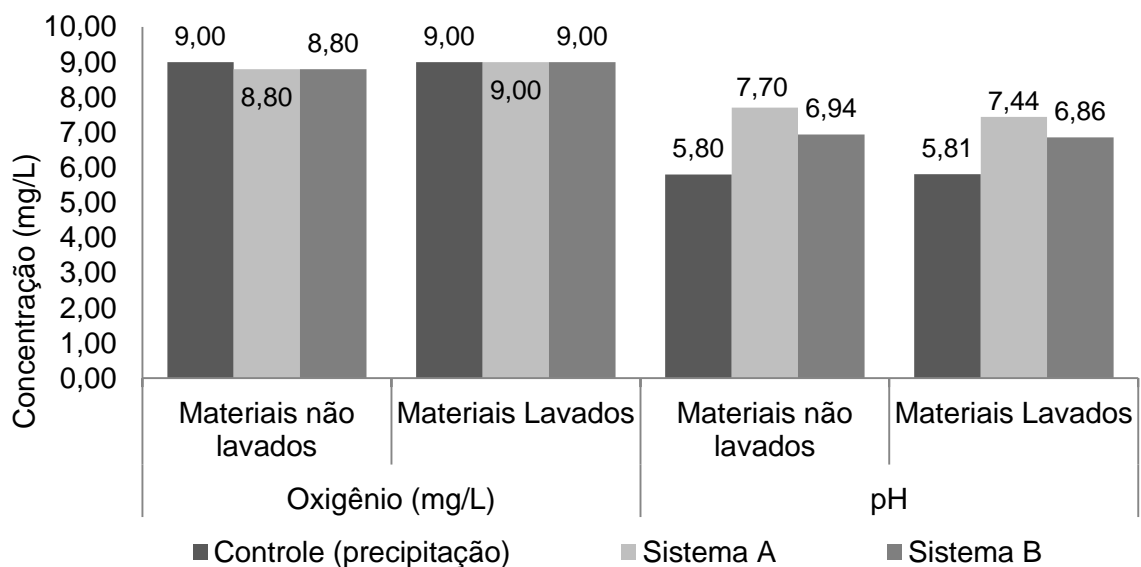
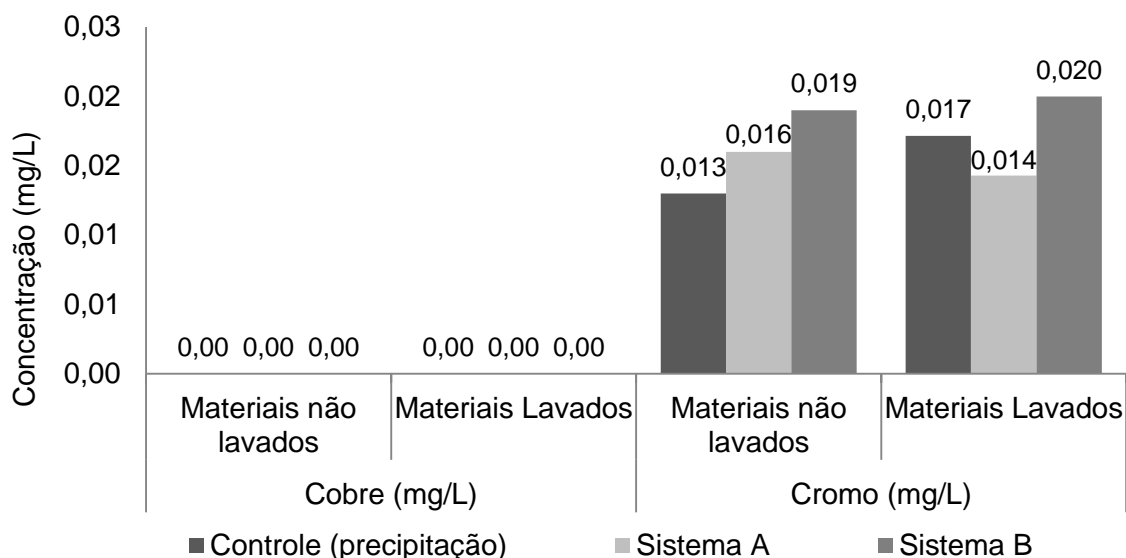


Figura 4.26 – Concentração média dos parâmetros cobre e cromo



Em relação à qualidade da água da precipitação em Florianópolis, a água infiltrada não apresentou resultados satisfatórios devido à quantidade de “impurezas” contidas nos sistemas ser muito maior que a encontrada na precipitação, com exceção da amônia, contaminando a água infiltrada.

A concentração dos parâmetros antes e depois da lavagem dos agregados, em geral, aumentou nos sistemas em relação à água de precipitação, indicando que os sistemas poluíram a água. No caso dos sistemas “lavados” não houve uma tendência inicial, para a maioria dos parâmetros, de eliminação das impurezas, assim como ocorreu com o parâmetro fósforo no sistema B “lavado” e com a maioria dos parâmetros para os sistemas “não lavados”.

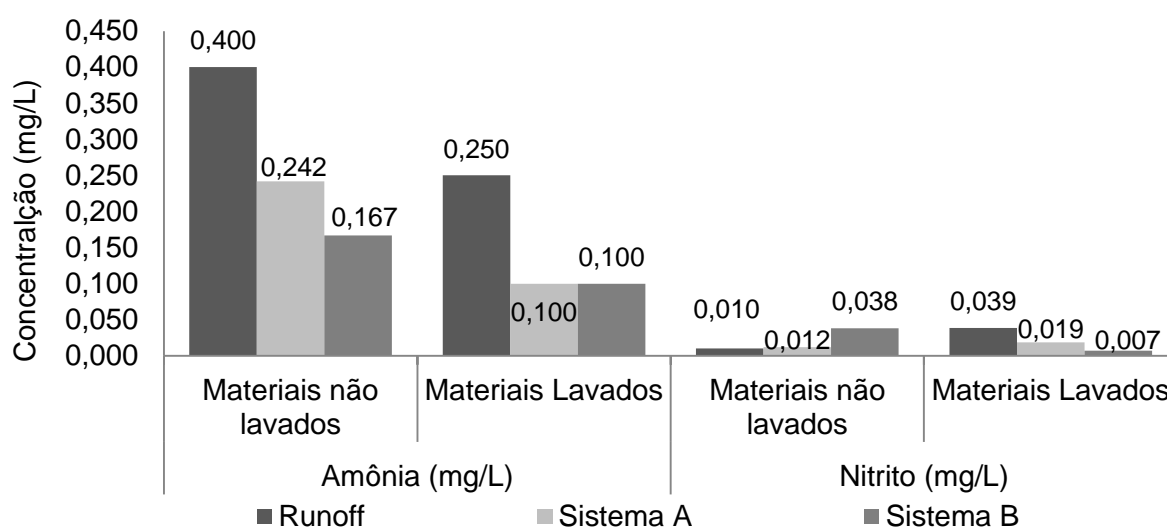
Possivelmente, se os sistemas fossem expostos a mais eventos de chuva as camadas seriam limpas depois de determinado número de precipitações. Uma vez que o material dos sistemas é lavado, estes são capazes, em tese, de melhorar a qualidade da água infiltrada ao longo do tempo, permitindo seu aproveitamento em edificações para consumo não potável.

A lavagem dos agregados realizada para a montagem dos sistemas ditos “lavados” não eliminou o suficiente de impurezas ao ponto dos sistemas filtrarem a água da chuva. Também, possivelmente houve acumulação sucessiva de poluentes a cada coleta, uma vez que não era possível fazer a limpeza das caixas dos sistemas.

4.7.2 Água de runoff

A Figura 4.27 mostra que a concentração de amônia reduziu para ambos os sistemas tanto antes quanto depois da lavagem dos agregados. Pode-se dizer que a lavagem não influenciou neste parâmetro, pois a concentração de amônia reduziu em torno de 60,0% para os dois sistemas em relação à água de *runoff*, antes e depois da lavagem dos agregados.

Figura 4.27 – Concentração média dos parâmetros amônia e nitrito no *runoff*



Na Figura 4.28 verifica-se que os níveis de alumínio, para ambos os sistemas “não lavados”, apresentaram uma diminuição ao longo do tempo, embora ainda sejam maiores que na água de *runoff*. Isto indica que os dois sistemas poderiam estar contaminando a água infiltrada com alumínio nas primeiras amostras. Por outro lado, depois da lavagem dos agregados, ambos os sistemas apresentaram redução da concentração do alumínio, sem indício de contaminação da água por impureza do sistema. Na Figura 4.29 é mostrada a concentração média dos parâmetros alumínio e zinco para os sistemas A e B.

Em geral, como mostrado nas Figuras 4.28 a 4.31, os níveis de zinco, nitrito, ferro, fósforo, cobre e cromo aumentaram na água infiltrada em ambos os sistemas “não lavados”, em relação ao *runoff*. Na Figura 4.30, se observa que o aumento da concentração de ferro no sistema B - “não lavado”, foi o maior registrado para este parâmetro.

Figura 4.28 – Concentração de alumínio nos sistemas A e B antes da lavagem dos agregados, ao longo do tempo

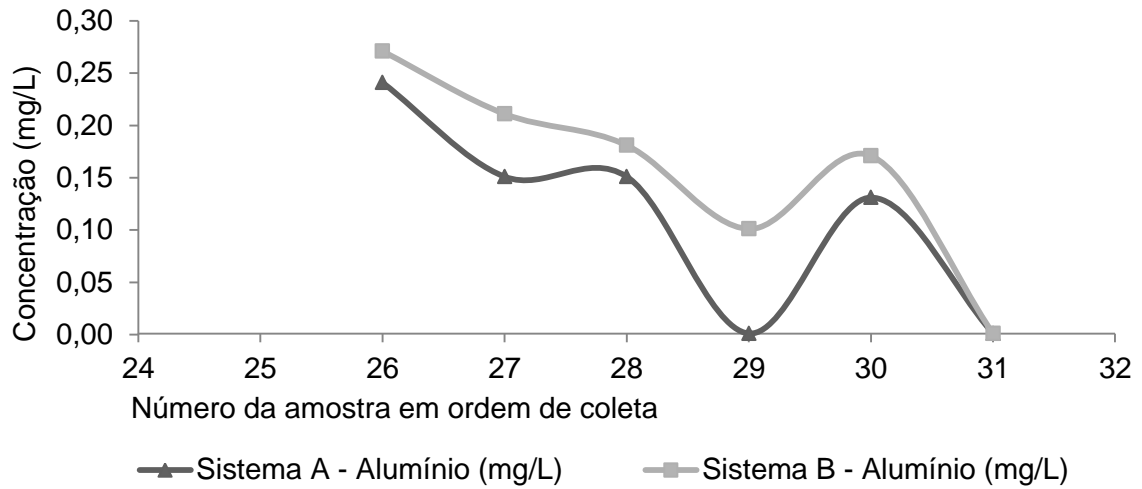


Figura 4.29 – Concentração média dos parâmetros alumínio e zinco no runoff

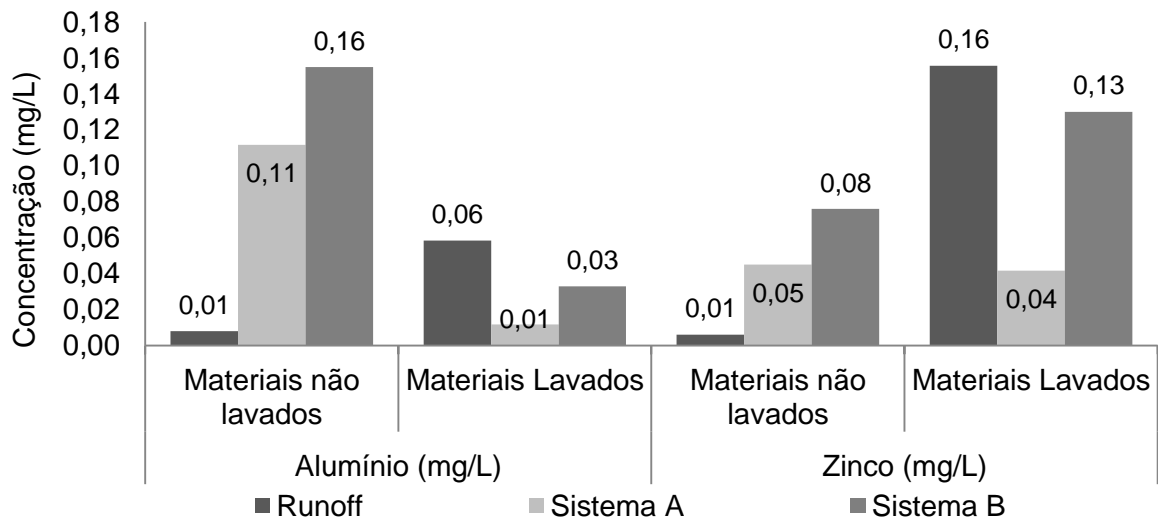


Figura 4.30 – Concentração média dos parâmetros fósforo e ferro no runoff

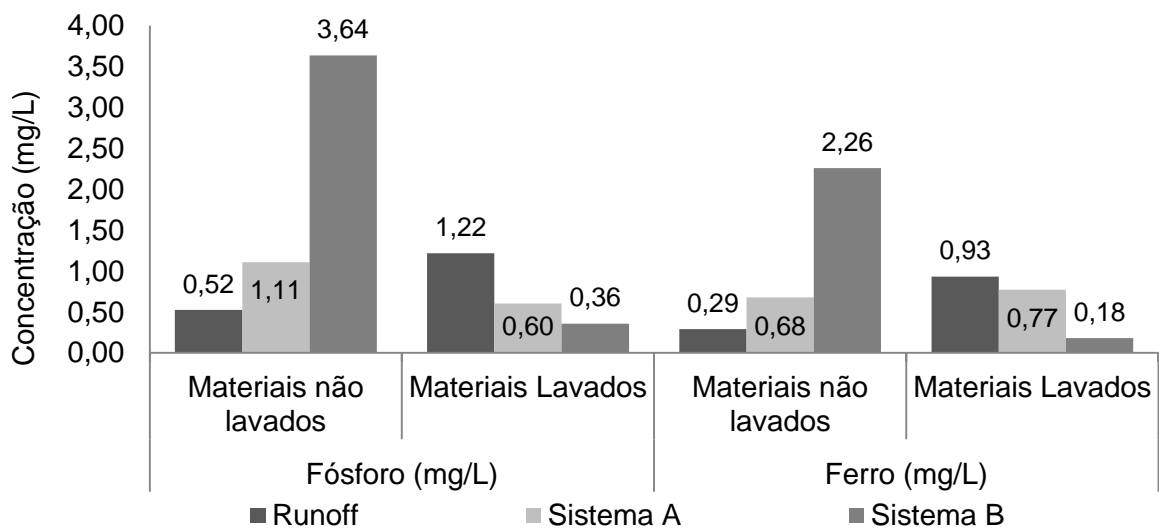
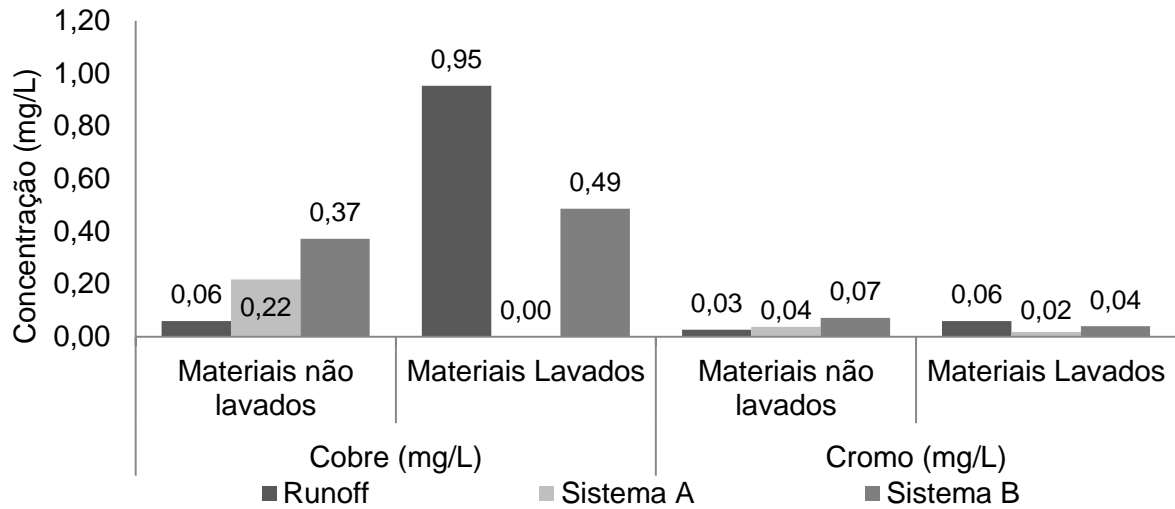
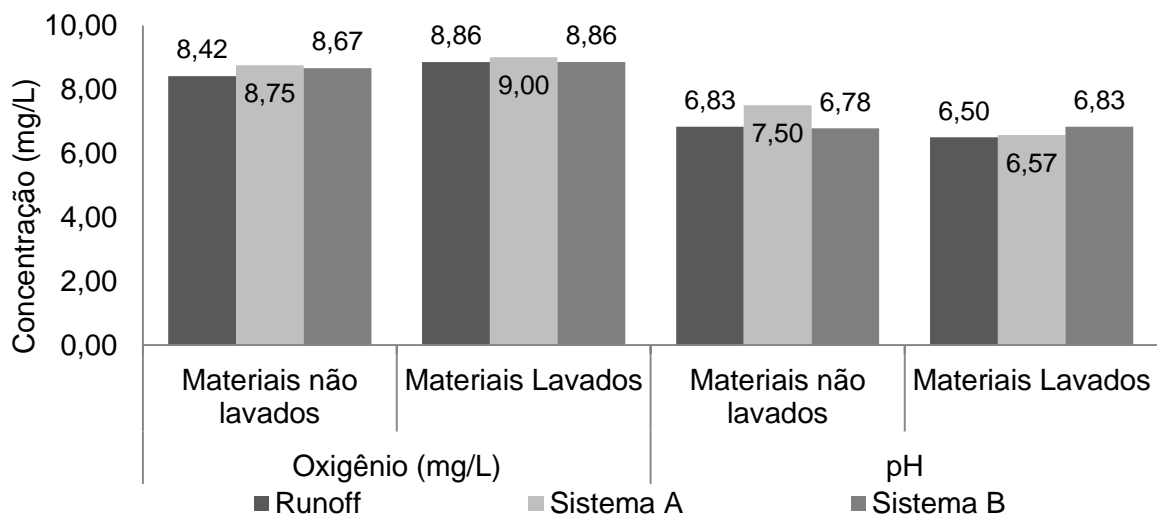


Figura 4.31 – Concentração média dos parâmetros cobre e cromo no *runoff*

Depois dos agregados serem lavados, a concentração média de zinco, nitrito, ferro, fósforo, alumínio, cobre e cromo reduziu em ambos os sistemas. As amostras não apresentaram indícios de redução gradativa ou de aumento inicial da concentração. Em geral, a concentração destes parâmetros reduziu em todas as amostras.

Em relação ao pH e a concentração de oxigênio dissolvido, não houve diferença significativa antes e depois de lavados os agregados. Na Figura 4.32 é mostrado o pH médio e a concentração média de oxigênio para os sistemas A e B, antes e depois da lavagem dos agregados.

Figura 4.32 – Concentração média dos parâmetros pH e oxigênio no *runoff*

Pode-se atribuir a grande melhora do desempenho dos sistemas, nesta última etapa do experimento, em relação à filtragem, não somente à lavagem dos agregados, mas também ao número de eventos de chuva ocorridos até os testes com a água de *runoff*. As amostras coletadas dos sistemas depois de lavados, em relação ao *runoff*, foram as últimas do estudo, do número 26 ao 31 (seis amostras). Os eventos de chuva que ocorreram antes, ou seja, entre as amostras de número 1 a 25, podem ter limpado ainda mais as camadas dos sistemas, além da lavagem dos agregados.

Os resultados qualitativos para a água de *runoff* foram satisfatórios. O zinco, por exemplo, reduziu 75,0% no sistema A e 19,0% no sistema B, em relação ao *runoff*. Na literatura se verifica redução do zinco entre 65,0 e 73,0% na água infiltrada em pavimento drenante, em relação à água de *runoff* que escoou sobre um pavimento tradicional. A concentração de cobre reduziu em 100,0% no sistema A e 49,0% no sistema B. Na literatura foram verificadas reduções de até 60,0% do cobre. A concentração de fósforo reduziu em 51,0 e 70,0% para os sistemas A e B, respectivamente. Outros autores verificaram redução de até 75,0% da concentração de fósforo na água de *runoff*.

Nas Tabelas 4.43 e 4.44 são mostradas comparações entre os resultados dos sistemas A e B “lavados” e os padrões de potabilidade e de água doce para tratamento e consumo humano, de acordo com o Conama (2000).

Tabela 4.43 – Comparação dos resultados dos sistemas lavados com padrão de potabilidade

Parâmetro	Unidade	Água potável (VMP)	Sistema A	Sistema B
Alumínio	mg/L	0,200	0,012	0,033
Amônia	mg/L	1,500	0,100	0,100
Chumbo	mg/L	0,010	-	-
Cobre	mg/L	2,000	0,000	0,486
Cromo	mg/L	0,050	0,019	0,040
Ferro	mg/L	0,300	0,771	0,182
Fósforo total	mg/L	0,025	0,601	0,359
Nitrito	mg/L	1,000	0,019	0,007
O.D.	mg/L	-	9,000	8,857
pH	-	6,0 a 9,5	6,571	6,833
Selênio	mg/L	0,010	-	-
Zinco	mg/L	5,000	0,042	0,130

VMP - Valor Máximo Permitido (CONAMA, 2000)

S.D.T. - Sólidos dissolvidos totais

O.D. - Oxigênio dissolvido

Tabela 4.44 – Comparação dos resultados dos sistemas lavados com padrão de águas doces destinadas ao consumo humano

Parâmetro	Unidade	Classe I (VMP)	Classe II (VMP)	Sistema A	Sistema B
Alumínio	mg/L	0,1	0,1	0,012	0,033
Amônia	mg/L	-	-	0,100	0,100
Chumbo	mg/L	0,01	0,01	-	-
Cobre	mg/L	0,009	0,009	0,000	0,486
Cromo	mg/L	0,05	0,05	0,019	0,040
Ferro	mg/L	0,3	0,3	0,771	0,182
Fósforo total	mg/L	0,02	0,05	0,601	0,359
Nitrito	mg/L	1,0	1,0	0,019	0,007
O.D.	mg/L	> 6,0	> 5,0	9,000	8,857
pH	-	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,571	6,833
Selênio	mg/L	-	-	-	-
S.D.T.	mg/L	-	-	-	-
Zinco	mg/L	0,18	0,18	0,042	0,130

VMP - Valor Máximo Permitido (CONAMA, 2000)

S.D.T. - Sólidos dissolvidos totais

O.D. - Oxigênio dissolvido

Classe I - Necessita somente de desinfecção para consumo humano

Classe II - Necessita de tratamento simplificado para consumo humano

Na Tabela 4.43, se observa que dos parâmetros analisados, somente o parâmetro ferro para o sistema A, e o parâmetro fósforo para ambos os sistemas, não estão em conformidade com os níveis padrão de substâncias químicas inorgânicas presentes na água potável.

Na Tabela 4.44 nota-se que somente o cobre para o sistema B, o ferro para o sistema A e o fósforo para ambos os sistemas, não estão em conformidade com os padrões das águas doces classe I e II. Caso esses três parâmetros fossem reduzidos nos sistemas, somente um tratamento de desinfecção seria necessário para consumo humano, supondo que outros parâmetros orgânicos e inorgânicos, não avaliados neste trabalho, estivessem dentro dos valores máximos admissíveis.

De qualquer forma, os resultados mostram que a água de *runoff* infiltrada nos sistemas tem qualidade o suficiente para ser utilizada para fim não potável. Os sistemas proporcionaram uma melhora satisfatória na qualidade da água de *runoff* infiltrada, possibilitando o seu aproveitamento em edificações.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a qualidade da água pluvial infiltrada sobre sistemas multicamadas de pavimento drenante, sendo esta água oriunda da precipitação incidente sobre os sistemas ou do escoamento superficial (*runoff*) de estradas de Florianópolis. Os sistemas de pavimento drenante também foram avaliados quantitativamente e mecanicamente. Este trabalho verificou o potencial de infiltração dos sistemas, e o estado tensão-deformação dos mesmos.

Em termos quantitativos, verificou-se que os sistemas A e B apresentaram eficiência de aproximadamente 90,0% com relação à infiltração da água da chuva. Deste modo, a utilização de pavimentos drenantes para captação de água pluvial para aproveitamento em edificações é eficiente, principalmente em condomínios horizontais, estacionamentos e em distritos residenciais, onde a proporção de área pavimentada é grande em relação à cobertura das edificações.

Em relação ao desempenho mecânico, dos quatro sistemas simulados no programa Bisar, o melhor resultado foi do sistema C, seguido do sistema A. O sistema A obteve menor deflexão que o sistema B, assim como esperado, pois o sistema B possui número maior de camadas constituídas de agregado. O sistema B é constituído de uma camada asfáltica drenante de revestimento e de três camadas de agregados, incluindo areia, o agregado menos resistente de todos. O sistema A, cujos resultados foram melhores que os do sistema B, tem duas camadas asfálticas drenantes e somente uma de agregado, sendo esta a brita graduada simples.

No estudo qualitativo, verificou-se grande influência dos sistemas A e B sobre os parâmetros avaliados na água de precipitação infiltrada. Em ambos os sistemas, antes da lavagem do material componente de suas camadas, somente a concentração de amônia reduziu na água pluvial infiltrada, diminuindo em média 54,0% no sistema A. Após a lavagem dos materiais, os parâmetros amônia, nitrito, fósforo e cromo reduziram na água infiltrada no sistema A, em média 85,0%, 52,0%, 68,0% e 17,0%, respectivamente. No sistema B, somente os parâmetros amônia e nitrito reduziram após a lavagem, com redução média de 80,0% e 9,0% da concentração.

Os resultados referentes à água pluvial infiltrada nos sistemas A e B, indicam que os sistemas contaminaram a água, pois antes da lavagem dos agregados

somente a concentração de amônia foi reduzida nos sistemas, enquanto que os outros parâmetros, exceto oxigênio e pH, aumentaram significativamente.

A existência de impurezas nas camadas, que contaminaram a água infiltrada dos sistemas, se confirma ao observar os resultados após a lavagem dos agregados, pois outros parâmetros, além da amônia, como nitrito, fósforo e cromo reduziram em relação à água da precipitação. E, os demais parâmetros, com exceção do oxigênio dissolvido, diminuíram em relação à concentração dos mesmos na água dos sistemas antes da lavagem dos materiais componentes.

Portanto, o experimento com a água captada diretamente da precipitação, verificou que os sistemas, ao menos no estágio inicial, contaminam a água. Contudo, a água captada para aproveitamento em edificações é água de *runoff*, a qual apresentou melhora significativa dos parâmetros de qualidade.

A água de *runoff* infiltrada nos sistemas, antes da lavagem dos agregados teve resultados semelhantes aos da água da precipitação infiltrada nos sistemas, em termos de qualidade, pois somente o parâmetro amônia teve sua concentração reduzida na água infiltrada. Após a lavagem dos sistemas, ambos os sistemas apresentaram bons resultados quanto à filtração dos poluentes, pois todos os parâmetros, com exceção do oxigênio dissolvido, tiveram suas concentrações reduzidas em relação ao *runoff*.

Os parâmetros amônia, nitrito, fósforo, ferro, alumínio, zinco, cobre e cromo para a água de *runoff* infiltrada no sistema A, reduziram em 60,0%, 52,0%, 51,0%, 17,0%, 80,0%, 73,0%, 100,0% e 69,0%, respectivamente. O sistema B apresentou, de modo geral, desempenho semelhante ao do sistema A. Os parâmetros amônia, nitrito, fósforo, ferro, alumínio, zinco, cobre e cromo para a água de *runoff* infiltrada no sistema B, reduziram em 60,0%, 81,0%, 71,0%, 81,0%, 44,0%, 17,0%, 49,0%, 33,0%, respectivamente. Os parâmetros pH e oxigênio dissolvido não sofreram influência significativa nos dois sistemas.

A melhora no desempenho dos sistemas em relação à filtração dos poluentes analisados, contidos na água de *runoff*, novamente indica que inicialmente, antes da lavagem dos agregados, as camadas dos sistemas estavam contaminando a água infiltrada. A provável causa desta contaminação foi a presença de finos em excesso nas camadas de agregados de pedra e de matéria orgânica na camada de areia (no caso do sistema B). A oxidação do suporte metálico também influenciou na concentração de parâmetros como ferro, conferindo o aspecto avermelhado da

água. Outro fator atuante, em consequência da presença de matéria orgânica em excesso no sistema B, foi a eutrofização da água e surgimento de fitoplâncton.

O desempenho de ambos os sistemas em relação à água de precipitação antes e depois da lavagem dos agregados, e em relação à água de *runoff* infiltrada nos sistemas com os agregados em seu estado natural, sem lavagem, não contemplou o esperado.

Por outro lado, em relação à filtragem de poluentes contidos na água de *runoff*, ambos os sistemas com agregados lavados tiveram desempenho satisfatório, semelhante ao dos pavimentos estudados por outros autores, tornando a água de *runoff* apropriada para aproveitamento em edificações para uso não potável.

É importante ressaltar que o pavimento drenante oferece um tratamento primário à água de *runoff*, o qual pode ser elevado, melhorando os parâmetros como fósforo, cobre e ferro, por meio de tratamentos secundários.

O emprego de pavimento drenante é uma ação ambiental, pois possibilita a filtragem de poluentes da água de *runoff*, advindos da atmosfera e principalmente dos automóveis que circulam em larga escala, possibilitando o aproveitamento desta água em edificações para os mais diversos fins não potáveis. Deste modo, a água potável disponível, já escassa em muitos lugares, é preservada.

5.1 Limitações do trabalho

Uma das principais limitações da pesquisa se deu em decorrência das caixas de acrílico dos sistemas não permitirem a remoção completa da água e a limpeza do seu fundo a cada coleta. Desta forma, cada nova coleta, possivelmente, continha resíduos acumulados das coletas anteriores, como também continha resíduos oriundos da proliferação de fitoplâncton e da oxidação dos pés metálicos do suporte do sistema.

Outro fator limitante, também relativo às caixas de acrílico, foi o fato de não ser possível se compactar as camadas de agregado no experimento. Deste modo, não se atingiu a compactação necessária das camadas, como aconteceria em campo, o que pode influenciar diretamente no potencial drenante das camadas.

A impossibilidade de realizar as coletas imediatamente após cada evento de chuva, possivelmente, influenciou os parâmetros pH e oxigênio dissolvido, devido a incidência de sol e temperatura, como também influenciou os parâmetros fósforo,

amônia, nitrito e ferro, em decorrência de acumulação dos resíduos do fitoplâncton e da oxidação do suporte metálico.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A fim de aprimorar os resultados desta pesquisa em trabalhos futuros, sugere-se:

- Construção dos sistemas de pavimento drenante em local que permita a compactação de suas camadas;
- Construção dos sistemas em local que permita a remoção total da água e limpeza do local de armazenamento da água a cada coleta;
- Investigar atentamente a possível causa dos sistemas filtrarem mais os poluentes da água de *runoff* do que da água de precipitação;
- Registrar as ocorrências de chuva entre cada coleta, como também os períodos de estiagem;
- Registrar o tráfego atuante na região no período da coleta;
- Realizar o descarte das primeiras coletas, eliminando as impurezas das camadas antes de testar seu potencial de filtração;
- Testar diferentes tipos de materiais como borracha de pneu triturada e carvão ativado, por exemplo;
- Procurar por métodos de tratamento secundário da água captada pelo pavimento para aproveitamento, bem como procurar por sistemas de captação e condução da água coletada nos pavimentos.

Referências

- ALVES, T. S. F. Metodologias de Auscultação de Pavimentos Rodoviários: **Aplicação Prática do Radar de Prospecção e do Deflectômetro de Impacto**. Lisboa, Portugal: Dissertação de Mestrado - Universidade Técnica de Lisboa, 2007.
- ANTUNES, L. N. **Potencial de Economia de Água Potável em Edificações por meio do Aproveitamento de Água de Chuva Captada de Vias Públicas**. Santa Catarina, Brasil: Relatório Técnico de Iniciação Científica – Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.
- ARAÚJO, P. R.; TUCCI, CARLOS E. M.; GOLDENFUM, JOEL A. Avaliação da Eficiência dos Pavimentos Permeáveis na Redução de Escoamento Superficial. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Brasil, v. 5, n.3, 2000.
- BIS, K. São Paulo e as enchentes. **Revista Abril, Planeta Sustentável**, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/cidade/sao-paulo-enchentes-causas-tratamento-acoes-678098.shtml>>. Acesso em abril de 2015.
- BENEVIDES, Carolina. No Brasil, 80% das estradas não contam com pavimentação, **O Globo**. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/brasil/no-brasil-80-das-estradas-nao-contam-com-pavimentacao-13710994>>. Acesso em abril de 2015.
- BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. Pavimentação Asfáltica: **Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, Brasil: PETROBRÁS Asfaltos e ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos), 2008.
- BODIN, D; CABOT, G. P; ROCHE, C. L; PIAU, J. M. **A continuum Damage Approach of Asphalt Concrete Fatigue Tests**. New York, NY, EUA: Engineering Mechanics Conference, Columbia University, 2002.
- BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. P. **Pavimentos Rodoviários**. Coimbra, Portugal: editora Almedina, 2005.
- CALTRANS (California Department of Transportation). **Open Graded Friction Course Usage Guide**. Califórnia, EUA: Division of Engineering Services – Caltrans, 2006.
- CALTRANS (California Department of Transportation). **Thin Maintenance Overlays: Chapter 10**. Califórnia, EUA: Caltrans Division of Maintenance: MTAG Volume I – Flexible Pavement Preservation, 2007.
- CALTRANS (California Department of Transportation). **Maintenance Technical Advisory Guide (MTAG): Volume I, Flexible Pavement Preservation – CHAPTER 1 INTRODUCTION**. Sacramento, California, USA: California Department of Transportation, 2008.
- CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução Número 357**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Publicação número 053 do Diário Oficial da União (DOU), 2005.
- CONDIÇÃO. Condição Inicial. **Regressão Linear Múltipla – Eliminação de Dados Espúrios**. Disponível em: <<http://www.condicaoInicial.com/2010/09/regressao-linear-multipla-eliminacao-de-dados-espurios.html/view-all>>. Acesso em outubro de 2015.

- DER/SP (Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo). **Especificação Técnica: Pré-Misturado a Quente**. São Paulo, Brasil: Especificação técnica do DER/SP, 2006.
- DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem). **Pavimentação: Pré-Misturado a Quente com Asfalto Polímero** (Camada Porosa de Atrito). Especificação de serviço DNER-ES 386/99. Brasil, 1999.
- DNIT (Departamento Nacional de InfraEstrutura de Transportes). **Manual de Estudos de Tráfego**. Brasil: Publicação IPR – 723, 2006.
- DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). **Pavimentação: Sub-base ou Base de Brita Graduada Simples**. Especificação de serviço ES 10. Brasil, 2009.
- DUMKE, M. P. **Concreto Asfáltico Drenante com Fibras de Celulose, Ligante Modificado por Polímero e Asfalto-Borracha**. Santa Catarina, Brasil: Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- ECK, B. J.; WINSTON, R. J.; HUNT, W. F.; BARRET, M. E. Water Quality of Drainage from Permeable Friction Course. American Society of Civil Engineers, EUA: **Journal of Environmental Engineering**, American Society of Civil Engineers, n. 138, p. 174 – 181, 2012. 2012.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Qualidade da Água: Piscicultura Familiar**. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/93111/1/agua.pdf> Acesso em setembro de 2015.
- FAGHRI, M.; SADD, M. H. **Performance Improvement of Open-Graded Asphalt Mixes**. Kingston, EUA: Department of Mechanical Engineering & Applied Mechanics, 2002.
- FERNANDES, S.; PINTO, M. **Como se Calculam os Quartis?** Algarve, Portugal: Departamento de matemática da Universidade do Algarve. Disponível em: <https://sapiencia.ualg.pt/bitstream/10400.1/2963/1/SFernandes_MMPinto_quartis_no_ensino.pdf>. Acesso em outubro de 2015.
- FHWA (Federal Highway Administration). **Drainable Pavement Systems: Participant Notebook**. Washington, EUA: U. S. Department of Transportation, 1992.
- FHWA (Federal Highway Administration). **State of the Practice: Permeable Friction Courses**. Texas, EUA: Center of Transportation Research – University of Texas. CTR Technical Report Documentation: FHWA/TX-08/0-5220-1, 2007.
- FONTES, L. P. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Minho, Portugal: Tese de Doutoramento - Universidade do Minho, 2009.
- FRANCISCO, A. P. S. **Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis**. Bragança, Portugal: Dissertação de Mestrado - Instituto Politécnico de Bragança, 2012.
- GALLI, C. S.; ABE, D. S. **Disponibilidade, Poluição e Eutrofização das Águas**. Academia Brasileira de Ciência (ABC). Disponível em: <<http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-816.pdf>>. Acesso em outubro de 2015.
- GILBERT, J.; CLAUSEN, J. Stormwater Runoff Quality and Quantity from Asphalt, Paver, and Crushed Stone Driveways in Connecticut, EUA: **Water Research**, Elsevier, n. 40, p. 826 – 832, 2006.
- GUIMARÃES, P. A. **Estudo da aderência entre camadas asfálticas de pavimentos**. São Paulo, Brasil: Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

- GOSSAIN, V.; KAPOO, K.; PROZZI, J. A. FHWA. **Testing the HB2060 Pads: Equivalent Damage and Fatigue Testing**. Washington, D.C., EUA: Federal Highway Administration e colaboração do Texas Department of Transportation (Texas, EUA), 2005.
- HELMREICH, B.; HILLIGES, R.; SCHRIEWER, A.; HORN, H. R. Runoff pollutants of a highly trafficked urban road - Correlation analysis and seasonal influences. **Chemosphere**, Elsevier, n. 80, p. 991 – 997, 2010.
- HIMMELBLAU, D. M. **Process Analysis by Statistical Methods**. New York, USA: John & Sons Inc, 1970.
- HOROSTECKI, Marcos. Poluição começa a ser controlada em Chapecó. **A Notícia, Especial**, Santa Catarina, 2000. Disponível em: <<http://www1.an.com.br/anverde/especial4/pg03.htm>>. Acesso em março de 2015.
- HUB. **Permeable Paving**. Disponível em: <<http://hubpages.com/living/permeable-paving>>. Acesso em novembro de 2015.
- JAMES, E. **Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control**. Local desconhecido. Silvia Project Report, European Commission: Contract N° GRD2-2000-31801-SI2.335701, 2000.
- KLENZENDORF, J. B.; ECK, J. B.; CHARBENEAU, J. R.; BARRET, E. M. Quantifying the Behavior of Porous Asphalt Overlays with Respect to Drainage Hydraulics and Runoff Water Quality. Texas, EUA: **Environmental & Engineering Geoscience**, v. XVIII, n. 1, p. 99 – 111, 2012.
- LEGRET M.; COLANDINI, V.; MARC, C. Effects of a Porous Pavement with Reservoir Structure on the Quality of Runoff Water and Soil. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Bouguenais, França: **The Science of the Total Environment**, Elsevier, n.189/190, p.335 – 340, 1996.
- MARCHIONI, M. L.; SILVA, C. O.; MAYOR A. V. **Conceitos e Requisitos para Pavimentos de Concreto Permeável**. Brasil: Sistemas Construtivos de Pavimentos Permeáveis – Prática Recomendada PR-3. Associação Brasileira de Cimento Portland e Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem, 2014.
- MEIER, D. **Análise da Qualidade do Agregado Miúdo Fornecido em Curitiba e Região Metropolitana**. Paraná, Brasil: Trabalho de conclusão de curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.
- MOTTA, L. M. G. e MEDINA, J. **Investigação e Desenvolvimento em Mecânica dos Pavimentos na COPPE**. Rio de Janeiro, Brasil: COPPE-UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- PAGOTTO, C.; LEGRET, M.; CLOIREC, P. Comparison of the Hydraulic Behaviour and the Quality of Highway Runoff Water According to the Type of Pavement. **Water Research**, Elsevier, v. 34, n. 18, p. 4446 – 4454, 2000.
- PALMA, M. H. C.; TIERA, V. A. O. Oxidação de metais. **Química Nova Escola**, 2003.
- PEREIRA, P.; MIRANDA, V. **Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários**. Braga, Portugal: Universidade do Minho, 1999.
- PEREIRA, R. S. Identificação e Caracterização das Fontes de Poluição em Sistemas Hídricos. **Revista Eletrônica de Recursos Hídricos**. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/informacoes/rrh.pdf>>. IPH – UFRGS, 2004.
- PEREIRA, L. D. A. **O Fitoplâncton e nossas águas**. Minas Gerais, Brasil: Trabalho de Conclusão de curso, PUC – MG, 2013.

- PMSP. **Classificação das Vias**. São Paulo, Brasil: IP-02. Disponível em: <<http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/NORMAS%20T%C3%89CNICAS%20INSTRU%C3%87%C3%95ES%20NOVAS/Pavimenta%C3%A7%C3%A3o/IP-02%20%5B1%5D.pdf>>. Prefeitura de São Paulo, 2004. PMSP/SP ESP10 (Prefeitura do Município de São Paulo). ESP10/92: **Camadas de Pré-Misturado a Quente**. São Paulo, Brasil: Especificação técnica de serviço da PMSP/SP, 1992.
- Portaria 1469/MS. **Portaria Número 1469**. Disponível em: http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/Portaria_MS_1469-00.pdf Publicação do Ministério da Saúde, 2000.
- Resolução 274. **Critérios de Balneabilidade em Águas Brasileiras**. Rio de Janeiro, Brasil: resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) – publicada no Diário Oficial da União, 2000.
- RIBAS, C. Y. Estudo Comparativo entre as Metodologias Empírica e Empírico-Mecanicista de Dimensionamento de Reforço de Pavimentos Flexíveis: **Um Estudo de Caso da Rodovia BR-282/SC**. Santa Catarina, Brasil: Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- RLCS (Residential and Light Commercial Standards). **Residential and Light Commercial Standards - Chapter 1: Asphalt Paving**. EUA: RSMean/Reed Construction Data. 2009.
- RWMWD (Ramsey Washington Metro Watershed District). **Porous Asphalt Parking Lot: Technical Series on District Office Demonstration Features**. Washington, EUA: RWMWD, NAPA (National Asphalt Pavement Association) e Minnesota Asphalt Pavement Association. 2006.
- SCDOT (South Carolina Department of Transportation). **Evaluation of Open-Graded Friction Courses: Construction, Maintenance and Performance**. South Carolina, USA: SCDOT in cooperation with US Department of Transportation and Federal Highway Administration. Final Report, 2012.
- SCGOV (Secretaria de Estado da Defesa Civil). **Projeto de Diagnóstico da Estiagem no Oeste**. Defesa Civil de Santa Catarina, Santa Catarina, 2015. Disponível em: <<http://sc.gov.br/mais-sobre-defesa-civil-e-bombeiros/projeto-de-diagnostico-da-estiagem-no-oeste-sera-apresentado-em-chapeco>>. Acesso em junho de 2015.
- SCHAUS, L. K. **Porous Asphalt Pavement Designs: Proactive Design for Cold Climate Use**. Ontario, Canadá: Dissertação de Mestrado - University of Waterloo, 2007.
- SCHOLZ M; GRABOWIECKI, P. Review of Permeable Pavement Systems. **Building and Environment**, Elsevier, n. 42, p. 3820 – 3836, 2006.
- SHELL. **Bisar – User Manual**. Bitumen Business Group, 1998.
- SOARES, J. B.; SOUZA, F. V. **Considerações Sobre Módulo Resiliente e Módulo Dinâmico em Misturas Asfálticas com Base na Teoria da Viscoelasticidade**. Ceará, Brasil: Universidade Federal do Ceará, 2005.
- TAYDAL. **Environmentally Friendly Systems**. Taydal Surfacing Ltd. Disponível em: < <http://www.taydal.com/services/porous-tarmac-systems/>>. Acesso em novembro de 2015.
- TOMAZ, P. Curso de Manejo de Águas Pluviais - Capítulo 60: **Pavimento Poroso**. Local desconhecido, 2009.
- UNESP. Rochas magmáticas: **Granito**. Museu Heinz Ebert da Universidade Estadual Paulista. Disponível em:

- <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/magmaticos/granito.html>>. Acesso em outubro de 2015.
- UNHSC (University of New Hampshire Stormwater Center). **UNHSC Design Specifications for Porous Asphalt Pavement and Infiltrations Beds**. New Hampshire, USA: UNHSC center, 2009.
- VASSOLER, G.; CHONG, W.; SPECHT, L. P. **Comportamento Mecânico de Pavimentos Flexíveis Submetidos a Gradientes Térmicos**. Paraná, Brasil: Acta Scientiarum Technology, v. 33, n. 3, p. 265-271, 2011.
- WANG, Y.; WANG, G. **Improvement of Porous Pavement**. U. S. Local desconhecido. Green Building Council, 2011.
- WSDOT (Washington State Department). **Untreated Highway Runoff in Western Washington**. Washington, EUA: Washington State Department of Transportation, 2007.
- WSDOT (Washington State Department of Transportation). **Quieter Pavement Photos**. Disponível em: <<http://www.wsdot.wa.gov/Business/MaterialsLab/QuieterPavement/QuieterPavementPhotos.htm>>. Acesso em novembro de 2015.
- YUEN J.; OLIN, P. H.; LIM, H. S.; BENNER, S. G.; SUTHERLAND, R. A.; ZIEGLER A. D. Accumulation of Potentially Toxic Elements in Road Deposited Sediments in Residential and Light Industrial Neighborhoods of Singapore. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, n. 101, p. 151 – 163, 2012.
- ZINC. **O Zinco e o Meio Ambiente**. Associação Internacional do Zinco, Zinc – Essential for Life. Disponível em: <<http://www.icz.org.br/upfiles/arquivos/publicacoes/o-zinco-no-meio-ambiente-compreendendo-a-ciencia.pdf>>. Acesso em outubro de 2015.