

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Lucas Alves Lamberti**

**DESEMPENHO HIDROLÓGICO DE REVESTIMENTOS DE  
CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND APLICADOS A  
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS**

Santa Maria, RS  
2019



**Lucas Alves Lamberti**

**DESEMPENHO HIDROLÓGICO DE REVESTIMENTOS DE  
CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND APLICADOS A  
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Civil**.

**Orientador: Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Picilli**  
**Coorientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Tatiana Cureau Cervo**

Santa Maria, RS, Brasil  
2019

LAMBERTI, LUCAS ALVES

DESEMPENHO HIDROLÓGICO DE REVESTIMENTOS DE CONCRETO DE  
CIMENTO PORTLAND APLICADOS A PAVIMENTOS PERMEÁVEIS /  
LUCAS ALVES LAMBERTI.- 2019.

179 p.; 30 cm

Orientador: Daniel Gustavo Allasia Piccilli

Coorientadora: Tatiana Cureau Cervo

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2019

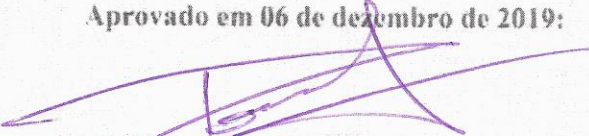
1. Pavimentos permeáveis 2. Concreto permeável 3.  
Drenagem I. Gustavo Allasia Piccilli, Daniel II. Cureau  
Cervo, Tatiana III. Título.

Lucas Alves Lamberti

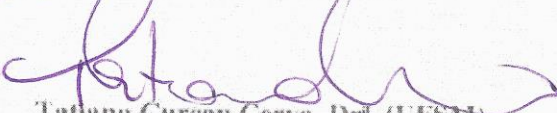
**DESEMPENHO HIDROLÓGICO DE REVESTIMENTOS DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND APLICADOS A PAVIMENTOS PERMEÁVEIS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.

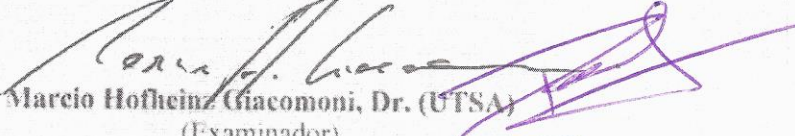
Aprovado em 06 de dezembro de 2019:



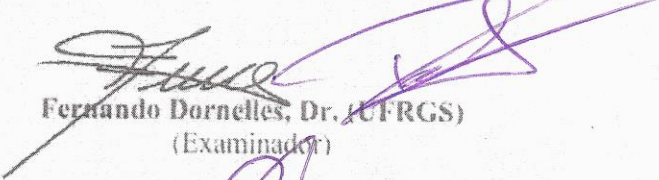
Daniel Gustavo Allasia Picilli, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)




Tatiana Cureau Cervo, Dr.<sup>a</sup>. (UFSM)  
(Co Orientadora)



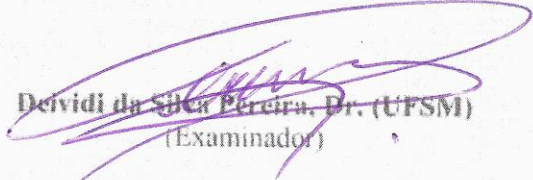
Marcio Hofheinz Giacomoni, Dr. (UTSA)  
(Examinador)



Fernando Dornelles, Dr. (UFRGS)  
(Examinador)



Alejandro Ruiz Padillo, Dr. (UFSM CS)  
(Examinadora)



Deividi da Silveira Pereira, Dr. (UFSM)  
(Examinador)

Santa Maria, RS.  
2019



## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer aos meus pais, Gercimar e Hellen, que me apoiaram e participaram efetivamente, muitas vezes indo fazer leituras durante a noite;

À Carla, que também colocou a mão na massa diversas vezes e me orientou com assuntos de Hidrologia;

Agradeço à minha irmã Fernanda por ser companheira e presente;

À Luna, que algumas vezes me ajudou, outras vezes me atrapalhou, mas sempre que foi possível esteve ao meu lado;

Aos colegas Bruna Minetto, Jonathan e Pedro Orlando por não medirem esforços em me ajudar;

Aos outros colegas que me ajudaram nas leituras, plantio de grama, execução do concreto permeável, a destacar o Cristiano Persch (deu o sangue no plantio da grama), Jéssica Fontoura, Gabriel e João Paludo;

Aos funcionários do LMCC que me ajudaram com o uso dos equipamentos e buscaram material em diversos lugares. Preciso destacar a prestatividade do José Pedro, Diego e Fernando Zucchi;

Ao técnico Fábio do laboratório de Hidráulica pelo apoio;

Aos colegas de sala: Fábio Beck, Josué Rigue, Diogo Pauletti, Lucas Cardoso, Bibiana Bule, Fernanda Tamiozzo, Pedrinho, pela descontração entre os períodos de trabalho;

Às empresas Formato, Tecmold, Supertex, ProntoMix, Votorantim, Brita Pinhal e De Martini pela ajuda de custo, doações e mão de obra;

Agradeço à UFSM e UFSM Campus de Cachoeira do Sul por permitirem meu afastamento para qualificação;

Aos professores que compuseram a banca avaliadora da qualificação e defesa. Destaco a Prof<sup>a</sup>. Rutinéia Tassi pelos conselhos e esclarecimentos em diversos momentos do trabalho;

Aos meus orientadores, Daniel Allasia e Tatiana Cervo, que foram muito mais que orientadores, foram meus amigos. Nunca negaram um momento para dúvidas e sempre me respeitaram como profissional;

-Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela estrutura, qualidade e oportunidade;

Muito obrigado a todos!





## RESUMO

### DESEMPENHO HIDROLÓGICO DE REVESTIMENTOS DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND APLICADOS A PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

AUTOR: Lucas Alves Lamberti  
ORIENTADOR: Daniel Gustavo Allasia Piccilli  
COORIENTADORA: Tatiana Cureau Cervo

A urbanização, associada ao crescimento populacional, é responsável pela impermeabilização das superfícies, que, pela sua vez, aumenta a frequência de inundações. Na atenuação desses problemas surgem, entre outras medidas, os pavimentos permeáveis. Este tipo de pavimento reduz o volume de escoamento superficial ao permitir a infiltração e armazenamento da água em sua estrutura e, em seguida, no solo local. O presente trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de diferentes tipos de pavimentos permeáveis construídos na região subtropical do Brasil (Santa Maria – RS). Foram analisados sobre a mesma estrutura revestimentos de concreto permeável, intertravado de concreto permeável e convencional e blocos pisograma. Primeiramente, fez-se uma investigação em laboratório das características mecânicas, hidráulicas e de durabilidade do concreto permeável provocadas por diferenças na composição do agregado (traço) na mistura. Considerando os melhores traços, foram construídos módulos experimentais a escala com 1m<sup>2</sup> cada para verificar o efeito da colmatação (entupimento dos poros) dos sistemas ao longo do tempo e, na sequência, vagas de estacionamento para analisar a eficiência hidráulica dos pavimentos permeáveis em condições reais. Concluiu-se que a inserção de 5% de areia e combinação de britas entre as peneiras 4,75/12,5mm e 9,5/25mm no concreto permeável proporciona ganho desejável de resistência mecânica embora reduza a capacidade de percolação d'água. Foi verificada ainda uma grande heterogeneidade no valor do índice de vazios do concreto permeável implementado nos experimentos quando comparado ao investigado em laboratório, atribuída à trabalhabilidade da mistura. Quanto ao efeito de sedimentos na colmatação dos poros do concreto, foi identificado que os de maior granulometria, tais como areia, reduzem mais a eficiência do concreto permeável do que materiais de menor granulometria, como a argila, e que, lavagem sob alta pressão é capaz de recuperar totalmente a eficiência dos pavimentos. Observou-se ainda que, dentre os revestimentos analisados, os pavimentos com concreto permeável, intertravado de concreto permeável e blocos pisograma tiveram desempenho hidrológico semelhante.

**Palavras-Chave:** pavimento permeável, concreto permeável, escoamento superficial.



## ABSTRACT

### HYDROLOGICAL PERFORMANCE OF PORTLAND CEMENT CONCRETE COATINGS APPLIED TO PERMEABLE PAVEMENTS

AUTHOR: Lucas Alves Lamberti  
ADVISOR: Daniel Gustavo Allasia Picilli  
CO-ADVISOR: Tatiana Cureau Cervo

The urbanization, associated with the population growth, is responsible for waterproofing surfaces, which increases inundation events frequency. To ease these problems, among other actions, come permeable pavements. This pavement is based on reduction of the surface runoff volume by allowing infiltration and storage of the water in its structure, and after that, the infiltration into the local soil. The objective of this work is to evaluate the structural and hydraulic performance of different permeable pavements to be built in the subtropical region of Brazil (Santa Maria-RS). We evaluated over the same structure, pervious concrete, pervious concrete pavers, concrete pavers and grass paver. Firstly, a laboratory investigation was carried out of the mechanical, hydraulic and durability characteristics of permeable concrete caused by differences in aggregate composition (unit mixture) in the mixture. Considering the best unit mixture, 1m<sup>2</sup> experimental modules were constructed to verify the effect of pore fouling over time, and then, parking lots to analyze the hydraulic efficiency of the permeable pavements under real conditions. It was concluded that the addition of 5% of sand and gravel combination between the 4.75/12.5mm and 9.5/25mm sieves in the permeable concrete provides a desirable gain of mechanical strength although it reduces the water percolation capacity. There was also a great heterogeneity in the value of the permeable concrete voids index implemented in the experiments when compared to the investigated in the laboratory, attributed to the workability of the mixture. Regarding the effect of sediment on the clogging, it was identified that those with higher grain size, such as sand, reduce the efficiency of permeable concrete more than materials with smaller grain size, such as clay, and that high pressure washing is able to recover floor efficiency. It was also observed that, among the analyzed coatings, the floors with permeable concrete, pervious concrete pavers and grass paver had similar hydrological performance.

**Key-words:** permeable pavement, pervious concrete, surface runoff



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplos de revestimentos permeáveis.....	28
Figura 2.2 – Sistema de pavimento permeável Tipo A (a) e Tipo B (b) .....	30
Figura 2.3 – Condutividade hidráulica e absorção acústica conforme dimensão de agregado	35
Figura 2.4 – Análise bidimensional de concretos com agregado de 2,36 a 4,75 mm (a); 4,75 a 9,52 mm (b) e 9,52 a 12,5 mm (c); e análise tridimensional (d) .....	36
Figura 2.5 - Bloco de concreto articulado unidirecionalmente .....	37
Figura 2.6 – Pisograma em concreto (a) e plástico flexível (b).....	37
Figura 2.7 – Fluxograma do processo de projeto de pavimentos permeáveis.....	39
Figura 2.8 – Diferença entre colmatção de sedimentos com maior (a) e menor (b) diâmetro	40
Figura 2.9 – Segunda passagem da bomba de limpeza no concreto permeável.....	42
Figura 3.1 – Moldes (a), armazenamento dos CP's (b) e verificação táctil (c); (d) .....	49
Figura 3.2 – Ensaio de caracterização das propriedades mecânicas (a); (b); (c), aspecto final dos CP's do ensaio de Abrasão (d) e regularização da superfície para ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico (e) .....	50
Figura 3.3 – Permeâmetro de carga variável construído .....	51
Figura 3.4 – Permeâmetro de carga constante construído e esquema de funcionamento .....	52
Figura 3.5 – Câmara de simulação climática.....	53
Figura 3.6 – Temperatura dos CP's no ciclo gelo-degelo .....	54
Figura 3.7 – Vedação entre anel e pavimento com massa de calafetar .....	56
Figura 3.8 – Etapas de monitoramento dos módulos .....	57
Figura 3.9 – Materiais adotados na colmatção (a) e misturador (b) .....	58
Figura 3.10 - Mapa de localização dos módulos experimentais.....	59
Figura 3.11 – Local do experimento.....	59
Figura 3.12 – Planta baixa dos módulos experimentais .....	60
Figura 3.13 – Corte AA' dos módulos experimentais .....	61
Figura 3.14 – Projeto elétrico dos módulos: comprimento dos fios e planta baixa.....	61
Figura 3.15 – Projeto elétrico dos módulos: detalhamento da central de dados .....	62
Figura 3.16 – Sequência de construção dos módulos experimentais. (a) escavação; (b) tubo e brita; (c) manta geotêxtil; (d) assentamento; (e) calha de captação; (f) baldes de reservação.	64
Figura 3.17 – Central com pluviógrafo, fonte e caixas de dados dos sensores .....	64
Figura 3.18 – Modelo de hidrograma dos módulos experimentais .....	66
Figura 3.19 – Equipamento retangular e pisograma vedados com massa de calafetar .....	68

Figura 3.20 – Teste com três situações do sensor MPX5010DP .....	69
Figura 3.21 – Mapa de localização do estacionamento com vagas experimentais .....	70
Figura 3.22 – Local do experimento .....	71
Figura 3.23 – Esquema de ensaio de poço invertido.....	73
Figura 3.24 – Perspectiva do estacionamento .....	74
Figura 3.25 – Etapas da construção do estacionamento. Ajuste do terreno (a); vedação das vagas permeáveis (b); tubulação para escoamento superficial (c); construção das caixas de alvenaria (d); assentamento da manta geotêxtil. ....	77
Figura 3.26 – Etapas da construção do estacionamento. Base granular (a); assentamento e rejuntamento dos blocos (b); plantio da grama (c); execução do concreto permeável (d). ....	78
Figura 3.27 – Instalação das cápsulas dos sensores de pressão .....	79
Figura 3.28 – Modelo de hidrograma para cada tipo de pavimentos permeável .....	80
Figura 4.1 – Granulometria do a) agregado graúdo e b) agregado miúdo. ....	82
Figura 4.2 – Granulometrias das misturas a) sem areia e faixa ideal b) com areia e faixa ideal .....	83
Figura 4.3 – Relação entre o índice de vazios e a) condutividade hidráulica pelos ensaios de carga variável e constante; b) resistência à compressão axial; c) resistência à tração na flexão. ....	86
Figura 4.4 – Perda de massa dos traços pela ciclagem de congelamento .....	87
Figura 4.5 – Resultados de a) compressão axial e b) desgaste por abrasão dos CP's em condições normais e após ciclos gelo-degelo .....	88
Figura 4.6 – Compressão axial de CP's a) sem areia e b) com areia, em condições normais e após ciclos gelo-degelo .....	89
Figura 4.7 – Perda por abrasão dos CP's em condições normais e após ciclos em relação ao índice de vazios.....	89
Figura 4.8 – Ajuste pela curva Horton da infiltração do solo dos módulos.....	91
Figura 4.9 – Redução da capacidade de infiltração dos módulos em relação à condição inicial .....	94
Figura 4.10 – Distribuição da a) areia e da b) argila em corte lateral do concreto permeável. ....	95
Figura 4.11 – Módulo I.P.C. a) antes e b) depois da segunda limpeza.....	96
Figura 4.12 – Caracterização dos eventos dos módulos pela IDF de Santa Maria .....	97
Figura 4.13 – Validação dos eventos dos módulos.....	98
Figura 4.14 – Análise cronológica dos eventos com TR<0,1 anos dos módulos I.P.....	99
Figura 4.15 – Análise cronológica dos eventos com TR<0,1 anos dos módulos I.C. ....	100

Figura 4.16 – Análise cronológica dos eventos com $TR < 0,1$ anos dos módulos C.P. ....	101
Figura 4.17 – Correlação entre precipitação e escoamento superficial dos módulos.....	103
Figura 4.18 – Correlação entre tempo de retorno e escoamento superficial dos módulos .....	105
Figura 4.19 – Correlação entre precipitação e nível máximo dos módulos .....	107
Figura 4.20 – Correlação entre tempo de retorno e nível máximo dos módulos.....	108
Figura 4.21 – Correlação entre precipitação e tempo de esvaziamento dos módulos .....	110
Figura 4.22 – Correlação entre tempo de retorno e tempo de esvaziamento dos módulos ....	111
Figura 4.23 – Hidrograma de precipitação e nível de água nos módulos do evento mais intenso.....	114
Figura 4.24 – Curva granulométrica do solo presente na base do estacionamento .....	116
Figura 4.25 – Resultado do ensaio de a) Proctor Normal e b) CBR.....	116
Figura 4.26 – Resultado do ensaio de infiltração do solo no local do estacionamento .....	117
Figura 4.27 – Redução da capacidade de infiltração das vagas em relação à condição inicial .....	121
Figura 4.28 – Caracterização dos eventos do estacionamento pela IDF .....	122
Figura 4.29 – Escoamento superficial dos pavimentos do estacionamento – <i>box spot</i> .....	123
Figura 4.30 – Correlação entre precipitação e escoamento superficial das vagas.....	125
Figura 4.31 – Correlação entre tempo de retorno e escoamento superficial das vagas .....	126
Figura 4.32 – Correlação entre precipitação e vazão máxima de escoamento das vagas.....	127
Figura 4.33 – Correlação entre tempo de retorno e vazão máxima de escoamento das vagas .....	127
Figura 4.34 – Imagens do espectro visível e térmicas (imagens infravermelhas) das vagas de estacionamento em a) dia frio e b) quente com diferentes escalas colorimétricas .....	129
Figura 4.35 – Imagens do espectro visível e térmicas (imagens infravermelhas) do intertravado poroso em a) dia frio e b) quente com diferentes escalas colorimétricas.....	129
Figura 4.36 – Imagens do espectro visível e térmicas (imagens infravermelhas) do intertravado comum em a) dia frio e b) quente com diferentes escalas colorimétricas.....	130
Figura 4.37 – Imagens do espectro visível e térmicas (imagens infravermelhas) do concreto permeável em a) dia frio e b) quente com diferentes escalas colorimétricas .....	131
Figura 4.38 – Imagens do espectro visível e térmicas (imagens infravermelhas) do pisograma em a) dia frio e b) quente com diferentes escalas colorimétricas .....	131
Figura 4.39 – Relação entre os principais parâmetros dos pavimentos permeáveis estudados .....	133





## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Coeficientes de escoamento conforme tipo de superfície.....	28
Tabela 2.2 – Granulometria do agregado graúdo em pavimentos permeáveis.....	34
Tabela 3.1 – Traços utilizados.....	47
Tabela 3.2 – Tipos e quantidade de corpos de prova para cada ensaio.....	48
Tabela 3.3 - Comparativo entre método gelo-degelo adotado e norma ASTM C666 (2015) ..	54
Tabela 3.4 – Dimensões superficiais dos módulos.....	65
Tabela 4.1 – Caracterização física dos agregados.....	81
Tabela 4.2 – Consumo de material das misturas e massa unitária no estado fresco.....	83
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios mecânicos e coeficiente de variação.....	84
Tabela 4.4 – Índice de vazios, massa específica e permeabilidade dos traços estudados.....	85
Tabela 4.5 – Índice de vazios dos CP's destinados ao ensaio de congelamento comparado com a 1ª moldagem.....	87
Tabela 4.6 – Composição de resultados para definição do traço a ser utilizado em campo.....	90
Tabela 4.7 – Dimensionamento das caixas de armazenamento dos módulos experimentais...	92
Tabela 4.8 – Taxa de infiltração dos módulos experimentais.....	93
Tabela 4.9 – Eventos monitorados conforme mês e período verificado.....	97
Tabela 4.10 – Análise estatística dos resultados de escoamento superficial.....	102
Tabela 4.11 – Infiltração do solo para a condição UAS I.....	112
Tabela 4.12 – Infiltração do solo para a condição UAS II.....	113
Tabela 4.13 – Infiltração do solo para a condição UAS III.....	113
Tabela 4.14 – Condutividade hidráulica obtida pelo ensaio de poço invertido.....	118
Tabela 4.15 – Dimensionamento das caixas de armazenamento das vagas de estacionamento.....	119
Tabela 4.16 – Taxa de infiltração das vagas de estacionamento.....	120
Tabela 4.17 – Análise estatística dos resultados de escoamento superficial do estacionamento.....	124
Tabela 4.18 – Comparativo de coeficiente de escoamento entre estacionamento e módulos	125



## LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society of Testing and materials
BS	British Standard
C	Coefficiente de escoamento superficial
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CP	Corpo de prova
E	Escoamento
EUA	Estados Unidos da América
$f_o$	Taxa de infiltração inicial
H	Profundidade
He	Lâmina d'água de entrada acumulada
Hs	Lâmina d'água de saída acumulada
IDF	Intensidade-duração-frequência
LID	Desenvolvimento de Baixo Impacto (Low Impact Development)
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
M	Relação agregado cimento
NBR	Norma Brasileira
P	Precipitação
PDDU	Plano Diretor de Drenagem Urbana
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PVC	Policloreto de polivinila
Q	Vazão
$q_s$	Vazão de saída
RS	Rio Grande do Sul
SI	Sistema Internacional
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SUDS	Sustainable Drainage Systems
t	Duração do evento
$t_c$	Tempo de concentração
TR	Tempo de retorno
$V_{máx}$	Volume máximo
WSUD	Siglas usadas no Reino Unido para Desenvolvimento de Baixo Impacto (Water-Sensitive Urban Design)
x	Relação água cimento
$\eta$	Porosidade



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	23
1.1. Objetivo geral.....	24
1.2. Objetivos específicos .....	25
1.3. Organização do trabalho .....	25
2. CONTROLE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA FONTE E PAVIMENTAÇÃO PERMEÁVEL .....	27
2.1. Estrutura e etapas construtivas do pavimento permeável .....	29
2.1.1. Revestimento - concreto permeável .....	31
2.1.2. Revestimentos – blocos de concreto .....	36
2.2. Critérios de projeto e dimensionamento .....	37
2.3. Manutenção e durabilidade .....	39
2.3.1. Colmatação.....	40
2.3.2. Efeitos climáticos deletérios .....	42
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1. Etapa 1 – estudo de concreto permeável em laboratório .....	46
3.1.1. Caracterização dos materiais.....	46
3.1.2. Descrição dos concretos permeáveis estudados .....	46
3.1.3. Dimensões, quantidade e moldagem dos corpos de prova.....	47
3.1.4. Ensaio de propriedades mecânicas .....	49
3.1.5. Ensaio de propriedades hidráulicas .....	51
3.1.6. Durabilidade ao ciclo gelo-degelo .....	52
3.2. Etapa 2 – módulos experimentais para análise da colmatação .....	55
3.2.1. Estratégia metodológica .....	55
3.2.2. Local de implantação .....	58
3.2.3. Projeto dos módulos.....	60
3.2.4. Dimensionamento .....	62
3.2.5. Implantação dos módulos.....	63
3.2.6. Critérios de análise .....	65
3.3. Etapa 3 – Vagas de estacionamento com diferentes revestimentos permeáveis.....	67
3.3.1. Estratégia metodológica .....	67
3.3.2. Local de implantação .....	70
3.3.3. Projeto do estacionamento .....	73

3.3.4.	Dimensionamento .....	75
3.3.5.	Implantação.....	76
3.3.6.	Critérios de análise .....	79
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	81
4.1.	Resultados da Etapa 1 – estudo de concreto permeável em laboratório.....	81
4.1.1.	Caracterização dos materiais .....	81
4.1.2.	Propriedades mecânicas.....	83
4.1.3.	Propriedades hidráulicas .....	84
4.1.4.	Influência do índice de vazios nas características hidráulicas e mecânicas	86
4.1.5.	Durabilidade ao ciclo gelo-degelo .....	87
4.1.6.	Escolha do traço.....	90
4.2.	Resultados da Etapa 2 - módulos experimentais para análise da colmatação .....	90
4.2.1.	Análise prévia – solo local.....	90
4.2.2.	Dimensionamento dos elementos dos módulos .....	91
4.2.3.	Índice de vazios do concreto permeável .....	92
4.2.4.	Monitoramento dos módulos .....	92
4.3.	Resultados da Etapa 3 - Vagas de estacionamento com diferentes revestimentos permeáveis .....	115
4.3.1.	Análise prévia – solo local.....	115
4.3.2.	Dimensionamento dos elementos do estacionamento .....	118
4.3.3.	Índice de vazios do concreto permeável.....	119
4.3.4.	Monitoramento das vagas de estacionamento .....	120
4.3.5.	Verificação térmica.....	128
4.4	Comportamento hidrológico dos pavimentos permeáveis – análise global .....	132
5.	CONCLUSÕES .....	135
5.1.	Recomendações .....	138
	REFERÊNCIAS.....	141
	ANEXO A – Métodos de determinação do coeficiente de permeabilidade .....	151
	ANEXO B – Dimensionamento Mecânico e Hidráulico/Hidrológico.....	154
	ANEXO C – Ensaios mecânicos.....	159
	APÊNDICE A – Projetos do estacionamento .....	163
	APÊNDICE B – Relação de eventos e correlações dos resultados dos módulos .....	166
	APÊNDICE C – Relação de eventos e correlações dos resultados do estacionamento.....	173
	APÊNDICE D – Levantamento de custo dos pavimentos permeáveis.....	178

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema de pavimento permeável facilita a infiltração da água nos solos, reduzindo o volume do escoamento e promovendo a recarga de águas subterrâneas e o tratamento de poluentes (EPA 1999; WOODS-BALLARD et al., 2015; TUCCI, 2012; FERGUSON, 2005; URBONAS E STAHERE, 1993; BOOGARD et al., 2014b; HOLLENBECK E GÖBEL 2013). Seu princípio de funcionamento consiste em permitir a passagem total ou parcial da água da chuva através das camadas de sua estrutura, permitindo que o líquido seja estocado nos vazios das camadas inferiores, dando tempo para infiltração da água no solo (BLECKEN, et al., 2017; EISENBERG et al., 2015; URBONAS E STAHERE, 1993).

Há uma gama de materiais possível para compor a camada superior dos pavimentos permeáveis, chamada de revestimento. Todas devem, essencialmente, dar condições para a passagem da água, além de apresentar resistência mecânica e durabilidade (KIA et al., 2017a; HASSELBACH et al., 2016; EISENBERG et al., 2015). Uma dessas opções é o concreto produzido com pouca (ou nenhuma) areia em sua composição, chamado de concreto permeável, ou ainda, produzido em blocos que se encaixam, permitindo a passagem de água entre suas juntas (URBONAS E STAHERE, 1993; SCHAEFER et al., 2006; COLLINS et al., 2008; DELATTE et al., 2009; CHOPRA et al., 2010; HOLLENBECK E GÖBEL 2013; BOOGAARD et al., 2014; EISENBERG et al., 2015; KIA et al., 2017a). Em contrapartida, seu uso fica limitado a áreas de tráfego leve, tais como estacionamentos de automóveis, passeios públicos e calçadas de lotes privados. Isso ocorre devido à baixa resistência de concretos permeáveis e à grande deformabilidade da estrutura em condições saturadas sob efeito de grandes cargas (EISENBERG et al., 2015; SCHAEFER et al., 2006; TENNIS et al., 2004).

A tecnologia vem sendo estudada expressivamente desde a década de 90 na Europa, Estados Unidos e Ásia em pesquisas que envolvem problemas de durabilidade, falta de manutenção e eficiência dos pavimentos (KORHONEN E BAYER, 1989; PAINE, 1990; GHAFORI E DUTTA, 1995; TANGPITHAKKUL, 1997; NEITHALATH et al, 2003; SCHAEFER et al., 2006; BEAN et al., 2007; COLLINS et al., 2008; DELATTE et al., 2009; CHOPRA et al., 2010; FASSMAN et al., 2010; GOMEZ-ULLATE et al., 2010; HOLLENBECK E GÖBEL 2013; BOOGAARD et al., 2014; KIA et al., 2017a). De igual forma, pesquisas envolvendo concreto permeável têm sido desenvolvidas no Brasil, principalmente a partir do início do século XXI (ARAUJO et al., 2000; ACIOLI et al., 2003; ALESSI et al., 2006; SILVA et al., 2009; HOLTZ et al., 2011; VIRGILIIS et al., 2011;

BRUNO et al., 2013; CASTRO et al., 2013; GUEDES et al., 2013; LAMB et al., 2017; ALENCAR et al., 2014; BATEZINI E BALBO, 2015; JABUR et al., 2015; MELO et al., 2016; ONO et al., 2017), com a mesma intenção de avaliar o comportamento, eficiência e durabilidade deste material.

Mais recentemente, foi publicada a primeira norma brasileira que trata de pavimentos permeáveis de concreto, a NBR 16416: pavimentos permeáveis de concreto – requisitos e procedimentos (ABNT, 2015), que define os requisitos e procedimentos necessários para a utilização destes materiais.

Ainda assim, a disseminação da tecnologia avança de modo discreto no país, talvez justificada pela cautela da população à adoção de novas práticas, a falta de alguns equipamentos como aspiradores para a manutenção dos pavimentos permeáveis e por algumas lacunas no funcionamento dessas estruturas nas condições locais.

A eficiência dos sistemas de desenvolvimento de baixo impacto no controle do escoamento, entre eles os pavimentos permeáveis, está diretamente ligada às características locais, tais como tipo de solo, tráfego, carregamento de partículas de solo no pavimento (colmatação), regime de precipitações, topografia, entre outros (EPA, 1999; BLECKEN et al., 2017; EISENBERG et al., 2015; WOODS-BALLARD et al., 2015; CANHOLI, 2014).

Neste contexto, o presente trabalho avaliou em laboratório o desempenho mecânico e a durabilidade de concretos permeáveis, considerando as condições da região subtropical do Brasil, região em que o pavimento pode sofrer congelamento no inverno, e o desempenho hidráulico/hidrológico de pavimentos permeáveis de concreto de cimento Portland. Foi testada ainda a eficiência de ferramentas disponíveis no Brasil, como lavagem com água sob pressão, na manutenção dos pavimentos. Espera-se que este trabalho venha a contribuir para o meio científico com a exposição de práticas, problemas e soluções de pavimentos permeáveis através da análise aprofundada da colmatação, ação térmica e execução de dispositivos em condições reais.

### 1.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho hidráulico/hidrológico de pavimentos permeáveis com revestimentos de concreto de cimento Portland em região com clima subtropical.



## 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a influência de diferentes traços (composição de agregados) de materiais locais sobre propriedades de revestimentos de concreto permeável, tais como resistência mecânica, permeabilidade, resistência ao desgaste, resistência ao ciclo térmico;
- Verificar a eficiência hidráulica no longo prazo de pavimentos permeáveis através de um processo de simulação do processo de colmatção em módulos experimentais;
- Verificar a eficiência de ferramentas disponíveis no Brasil, tais como limpeza com água sob pressão, na manutenção dos pavimentos;
- Verificar o comportamento hidrológico de pavimentos permeáveis em condições reais de funcionamento em um estacionamento de veículos leves e compará-lo aos resultados obtidos nos módulos experimentais.

## 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente pesquisa encontra-se estruturada em cinco capítulos, como descrito a seguir. O capítulo 1 apresenta o escopo do trabalho. É feita a contextualização da pesquisa e, em seguida, são apresentados os objetivos.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica com abordagem nos impactos causados na impermeabilização do solo devido ao processo de urbanização. Em seguida, a tecnologia de pavimentos permeáveis é apresentada através da estruturação, métodos construtivos e materiais utilizados. Por último, os problemas que podem surgir na utilização do sistema e as alternativas de recuperação.

O capítulo 3 traz os critérios que foram adotados no desenvolvimento experimental da pesquisa, tais como normas e ensaios, características dos materiais, etapas construtivas e instalação dos dispositivos de análise. Por questões de organização, o experimento é subdividido em três etapas:

Etapa 1 – Definição do traço mais adequado do concreto permeável quando utilizados materiais locais;

Etapa 2 – Verificação da eficiência hidráulica no longo prazo e de ferramentas de manutenção através da simulação do processo de colmatção em módulos experimentais;

Etapa 3 – Avaliação do comportamento hidrológico em condições reais de funcionamento em um estacionamento de veículos leves.

O capítulo 4 apresenta os resultados divididos nas três etapas estabelecidas no capítulo anterior e no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

## 2. CONTROLE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA FONTE E PAVIMENTAÇÃO PERMEÁVEL

O processo de urbanização modifica a cobertura natural do solo provocando vários efeitos que alteram o ciclo hidrológico natural, tais como aumento do volume de escoamento superficial, redução da umidade do solo e nível do lençol freático, inundações e alagamentos, aumento da velocidade de escoamento e consequente erosão do solo, diminuição do escoamento de base dos rios, acréscimo na carga de poluentes decorrente da rede pluvial (WOODS-BALLARD et al., 2015; TUCCI, 2012; FERGUSON, 2005; URBONAS E STAHR, 1993).

Para a mitigação destes problemas é preconizada a implantação de alternativas que controlem o escoamento superficial na fonte. Este conceito de controle hidrológico evoluiu desde a década de 1980 por meio das técnicas conhecidas como Desenvolvimento de Baixo Impacto (em inglês *Low Impact Development* - LID) nos EUA, *Sustainable drainage systems* (SUDS) no Reino Unido, *Water-Sensitive Urban Design* (WSUD) na Austrália e Infraestrutura Verde no Brasil (FLETCHER et al., 2015; WOODS-BALLARD et al., 2015; TASSI et al., 2014; EPA, 1999; SCHUELER, 1987).

Dentre os principais dispositivos usados como Infraestrutura Verde estão as bacias de detenção ou retenção (ALLAN et al., 2017; MAH E HO, 2017) e os dispositivos de infiltração, como trincheira de infiltração (CIZEK et al. 2017; LOCATELLI et al., 2015), telhados verdes (HARPER et al., 2015; STOVIN et al., 2015) e pavimentos permeáveis (BOOGARD et al., 2014b; HOLLENBECK E GÖBEL 2013). A escolha do dispositivo mais adequado para a drenagem do local deve ser feita após uma análise das condições de uso e ocupação do solo, das características hidrológicas locais, características físicas e geográficas e resultados requeridos (BLECKEN et al., 2017; EISENBERG et al., 2015; WOODS-BALLARD et al., 2015; CANHOLI, 2014).

Os pavimentos permeáveis, alvo dessa pesquisa, são uma alternativa para a pavimentação de estacionamentos de veículos, passeios públicos e lotes. Consiste em uma estrutura formada por diversas camadas que permitem a passagem da água para a camada subjacente de base/sub-base, também composta por materiais porosos, cuja função é armazenar temporariamente a água infiltrada nas camadas superiores até sua completa infiltração no solo. Quando bem dimensionados e construídos, reduzem o escoamento superficial (podendo eliminá-lo completamente até um limite de intensidade de chuva) e atuam no tratamento da água à medida que infiltra através das camadas (Tabela 2.1) (ONO et

al., 2017; KIA et al., 2017a; WEISS et al., 2017; GUEDES et al., 2013; JABUR et al., 2015; EISENBERG et al., 2015; WOODS-BALLARD et al., 2015; LAMB et al., 2017; MARCHIONI et al., 2014; HOLLENBECK E GÖBEL 2013; IMRAN et al., 2013; ACPT, 2012; CHOPRA et al., 2010; GOMEZ-ULLATE et al., 2010; SILVA et al., 2009; COLLINS et al., 2008; BEAN et al., 2007a; DREELIN et al., 2006; ACIOLI et al., 2003; BEAN et al., 2007b; BRATTEBO E BOTH, 2003; AZZOUT et al., 1994). Atualmente, há diversas possibilidades de materiais para a construção de pavimentos permeáveis (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Exemplos de revestimentos permeáveis



Fonte: JBM (2015).

Tabela 2.1 – Coeficientes de escoamento conforme tipo de superfície

Autor		Araújo et al. (2000)	Acioli (2005)	Silva et al. (2009)	Bruno et al. (2013)	Guedes et al. (2013)
Intensidade ( $\text{mm.h}^{-1}$ )		110	0,8 a 16	120	129	100,8
Declividade (%)		1,0 a 4,0	1,0	2,0	2,0	1,5
Coeficiente de escoamento	Concreto convencional	0,95	-	-	0,92	-
	Intertravado de concreto	0,78	0,38 a 0,69	0,13 a 0,69	0,55	0,09 a 0,27
	Solo compactado	0,66	0,57 a 0,63	0,52 a 0,63	0,62	-
	Paralelepípedo	0,60	-	-	-	-
	Blocos vazados - Pisograma	0,03	0,00 a 0,35	0,02 a 0,35	0,23	0,00 a 0,02
	Concreto permeável	0,01	-	-	-	0,00 a 0,29

Fonte: Adaptado de autores citados.

Há um consenso que a utilização de pavimentos permeáveis deve ser em solos com boa permeabilidade, pequenas declividades e lençol freático distante da superfície, embora os valores de referência variem. Para a taxa de permeabilidade do solo os valores mínimos variam na literatura entre  $0,036 \text{ mm.h}^{-1}$  a  $13 \text{ mm.h}^{-1}$  (WOODS-BALLARD et al., 2015; ACIOLI, 2005; TUCCI, 2003; EPA, 1999; URBONAS E STAHR, 1993). A recomendação para a declividade máxima do revestimento varia de 5% (WDNR, 2014; MARCHIONI E

SILVA, 2010; ACIOLI, 2005; EPA, 1999; URBONAS E STAHRÉ, 1993) a 16%, neste caso com adaptações do método construtivo (TENNIS et al., 2004). Já para a distância do lençol freático, encontram-se valores mínimos variando entre 0,6 m e 1,2 m do fundo do dispositivo (NBR 16416, 2015; CANHOLI, 2014; TUCCI, 2003; EPA, 1999; URBONAS E STAHRÉ, 1993).

Também deve limitar-se o uso de pavimentos permeáveis nos casos em que a água drenada é fortemente contaminada com óleos, graxas e metais pesados, tendo impacto no escoamento subterrâneo e lençol freático; e ineficiência do dispositivo pela falta de controle na execução ou manutenção, causando entupimento dos poros (EINSEBERG et al., 2015; TUCCI, 2003).

Há diversos estudos sobre pavimentos permeáveis no Brasil (exemplo: Araújo et al. (2000), Acioli et al. (2003), Silva et al. (2009), Bruno et al. (2013), Guedes et al. (2013)), sendo que alguns destes trabalhos foram desenvolvidos na região subtropical, mais particularmente no Rio Grande do Sul. Em Santa Maria, região central do RS, há poucos estudos nesta área. Pode-se citar o trabalho de Melo et al. (2016), que investigaram misturas de concretos de cimento Portland permeáveis em laboratório, Maus et al. (2007), com a avaliação da eficiência de parcelas experimentais revestidas com blocos de concreto intertravados, grama, paralelepípedo e concreto asfáltico, e Dresch et al. (2016), que investigou em laboratório as propriedades de concretos asfálticos porosos.

## 2.1. ESTRUTURA E ETAPAS CONSTRUTIVAS DO PAVIMENTO PERMEÁVEL

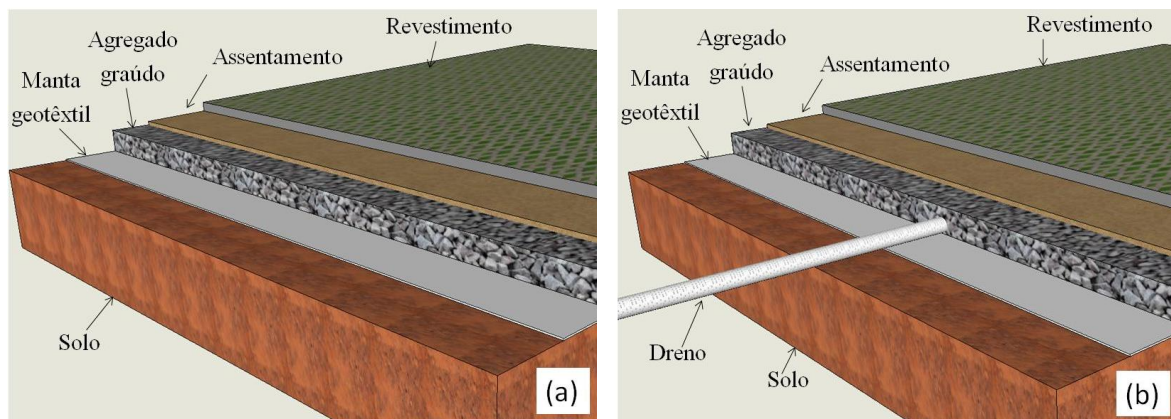
As estruturas e etapas construtivas de um pavimento permeável são citadas pela literatura (EISENBERG et al., 2015; WOODS-BALLARD et al., 2015; ACPT, 2012; MARCHIONI E SILVA, 2010; VIRGILIIS et al., 2011; SCHAEFER et al., 2006; TENNIS et al., 2004; EPA, 1999; PAINE, 1990), sendo que no cenário nacional destaca-se o trabalho realizado por Virgiliis et al. (2011).

Há três tipos de pavimentos permeáveis de acordo com a forma de gerenciar a água que infiltra no pavimento permeável e que definem sua estrutura (WOODS-BALLARD et al., 2015; ABNT, 2015):

- Tipo A: toda a água que infiltra na camada superficial do pavimento permeável fica armazenada na estrutura (base granular) e infiltra no solo local ao longo de algumas horas (Figura 2.2a).

- Tipo B: a proporção de água que excede a capacidade drenante do solo local é conduzida por um sistema de drenos (tubo perfurado) dentro da estrutura (Figura 2.2b).

Figura 2.2 – Sistema de pavimento permeável Tipo A (a) e Tipo B (b)



Fonte: Autor.

- Tipo C: de estrutura similar ao tipo B, neste pavimento não ocorre infiltração da água no solo local, toda a água infiltrada é esgotada através de dreno. Neste caso, o solo pode ser isolado com uma membrana impermeável de plástico ou Polietileno de Alta Densidade (PEAD). É recomendado em situações em que possui baixa permeabilidade, baixa resistência mecânica (a infiltração de água poderia causar danos), captação da água para uso ou situações em que o lençol freático deve ser protegido ou está muito próximo da base do pavimento.

A camada inferior é o solo local, chamado de subleito. Nos sistemas do Tipo A e B ocorre infiltração da água no subleito, portanto, o solo deve apresentar uma capacidade de infiltração adequada, evitando-se a sua compactação e grande caimento (EISENBERG et al., 2015; ACIOLI, 2005; TENNIS et al., 2004). Nesses dois sistemas pode ser usada uma manta geotêxtil (bidim) ou material granular de tamanho intermediário para impedir a ascensão dos finos do solo local que poderiam causar o preenchimento dos poros (colmatação) da camada permeável (WEISS et al., 2017; ABNT, 2015; ACIOLI et al., 2003; VIRGILIIS et al., 2011). É importante conferir durante a execução se não há material cortante que possa danificar a manta utilizada.

A camada acima do subleito é conhecida como base granular (ou reservatório), composta de pedra britada de granulometria aberta (sem finos). Como a base granular pode danificar a manta inferior, é recomendado colocar manualmente uma camada de 5 cm de pó de pedra entre a manta e a camada de base e compactar com rolo liso vibratório de até 1,5 toneladas. Na base granular, a água percola pelos poros e fica armazenada até o esgotamento

total, seja pela infiltração ou pelo dreno. A NBR 16416:2015 coloca algumas especificações para o material utilizado nesta camada, dentre elas, o índice de vazios, que deverá ser superior a 32%. A faixa granulométrica indicada pela norma está entre as peneiras 9,5 mm e 25 mm.

Quando o projeto determina o uso de drenos para a saída de água (tipos B e C), deve-se posicionar os tubos de PEAD furados nessa camada na cota pré-determinada e direcioná-lo a uma caixa coletora.

Acima da base granular também é recomendado utilizar uma manta geotêxtil para evitar a entrada de finos pela superfície superior, no entanto, essa manta reduz normalmente a capacidade de infiltração do sistema. Além disso, outra camada de manta geotêxtil eleva o custo da obra, por estes motivos esta camada é muitas vezes rejeitada (WEISS et al., 2017; VIRGILIIS et al., 2011). A próxima camada é chamada de assentamento e tem a função de assentar as peças do revestimento no nível correto e de filtrar a água pluvial que infiltra no sistema (WOODS-BALLARD et al., 2015; JABUR et al., 2015). O assentamento é somente necessário nas peças pré-fabricadas. Quando se executa o revestimento no local, seja de concreto permeável ou asfalto poroso, faz-se diretamente sobre a camada de base granular ou manta geotêxtil (se houver).

A camada de assentamento é composta de material granular espalhado a mão, também de granulometria aberta, porém, com dimensão máxima de 9,5 mm e índice de vazios superior a 32% (ABNT, 2015). A espessura da camada de assentamento deve ser especificada em projeto, variando entre 20 mm e 60 mm na condição não compactada e com uma variação máxima permitida da camada é de  $\pm 5$  mm em relação ao valor de projeto (NBR 16416:2015).

Sobre a camada de assentamento vem o revestimento que recebe o carregamento do tráfego e transfere os esforços para as outras camadas. Trata-se da camada de maior custo, pois, além de apresentar boa resistência mecânica para os esforços e desgaste superficial, deve apresentar boa aparência e acessibilidade (EISENBERG et al., 2015; MARCHIONI et al., 2014; HOLTZ et al., 2011; SCHAEFER E KEVERN, 2011).

Diversos materiais são utilizados como revestimento, tais como asfalto poroso, peças intertravadas, placas e blocos de diferentes formatos, concreto permeável. Esse trabalho irá focar nos revestimentos de concreto de cimento Portland.

### **2.1.1. Revestimento - concreto permeável**

O avanço em pesquisas e aplicações do concreto permeável se deu na década de 90 com os trabalhos de Korhonen e Bayer (1989), Paine (1990), Ghafoori e Dutta (1995a),

Ghafoori e Dutta (1995b), Karasawa e Suda (1996), Tangpithakkul (1997), entre outros. A estrutura do concreto permeável baseia-se na redução da quantidade de agregado miúdo do concreto convencional, tornando-se, assim, um material com poros interconectados que variam de 2 a 8 mm (KIA et al., 2017a; SCHAEFER e KEVERN, 2011; TENNIS et al., 2004).

As propriedades do concreto permeável são dependentes da quantidade de poros, chamada de índice de vazios. A resistência à compressão axial diminui linearmente à medida que aumenta a porosidade, por outro lado, a permeabilidade aumenta exponencialmente, com índice de vazios superior a 25% (WEISS et al., 2017; KIA et al., 2017a; DELATTE et al., 2009; SCHAEFER et al., 2006; NEITHALATH, 2003); Dessa forma, procura-se obter concretos permeáveis com índice de vazios entre 15 e 35% e permeabilidade entre 0,14 e 1,23  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  (ACI 522R, 2010). Os métodos de ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade do concreto permeável em laboratório e campo são descritos no Anexo A.

Alguns ensaios do concreto convencional não são significativos para o controle de qualidade dos concretos permeáveis. Durante o estado fresco, a mistura apresenta pouca trabalhabilidade, pois a ausência (ou pequena quantidade) de agregado miúdo torna-o mais consistente. Desta forma, o ensaio de abatimento pelo tronco do cone, conhecido como “slump test”, é pouco representativo. O ensaio de massa específica aparente ou controle visual é um dos métodos de controle de produção mais empregados (TENNIS et al., 2004). A NBR 16416 (ABNT, 2015) apresenta o valor mínimo para a massa específica aparente do concreto de  $1600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , com tolerância de  $\pm 80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , tanto para o estado fresco quanto para o estado endurecido.

Ensaio convencionais de resistência à compressão também têm sua representatividade limitada, porque as tensões são fortemente dependentes dos vazios (Tennis et al., 2004). Mesmo assim, a NBR 16416 (ABNT, 2015) limita inferiormente a resistência à compressão em 35 MPa para blocos de juntas alargadas e 20 MPa para blocos de juntas padrão. Já para as placas e concreto moldado no local, é preciso apresentar 2 MPa de resistência à tração na flexão (em amostras prismáticas).

A falta de trabalhabilidade do concreto permeável impacta na sua execução, já que tem início de pega mais rápido que o concreto convencional, tornando o lançamento e nivelamento um obstáculo desafiador. O espalhamento do concreto permeável deve ser feito sobre a base/subleito úmida para evitar perda de água do concreto, de forma rápida, contínua e, preferencialmente, em horários de temperatura mais baixa. O nivelamento é feito com rodos ou régua vibratória, a um nível de 15 a 20 mm acima das guias para permitir a posterior



compactação com rolo, ainda com o concreto fresco. Executa-se juntas de dilatação a cada 6 metros logo após a compactação, com profundidade de  $\frac{1}{4}$  da espessura do revestimento, apesar do concreto permeável ter menos problemas de trincas que o concreto convencional. É necessário especificar o tipo de cura a ser adotada, úmida ou química, e realizá-la adequadamente durante o tempo pré-estabelecido.

#### *2.1.1.1. Materiais utilizados na composição do concreto permeável*

O concreto permeável contém aglomerante hidráulico, agregado graúdo, água e pode conter uma pequena parcela de agregado miúdo. Não utiliza-se mais de 7% de agregado miúdo para a porosidade do material adequada, característica fundamental do revestimento superficial. Essa pequena fração de agregado miúdo pode resultar em ganho de resistência mecânica, ao reduzir tensões do contato de grãos do agregado graúdo e melhorar o contato na zona da interface entre o agregado graúdo e a pasta. Há a possibilidade de utilizar diferentes tipos de adições e aditivos químicos que atribuem ao concreto melhor durabilidade, desempenho e trabalhabilidade (EISENBERG et al, 2015; ACPT, 2012; YANG et al., 2008; TENNIS et al., 2004).

As proporções dos materiais devem ser definidas através de dosagem racional, com experimentos e procedimentos realizados em laboratório com os insumos que se pretende utilizar em campo. A NBR 16416 (ABNT, 2015) deixa lacunas em alguns aspectos, principalmente às questões de dosagem do concreto moldado no local, como dimensões adequadas dos agregados, relação água/cimento e procedimento de mistura.

O aglomerante hidráulico mais empregado em concretos permeáveis é o cimento Portland, porém, materiais como sílica ativa, cinza volante e escória de alto-forno podem ser utilizados com a finalidade de ganho econômico e mecânica (BATEZINI E BALBO, 2015; EISENBERG et al, 2015; SCHAEFER E KEVERN, 2011; TENNIS et al., 2004). Como o volume de argamassa em concretos permeáveis é reduzido, as misturas exigem menor consumo de água. A norma ACI 522R-10 sugere uma faixa de relação água/cimento apropriada de 0,26 a 0,45.

Em relação aos agregados, a distribuição granulométrica aconselhável é do tipo uniforme (pequena variação de diâmetro). A NBR 16416:2015 não especifica a distribuição para misturas de concreto permeável, somente para agregados utilizados nas camadas inferiores ao revestimento embora praticamente todas as normas estrangeiras tais como ACI 211.3R-02, a Britânica BS7533-3: 2009 e o Manual de Melhores Práticas de Gestão de águas pluviais de Nova Jersey (NJDEP, 2004) sugerem faixas adequadas (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Granulometria do agregado graúdo em pavimentos permeáveis

Peneiras (mm)	Material passante (%)		
	NJDEP (2004)	BS 7533-3 (2009)	ACI 211.3R (2002)
12,50	100	100	100
9,50	95	98 a 100	0 a 100
6,30	*	80 a 99	0 a 100
4,75	35	*	0 a 100
2,36	15	0 a 20	0 a 100
1,20	10	0 a 5	0
0,60	2	0 a 2	0

\* Não informado

Fonte: adaptado de NJDEP (2004) e Tabela D6 do BS 7533-3 (2009).

Por outro lado, grãos de maior dimensão, até determinado limite, são desejáveis para garantir segurança de trafegabilidade, conferindo aderência entre pavimento-veículo, além de reduzir o custo (EISENBERG et al, 2015). Holtz et al. (2011) realizaram estudo com diferentes composições de agregados de concreto permeável, visto que britas de menor dimensão exige maior energia de britagem. Foram feitos ensaios de resistência à compressão e permeabilidade pelo método de carga variável em corpos de prova (CP's) moldados com agregado de granulometria entre as peneiras 4,75/12,5 mm, moldados com agregado de granulometria entre as peneiras 9,5/25 mm e moldados com agregado de granulometria entre as peneiras 9,5/25 mm e adição de 7% de areia. Os autores constataram bons resultados da mistura com maior granulometria e adição de 7% de areia, tornando-a totalmente praticável. Além disso, concluíram que o concreto apresenta problemas com a relação agregado/cimento (M) acima de 7 e que a faixa ideal está entre 4 e 5.

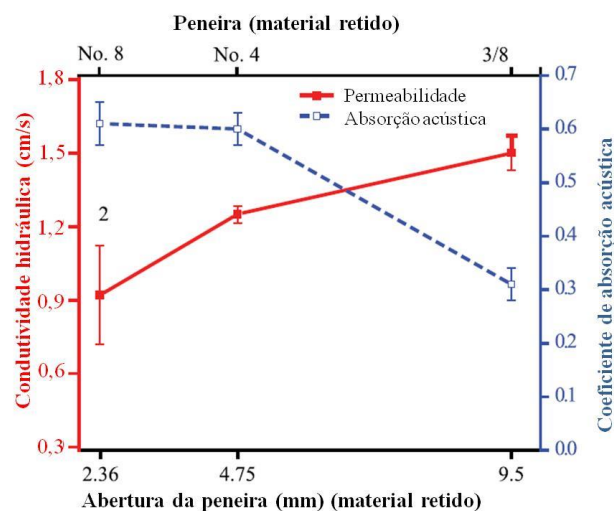
Batezini e Balbo (2015) também verificaram a permeabilidade pelos métodos de ensaio com carga variável e carga constante de misturas com três granulometrias diferentes, conforme porcentagem retida nas peneiras 9,5 mm, 6,3 mm e 4,75 mm: uma mais aberta, uma intermediária e outra mais fechada. Os coeficientes de permeabilidade obtidos pelo ensaio de carga variável foram superiores aos obtidos pelo ensaio de carga constante. Em ambos os ensaios, verificaram que a granulometria não tem efeito significativo nos resultados. Segundo os autores, a capacidade permeável do concreto é dependente do índice de vazios e não da variação do diâmetro máximo do agregado. Em contraste, Schaefer et al. (2006) afirmam que o índice de vazios é sim dependente do tamanho do agregado graúdo além de muitos outros fatores, tais como energia de compactação, presença de areia na mistura e origem do agregado graúdo. Os autores fizeram misturas de concreto permeável com relação água cimento 0,27, diferentes faixas granulométricas de dois agregados graúdos, adições de borracha e sílica ativa

para verificar resistência à compressão axial, resistência de tração por flexão, permeabilidade pelo ensaio de carga variável e resistência ao ciclo de gelo-degelo.

Já Neithalath et al. (2010), ao estudarem as características dos poros, afirmaram que a verificação isolada do índice de vazios não é determinante na permeabilidade de um concreto permeável. Como mostra a Figura 2.3, a condutividade hidráulica (pelo ensaio de carga variável) e o coeficiente de absorção acústica (capacidade do material de absorver energia acústica) são influenciados pelo tamanho do agregado em três misturas com o mesmo índice de vazios (20%). As misturas envolveram graduações do agregado graúdo:

- Entre as peneiras 2,36 mm e 4,75 mm;
- entre as peneiras 4,75 mm e 9,52 mm;
- e entre as peneiras 9,52 mm e 12,5 mm.

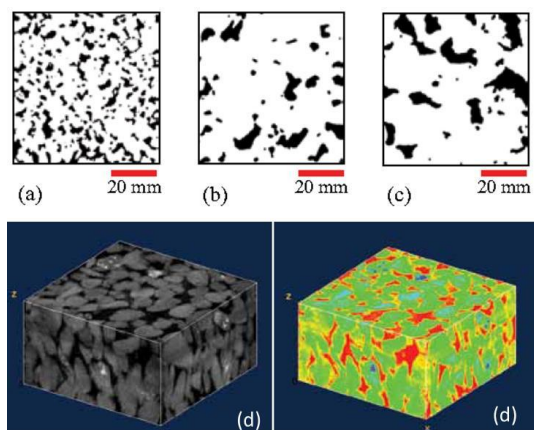
Figura 2.3 – Condutividade hidráulica e absorção acústica conforme dimensão de agregado



Fonte: adaptado de Neithalath et al. (2010).

Tem-se uma variação considerável da permeabilidade de concretos com o mesmo índice de vazios. Segundo os autores, torna-se importante caracterizar e verificar a conectividade dos poros. A caracterização dos poros pode ser realizada pela análise de imagens bidimensionais (Figura 2.4 (a), (b) e (c)) ou pelo método de intrusão de mercúrio e a conectividade pode ser constatada pela visualização tridimensional (Figura 2.4 (d)) do espaço poroso através do uso de microtomografia de raio-X (disponibilidade de equipamento é limitada) ou pela análise mais aprofundada de imagens bidimensionais (RAZZAGHMANESH E BEECHAM, 2018; NEITHALATH et al., 2010).

Figura 2.4 – Análise bidimensional de concretos com agregado de 2,36 a 4,75 mm (a); 4,75 a 9,52 mm (b) e 9,52 a 12,5 mm (c); e análise tridimensional (d)



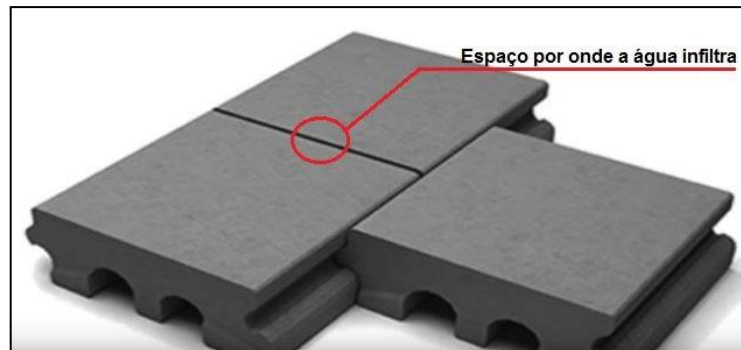
Fonte: adaptado de Neithalath et al. (2010).

### 2.1.2. Revestimentos – blocos de concreto

Os blocos intertravados construídos em concreto surgiram no final do século XIX, mas foi após a 2ª Guerra Mundial que teve maior impulso industrial, com importante papel na reconstrução de ruas europeias. Suas principais vantagens eram o baixo custo de produção, a homogeneidade das dimensões e facilidade na instalação. Nas décadas de 60 e 70, os blocos pré-moldados passaram por diversos avanços e consolidaram-se no setor da construção, inclusive no Brasil. Sua propagação teve dois pontos importantes: utilização em projetos urbanísticos pela versatilidade estética e o apelo ambiental, pois não impermeabiliza totalmente o solo. Atualmente, as peças de concreto são fabricadas em diferentes formatos, espessuras e cores, que podem ser dispostas de diversas maneiras. A percolação da água ocorre pelas juntas entre as peças, assim, é aconselhável utilizar blocos que contenham espaçadores alargadores de juntas quando se pretende facilitar essa infiltração. Em seguida, as juntas são preenchidas com areia ou pó de pedra (ONO et al. 2017; VIRGILIIS et al., 2011).

Alguns pesquisadores no Brasil (MARCHIONI E SILVA, 2013; SANTOS et al. 2015) avaliaram pavimentos intertravados permeáveis com infiltração nas juntas alargadas verificando valores abaixo dos hoje requeridos pela norma brasileira e caindo fortemente com o tempo de uso. Uma solução para esse problema são os blocos de concreto unidirecionalmente articulados (ONO et al., 2017) (Figura 2.5). Este tipo de bloco foi desenvolvido para conduzir a água na direção das cavidades inferiores, além de ter um encaixe rápido entre as peças e funcionar como uma estrutura rígida. A taxa de infiltração média foi de  $4,89 \times 10^{-1} \text{ cm.s}^{-1}$ , valor acima do exigido por norma (ABNT, 2015).

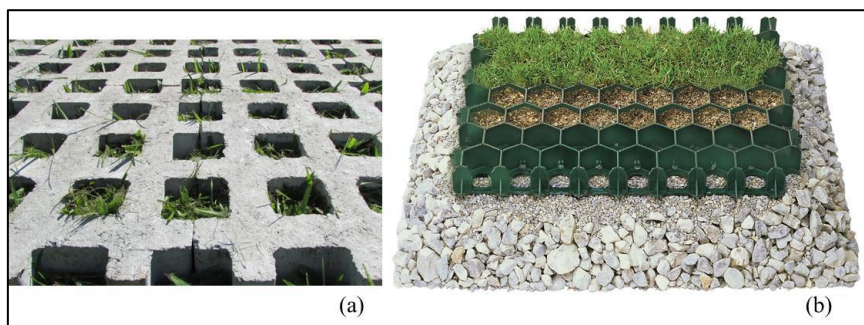
Figura 2.5 - Bloco de concreto articulado unidirecionalmente



Fonte: Ono et al. (2017).

Outra solução é o chamado pisograma. Sua estrutura em concreto convencional ou em plástico flexível (Figura 2.6) é feita para que, ao dispor no local, apresente vãos destinados ao preenchimento de grama (BUYUNG E GHANI, 2017; ACIOLI, 2005; BRATTEBO E BOTH, 2003). Em termos gerais, os resultados obtidos com esse tipo de blocos se encontram dentro da norma e entre os melhores entre os blocos intertravados (ACIOLI, 2005).

Figura 2.6 – Pisograma em concreto (a) e plástico flexível (b)



Fonte: adaptado de Ritter (2018).

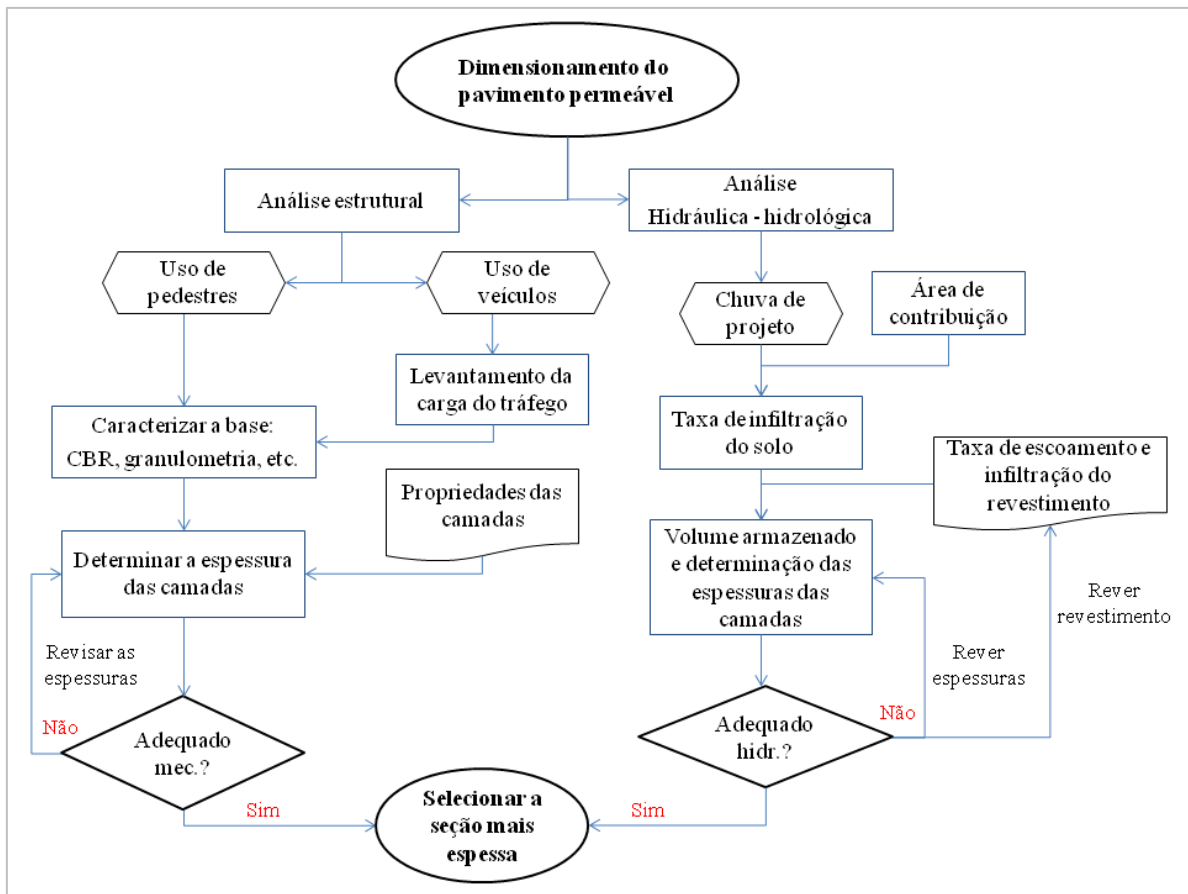
## 2.2. CRITÉRIOS DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO

Há uma grande variedade de concepções de pavimentos permeáveis e neste contexto, o projeto deve ser bem elaborado para garantir a eficiência e durabilidade estrutural e hidráulica. Na literatura (Ex: EISENBERG et al., 2015; WOODS-BALLARD et al, 2015; ACPT, 2012; MARCHIONI E SILVA, 2010; VIRGILIIS et al., 2011; SCHAEFER et al., 2006; TENNIS et al., 2004; EPA, 1999; PAINE, 1990) são citadas diversas técnicas para sua elaboração. Especificam-se algumas informações e etapas necessárias que devem ser levantadas durante o projeto (NBR 16416, 2015; EISENBERG et al., 2015; MARCHIONI et

al., 2014; TENNIS et al., 2004) tais como condições de implantação, uso do pavimento e possíveis interferências; condições de carregamento, móveis e estáticos, e configurações diversas às quais o pavimento deve estar sujeito; capacidade de suporte do solo, através do índice de suporte califórnia (CBR); coeficiente de permeabilidade do subleito; condição de saturação do solo; medição do nível do lençol freático; precipitação da região; levantamento planialtimétrico: sistema de drenagem da região, geomorfologia do local e vegetação de maior porte; área de contribuição: deve ser no máximo cinco vezes maior que a área permeável; declividade máxima de 5% para áreas permeáveis; declividade máxima de 20% para as áreas de contribuição; resistência mecânica mínima para o revestimento; dimensionamento: espessura do revestimento e base granular; massa específica do concreto permeável moldado no local; detalhamento das juntas longitudinais e transversais; análise de risco de contaminação do lençol freático e distância mínima de 30 m de fontes de captação de água subterrâneas; projeto geométrico: conjunto de plantas, perfis e seções transversais em escalas apropriadas.

A etapa de dimensionamento envolve a determinação da espessura das camadas do sistema permeável, em especial as camadas de revestimento e base granular. A espessura de agregado da base é necessária para armazenar o volume de água infiltrada para uma chuva com determinado tempo de retorno (TR). A espessura calculada deve ser comparada com a espessura especificada para suportar os esforços solicitantes, ou seja, oriunda do dimensionamento mecânico. Adota-se a maior entre as duas espessuras. Araújo et al. (2000) salientam que, por questões práticas, aconselha-se utilizar uma espessura mínima de base granular de 15 cm. A Figura 2.7 mostra esquematicamente o processo de dimensionamento. Maiores detalhes são descritos no Anexo B.

Figura 2.7 – Fluxograma do processo de projeto de pavimentos permeáveis



Fonte: adaptado de Swan e Smith (2010); Eisenberg et al. (2015).

### 2.3. MANUTENÇÃO E DURABILIDADE

A eficiência dos pavimentos permeáveis pode ficar aquém do projetado devido a erros de execução, falta de controle na construção e problemas de manutenção. A manutenção das estruturas permeáveis deve ser adotada para que a estrutura conserve não somente sua capacidade drenante, mas também absorção de ruídos e absorção de deformações. Os principais fatores que afetam a durabilidade dos pavimentos permeáveis são inspeção na execução e pós-construção, restrição ao acesso de veículo pesados, rotina de limpeza e cuidados com escoamento de outros locais (LUCKE et al., 2015; SILVA et al., 2009; SCHAEFER et al., 2006; ACIOLI et al., 2003). Segundo Kia et al. (2017a), a vida útil de um pavimento permeável varia de 6 a 20 anos e seu estado final é causado pelo entupimento dos poros, degradação pelo ciclo gelo-degelo ou desgaste excessivo da superfície.

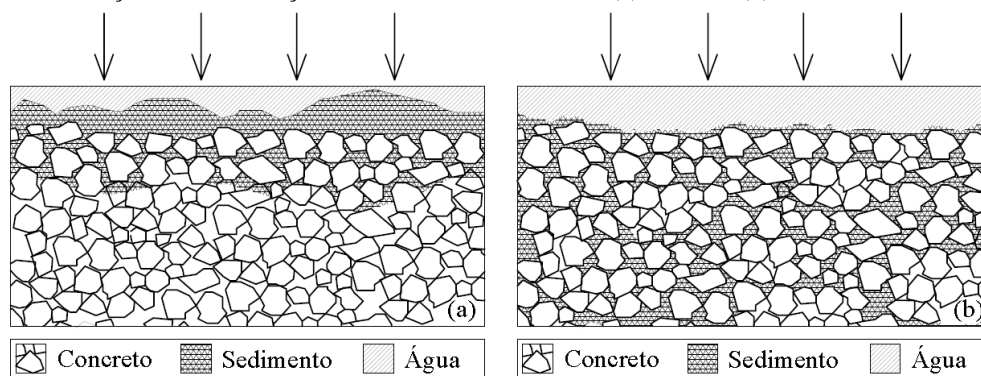
### 2.3.1. Colmatação

Sem a limpeza periódica, a sedimentação entope a estrutura permeável com o processo gradual de aprisionamento das partículas finas nos poros da estrutura durante o escoamento da água pluvial, conhecido como ‘colmatação’. Compreender o processo de colmatação pode otimizar o desempenho e durabilidade do sistema permeável. Portanto, é importante investigar a forma que diferentes partículas acumulam no sistema, qual(ais) melhor(es) método(s) para reverter este processo natural e com que frequência executá-lo(s) (KIA et al., 2017a; COUGHLIN et al., 2012; TONG, 2011; CHOPRA et al., 2010).

As partículas podem ser oriundas de solos (areia, silte, argila), detritos de outras áreas trazidos pelos veículos, ou ainda, material orgânico de vegetação próxima, trazido pelo vento. Assim, a velocidade de acúmulo de sedimentos depende do volume de tráfego e existência de fontes de sedimentos próximos ao pavimento, como jardins, obras e ruas não pavimentadas. Torna-se importante desenvolver um projeto de paisagismo da área ao redor do pavimento permeável para minimizar o fluxo de sedimentos em direção ao pavimento (RAZZAGHMANESH E BEECHAM, 2018; KIA et al., 2017a; LUCKE et al., 2015).

O local de deposição dos sedimentos no sistema permeável é variável, fortemente dependente do tamanho das partículas que estão acumulando. Partículas maiores se depositam próximas à superfície do pavimento, já partículas menores se acumulam nas camadas mais profundas, ou na parte inferior do revestimento, quando há manta que restringe a passagem para camadas inferiores, ou na base do sistema quando não foi posta a manta geotêxtil (Figura 2.8). O acúmulo de sólidos na manta geotêxtil posta sobre a base granular reduz a infiltração mais rapidamente, porém, torna o processo de limpeza e recuperação da taxa de infiltração mais eficiente (KIA et al., 2017a; KAYHANIAN et al., 2012).

Figura 2.8 – Diferença entre colmatação de sedimentos com maior (a) e menor (b) diâmetro



Fonte: Adaptado de Kia et al. (2017a).



Os principais procedimentos adotados para remoção dos sedimentos finos da estrutura são aspiração, aspersão de alta pressão de água, varrição seca ou úmida e a associação desses métodos. Alguns estudos (LIN et al., 2016; HEIN et al., 2013; COUGHLIN et al., 2012; TONG, 2011; SCHAEFER et al., 2011; CHOPRA et al., 2010) compararam a eficiência dos procedimentos de limpeza e constataram que a aspiração e a aspersão de alta pressão frequentes podem recuperar consideravelmente a taxa de infiltração do pavimento (RAZZAGHMANESH E BEECHAM, 2018; KIA et al., 2017a; MARCHIONI E SILVA, 2010). No entanto, a recuperação total da capacidade de infiltração do pavimento é muito improvável, principalmente quando não se tem uma frequência adequada (KIA et al., 2017a). Azzout et al. (1994) não aconselham o método de varrição na limpeza superficial do pavimento, seja seca ou úmida, pois este método introduz os finos nos poros do pavimento.

Quanto à frequência da limpeza do pavimento, as recomendações variam entre uma e quatro limpezas anuais (RAZZAGHMANESH E BEECHAM, 2018; KIA et al., 2017a; MARCHIONI E SILVA, 2010). A definição da periodicidade é dependente da agressividade do ambiente e do volume de tráfego. Um método de monitoramento da redução da eficiência do pavimento permeável é a verificação da capacidade de infiltração. Na Holanda, por exemplo, a limpeza e desobstrução dos poros deve ser realizada sempre que a infiltração for inferior a  $20,8 \text{ mm.h}^{-1}$  ( $5,78.10^{-4} \text{ cm.s}^{-1}$ ) (BOOGARD et al., 2014a). Também é plausível substituir o material de rejuntamento de pavimentos revestidos com blocos intertravados para restaurar as condições do pavimento.

Diversas pesquisas (HEIN et al., 2013; KAYHANIAN et al., 2012; CHOPRA et al., 2010; BALADES et al., 1995) investigaram o processo de colmatção em campo e a eficiência dos métodos de recuperação dos pavimentos. Outras (RAMA E SHANTHI, 2018; KIA et al., 2017b; TONG, 2011; SCHAEFER E KEVERN, 2011; DEO et al., 2010; MATA, 2008) adotaram o permeâmetro de carga variável para avaliar a evolução da colmatção em laboratório. Nestas, são empregados sedimentos com granulometria superior (geralmente um material arenoso), um material de granulometria inferior (material argiloso ou silto argiloso) e um material misto. O procedimento consiste em determinar a permeabilidade inicial, aplicar ciclos de colmatção pela passagem do sedimento dissolvido em água, simulando um período de vida útil, em seguida realizar novamente o ensaio de permeabilidade. Ao fim, avaliam a eficiência dos métodos de recuperação observando a permeabilidade dos corpos de prova após aplicação dos métodos. De maneira geral, os autores concluem que a permeabilidade reduz à apenas 10% do valor inicial após 3-5 anos. Ainda, os corpos de prova colmatados com areia

podem ser facilmente recuperados e corpos de prova colmatados com argila ou material de granulometria mista causam sérios danos à capacidade de infiltração dos pavimentos.

No Brasil, têm-se algumas pesquisas a respeito do processo de colmatagem (SILVA et al., 2009; CASTRO et al., 2013; LAMB et al., 2017; ALENCAR et al., 2014). Os resultados mostram que a colmatagem da superfície é o principal fator de redução de eficiência de um pavimento. Seja com a passagem de veículos ou pela simulação de percolação de finos no revestimento, pode levar a perda completa da eficiência dos pavimentos. As pesquisas mostram que na recuperação dos pavimentos, duas passagens do equipamento de aspersão de água sob pressão pode trazer a tona mais sedimentos e recuperar até 85% da capacidade de infiltração (Figura 2.9).

Figura 2.9 – Segunda passagem da bomba de limpeza no concreto permeável



Fonte: Alencar (2014).

### **2.3.2. Efeitos climáticos deletérios**

A variabilidade térmica do concreto permeável pode causar danos a sua microestrutura, conforme constatado em trabalhos internacionais (ZHANG et al., 2017; WU et al., 2016; GESOGLU et al., 2014; KEVERN et al. 2010; SCHAEFER et al., 2006, NEITHALATH et al., 2003). Durante o processo de congelamento e descongelamento, Zhang et al (2017) apontaram três processos de perda de massa: em primeiro momento o agregado graúdo desprende da pasta; em seguida, tanto o agregado graúdo quanto a pasta endurecida desprendem da estrutura; e por último, aparecem fendas macroscópicas. Ao congelar gradualmente, a água presente no processo se expande, criando novos poros e aumentando os já existentes, o que resulta na instabilidade da camada de ligação do concreto permeável e até mesmo o desprendimento. Além disso, cria-se um gradiente de temperatura na matéria, com

temperaturas mais baixas no interior do concreto do que na superfície durante o processo de descongelamento e temperaturas superiores no interior em relação à superfície do concreto durante o processo de congelamento. Essa alternância desempenha um papel de fadiga que formam microfissuras.

Devido às condições climáticas da maior parte do Brasil, pouco se tem estudado a respeito da variação de temperatura com concretos permeáveis. A própria norma brasileira de concreto permeável (ABNT, 2015) não apresenta as diretrizes de ensaio para avaliar este problema. No entanto, a região sul do País, situado na faixa subtropical, apresenta um clima que transita entre tropical e temperado e recebe a ação de ondas de frio com maior intensidade durante o inverno. As ondas de frio podem causar dois fenômenos na região: geada e, mais raramente, neve. A geada ocorre, sobretudo, em noites de baixa umidade. É preciso que a temperatura durante o dia seja relativamente baixa para que a temperatura do solo fique abaixo de 0°C (NIMER, 1989). Segundo Rossato (2011), acontecem de 1 a 5 geadas em média por ano na maior parte da Planície Litorânea, de 5 a 10 na Depressão, de 10 a 15 na maior parte do estado, especialmente no Planalto, e mais de 15 geadas na Serra do Nordeste, Campanha e Serra do Sudeste.

### *2.3.2.1. Métodos de verificação dos efeitos de variação térmica*

Os métodos de ensaio mais frequentemente relatados são da norma americana ASTM C666 (2015), métodos A e B. Estes métodos foram desenvolvidos para simular os efeitos do congelamento e descongelamento de concretos convencionais. O método A especifica a submersão dos corpos de prova no momento do congelamento e descongelamento, já no método B os corpos de prova devem ser congelados completamente livres ao ar e descongelados em água. Em ambos os ensaios, deve-se realizar 300 ciclos de gelo-degelo e os CP's devem ser pesados e medidos a cada 36 ciclos de gelo-degelo para verificar a perda de massa. De acordo com Schaefer et al. (2006), o ciclo repetitivo gera redução de massa do material, resultado de deterioração do agregado ou falha da matriz de pasta de cimento. A falha do agregado é observada na deterioração ou divisão do agregado, em que uma porção de uma partícula agregada é despreendida do concreto. Segundo os autores, 15% é o limiar aceitável de redução de massa, ainda passível de manutenção.

O número de ciclos por dia tem relação com a deterioração do concreto permeável, com deterioração maior quando se aplicam ciclos mais rápidos (SCHAEFER et al., 2006). Segundo a norma ASTM C666 (2015), o processo de gelo e degelo deve ser entre 2 e 5 horas. O ciclo para ambos os procedimentos, A e B, consiste em reduzir e elevar alternadamente a

temperatura entre  $-18^{\circ}\text{C}$  e  $4^{\circ}\text{C}$ . No procedimento A 25% do tempo total é destinado ao descongelamento e no procedimento B 20%.

Schaefer et al. (2006) investigaram o impacto do ciclo de gelo e degelo na diminuição da durabilidade em diferentes estruturas de concreto permeável: agregados distintos, uso ou não de areia e borracha e diferentes métodos de compactação. O principal objetivo do estudo foi aumentar o índice de vazios do concreto sem reduzir significativamente a resistência mecânica e resistência ao ciclo gelo-degelo. Adotando o procedimento A da norma ASTM C666 (2015), os autores constataram que as misturas que continham areia e/ou borracha apresentaram melhor resistência ao gelo-degelo do que aquelas que continham apenas agregado graúdo.

Neithalath et al. (2003) compararam a resistência ao ciclo gelo-degelo de traços compostos de agregado de 2,36 mm, traços com agregado de 4,65 mm e traços com agregado de 9,5 mm por meio de ciclos de gelo-degelo acelerado (cinco ciclos por dia) e gelo-degelo lento (um ciclo diário) e, após 80 ciclos, compararam a redução do módulo dinâmico. Os autores verificaram maior redução do módulo dinâmico no traço com agregado de menor dimensão, explicado pelo tamanho dos poros serem menores, levando a tensões maiores entre os agregados. Este estudo mostra uma vantagem de durabilidade no uso de agregados de maior dimensão.

Zhang et al. (2017) analisaram a perda de massa e módulo de elasticidade dinâmico de misturas de concreto permeável com substituições de 0% a 10% do cimento por cinza volante, sílica ativa, fibra de polietileno, pó mineral e látex, após processo de 100 ciclos de gelo-degelo. Os autores seguiram a norma ASTM C666/C666M – 15 procedimento A para o congelamento/descongelamento, consideraram a perda de massa limite de 5% e perda de módulo de elasticidade de 40%.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi subdividida em três etapas. A Etapa 1 teve por objetivo a busca pela otimização de um traço de concreto permeável, com base em uma revisão da literatura e ensaios posteriores. O traço ideal deve apresentar bons resultados nos ensaios representativos de suas propriedades mecânicas, ensaios de propriedades hidráulicas e durabilidade diante condições climáticas da região de estudo.

Os ensaios realizados para caracterizar as propriedades mecânicas foram resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, determinação do módulo de elasticidade e desgaste por abrasão. Os ensaios para determinar as propriedades hidráulicas foram índice de vazios e permeabilidade.

Também foi avaliada a durabilidade dos concretos permeáveis estudados. A condição climática que foi considerada mais extrema para estruturas de concreto permeável no Rio Grande do Sul é a variação de temperatura no inverno, com ocorrência de geadas durante o período noturno e aumento de temperatura durante o dia. Portanto, foi realizado um ensaio cíclico de simulação de clima em amostras de concreto permeável para investigar sua durabilidade e efeitos sobre a resistência das amostras.

A Etapa 2 envolveu a análise do efeito de longo prazo, em particular de colmatação em módulos experimentais de 1,0 x 1,0 m. Foram construídos dois módulos para três tipos de revestimento superficial: concreto permeável da Etapa 1 (C.P.), blocos intertravados de concreto convencional (I.C.) e blocos intertravados de concreto permeável (I.P.), totalizando 6 módulos. Foi verificada a influência do tamanho do grão na redução da eficiência hidrológica dos três tipos de revestimentos e a capacidade de recuperação pelo método de limpeza com água sob pressão.

A Etapa 3 envolveu a execução de vagas de estacionamento no campus sede da Universidade Federal de Santa Maria. Foram construídas oito vagas para veículos leves com quatro tipos diferentes de revestimento (duas vagas cada tipo): blocos de concreto conhecidos como pisograma (P.G.), concreto permeável da Etapa 1 (C.P.), blocos intertravados de concreto convencional (I.C.) e blocos intertravados de concreto permeável (I.P.). As vagas foram monitoradas para avaliar o comportamento hidrológico em condições reais. Também foi verificada a temperatura superficial das vagas de estacionamento em duas condições: um dia com temperatura do ar próxima a zero e um dia com temperatura elevada.

### 3.1. ETAPA 1 – ESTUDO DE CONCRETO PERMEÁVEL EM LABORATÓRIO

Para o estudo de caracterização mecânica, hidráulica e durabilidade de concretos permeáveis, foram preparadas amostras prismáticas e cilíndricas. As moldagens e ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria.

#### 3.1.1. Caracterização dos materiais

##### 3.1.1.1. Agregados

Foram desenvolvidas misturas com variação de proporções de pedra britada diabásica nº 0 e nº 1 provenientes de Itaara/RS e areia média natural proveniente do Rio Verde, Santa Maria/RS. Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização:

- massa específica e aparente do agregado miúdo, através da determinação de volume e massa, seguindo as diretrizes estabelecidas na NBR NM 52 (ABNT, 2009);
- massa específica e aparente e absorção de água do agregado graúdo, determinados por massa e volume, seguindo a NBR NM 53 (ABNT, 2009);
- massa unitária e do volume de vazios de agregados, seguindo a NBR NM 45 (ABNT, 2006);
- composição granulométrica, pelo método da NBR NM 248 (ABNT, 2003);
- determinação do teor de material pulverulento nos agregados, NBR NM 46 (ABNT, 2003).

##### 3.1.1.2. Aglomerante hidráulico

Foi utilizado cimento CPV-ARI que atende à norma NBR 5733:1991. Este cimento é adequado para a utilização em pavimentos permeáveis, pois apresenta um ganho de resistência mais acelerado e permite, assim, liberação do tráfego em poucos dias. Realizou-se o ensaio de determinação da massa específica absoluta utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier, seguindo as diretrizes da norma NBR NM 23 (ABNT, 2001). Em três determinações da massa específica obteve-se o valor  $2,93 \text{ g.cm}^{-3}$ .

#### 3.1.2. Descrição dos concretos permeáveis estudados

Os corpos de prova de concreto permeável foram moldados com uma relação de agregado/cimento  $M=4$  e relação água/cimento  $x=0,36$ . A escolha do  $M=4$  (HOLTZ et al., 2011; BATEZINI E BALBO, 2015) foi feita após algumas iterações na dosagem do concreto

para atingir um consumo de agregado graúdo entre  $1200 \text{ kg.m}^{-3}$  e  $1600 \text{ kg.m}^{-3}$  (SCHAEFER et al., 2006; TENNIS et al., 2004). Já a escolha da relação água/cimento foi baseada na norma ACI 522R (2010), que sugere valores entre 0,26 e 0,45. Fez-se uma tentativa inicial de  $x=0,30$  para a mistura e foi sendo adicionada água até atingir uma consistência adequada, que resultou em  $x=0,36$ . Os traços avaliados variaram nas porcentagens de agregados graúdos (diferentes zonas granulométricas) e na utilização ou não de 5% de agregado miúdo (areia) (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Traços utilizados

Denominação	x*	M**	Proporções dos agregados		
			4,75/12,5 mm	9,5/25 mm	Areia
REF	0,36	4	4,00	0,00	0,00
B80			3,20	0,80	0,00
B60			2,40	1,60	0,00
BA			3,80	0,00	0,20
B80A			3,04	0,76	0,20
B60A			2,28	1,52	0,20

\* Relação água/cimento

\*\* Relação agregado/cimento

Fonte: Autor.

As denominações dos traços foram escolhidas conforme presença ou não de areia e porcentagem do agregado graúdo de menor dimensão (4,75/12,5 mm). A mistura de referência (REF) possui apenas o agregado graúdo de menor dimensão, o traço B80 tem 80% do agregado 4,75/12,5 mm e o restante de agregado 9,5/25 mm e o B60 tem 60% de agregado 4,75/12,5 mm e o restante de agregado 9,5/25 mm. Os últimos três traços foram calculados a partir dos três primeiros, com a substituição de cada agregado graúdo por 5% de areia, em massa.

### 3.1.3. Dimensões, quantidade e moldagem dos corpos de prova

Os agregados foram lavados, secos em estufa e armazenados em sacos plásticos. O processo de mistura dos constituintes foi igual para todos os traços, baseado nos trabalhos de Schaefer et al. (2006) e Batezini e Balbo (2015):

- Misturar 1 minuto o agregado graúdo (e miúdo nos traços que o compunham) com 5% do cimento;
- Inserir o restante do cimento e rotacionar com cuidado por mais um minuto;
- Adicionar a água, rodar a mistura por 2 minutos;

- d) 3 minutos de espera;  
 e) Rodar a mistura por 2 minutos.

O controle das misturas foi realizado pela análise táctil visual da consistência do concreto e pela verificação da massa unitária no estado fresco. A análise táctil visual foi realizada conforme recomendações da literatura, que compreende em apertar uma pequena quantidade de concreto fresco e observar a formação de um aglomerado consistente.

Foram moldados 120 corpos de prova (CP's) em uma primeira moldagem e 36 CP's em uma segunda moldagem, totalizando um volume de 0,045 m<sup>3</sup> por traço (Tabela 3.2). Os CP's cilíndricos utilizados na determinação da permeabilidade foram moldados e mantidos em tubo de PVC de 100 mm para que houvesse encaixe nos equipamentos utilizados no ensaio. Após a realização dos ensaios de condutividade hidráulica pelos ensaios de carga variável e carga constante, os CP's foram desmoldados e utilizados no ensaio de desgaste por Abrasão. Os CP's utilizados no ensaio de durabilidade ao ciclo de congelamento foram utilizados na verificação da resistência à compressão axial e desgaste por abrasão após ciclo de congelamento.

Tabela 3.2 – Tipos e quantidade de corpos de prova para cada ensaio

Ensaio	Corpo de prova	Traço					
		REF	B80	B60	BA	B80A	B60A
<b>Primeira moldagem:</b>							
Compressão axial	Cilíndrico 10(cm) x 20(cm)	4	4	4	4	4	4
Tração indireta - Diametral	Cilíndrico 10(cm) x 20(cm)	4	4	4	4	4	4
Tração direta - flexão	Prismático 10(cm) x 10(cm) x 40(cm)	3	3	3	3	3	3
Módulo de Elasticidade Dinâmico	Marshall 10(cm) x 7(cm)	3	3	3	3	3	3
Desgaste por abrasão	Cilíndrico 10(cm) x 20(cm)	3*	3*	3*	3*	3*	3*
Permeabilidade	Cilíndrico 10(cm) x 20(cm)	3	3	3	3	3	3
Índice de vazios	Cilíndrico 10(cm) x 20(cm)	3	3	3	3	3	3
<b>Segunda moldagem:</b>							
Durabilidade ao gelo-degelo	Cilíndrico 10(cm) x 20(cm)	6	6	6	6	6	6
Compressão axial após gelo-degelo	Cilíndrico 10(cm) x 20(cm)	3*	3*	3*	3*	3*	3*
Desgaste por abrasão após gelo-degelo	Cilíndrico 10(cm) x 20(cm)	3*	3*	3*	3*	3*	3*

\* corpos de prova aproveitados de outro ensaio

Fonte: Autor.

Após a verificação táctil visual (Figura 3.1 (a) e (b)), a mistura final foi colocada nas formas, previamente untadas com desmoldante (Figura 3.1 (c)). No processo de compactação,



os corpos de prova cilíndricos receberam 15 golpes com a haste em duas camadas (uma única camada nos corpos de prova Marshall), os corpos de prova prismáticos receberam 25 golpes em uma única camada e todos vibrados por 7 segundos em mesa vibratória. Após período de 24 h, todas as formas foram levadas para câmara úmida, visto que, diferentemente do concreto convencional, as amostras apresentaram resistência baixa para resistir à desmoldagem sem segregar. Aos três dias fez-se a desmoldagem e os corpos de prova permaneceram em câmara úmida até a data de ensaio (Figura 3.1 (d)).

Figura 3.1 – Moldes (a), armazenamento dos CP's (b) e verificação tátil (c); (d)



Fonte: Autor.

#### 3.1.4. Ensaio de propriedades mecânicas

Para a caracterização dos parâmetros mecânicos dos seis traços de concreto permeável analisados foram definidos ensaios de compressão axial, tração indireta por compressão diametral, tração direta por flexão, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à abrasão. Os ensaios são explicados em detalhe no anexo C.

A norma NBR 16416 (ABNT, 2015) não exige resistência à compressão axial de concretos permeáveis moldado no local, no entanto, realizou-se esse ensaio visto sua importância na caracterização de concretos perante meio científico. Seguiu-se o método de ensaio adotado para concretos convencionais, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007) (Figura 3.2

a). A determinação da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias seguiu a NBR 7222 (ABNT, 2011) (Figura 3.2 b).

Para o ensaio de resistência à tração na flexão aos 28 dias foi consultada a NBR 12142 (ABNT, 2010) (Figura 3.2 c). A norma NBR 16416 (ABNT, 2015) exige que concretos permeáveis destinados a tráfego leve e moldados no local devem resistir a 2,0 MPa à tração na flexão, portanto, os traços que apresentarem valores inferiores a este não podem ser aplicados em campo.

O ensaio de desgaste por abrasão foi realizado segundo as especificações da norma ASTM C1747/1747M (2013), pois se trata de um método específico para o concreto permeável (Figura 3.2 d). Para esse ensaio fez-se o uso dos mesmos CP's utilizados no ensaio de permeabilidade ao tirá-los dos moldes de PVC após a idade de 28 dias. Maiores detalhes no anexo C.

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi por equipamento ultrassônico, conforme NBR 8802 (ABNT, 2013) e NBR 15630 (ABNT, 2008). Utilizaram-se corpos de prova 10x7 cm Marshall, pois a irregularidade da estrutura interna do concreto permeável é grande e a adoção de um CP menor é favorável. Fez-se a regularização das superfícies com gesso, segundo recomendação da norma NBR 8802:2013 (Figura 3.2 e).

Figura 3.2 – Ensaio de caracterização das propriedades mecânicas (a); (b); (c), aspecto final dos CP's do ensaio de Abrasão (d) e regularização da superfície para ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico (e)



Fonte: Autor.

### 3.1.5. Ensaios de propriedades hidráulicas

Os ensaios que determinaram as propriedades hidráulicas foram índice de vazios e permeabilidade do concreto permeável.

#### 3.1.5.1. Índice de Vazios

A determinação do índice de vazios foi feita pela pesagem dos corpos de prova no estado seco e submerso, utilizando-se a equação 1 para o cálculo (ASTM C1754, 2012).

$$I = \left( 1 - \left( \frac{w_2 - w_1}{\rho_w \cdot V_p} \right) \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Sendo I o índice de vazios (%),  $w_2$  o peso seco do corpo de prova (kg),  $w_1$  o peso submerso (kg),  $\rho_w$  a massa específica da água ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) e  $V_p$  o volume do corpo de prova ( $\text{m}^3$ ).

#### 3.1.5.2. Coeficiente de permeabilidade

A permeabilidade foi determinada por meio de duas metodologias: a primeira é baseada no ensaio descrito por Neithalath (2003). Foi construído artesanalmente um permeâmetro de carga variável (Figura 3.3) semelhante ao equipamento desenvolvido pelo autor. Os corpos de prova foram mantidos nos seus moldes de PVC para que houvesse o encaixe nas conexões do equipamento. Foram feitas três leituras para cada CP, totalizando nove valores para cada traço estudado.

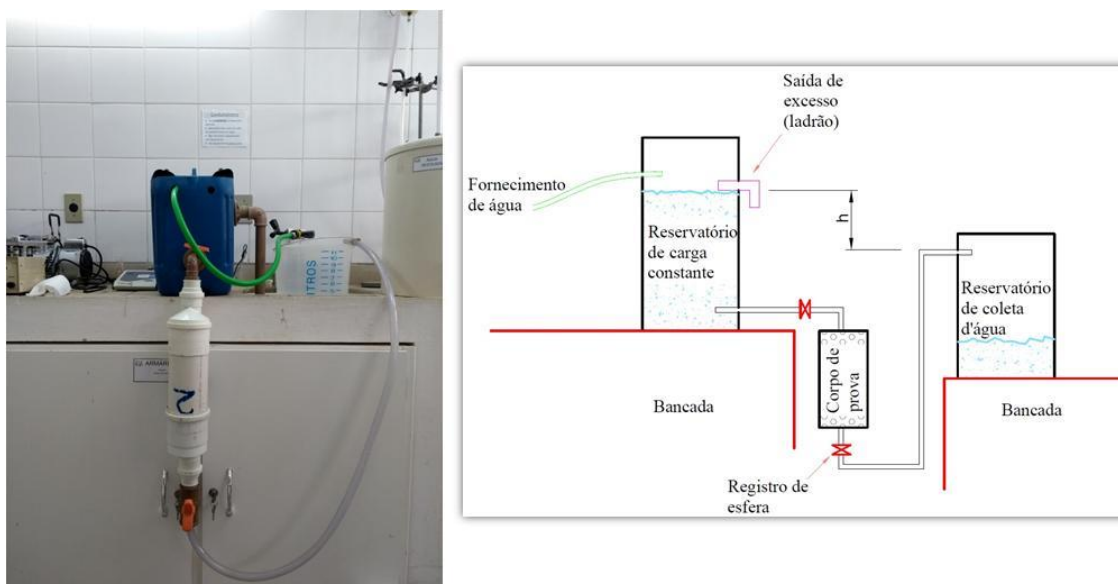
Figura 3.3 – Permeâmetro de carga variável construído



Fonte: Autor.

O outro método adotado foi conforme recomendação da norma brasileira de concreto permeável NBR 16416:2015, por meio de permeâmetro de carga constante baseada na NBR 13292:1995. Por questões de incompatibilidade do permeâmetro de solos disponível em laboratório, foi construído um permeâmetro de carga constante artesanalmente, conforme Figura 3.4. A coluna d'água foi mantida constante dentro do reservatório de água, calibrada pela vazão da água de entrada e a saída pelo ladrão. O corpo de prova foi posicionado, saturado com a abertura do primeiro registro de esfera. Com a abertura do sistema, a água foi coletada em um recipiente nas alturas pré-definidas (cargas hidráulicas de 22 cm e 37 cm), cronometrando-se o tempo de 30 segundos. Por fim, foi determinado o volume de água coletada por meio de pesagem.

Figura 3.4 – Permeâmetro de carga constante construído e esquema de funcionamento



Fonte: Autor.

Foram realizadas duas medições por CP em cada carga hidráulica, ou seja, a condutividade hidráulica de cada traço é a média de 12 valores. Ambos os ensaios são descritos no Anexo A.

A norma NBR 16416:2015 exige que pavimentos permeáveis recém-construídos tenham coeficiente de permeabilidade mínimo de  $10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ , que corresponde a  $0,1 \text{ cm.s}^{-1}$ , portanto, este foi o valor que determinou a possibilidade de uso do concreto em campo.

### 3.1.6. Durabilidade ao ciclo gelo-degelo

A região subtropical apresenta períodos de temperaturas próximas a  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ao longo do inverno, sendo frequente a ocorrência de geadas, momento em que a temperatura do solo fica

abaixo da temperatura do ar. Os pavimentos permeáveis apresentam grande porosidade e, como estão próximos ao solo, podem atingir temperaturas negativas rapidamente no interior de sua estrutura. Desta forma, definiu-se uma metodologia de ensaio para simular a exposição dos concretos permeáveis às condições climáticas da região. Tomou-se como referência a norma americana ASTM C666 (2015) para simular os efeitos do congelamento e descongelamento em condições extremas as quais se encontram.

Para a realização do ciclo gelo-degelo foi utilizada a câmara de simulação climática Feutron Klimasimulation GmbH, modelo Type 3423/16, conforme Figura 3.5. Esta câmara tem um faixa de operação de temperatura de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  e umidade de 10% a 95%. Foram moldados seis corpos de prova cilíndricos de cada traço para realizar este ensaio de gelo-degelo, totalizando 36 CP's, que permaneceram em câmara úmida durante 07 dias. Em seguida, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e mantidos em local coberto durante 01 dia para regularizar sua umidade com o ambiente (60%). Fez-se a pesagem de cada CP, devidamente identificados, para servir de referência para a evolução de perda de massa e foram acomodados na câmara climática.

Figura 3.5 – Câmara de simulação climática



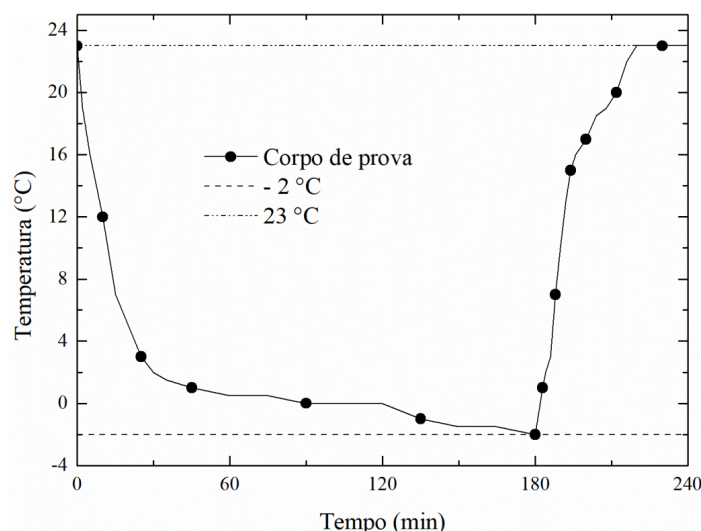
Fonte: Autor.

Para simular o que acontece com o concreto quando executado na região de Santa Maria de maneira factível, adotou-se uma ciclagem variando de  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O volume de material presente na câmara climática interfere no tempo necessário para atingir as duas temperaturas alvo, então, após vários testes, adotou-se um tempo de 3h com a câmara em  $-5^{\circ}\text{C}$  para os CP's atingirem  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  e tempo de 1h com a câmara em  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  para atingirem os  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Estas condições conferem com a norma ASTM C666 (2015), que estabelece um período entre 2 h e 5 h para o ciclo completo, 25% deste tempo total para o processo de descongelamento

(procedimento A). Durante os dois processos os CP's permaneceram na condição seca, com a umidade ambiente. A Figura 3.6 mostra a evolução da temperatura dos corpos de prova ao longo do ciclo gelo-degelo.

Foram realizados 300 ciclos de gelo-degelo, a cada 30 ciclos fez-se a pesagem dos CP's para observar a perda de massa. Ao considerar que ocorrem em torno de 15 geadas por ano na região de Santa Maria (ROSSATO, 2011), os 300 ciclos representam 20 anos de exposição às condições locais. Conforme valores de referência encontrados na literatura, adotou-se uma perda de massa limite de 5%, posto que a faixa de temperatura adotada é menos agressiva se comparada com a faixa de  $-18^{\circ}\text{C}$  a  $4^{\circ}\text{C}$  recomendada pela norma ASTM C666 (2015). A Tabela 3.3 mostra as diferenças entre a metodologia adotada para simular o clima regional e o método da norma ASTM C666 (2015).

Figura 3.6 – Temperatura dos CP's no ciclo gelo-degelo



Fonte: Autor.

Tabela 3.3 - Comparativo entre método gelo-degelo adotado e norma ASTM C666 (2015)

Item	Metodologia adotada	ASTM C666 - 15	
		Procedimento A	Procedimento B
Faixa de temperatura	$-2^{\circ}\text{C}$ a $23^{\circ}\text{C}$	$-18^{\circ}\text{C}$ a $4^{\circ}\text{C}$	$-18^{\circ}\text{C}$ a $4^{\circ}\text{C}$
Ciclos	300	300	300
Pesagem	a cada 30 ciclos	a cada 36 ciclos	a cada 36 ciclos
Duração de ciclo	4 h	entre 2 h e 5 h	entre 2 h e 5 h
Tempo de descongelamento	25% da duração	25% da duração	20% da duração
Congelamento	ao ar	submerso	ao ar
Descongelamento	ao ar	submerso	submerso

Fonte: Autor.

Após o término dos 300 ciclos de gelo-degelo, foi verificado o índice de vazios das amostras. Fez-se a secagem em estufa para, então, realizar o ensaio de compressão axial em três corpos de prova e o ensaio de resistência à abrasão nos outros três corpos de prova de cada traço.

### 3.2. ETAPA 2 – MÓDULOS EXPERIMENTAIS PARA ANÁLISE DA COLMATAÇÃO

Foram construídos seis módulos experimentais de 1 m<sup>2</sup> cada para avaliar a evolução do processo de colmatação dos poros dos diferentes tipos de revestimentos permeáveis e a eficiência da manutenção com equipamento de aspersão de alta pressão d'água. Os pavimentos permeáveis foram construídos conforme tipo A, sem dreno (item 2.2), e os revestimentos analisados foram:

- dois módulos de intertravado de concreto permeável com declividade de 2%;
- dois módulos de intertravado de concreto convencional com declividade de 2%;
- dois módulos de concreto permeável moldado no local com declividade de 2%.

#### 3.2.1. Estratégia metodológica

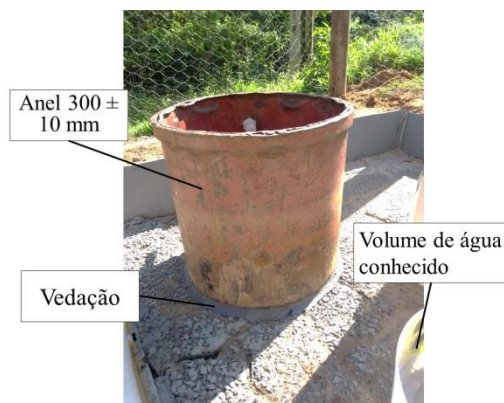
Os módulos revestidos com intertravado permeável foram nomeados I.P.S. e I.P.C.; os módulos revestidos com intertravado convencional foram nomeados I.C.S. e I.C.C.; e os módulos revestidos com concreto permeável foram nomeados C.P.S. e C.P.C. A letra final, 'S' ou 'C', refere-se ao processo de colmatação acelerada, descrita mais a frente neste mesmo item.

Foram definidos dois métodos de monitoramento do avanço do processo de colmatação:

- i. Ensaio de permeabilidade pelo método presente na norma NBR 16416:2015;
- ii. Análise do desempenho hidrológico dos pavimentos pela verificação do escoamento superficial após o evento e o hidrograma do nível de água nos módulos versus precipitação.

O ensaio de permeabilidade, realizado com um anel de diâmetro interno de  $300 \pm 10$  mm (conforme descrito no Anexo A) e vedado com massa de calafetar (Figura 3.7), foi executado sempre no mesmo ponto de cada módulo, com três repetições após a pré-molhagem.

Figura 3.7 – Vedação entre anel e pavimento com massa de calafetar



Fonte: Autor.

Já no segundo método de monitoramento foram empregados sensores ultrassônicos HC-SR04 de baixo custo desenvolvido em plataforma Arduino por Minetto (2018) para registrar o nível de água infiltrado em cada módulo. O sistema, também empregado no monitoramento da Etapa 3, conta com correção de temperatura e umidade do ar. A autora fez diversos testes de validação, e em sua análise estatística, obteve um erro relativo médio de 4% para leitura de nível estático. Este valor se enquadra nos limites da norma NBR 13403 (ABNT, 1995). O sistema também registrou dados de um pluviógrafo do tipo basculante, com resolução de medida de 0,2 mm, instalado no local. Foi instalado um pluviômetro da marca São Izidro fabricado em polipropileno e nylon, diâmetro de 100 mm, resolução de 1 mm e capacidade máxima de 140 mm para aferir os dados pluviométricos dos eventos. Com estes dados foi possível montar os hidrogramas de cada módulo após cada evento.

Para o escoamento superficial, cada módulo foi munido de calha que direcionou a água escoada até um reservatório próprio (caixa de armazenamento). As leituras foram feitas manualmente com régua após cada evento.

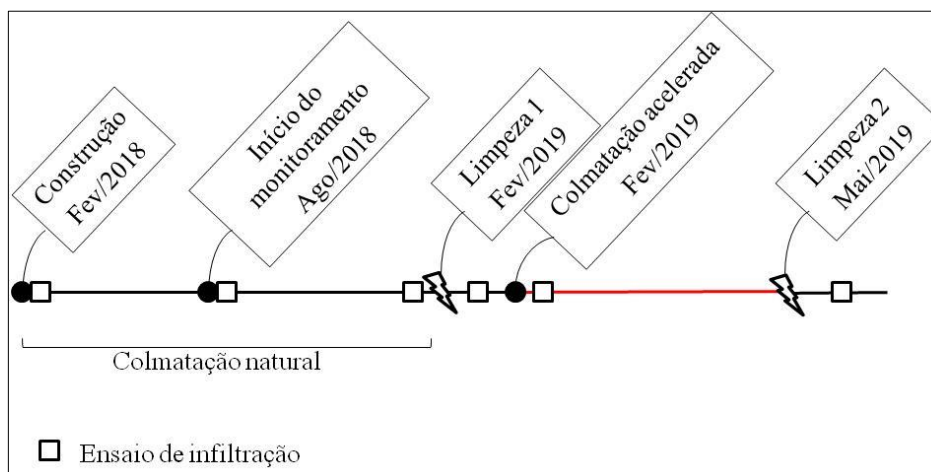
Estes dois métodos foram aplicados em quatro períodos distintos (Figura 3.8):

- i. Durante os primeiros 12 meses após a construção, ou seja, os módulos colmataram durante este período apenas pela ação do vento (deposição de sedimentos e material orgânico). O ensaio de infiltração foi realizado em três momentos: recém-construídos, 6 meses e 12 meses;
- ii. Após recuperação dos pavimentos pelo método de aspersão de água sob pressão, chamada de 'Limpeza 1';
- iii. Após um cenário de colmatção acelerada com materiais de diferentes granulometrias;



- iv. Nova recuperação dos pavimentos pelo mesmo método de aspersão, chamada de ‘Limpeza 2’.

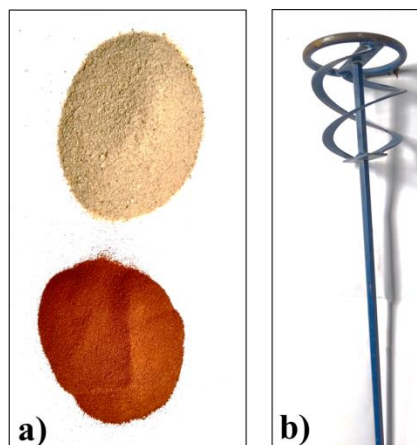
Figura 3.8 – Etapas de monitoramento dos módulos



Fonte: Autor.

Para o cenário de colmatação acelerada, procedeu-se da seguinte maneira: Os módulos I.P.S., I.C.S. e C.P.S. foram nomeados com a letra ‘S’ remetendo a ‘Sand’ (‘Areia’ do inglês) porque receberam concentração elevada de material arenoso com granulometria entre as peneiras nº 10 (2 mm) e nº 200 (0,074 mm) e; e os módulos I.P.C., I.C.C. e C.P.C., com letra ‘C’ remetendo a ‘Clay’ (‘Argila’ do inglês), receberam uma concentração elevada de material argiloso passante na peneira nº 200 (0,074 mm) (Figura 3.9 a). A quantidade de material foi calculada a partir dos trabalhos de Schaefer e Kevern (2011) e Tong (2011), que realizaram a colmatação com materiais arenosos e argilosos em corpos de prova, além do trabalho de Pivetta (2017), que avaliou a carga poluidora do escoamento pluvial na região de Santa Maria/RS. A autora verificou uma concentração de sólidos totais de até  $368 \text{ mg.L}^{-1}$  na região de Santa Maria/RS, cidade que apresenta uma média pluviométrica anual de 1688 mm, ou seja,  $0,621 \text{ kg.ano}^{-1}$  em  $1 \text{ m}^2$ . Este valor é próximo ao valor equivalente adotado por Schaefer e Kevern (2011) e Tong (2011). Portanto, fez-se a simulação aproximada de 10 anos de colmatação com 6,2 kg de material em cada módulo. Esta quantidade foi dissolvida em 100 litros de água por meio de um misturador acoplado em uma furadeira profissional (Figura 3.9 b). O material foi lançado manualmente de maneira uniforme pela superfície de  $1 \text{ m}^2$ . Esta simulação acelerada deve agir de forma menos agressiva que 10 anos de colmatação natural, pois, a sedimentação lenta e a vibração do pavimento com o tráfego de veículos permite uma colmatação mais profunda.

Figura 3.9 – Materiais adotados na colmatação (a) e misturador (b)



Fonte: Autor.

Após o lançamento do material argiloso sobre os módulos, observou-se que o concreto permeável comportou os 6,2 kg, porém, o pavimento com intertravado comum e intertravado permeável não retiveram todo material. O módulo com intertravado comum reteve apenas 2,26 kg do material argiloso e o módulo com intertravado permeável reteve 4,68 kg do material argiloso. Desta forma, fez-se o lançamento da mesma quantidade de material arenoso nos outros módulos: 6,2 kg no módulo de concreto permeável, 2,26 kg no módulo de intertravado comum e 4,68 kg no módulo de intertravado permeável.

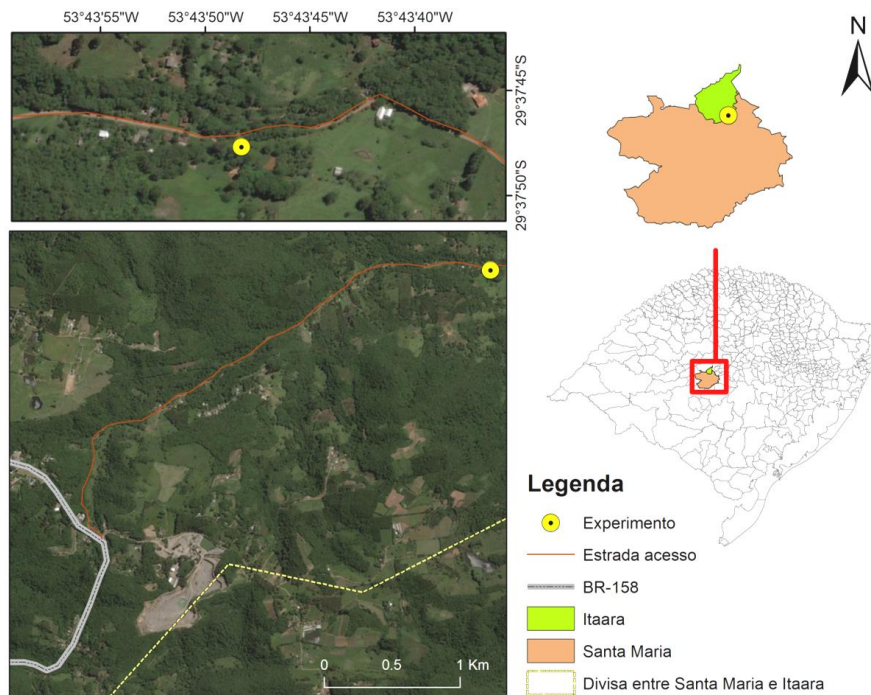
Nos dois períodos que os pavimentos foram recuperados pelo método de aspersão de água sob pressão, adotou-se um pressurizador da marca Tramontina®, modelo Master, com vazão de 6 litros.minuto<sup>-1</sup> e pressão de trabalho de 7 MPa (70 bar). O pressurizador foi mantido a uma distância de 10 cm da superfície do pavimento e a limpeza de cada módulo foi realizada durante 3 minutos.

Após o período de monitoramento, foram extraídas amostras dos módulos revestidos com concreto permeável (C.P.S. e C.P.C.) para a determinação dos índices de vazios. As amostras cúbicas foram serradas em laboratório para terem medidas próximas a 10 x 10 x 10 cm. Suas dimensões foram aferidas com paquímetro e o método de determinação dos índices de vazios foi o mesmo empregado na Etapa 1 (ASTM C1754, 2012).

### 3.2.2. Local de implantação

A área deste estudo está localizada no interior de Itaara/RS. O local fica a aproximadamente 20 km da Universidade Federal de Santa Maria (Figura 3.10).

Figura 3.10 - Mapa de localização dos módulos experimentais



Fonte: Autor.

### 3.2.2.1. Análise prévia: solo local

O local escolhido apresentava, inicialmente, uma cobertura gramada com declividade de 15%. Situa-se próximo a um pequeno reservatório natural (20 m<sup>2</sup>) com caixa d'água ao lado, a um poste de transmissão elétrica de baixa tensão e a uma estrada não pavimentada (Figura 3.11). Fez-se o ensaio de infiltração com anéis concêntricos para verificar a permeabilidade do solo.

Figura 3.11 – Local do experimento

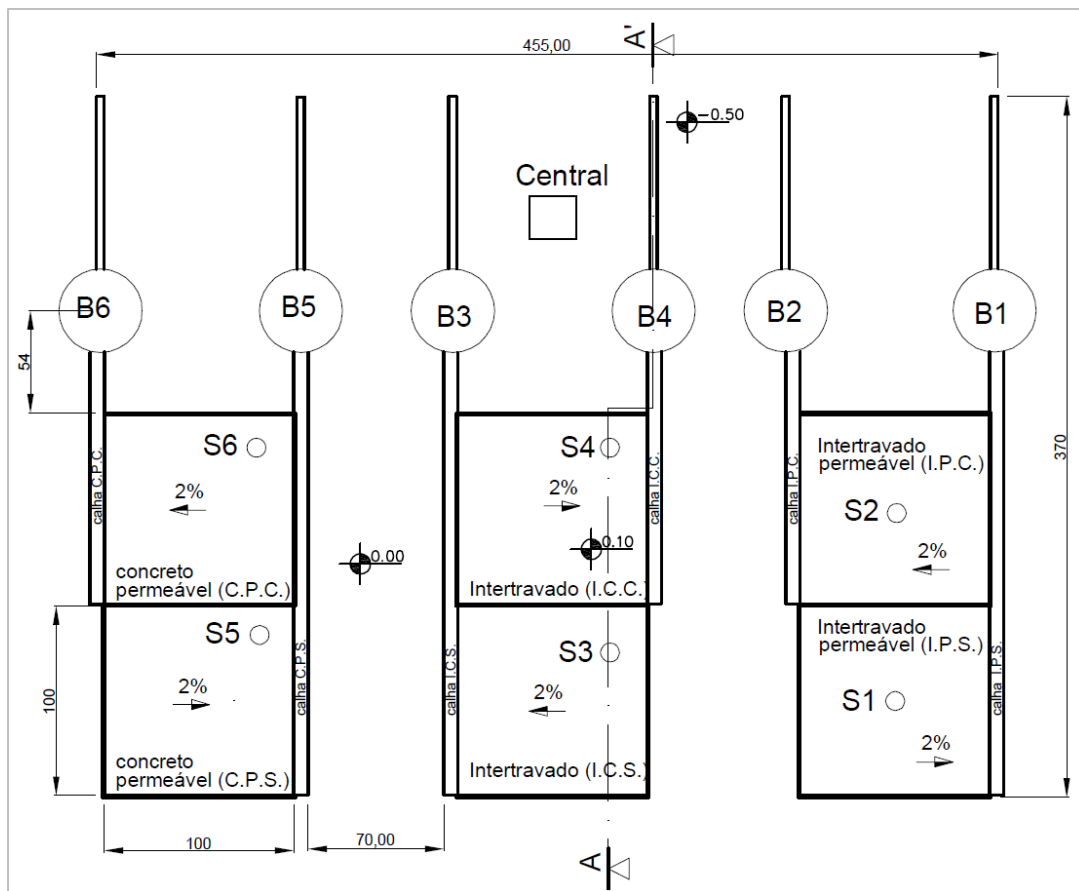


Fonte: Autor.

### 3.2.3. Projeto dos módulos

Para otimizar o espaço, os módulos foram locados em pares, ocupando áreas de 1 x 2 metros, dispondo o caimento para as duas laterais opostas. Cada lateral contém um tubo de PVC serrado para permitir entrada da água escoada (calha) e transferir esta água para as caixas de armazenamento (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Planta baixa dos módulos experimentais

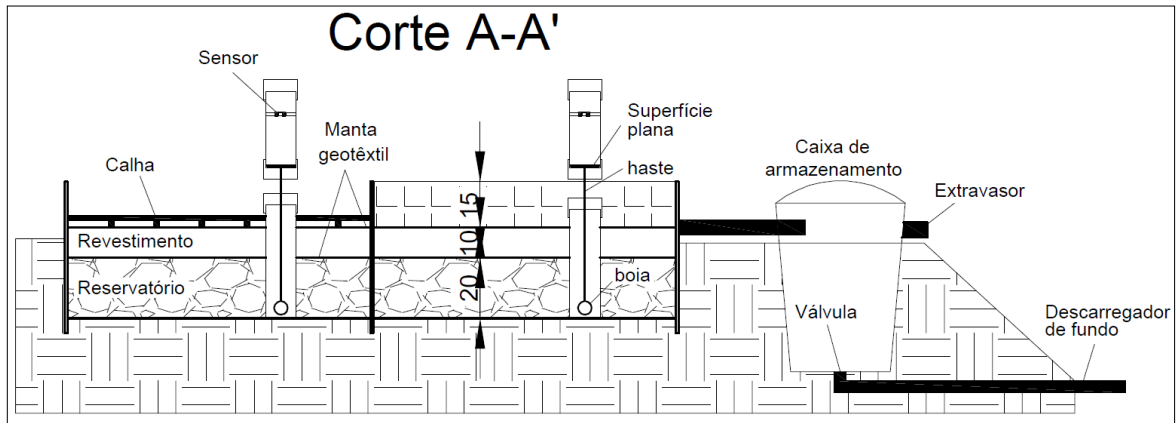


Fonte: Autor.

Este local foi ideal para a execução do experimento porque apresentava, inicialmente, uma declividade do terreno necessária para esvaziar a água acumulada nas caixas de armazenamento. Para tanto, foram instaladas válvulas de lavatório no fundo das caixas de armazenamento, conectadas a tubos de PVC, chamados de descarregadores de fundo. Outro detalhe importante foi a instalação dos sensores: os sensores ultrassônicos HC-SR04 são sensíveis a umidade, pois possuem elementos que corroem com o tempo. Para evitar este problema, os sensores foram posicionados em um tubo seco instalado acima do tubo perfurado instalado dentro de cada pavimento. Os tubos perfurados permitem a variação do

nível d'água em seu interior correspondente ao nível d'água presente na brita. Para transmitir essa variação ao tubo seco foi instalada uma peça composta por boia/haste/superfície em cada pavimento (Figura 3.13).

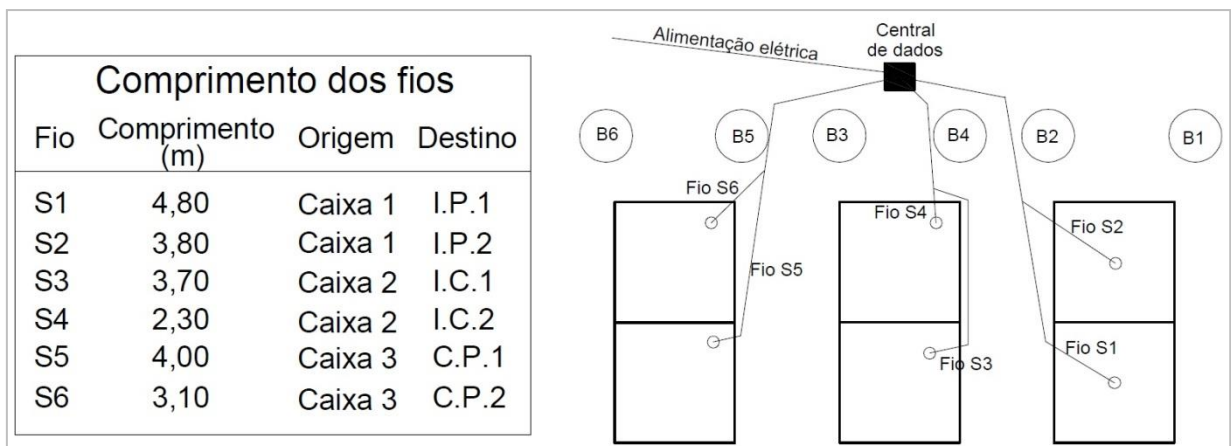
Figura 3.13 – Corte AA' dos módulos experimentais



Fonte: Autor.

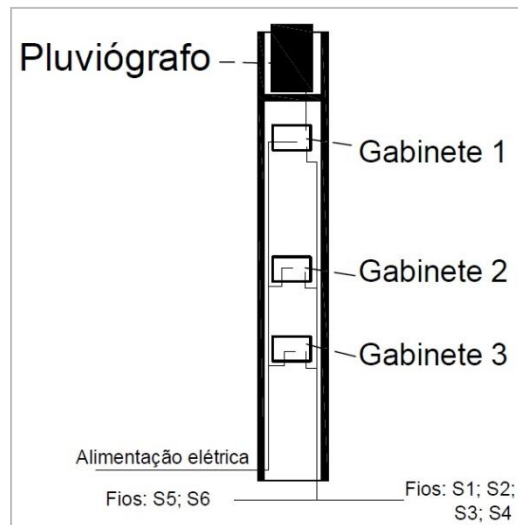
O projeto para a instalação do sistema de monitoramento da água infiltrada no pavimento é mostrado na Figura 3.14 e Figura 3.15. Os fios S1, S2, S3, S4, S5 e S6 são cabos PP 4 x 1,0 mm<sup>2</sup> que ligam a energia, o *trigger*, o *echo* e o aterramento dos sensores ultrassônicos. Os gabinetes 1, 2 e 3 foram locados na central de dados e armazenaram os componentes Arduino que registraram as informações dos sensores a cada 20 segundos. Os dados do pluviômetro instalado sobre a central foi armazenado no gabinete 1, também a cada 20 segundos.

Figura 3.14 – Projeto elétrico dos módulos: comprimento dos fios e planta baixa



Fonte: Autor.

Figura 3.15 – Projeto elétrico dos módulos: detalhamento da central de dados



Fonte: Autor.

### 3.2.4. Dimensionamento

Como os módulos não receberam carregamento de veículos, não foi realizado o dimensionamento mecânico. O dimensionamento hidrológico, por outro lado, foi necessário para os pavimentos acomodarem a chuva de projeto. Pela falta de equação intensidade-duração-frequência (IDF) da cidade de Itaara/RS e proximidade desta com a cidade de Santa Maria/RS, adotou-se a equação IDF de Santa Maria (ROMAN, 2015) (equação 2).

$$I = \frac{870,289 \cdot TR^{0,1632}}{(t + 8,76)^{0,7258}} \quad (2)$$

Sendo  $I$  a intensidade da chuva em  $\text{mm.h}^{-1}$ ,  $TR$  o tempo de retorno do evento chuvoso em anos e  $t$  a duração da chuva em minutos.

A equação foi convertida ao modelo Talbot (equação 3).

$$I = \frac{3182,552 \cdot TR^{0,1632}}{(t + 18,9121)} \quad (3)$$

Empregou-se o método da curva envelope, descrito no Anexo B. Adotou-se coeficientes de escoamento  $C = 0,1$  (ACIOLI, 2005) para concreto permeável moldado no local e blocos de concreto permeável; e  $C = 0,78$  (ALESSI, et al., 2006; ARAUJO et al., 2000) para blocos de concreto convencional. Estes valores foram utilizados para o

dimensionamento da base granular, da tubulação e caixas de armazenamento, visto que os revestimentos adotados no experimento são semelhantes e não apresentam dados necessários para o cálculo dos C's sem antes construí-los. O tempo de retorno (TR) e a duração da chuva (t) adotados para o projeto foram de 10 anos e 60 minutos, respectivamente, valores mínimos expresso por norma (ABNT, 2015).

### **3.2.5. Implantação dos módulos**

A instalação teve início dia 08 de janeiro de 2018 com a escavação de três áreas retangulares de 01 m x 02 m, com profundidade aproximada de 40 cm (Figura 3.16 (a)). A vedação lateral foi feita com cerâmicas de 60 cm x 60 cm transpassadas entre si e lona preta. No fundo de cada módulo foi posta a manta geotêxtil, em seguida, foi posicionado na vertical um tubo de PVC previamente perfurado. Ao redor do tubo foi despejada com cuidado a camada de brita 9,5/25 mm (Figura 3.16 (b)). Ajustou-se o caimento de 2% na superfície superior da base granular, com a declividade de um módulo para o lado direito e do outro módulo ao lado com declividade para a esquerda. Acima da base foi ajustada outra manta geotêxtil para evitar a entrada de finos na base granular pela camada superior, seguindo recomendação de Virgiliis et al. (2011), apesar da norma NBR 16416 (2015) não citar esta camada (Figura 3.16 (c)).

Quando todos os seis módulos estavam nesta condição, fez-se a execução dos revestimentos. Os dois primeiros módulos foram executados com blocos intertravados de concreto permeável. Para tanto, a superfície recebeu uma camada de assentamento de areia grossa (Figura 3.16 (d)), em seguida, os blocos permeáveis foram posicionados e rejuntados com a mesma areia grossa. Os módulos do meio foram executados da mesma forma, porém, com intertravado de concreto convencional. O terceiro par de módulos foi revestido sem a camada de assentamento de areia. Colocou-se uma camada de 10 cm do concreto permeável (estudado em laboratório) diretamente sobre a manta geotêxtil. O material foi compactado com haste, aplicando-se golpes distribuídos em toda a área do pavimento.

Para reservar a água escoada superficialmente, fez-se a captação desta nas laterais mais baixas dos pavimentos. As cerâmicas de uma lateral de cada módulo foram serradas rente ao pavimento para que se ajustassem calhas de PVC (Figura 3.16 (e)). As calhas têm caimento para as caixas de armazenamento parcialmente enterradas, que armazenam a água de escoamento (Figura 3.16 (f)). Cada caixa de armazenamento possui extravasor e tubulação para esgotamento da água acumulada. Foram colocadas quatro caixas, uma para cada módulo.

A central onde ficam armazenadas as informações dos sensores ultrassônicos e de um pluviógrafo instalado no topo foi construída em madeira. Os três gabinetes onde se encontram as placas e *shields* dos sensores foram presos na central e alimentados por uma fonte com saída de 5 V (Figura 3.17). Os dados do pluviógrafo foram armazenados no gabinete 1, pois este ficou mais próximo.

Figura 3.16 – Sequência de construção dos módulos experimentais. (a) escavação; (b) tubo e brita; (c) manta geotêxtil; (d) assentamento; (e) calha de captação; (f) baldes de reservação.



Fonte: Autor.

Figura 3.17 – Central com pluviógrafo, fonte e caixas de dados dos sensores



Fonte: Autor.



Após a construção foi feita a medição da área superficial dos módulos. A Tabela 3.4 resume as medidas calculadas pela média de três valores cada e a área de pavimento descontando a área do tubo de 100 mm que fica em contato com o fundo. As áreas obtidas foram adotadas na análise dos dados.

Tabela 3.4 – Dimensões superficiais dos módulos

Módulo	I.P.S.	I.P.C.	I.C.S.	I.C.C.	C.P.S.	C.P.C.
Largura (cm)	101	102	100	101	101	101
Comprimento (cm)	100	101	101	102	101	101
Área com desconto do tubo (m <sup>2</sup> )	1,00	1,02	1,00	1,02	1,01	1,01

Fonte: Autor.

### 3.2.6. Critérios de análise

Os resultados de permeabilidade dos módulos, obtidos pelo ensaio de infiltração com anel, foram analisados conforme valores médios absolutos nos períodos de colmatção natural, limpeza 1, colmatção acelerada e limpeza 2. Em seguida, fez-se a análise tomando o primeiro valor de infiltração média de cada pavimento (condição de recém-construído) como a referência (100% da capacidade inicial) e a redução, a partir desta, da capacidade de infiltração em porcentagem.

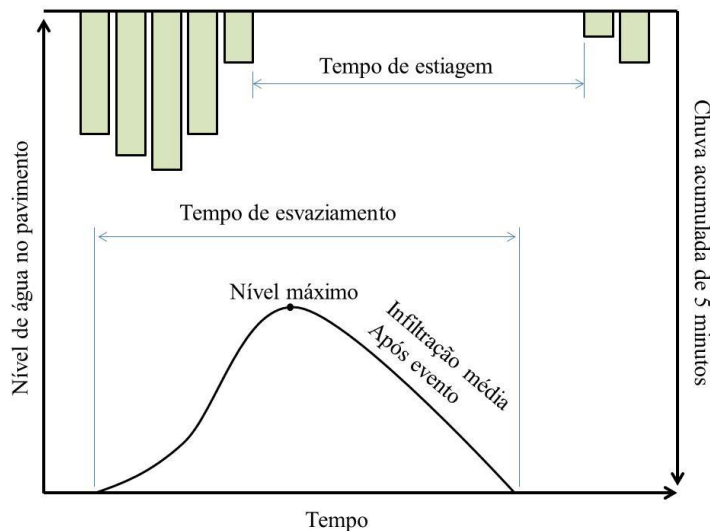
A partir da coleta de dados a cada 20 s, os eventos individuais foram caracterizados segundo seus volumes precipitados, duração total, intensidade média ( $I_{méd}$ ), intensidades máximas ocorridas em um período de 5 ( $I_{m5}$ ) e 30 minutos ( $I_{m30}$ ). Especificou-se um tempo de estiagem (sem precipitação) de 6 horas para separação dos eventos individuais. Nos casos em que aconteceu uma falha na coleta automática, anotava-se apenas a precipitação total registrada pelo pluviômetro e volume total escoado em cada caixa de armazenamento através de medição manual. Os dados pluviométricos foram consistidos pelo método de Dupla Massa com os dados pluviométricos da estação automática do INMET mais próxima, localizada na UFSM (RS A803). Foi verificada a correlação da consistência pelo coeficiente de Pearson.

Foi construído um hidrograma para cada evento, que envolveu a precipitação (acumulada em 5 minutos para facilitar visualização) e o nível em cada pavimento (Figura 3.18). Empregou-se a IDF de Santa Maria – RS (ROMAN, 2015) para determinar o tempo de retorno de cada evento, adotando o maior valor obtido entre duração total, 5 e 30 minutos.

Após a caracterização dos eventos, fez-se a validação dos dados obtidos, comparando os volumes finais nas caixas e pluviômetros com os colhidos automaticamente e com os dados

obtidos em estações próximas no INMET. Por balanço hídrico, o volume de água na camada de brita não pode ser superior à diferença entre o volume total precipitado e o volume escoado, o que indicaria ingresso de água externa no sistema. O volume de água na camada de brita foi calculado através do nível máximo observado e índice de vazios da brita (estimado em campo em 42%).

Figura 3.18 – Modelo de hidrograma dos módulos experimentais



Fonte: Autor.

Após a validação observou-se a evolução da colmatção ao longo do período inicial de 12 meses analisando as diferentes variáveis dos eventos, tais como, precipitação total, tempo de retorno, nível de água na brita, tempo de esvaziamento, capacidade de infiltração e escoamento superficial médio. Os escoamentos superficiais dos pavimentos foram comparados estatisticamente entre si através do método não paramétrico Mann-Whitney, visto o baixo número de amostras (menos de 30 repetições) em alguns casos, como após a limpeza dos pavimentos. Foi definido um nível de significância de 5%. Foram comparados os resultados dos módulos de mesmo revestimento, módulo antes e após colmatção, módulo antes da colmatção e após limpeza.

Com o auxílio do software CurveExpert®, obtiveram-se curvas que relacionam as variáveis entre si. O ajuste foi considerado fraco quando o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi menor que 0,5; mediano quando entre 0,5 e 0,8; e bom para  $R^2 > 0,8$ .

Também se caracterizou a situação de umidade precedente do solo pela precipitação acumulada dos 5 dias anteriores ao evento (UAS), conforme o método SCS (1971), mesma caracterização adotada por Persch et al. (2018) e Tassi et al. (2014) para seus dispositivos de

infraestrutura verde. Para uma precipitação acumulada  $\leq 13$  mm o solo classifica-se como UAS I; entre 13 mm e 28 mm o como UAS II; e acima de 28 mm como UAS III.

### 3.3. ETAPA 3 – VAGAS DE ESTACIONAMENTO COM DIFERENTES REVESTIMENTOS PERMEÁVEIS

Foi construído um estacionamento experimental com quatro tipos de revestimentos no campus da UFSM – Santa Maria para monitoramento e análise do controle da água pluvial. Foram oito vagas com pavimentos permeáveis que ocupam uma área de 105 m<sup>2</sup>, fazendo parte de um estacionamento de 1285 m<sup>2</sup> que não contribuiu com a área drenada nos pavimentos experimentais. Os quatro revestimentos utilizados foram: intertravado de concreto permeável (bloco de 16 lados comercial), intertravado de concreto convencional (bloco de 16 lados comercial), concreto permeável (traço estudado em laboratório usinado) e bloco de pisograma. A finalidade desta etapa foi verificar o comportamento hidrológico dos pavimentos em situação real e compará-lo aos resultados obtidos nos módulos experimentais. O revestimento com pisograma foi incluído no escopo durante o andamento da Etapa 2, então, compôs apenas o grupo de revestimentos analisados em escala real.

#### 3.3.1. Estratégia metodológica

Foi verificada a capacidade de infiltração dos pavimentos durante o período de monitoramento por meio do ensaio da norma NBR 16416 (ABNT, 2015) (conforme descrito no Anexo A). O ensaio foi realizado logo após a construção dos pavimentos, nas idades de 4 meses, 8 meses e 12 meses. Como o pisograma é um revestimento de formato incomum, com pequenas regiões quadradas para plantio de grama, foi preciso criar um equipamento de área equivalente que pudesse ser vedada totalmente no contato entre equipamento/concreto. O anel circular presente na NBR 16416 tem diâmetro 300 mm, que corresponde a 706,86 cm<sup>2</sup>. O equipamento desenvolvido para o pisograma é retangular, de lados 330 mm x 214,2 mm e área de 706,86 cm<sup>2</sup> (Figura 3.19).

Foi feita a validação do equipamento retangular nos outros três tipos de revestimentos, não houve diferença nos valores de infiltração calculados. Fez-se o uso do anel recomendado pela norma nos demais pavimentos. Definiram-se dois locais em cada pavimento para fixar o equipamento, totalizando oito pontos e duas repetições do ensaio.

Figura 3.19 – Equipamento retangular e pisograma vedados com massa de calafetar



Fonte: Autor.

Para monitorar a eficiência dos sistemas permeáveis, foram instalados sensores ultrassônicos (MINETTO, 2018) e sensores de pressão que registraram o nível de água nas caixas de armazenamento e no interior de cada pavimento, respectivamente, além de um pluviógrafo no local para monitorar a chuva. Ou seja, o método de avaliação dos experimentos da Etapa 2 e Etapa 3 são os mesmos, salvo o monitoramento do volume de água nas caixas de armazenamento do estacionamento com sensores. Os dados foram registrados a cada 20 segundos em cartões de memória inseridos no sistema Arduino. Este, por sua vez, foi locado em uma caixa de passagem metálica externa instalada na central.

#### *3.3.1.1. Validação dos sensores de pressão*

Os sensores de pressão MPX5010DP foram testados em três situações simultaneamente e comparados com o nível observado na régua milimétrica:

- a) Sensor posicionado acima do reservatório, com uma mangueira de 4 mm mergulhada, fixada de forma reta até o fundo;
- b) Sensor posicionado acima do reservatório, com uma mangueira de 4 mm mergulhada, fixada com várias curvas até atingir o fundo;
- c) Sensor posicionado no fundo de reservatório, protegido dentro de um tubo PVC de 50 mm, com um pequeno pedaço de mangueira de 4 mm em contato com a água.

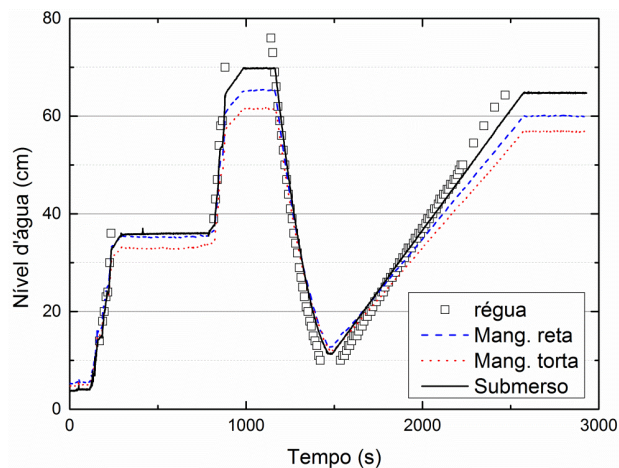
O nível de água foi alterado através de uma mangueira e registro de esfera instalado no fundo do reservatório. A água estava a uma temperatura de 20 °C. Obteve-se melhor precisão com o sensor de pressão submerso (Figura 3.20).

Em seguida foi feita a validação do sensor posicionado no fundo para níveis de água de 0 a 25 cm, com incrementos de 0,5 cm, pois sua aplicação no estacionamento fica restrita a

esta faixa de valores. O erro relativo médio foi de 3,50%, abaixo do valor admissível de 5% apresentado na norma NBR 14105-2 (ABNT, 2015).

Por último, fez-se uma verificação da influência da temperatura na leitura do sensor de pressão. Foi ajustado um nível estático de 45 cm com água a 65 °C. Foram aferidas a temperatura e leitura do sensor a cada 2 minutos até a água atingir temperatura de 20 °C. A variação máxima da leitura foi de 0,9%.

Figura 3.20 – Teste com três situações do sensor MPX5010DP



Fonte: Autor.

### 3.3.1.2. Verificação térmica dos pavimentos permeáveis

Foram feitas fotos térmicas (imagens infravermelhas) dos pavimentos em um período quente e em um período frio para comprovar e justificar o ensaio térmico cíclico realizado na Etapa 2. A câmera utilizada é da marca FLIR, modelo T440, que permite registrar imagens de objetos com temperaturas entre -20 °C e 1200 °C. As imagens se ajustam automaticamente em uma escala de cores conforme parâmetros inseridos. Os principais parâmetros são temperatura ambiente, umidade relativa do ar e emissividade do material. A emissividade de uma superfície varia de 0 a 1 e representa, de modo geral, sua capacidade de emitir calor. De acordo com a Norma Brasileira de Desempenho Térmico de Edificações NBR 15220 (ABNT, 2003), a emissividade de superfícies de concreto aparente encontra-se na faixa de 0,85 a 0,95, portanto, foi adotado um valor de 0,90 para a emissividade dos quatro revestimentos em concreto.

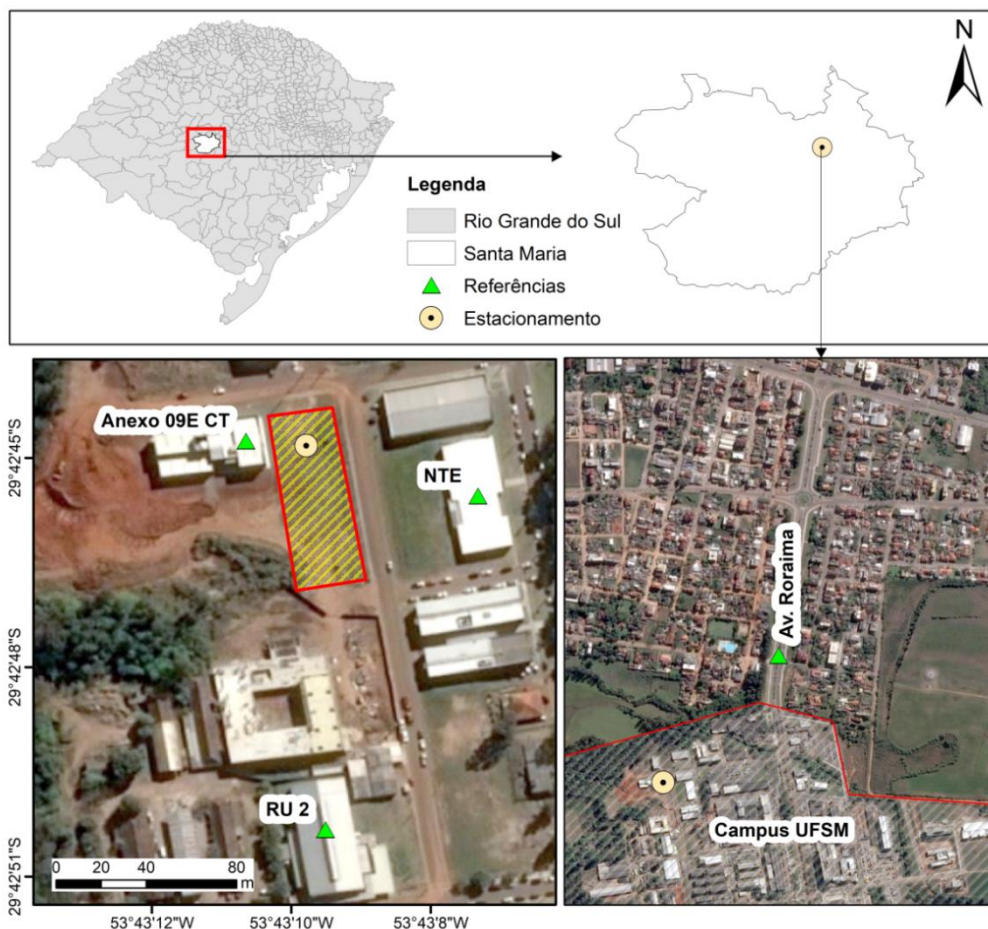
As fotos térmicas do momento de maior temperatura foram registradas às 15 h do dia 11 de dezembro de 2018, temperatura ambiente no momento dos registros de 37,7 °C e umidade relativa do ar de 28%. Os pavimentos encontravam-se secos, uma vez que a última chuva antes dos registros fotográficos foi registrada 11 dias antes (INMET, 2019). As fotos

térmicas em condições de baixa temperatura foram feitas às 7:30 h do dia 06 de julho de 2019. Segundo o INMET, a temperatura do ar no momento do registro era de 0,2 °C e a umidade relativa do ar era 96%. Os pavimentos estavam em condição seca, com 7 dias antecedentes sem chuva.

### 3.3.2. Local de implantação

A estrutura de infiltração em estudo foi construída próximo aos prédios do Instituto de Redes Inteligentes (INRI – prédio 09E) e do curso de Arquitetura e Urbanismo da UFSM, em Santa Maria/RS. O local foi escolhido porque o projeto para a construção deste estacionamento já estava em andamento e o solo apresentou condições adequadas em ensaios preliminares. A Figura 3.21 mostra a posição do local pela imagem de satélite e a Figura 3.22 a situação do local antes da construção. O local apresentava pequena declividade, coberto com vegetação rasteira.

Figura 3.21 – Mapa de localização do estacionamento com vagas experimentais



Fonte: Autor.

Figura 3.22 – Local do experimento



Fonte: Autor.

### *3.3.2.1. Análise prévia – solo local*

Fez-se uma análise do solo existente no local de implantação antes do início da construção do estacionamento para definir a viabilidade e dimensionamento da estrutura. Além da granulometria, os ensaios realizados foram proctor normal com reuso da amostra; índice de suporte Califórnia (CBR); infiltração no solo (anéis concêntricos); e condutividade hidráulica horizontal através do poço invertido.

#### **Granulometria**

O ensaio granulométrico do solo foi realizado por meio de peneiramento. Foram separadas três amostras de pontos distintos do local, obtidas a uma profundidade de 40 cm da superfície e levadas à estufa. Foram recolhidas amostras suficientes para a realização dos ensaios de granulometria, Proctor Normal e Índice de Suporte Califórnia. Após estarem secas e destorroadas, foram pesadas para iniciar o processo de peneiramento. Foram utilizadas as peneiras nº 4 (4,8 mm), nº 10 (2 mm), nº 16 (1,2 mm), nº 30 (0,6 mm), nº 40 (0,42 mm), nº 60 (0,25 mm), nº 100 (0,15 mm) e nº 200 (0,075 mm).

#### **Proctor normal com reuso da amostra**

O ensaio de Proctor Normal foi realizado para determinar a umidade do solo que resulta em maior densidade, chamada de umidade ótima. Compactou-se uma porção de solo com diferentes teores de umidade, de modo a acrescentar água e verificar a densidade, até constatar um declínio da densidade (NBR 7182, 2016).

#### **Índice de suporte Califórnia (CBR)**

No ensaio de CBR mediu-se a resistência do solo à penetração de um pistão a uma determinada velocidade. Seu resultado é dado em porcentagem comparativamente ao valor de referência de brita graduada (NBR 9895, 2016). A resistência do solo foi empregada no dimensionamento mecânico dos pavimentos, inserida nas características do solo no software DimPav 1.0.

### **Infiltração do solo (anéis concêntricos)**

O ensaio foi realizado cravando os anéis diretamente no solo, isento de grama e levemente regularizado. Foi posicionado um saco plástico no fundo do cilindro menor após a cravação, para que fosse possível adicionar a água até o nível correto sem que ocorresse a infiltração no solo. O equipamento disponível conta com um reservatório onde são feitas as leituras de infiltração e uma boia no cilindro menor que mantém o nível constante.

### **Condutividade hidráulica horizontal: poço invertido**

Foi adotado o método conhecido como poço invertido, ou método de rebaixamento, descrito pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE, 2013), dado que o nível do lençol freático situa-se a uma distância considerável da superfície (verificado no site SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, poço nº 4300000556). O procedimento é realizado conforme as seguintes etapas (BARBASSA et al., 2009):

- a) Abertura do poço;
- b) Preencher o poço com água até a superfície e saturá-lo por dez minutos;
- c) Interromper o fornecimento de água e considerar este instante como tempo zero;
- d) Acompanhar o rebaixamento do nível em intervalos curtos no começo e mais longos depois. Ex.: 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min, 5 min, etc.;
- e) Encerrar o ensaio quando o rebaixamento do nível for de 20% da carga hidráulica inicial ou 30 minutos.

O coeficiente de permeabilidade é calculado pela equação 4.

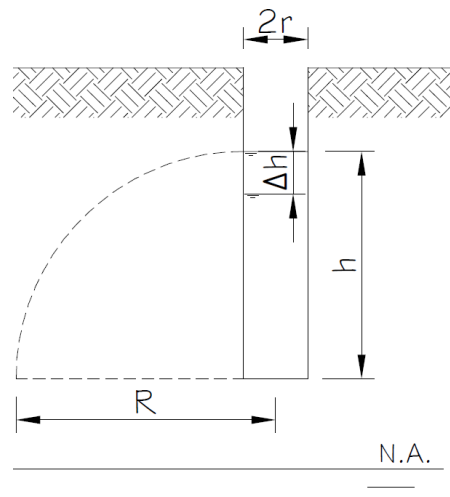
$$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (4)$$

Sendo K o coeficiente de permeabilidade ( $m \cdot s^{-1}$ ),  $\Delta h$  o rebaixamento da carga d'água (m),  $\Delta t$  o intervalo de tempo (s), r o raio do poço (m) e R o raio que considera que a percolação no solo se faz conforme uma parábola cujo vértice está no centro do fundo do furo (m). A



componente R pode ser analisada no esquema da Figura 3.23, seu cálculo é feito conforme equação 5.

Figura 3.23 – Esquema de ensaio de poço invertido



Fonte: adaptado de ABGE (2013).

$$R = \frac{(1 + 4 \cdot h)^{0,5} - 1}{2} \quad (5)$$

Sendo h a altura da lâmina d'água no poço (m).

Foram escolhidos três pontos do estacionamento, denominados PI 1, PI 2 e PI 3 (Apêndice A – Figura A.3). O ponto PI 1 foi locado próximo ao prédio 09E, o ponto PI 2 foi posicionado no centro do estacionamento e o ponto PI 3 foi locado próximo às vagas de pavimentos permeáveis.

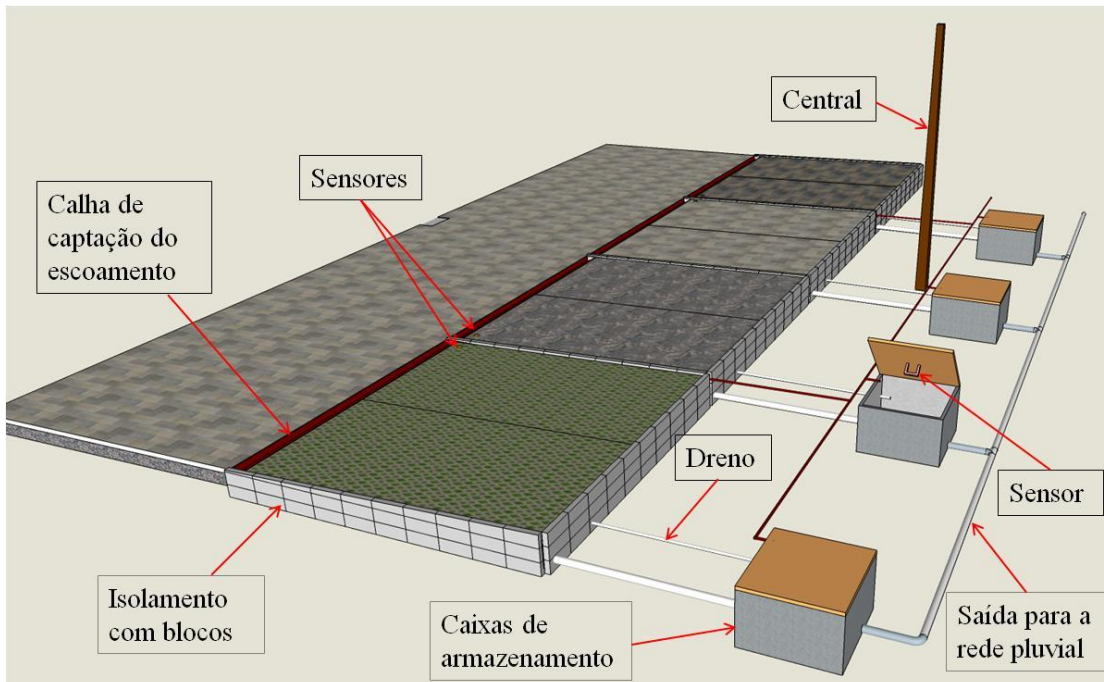
### 3.3.3. Projeto do estacionamento

O projeto do estacionamento com todas as vagas (Apêndice A) previa um caimento para o centro, caixas coletoras de água pluvial a cada 11 metros e ligação dessa captação com uma caixa existente da rua. Optou-se por estabelecer as vagas experimentais na região mais alta do terreno, o que contribui para o esvaziamento das caixas de armazenamento, além de uma região ampla ao lado disponível para a instalação das caixas de armazenamento. Pretendia-se definir um caimento superficial de 2% nas vagas permeáveis, da mesma forma que os módulos experimentais, no entanto, foi preciso manter o mesmo caimento do restante do estacionamento, 4,5% por requerimentos da UFSM.

Para captar a água escoada nos pavimentos permeáveis, especificou-se uma calha para cada par de vagas. A água é direcionada às suas respectivas caixas de armazenamento, por tubos de PVC que passam por baixo das vagas (Figura 3.24). Cada caixa de armazenamento possui um sensor ultrassônico HC-SR04 instalado em seu interior, a uma altura segura, para monitorar o nível de água.

Como o monitoramento do nível é realizado em locais em que os carros podem passar, danificariam os sensores ultrasônicos como os usados nos módulos experimentais. Por este motivo, optou-se por monitoramento através de sensores de pressão instalados no fundo da camada de agregado. Foi preciso especificar o nivelamento do solo abaixo das vagas para que os sensores descrevam corretamente o nível de água no interior do pavimento.

Figura 3.24 – Perspectiva do estacionamento



Fonte: Autor.

Cada tipo de revestimento (duas vagas) funcionou como um único sistema, portanto, foi preciso isolar lateralmente cada par de vagas com blocos de alvenaria. Eletrodutos enterrados ligam os sensores de pressão e ultrassônicos ao datalogger (mais detalhes no apêndice A).

### 3.3.4. Dimensionamento

O dimensionamento da estrutura envolveu o dimensionamento dos revestimentos para resistir aos esforços, o cálculo da altura da base granular (agregado graúdo) para acomodar o volume drenado pelo revestimento e resistir aos esforços, dimensionamento das tubulações que conduzem a água do escoamento superficial e das caixas que armazenam esta água.

#### 3.3.4.1. Dimensionamento mecânico dos revestimentos e base granular

Diferentemente do experimento da etapa 2, as vagas de estacionamento recebem carregamento de veículos. Desta forma, foi feito o dimensionamento mecânico através do software DimPav versão 1.0, software gratuito desenvolvido pelo Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP, 2018). Buscou-se determinar a espessura mínima da base e revestimentos para suportar os esforços impostos pelo uso das vagas de estacionamento. Apesar das vagas serem restritas a veículos leves, fez-se simulações com veículos de peso bruto total de 12,8 tf. Para um volume diário de 25 veículos e vida útil de projeto de 15 anos, obteve-se um número de repetições do eixo padrão de  $1,3 \times 10^5$  (tráfego leve).

#### 3.3.4.2. Dimensionamento hidráulico/hidrológico da base granular

Foi utilizada a equação genérica de relação intensidade-duração-frequência (IDF) de Santa Maria – RS (equação 2) obtida no trabalho realizado por Roman (2015). Adotaram-se os mesmos coeficientes de escoamento do dimensionamento dos módulos experimentais:  $C = 0,1$  (ACIOLI, 2005) para concreto permeável moldado no local, blocos de concreto permeável e Pisograma; e  $C = 0,78$  (ALESSI, et al., 2006; ARAUJO et al., 2000) para blocos de concreto convencional. O tempo de retorno (TR) e a duração da chuva (t) adotados para o projeto foram de 10 anos e 60 minutos, respectivamente, valores mínimos expresso por norma (ABNT, 2015).

### Dimensionamento das calhas e tubulações

O dimensionamento das calhas foi por meio da equação do método racional, adotando os mesmos coeficientes de escoamento superficial e intensidade da chuva do dimensionamento da base granular. A área de contribuição de cada tipo de revestimento corresponde a duas vagas, ou seja, 24,75 m<sup>2</sup>.

### **Dimensionamento das caixas de armazenamento**

O volume necessário para acumular a água escoada de cada tipo de revestimento foi dado pelo produto da vazão calculada e tempo de duração da chuva (60 minutos).

#### **3.3.5. Implantação**

As obras iniciaram no dia 04 de junho de 2018 com a terraplanagem e limpeza do local. Foi retirada uma camada de solo de aproximadamente 30 cm com retroescavadeira e caminhão basculante. O trabalho de topografia ocorreu em seguida com a marcação a cada 10 metros nos dois sentidos da obra. O terreno foi compactado com rolo compactador tipo liso, ajustando-se a declividade desejada para o estacionamento completo. Foram executadas as caixas de passagem da rede de drenagem do estacionamento, em seguida, ligadas com tubos de concreto de 400 mm (Figura 3.25 (a)).

Após a preparação do terreno, procedeu-se com o espalhamento do agregado graúdo na área do estacionamento exceto região destinada aos pavimentos permeáveis. No dia 26 de junho de 2018 deu-se início ao isolamento da área dos pavimentos permeáveis com blocos de concreto (Figura 3.25 (b)). Foram construídos três laterais de cada par de vagas, pois foi definido junto à empresa responsável que, por questões construtivas, a calha coletora do escoamento superficial deveria ser construída em concreto estrutural isolando a quarta lateral. Foram colocados tubos de PVC ligando as calhas coletoras aos locais de reservação (Figura 3.25 (c)) e tubos de PVC de 40 mm perfurados para drenar a água do agregado graúdo das vagas, caso seja necessário após um evento extremo (sistema Tipo B, item 2.2).

Para acomodar e verter os reservatórios, foram construídas caixas de alvenaria estrutural (Figura 3.25 (d)). O vertedouro foi instalado no nível mais baixo das caixas de alvenaria e verte para uma caixa de passagem da rede de drenagem do estacionamento. Foi instalado um registro de esfera no fundo de cada reservatório plástico e estes foram acomodados dentro das caixas de alvenaria.

O terreno dos pavimentos permeáveis foi nivelado manualmente, o que significou regular uma profundidade de 31 cm no lado mais baixo (próximo às calhas) e 45 cm no lado mais alto (próximo aos reservatórios). Após a construção das calhas coletoras em concreto estrutural, o solo foi revestido com manta geotêxtil (Figura 3.25 (e)).

Figura 3.25 – Etapas da construção do estacionamento. Ajuste do terreno (a); vedação das vagas permeáveis (b); tubulação para escoamento superficial (c); construção das caixas de alvenaria (d); assentamento da manta geotêxtil.



Fonte: Autor.

O agregado graúdo foi disposto sobre a manta geotêxtil com carrinho de mão, tomando-se o cuidado para não deslocar ou danificar a manta. A compactação foi feita manualmente em camadas de 5 a 8 cm por meio de um equipamento construído em madeira, na intenção de não reduzir significativamente o índice de vazios do agregado, no entanto, evitar deformações das camadas quando submetida ao tráfego (Figura 3.26 (a)). O assentamento do agregado graúdo foi concluído no dia 30 de julho de 2018.

Os blocos de pisograma, intertravados de concreto convencional e intertravados de concreto permeável foram assentados sobre uma camada de 5 cm de pó de pedra e rejuntados com o mesmo material (Figura 3.26 (b)). Diferentemente do experimento da Etapa 2, optou-se por não colocar outra camada de manta geotêxtil entre a camada de agregado graúdo e revestimentos.

A grama foi plantada sobre uma pequena porção de terra adubada no dia 10 de setembro de 2018 pelos alunos de iniciação científica, mestrado e doutorado dos laboratórios

Ecotecnologias e GEPPASV da UFSM (Figura 3.26 (c)). Tomou-se o cuidado para manter as mudas abaixo do nível superior do pavimento e assim evitar o esmagamento.

A placa de concreto permeável foi executada no dia 02 de outubro de 2018. A concreteira reproduziu o traço B80A estudado em laboratório, porém, utilizou o cimento CII-Z visto que não possuíam cimento CPV-ARI (maiores detalhes em Santos, 2019). Foi escolhido um dia nublado e de temperatura baixa, aproximadamente 15 °C, para retardar o tempo de pega do concreto permeável. O caminhão betoneira despejou o material diretamente sobre o agregado graúdo (Figura 3.26 (d)). O espalhamento foi feito com equipamentos manuais pelos alunos e o acabamento foi realizado com uma régua vibratória a gasolina.

Após a concretagem, as duas vagas foram cobertas com lona preta para evitar a perda de umidade do concreto. A lona foi mantida durante sete dias, o concreto foi hidratado diariamente durante este período para evitar fissuras de retração. O tráfego foi liberado após 30 dias da concretagem.

Figura 3.26 – Etapas da construção do estacionamento. Base granular (a); assentamento e rejuntamento dos blocos (b); plantio da grama (c); execução do concreto permeável (d).

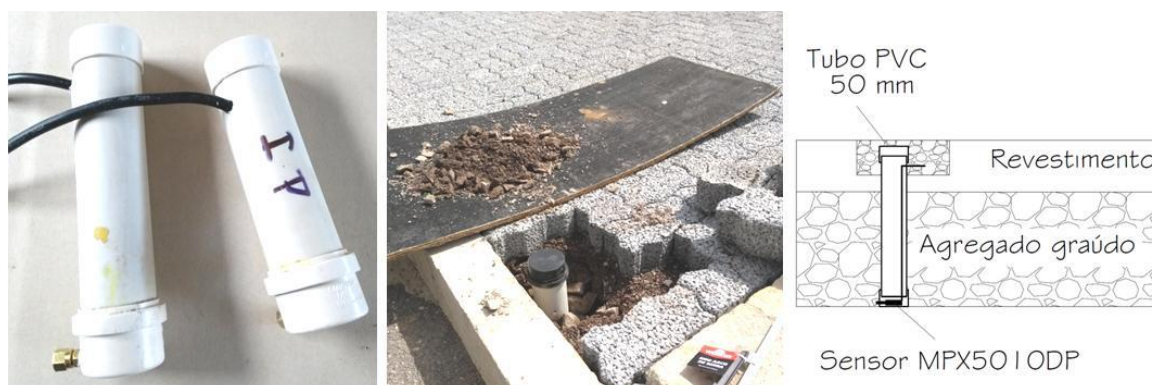


Fonte: Autor.

Os sensores ultrassônicos foram instalados no dia 07 de janeiro de 2019 em suportes construídos de madeira e fixados no interior de cada reservatório. As cápsulas dos sensores de

pressão foram construídas com tubos de PVC 50 mm de modo a proteger os sensores MPX5010DP e permitir que meçam o nível de água presente na camada de agregado graúdo de cada pavimento permeável. Os quatro sensores de pressão MPX5010DP foram instalados no dia 02 de março de 2019 (Figura 3.27).

Figura 3.27 – Instalação das cápsulas dos sensores de pressão



Fonte: Autor.

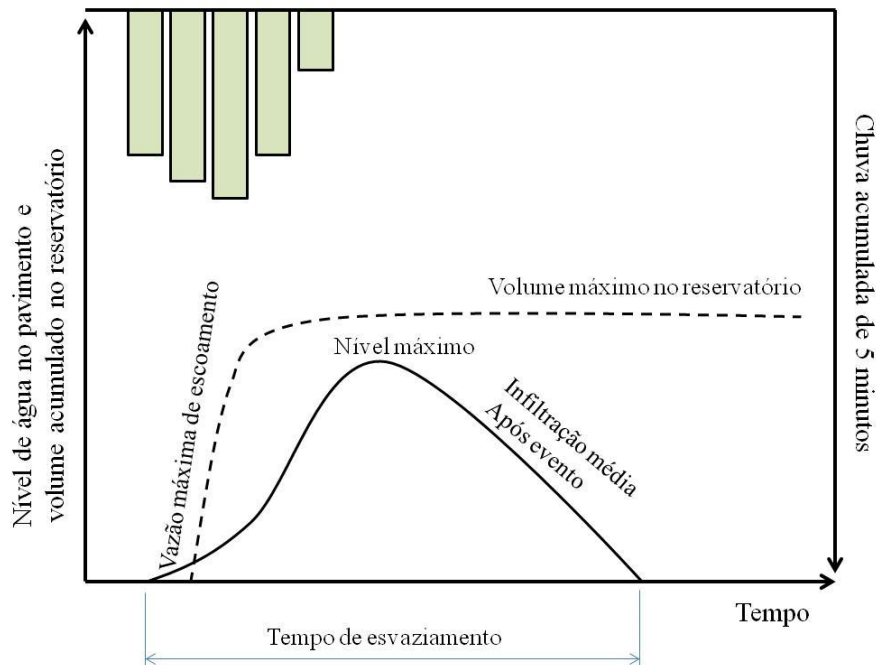
### 3.3.6. Critérios de análise

A partir do ensaio de infiltração (Anexo A) realizado periodicamente em cada pavimento, observou-se a alteração da capacidade de infiltração ao longo do período de monitoramento. Fez-se a análise sobre os valores médios absolutos e, em seguida, análise tomando o primeiro valor de infiltração média por cada pavimento (condição de recém-construído) como a referência (100% da capacidade inicial). Os valores foram comparados aos resultados encontrados nos módulos experimentais da Etapa 2.

A partir do monitoramento das vagas de estacionamento durante aproximadamente 10 meses (final de setembro de 2018 a início de agosto de 2019), foram construídos os hidrogramas de cada evento para cada pavimento permeável considerando um período de estiagem de 6 horas de forma similar à metodologia dos módulos experimentais. A partir dos hidrogramas e hietogramas foram obtidas informações, tais como nível máximo de água no pavimento, tempo de esvaziamento da base granular, infiltração, vazão máxima de escoamento superficial, volume máximo no reservatório, duração da chuva, precipitação total, intensidade média ( $I_{méd}$ ), intensidade máxima em um intervalo de 5 ( $I_{m5}$ ) e 30 minutos ( $I_{m30}$ ) e tempo de retorno com base na IDF de Santa Maria (equação 2 - ROMAN, 2015), adotando o maior valor obtido entre duração total, 5 minutos e 30 minutos. A Figura 3.28 representa esquematicamente os hidrogramas construídos. Os dados de precipitação foram consistidos

com a estação automática do INMET localizada na UFSM (RS A803) pelo método de Dupla Massa. Foi verificada a correlação da consistência pelo coeficiente de Pearson.

Figura 3.28 – Modelo de hidrograma para cada tipo de pavimentos permeável



Fonte: Autor.

Os escoamentos superficiais dos pavimentos foram comparados estatisticamente entre si através do método não paramétrico Mann-Whitney, com nível de significância de 5%. Foram comparados os resultados dos quatro revestimentos, de dois a dois.

Para a análise da variação térmica dos pavimentos foi verificada a temperatura máxima, temperatura mínima e temperatura média superficial das imagens obtidas por meio do *software* FLIR TOOLS®.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da Etapa 1 são apresentados no item 4.1, com a escolha do melhor traço para uso nas outras duas etapas. Em seguida, no item 4.2 são apresentados os resultados da Etapa 2 referentes às questões de durabilidade e manutenção dos pavimentos permeáveis. Por último, no item 4.3 são apresentados os resultados da Etapa 3 da avaliação dos pavimentos permeáveis em escala real.

### 4.1. RESULTADOS DA ETAPA 1 – ESTUDO DE CONCRETO PERMEÁVEL EM LABORATÓRIO

#### 4.1.1. Caracterização dos materiais

##### 4.1.1.1. Caracterização dos agregados

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da caracterização física dos agregados conforme descrito na metodologia. Foram estimados a massa específica e aparente do agregado graúdo e miúdo, absorção de água do agregado graúdo, massa unitária e volume de vazios de agregados, composição granulométrica e teor de material pulverulento nos agregados.

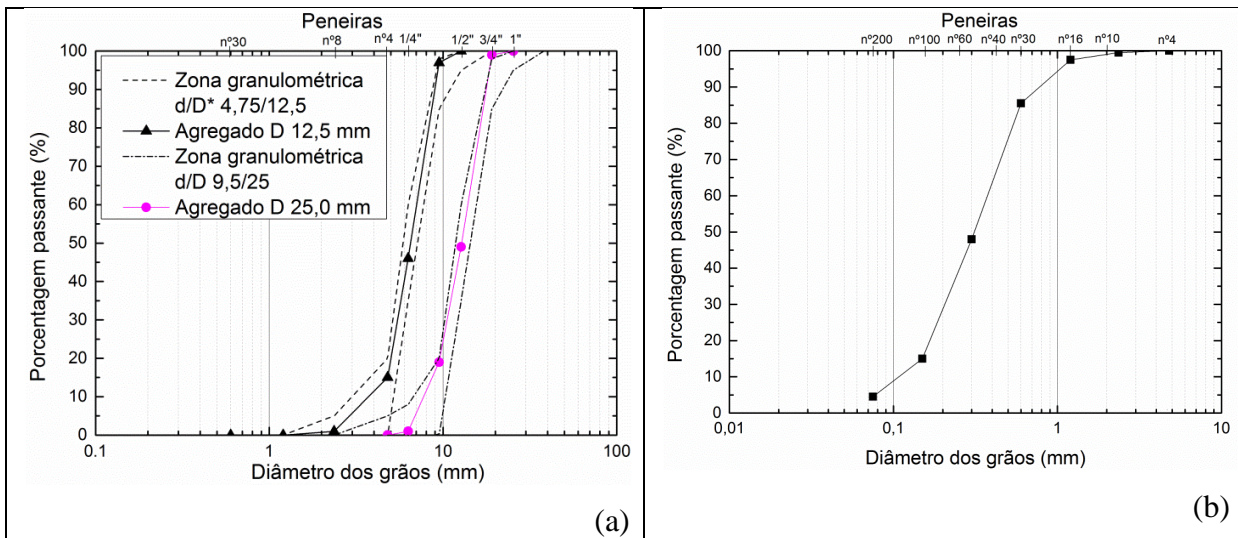
Tabela 4.1 – Caracterização física dos agregados

Propriedades físicas	Areia	4,75/12,5 mm	9,5/25 mm
Massa específica (g.cm <sup>-3</sup> )	2,64	2,44	2,50
Massa unitária, (kg.m <sup>-3</sup> )	1560,19	1173,50	1209,09
Módulo de finura	2,04	5,87	6,82
D. máx. característico (mm)	1,20	9,50	19,00
Absorção do agregado (%)	-	3,44	1,55
Volume de vazios (%)	40,90	51,81	51,64
Material Pulverulento (%)	4,25	2,23	0,51

Fonte: Autor.

A Figura 4.1a apresenta a curva granulométrica do agregado graúdo e a Figura 4.1b do agregado miúdo. Na figura 4.1a as linhas contínuas representam as britas utilizadas, enquanto as tracejadas às zonas granulométricas estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Constata-se que as duas misturas de agregados utilizadas se enquadram dentro das faixas adequadas.

Figura 4.1 – Granulometria do a) agregado graúdo e b) agregado miúdo.



\* Menor (d) e maior (D) dimensão do agregado graúdo.

Fonte: Autor.

#### 4.1.1.2. Aglomerante hidráulico

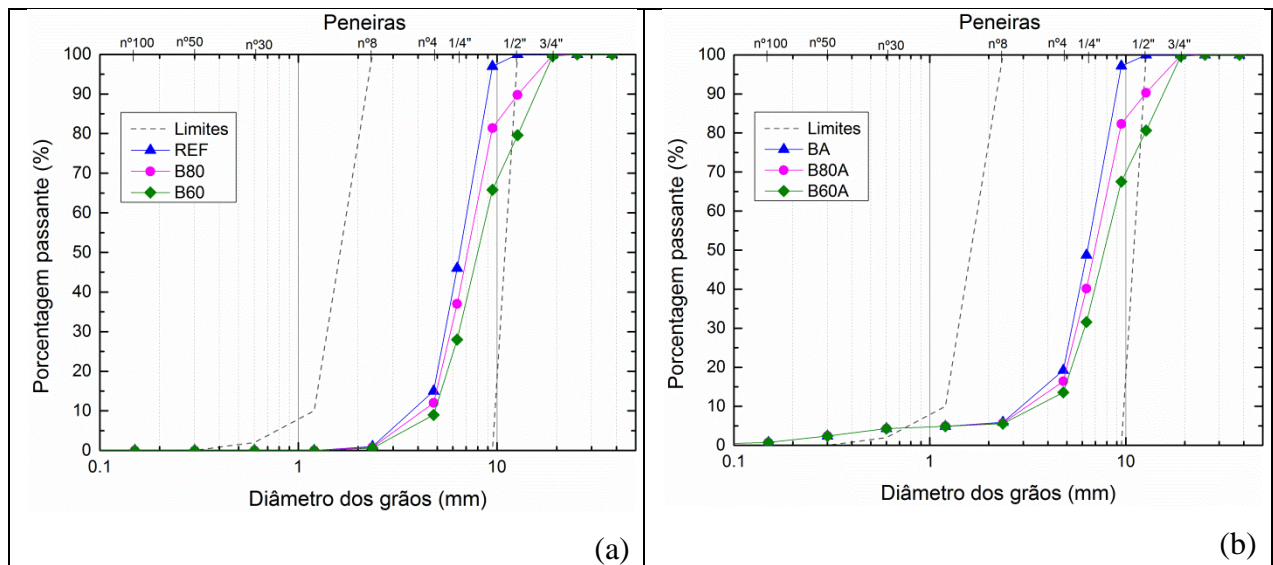
Como mencionado na metodologia, foi utilizado cimento CPV-ARI que atende à norma NBR 5733:1991. A estimativa em triplicata da massa específica absoluta utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier, seguindo as diretrizes da norma NBR NM 23 (ABNT, 2001) mostrou um valor  $2,93 \text{ g.cm}^{-3}$ .

#### 4.1.1.3. Traços

Os traços avaliados variaram nas porcentagens de agregados graúdos (diferentes zonas granulométricas) e na utilização ou não de 5% de agregado miúdo (areia). Buscou-se comparar as granulometrias das misturas obtidas com a combinação das faixas granulométricas encontradas na literatura. A Figura 4.2a e Figura 4.2b mostram a faixa recomendada segundo literatura (limites) (ACI, 2002; NJDEP, 2004; BS, 2009) e a granulometria das misturas que não contêm areia e que contêm areia, respectivamente.

Apenas o traço de referência (REF) está totalmente compreendido dentro da faixa recomendada pela literatura. Os traços que contêm a brita 9,5/25 mm (B80, B60, B80A, B60A) ultrapassam o limite granulométrico superior de 12,5 mm. Já os traços que contêm areia (BA, B80A, B60A) possuem excesso de grãos com granulometria inferior a 0,6 mm, apesar de ter apenas 5% de areia na mistura, aceitável conforme literatura (EISENBERG et al, 2015; ACPT, 2012; YANG et al., 2008; TENNIS et al., 2004).

Figura 4.2 – Granulometrias das misturas a) sem areia e faixa ideal b) com areia e faixa ideal



Fonte: Autor.

A Tabela 4.2 apresenta o consumo de material conforme traço e as massas unitárias das misturas no estado fresco. No cálculo do consumo de material, considerou-se o índice de vazios obtido em cada mistura apresentados no item 4.1.3. As massas unitárias no estado fresco, item de aceitação que deve ser verificada no recebimento do concreto permeável (NBR 16416, 2015), ficaram acima do valor mínimo exigido de  $1600 \text{ kg.m}^{-3} \pm 80 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Tabela 4.2 – Consumo de material das misturas e massa unitária no estado fresco

Traço	Consumo de material ( $\text{kg.m}^{-3}$ )					Massa unitária fresca ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
	Cimento	4,75/12,5 mm	9,5/25 mm	Areia	Água	
REF	302,69	1210,75	0,00	0,00	108,97	1748.03
B80	311,12	995,57	248,89	0,00	112,00	1738.50
B60	318,83	765,20	510,13	0,00	114,78	1765.98
BA	316,35	1202,12	0,00	63,27	113,88	1746.65
B80A	324,49	986,44	246,61	64,90	116,82	1779.70
B60A	330,27	753,03	502,02	66,05	118,90	1805.81

Fonte: Autor.

#### 4.1.2. Propriedades mecânicas

A Tabela 4.3 reúne os resultados das propriedades mecânicas. Os coeficientes de variação ficaram abaixo de 10%. A utilização de 5% de areia na mistura mostrou-se positiva quanto ao ganho mecânico nas três proporções de agregado graúdo: 100% de brita 4,75/12,5 mm, 80/20% e 60/40%. De modo geral, o acréscimo de agregado graúdo com maior

granulometria também resultou em aumento de resistência mecânica. As maiores resistências à compressão axial e diametral foram obtidas pelos traços B80A e B60A, traços com 5% de areia em sua composição. No ensaio de tração na flexão, principal item de aceitação do pavimento permeável segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), os traços que se destacaram foram B60 e B80A.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios mecânicos e coeficiente de variação

Traço	Ensaio				
	Compressão Axial (MPa)	Compressão Diametral (MPa)	Tração na flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Perda por abrasão (%)
REF	7,72	1,24	2,19	22,74	47,5
BA	8,64	1,46	2,77	22,66	43,1
B80	6,88	0,95	2,07	21,39	48,3
B80A	15,50	2,01	3,07	22,58	27,5
B60	11,24	1,76	3,05	25,86	33,1
B60A	16,09	2,43	2,85	25,08	34,6

Fonte: Autor.

Os traços com 60% de brita 4,75/12,5 mm e 40% de brita 9,5/25 mm apresentam módulos de elasticidade superiores aos demais, o que indica maior rigidez do material. Além disso, o módulo de elasticidade é um parâmetro indireto do índice de vazios do concreto permeável (DELATTE et al., 2009; TENNIS et al., 2004; NEITHLATH et al., 2003), visto que o equipamento faz a leitura do tempo em que a onda ultrassônica leva para percorrer o corpo de prova e a quantidade de vazios interfere neste tempo. A menor perda por abrasão foi obtida pelo traço B80A, seguido dos traços com 60% de brita 4,75/12,5 mm. Deseja-se obter um material com baixa perda por abrasão para que não ocorra problema de desgaste superficial com o uso e, neste aspecto, a mistura de agregado graúdo mostrou-se mais adequado.

#### 4.1.3. Propriedades hidráulicas

Observa-se que os resultados obtidos pelo ensaio de carga variável são inferiores aos obtidos pelo permeâmetro de carga constante (Tabela 4.4), porém, ambos demonstram a mesma tendência: redução da permeabilidade com a adição de 5% de areia em todas as misturas. Isto ocorre pelo fato de a areia compor, juntamente com o cimento, uma pasta que preenche em parte os poros do concreto. Ainda, nota-se a mesma tendência de redução de condutividade hidráulica quando a brita 4,75/12,5 mm é substituída parcialmente pela brita 9,5/25 mm. O maior empacotamento da estrutura, já esperada pelas curvas granulométricas,

diminui a capacidade de percolação d'água. Em relação ao valor de referência mínimo estabelecido pela norma NBR 16416 (ABNT, 2015), todos os seis traços ficaram acima de  $0,1 \text{ cm.s}^{-1}$  e com certa margem para eventual redução de permeabilidade em campo, seja pela variação da energia de compactação (KIA et al., 2017a; BATEZINI E BALBO, 2015; HOLTZ et al., 2011) ou processo de colmatação dos poros (KIA et al., 2017b; MARCHIONI et al., 2014).

Tabela 4.4 – Índice de vazios, massa específica e permeabilidade dos traços estudados

Traço	Índice de Vazios (%)	$\rho^*$ ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	Ensaio de carga variável		Ensaio de carga constante	
			Média ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	CV** (%)	Média ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	CV (%)
REF	29,05	1,59	1,022	6,987	1,302	4,335
BA	26,05	1,64	0,928	9,414	1,270	10,224
B80	27,34	1,60	1,014	4,297	1,239	3,524
B80A	24,41	1,66	0,648	5,013	0,966	5,869
B60	25,81	1,68	0,770	9,477	1,104	8,498
B60A	23,33	1,70	0,681	3,177	0,993	4,646

\* Massa específica no estado seco

\*\* Coeficiente de variação

Fonte: Autor.

É importante lembrar que a condutividade hidráulica é diretamente ligada ao índice de vazios do material, uma vez que quanto maior a porosidade, maior será a sua condutividade hidráulica. Neste contexto, o método de compactação interfere na interconectividade dos poros do concreto permeável e conseqüentemente nos resultados mecânicos e hidráulicos (HOLTZ et al., 2011). Os índices de vazios ficaram de acordo com a recomendação da norma ACI 522R (2010) e as massas específicas dos traços ficaram de acordo com o valor mínimo exigido pela norma NBR 16416 (ABNT, 2015).

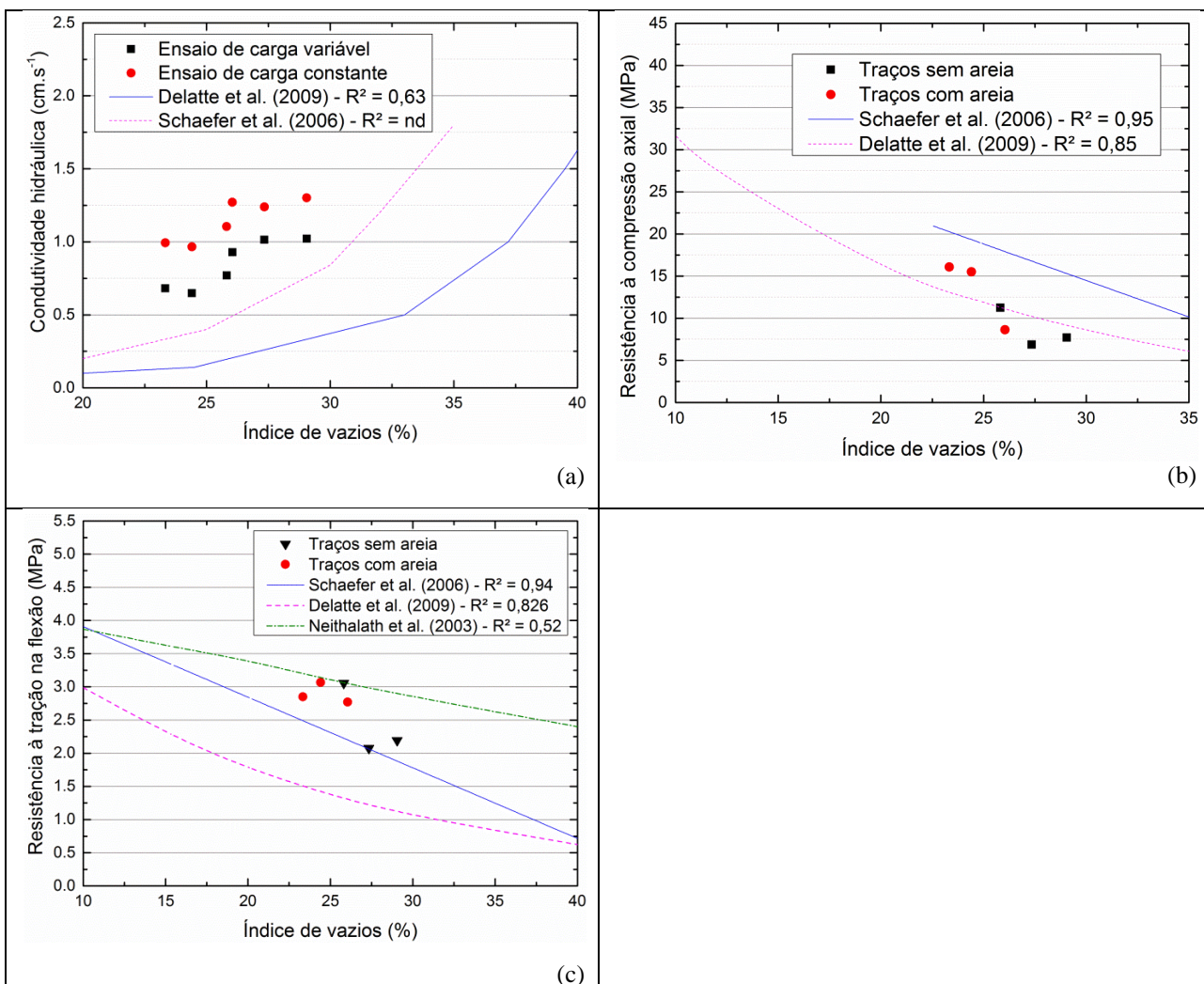
O índice de vazios foi inferior nas misturas que compunham areia e, analisando os pares de misturas de mesma proporção de britas: REF/BA; B80/B80A e B60/B60A, observa-se que a adição de 5% de areia gerou redução aproximada de 3% nos índices de vazios. Constata-se a mesma tendência de redução na substituição da brita 4,75/12,5 mm por brita 9,5/25 mm. Ao substituir uma parte da brita de menor dimensão por outra de maior, houve um melhor empacotamento da estrutura final e, conseqüentemente, redução da quantidade de vazios.

#### 4.1.4. Influência do índice de vazios nas características hidráulicas e mecânicas

Na Figura 4.3a é apresentada a variação das condutividades hidráulicas em função da variação do índice de vazios, em comparação aos resultados de Delatte et al. (2009) e Schaefer et al. (2006) que realizaram ensaios com permeâmetro de carga variável. Nota-se que os valores de condutividade hidráulica obtidos pelo ensaio de carga variável ficaram próximos aos obtidos por Schaefer et al. (2006), embora haja diferença dos materiais, relação água/cimento e método de compactação utilizados.

O índice de vazios também está ligado às características mecânicas, como resistência à compressão axial (Figura 4.3b) e resistência à tração na flexão (Figura 4.3c), sendo os resultados desse trabalho coerentes com o apresentado por outros autores (DELATTE et al., 2009; SCHAEFER et al., 2006; NEITHALATH et al., 2003).

Figura 4.3 – Relação entre o índice de vazios e a) condutividade hidráulica pelos ensaios de carga variável e constante; b) resistência à compressão axial; c) resistência à tração na flexão.



Fonte: Autor.

Observa-se que a redução das resistências conforme aumento dos vazios do concreto é considerável e, diante destas variáveis, é preferível a adoção de misturas com menores índices de vazios em contraste com os requerimentos hidráulicos.

#### 4.1.5. Durabilidade ao ciclo gelo-degelo

Os resultados de índice de vazios das duas moldagens estão apresentados na Tabela 4.5. Os índices de vazios das amostras utilizadas na ciclagem gelo-degelo tiveram uma variação de até 2% em relação aos calculados na primeira moldagem, o que pode ser justificado pela variação da umidade relativa e temperatura nos dias de moldagem e dificuldade de reproduzir o processo de compactação com a mesma intensidade.

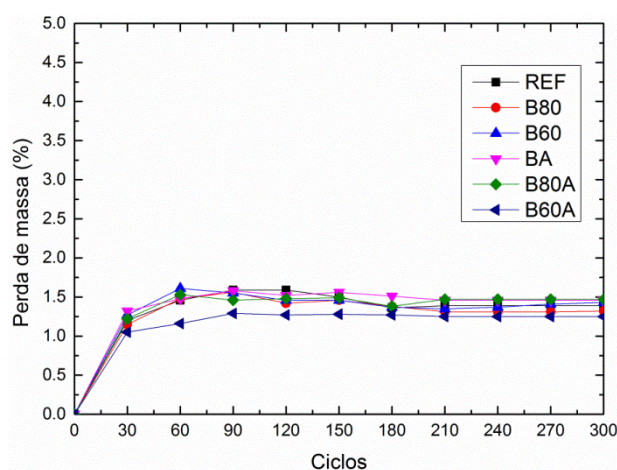
Tabela 4.5 – Índice de vazios dos CP's destinados ao ensaio de congelamento comparado com a 1ª moldagem

Traço	Índice de vazios (%)	
	1ª moldagem	2ª moldagem
REF	29,05	27,30
BA	26,05	24,90
B80	27,34	26,13
B80A	24,41	25,47
B60	25,81	26,34
B60A	23,33	25,80

Fonte: Autor.

A perda de massa de cada traço foi calculada pela média das seis amostras ensaiadas, dada em porcentagem. A Figura 4.4 mostra a variação da perda de massa ao longo dos 300 ciclos.

Figura 4.4 – Perda de massa dos traços pela ciclagem de congelamento

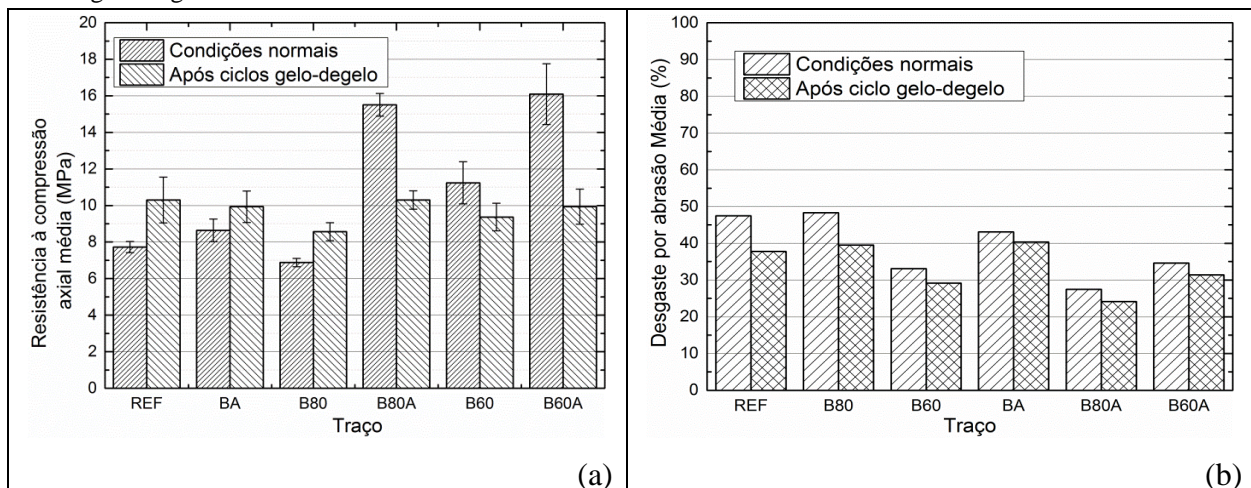


Fonte: Autor.

Todas as misturas apresentam perda de massa inferior ao valor de referência limite pré-estabelecido de 5%. A oscilação da massa após os 60 ciclos pode ser explicada pela variação de umidade dos corpos de prova, influenciada pela umidade relativa do ar nos dias de pesagem. O principal período de perda de massa foi nos primeiros 30 ciclos, quando os CP's estavam na idade inicial (entre 07 e 28 dias). Com o ganho gradual de resistência mecânica, intrínseco ao processo de hidratação do cimento, a consistência da estrutura pôde ser mantida diante variação de temperatura.

A Figura 4.5 apresenta a resistência à compressão axial e desgaste por abrasão dos CP's em condições normais e CP's que passaram pelos 300 ciclos de variação de temperatura. Em uma primeira análise, observa-se que houve alteração significativa apenas na resistência à compressão axial dos traços B80A e B60A.

Figura 4.5 – Resultados de a) compressão axial e b) desgaste por abrasão dos CP's em condições normais e após ciclos gelo-degelo



Fonte: Autor.

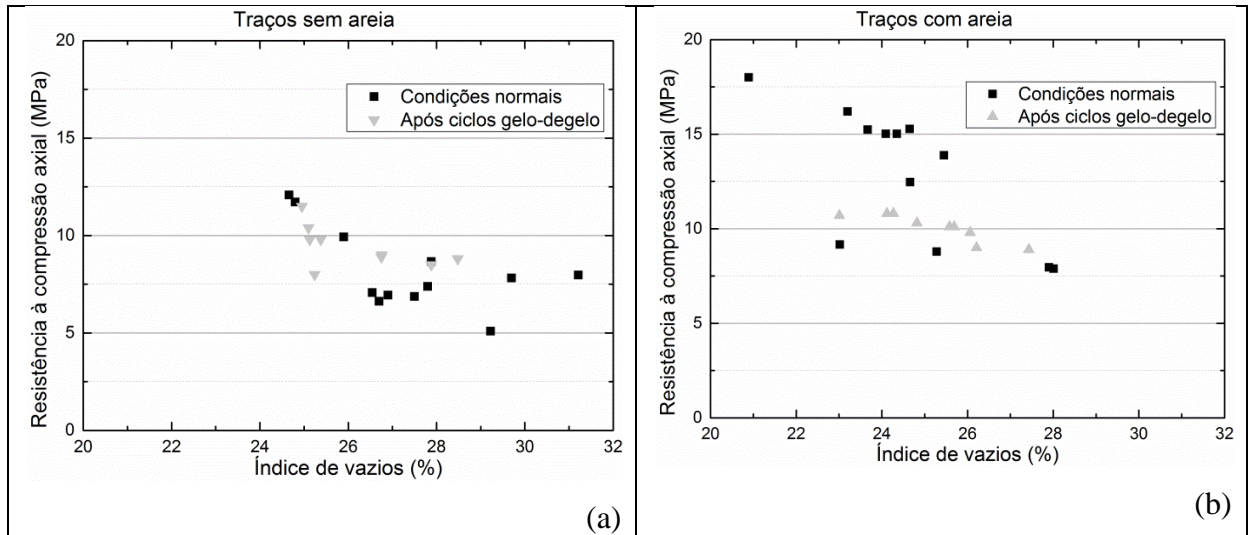
Como os corpos-de-prova que receberam ciclagem gelo-degelo foram moldados em dia diferente dos corpos-de-prova que permaneceram em condições normais, decidiu-se verificar os resultados mecânicos conforme índice de vazios. Ao separar os traços que possuem areia dos que não possuem, constatou-se uma redução na resistência à compressão axial dos traços que a compunham após a aplicação do ciclo gelo-degelo, conforme Figura 4.6.

É possível que a argamassa em maior quantidade criada pela areia tenha sido afetada pela variação de temperatura repetitiva e as misturas com menos argamassa manteve suas



ligações ou, ao menos, não demonstraram os efeitos da variação de temperatura nos resultados de resistência à compressão axial.

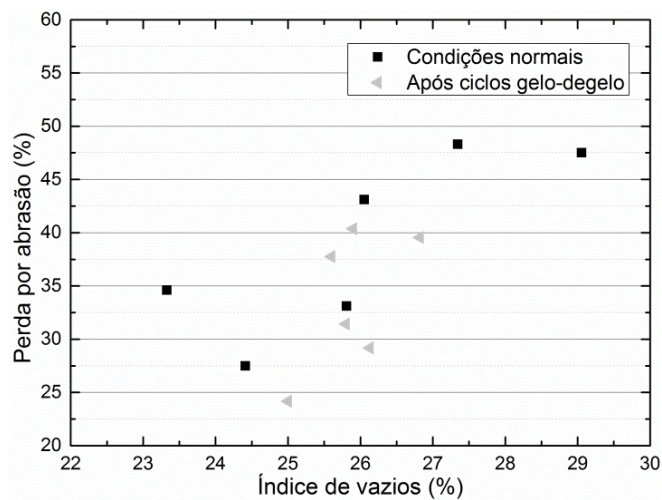
Figura 4.6 – Compressão axial de CP's a) sem areia e b) com areia, em condições normais e após ciclos gelo-degelo



Fonte: Autor.

A Figura 4.7 mostra a perda por abrasão dos CP's em condições normais e após ciclos de gelo-degelo conforme o índice de vazios. Não foi possível constatar diferença entre os corpos-de-prova com e sem os efeitos da variação de temperatura.

Figura 4.7 – Perda por abrasão dos CP's em condições normais e após ciclos em relação ao índice de vazios



Fonte: Autor.

#### 4.1.6. Escolha do traço

A escolha do traço para posterior implantação em campo parte da observação de que o índice de vazios deve ser menor para garantir melhores índices mecânicos. Deve-se atentar para as exigências da norma NBR 16416 (ABNT, 2015) com relação à permeabilidade ( $0,1 \text{ cm.s}^{-1}$ ), massa específica seca aparente ( $1600 \pm 80 \text{ kg.m}^{-3}$ ) e resistência à tração na flexão (2,0 MPa) para concretos moldados no local. Apesar da norma não mencionar, a resistência à abrasão é uma característica importante para a pavimentação e deve ser considerada. A Tabela 4.6 mostra os principais resultados dos concretos investigados. Os dois melhores resultados em cada ensaio estão destacados.

Tabela 4.6 – Composição de resultados para definição do traço a ser utilizado em campo

Traço	Índice de vazios (%)	Permeabilidade (carga variável) ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	Compressão axial (MPa)	Tração na flexão (MPa)	Massa esp. Seca ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Perda por abrasão (%)	Perda por congelamento (%)
REF	29.05	<b>1.02</b>	7.72	2.19	1593.95	0.475	1.39
B80	27.34	<b>1.01</b>	6.88	2.07	1604.49	0.483	<b>1.31</b>
B60	25.81	0.77	11.24	<b>3.05</b>	<b>1684.83</b>	<b>0.331</b>	1.43
BA	26.05	0.93	8.64	2.77	1639.94	0.431	1.46
B80A	<b>24.41</b>	0.65	<b>15.50</b>	<b>3.07</b>	1659.83	<b>0.275</b>	1.47
B60A	<b>23.33</b>	0.68	<b>16.09</b>	2.85	<b>1703.36</b>	0.346	<b>1.25</b>

Fonte: Autor.

Em uma verificação simples, os traços B80A e B60A contêm quatro resultados em destaque cada. Dada a importância da resistência à abrasão e tração na flexão para a durabilidade e suporte dos esforços solicitantes oriundos do uso do pavimento, destaca-se o traço B80A. A permeabilidade também é fator fundamental visto a função pretendida, felizmente, todos os traços apresentam uma folga quando comparados ao valor exigido por norma. A durabilidade ao ciclo gelo-degelo aparece de forma semelhante para todas as misturas, não sendo possível destacar um único traço. Desta forma, optou-se por utilizar o traço B80A nas etapas subsequentes.

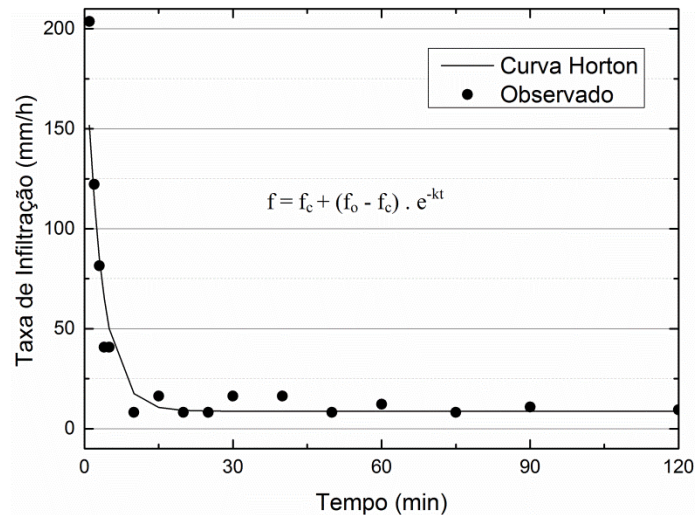
## 4.2. RESULTADOS DA ETAPA 2 - MÓDULOS EXPERIMENTAIS PARA ANÁLISE DA COLMATAÇÃO

### 4.2.1. Análise prévia – solo local

Por meio do ajuste da taxa de infiltração ( $f$ ) da curva Horton, obteve-se a taxa de infiltração do solo saturado ( $f_c$ ) de  $8,75 \text{ mm.h}^{-1}$ , com saturação em 15 minutos (Figura 4.8). O

valor da constante de decaimento ajustada  $k$  foi 0,31 e a taxa de infiltração inicial ( $f_0$ ) 203,65  $\text{mm.h}^{-1}$ .

Figura 4.8 – Ajuste pela curva Horton da infiltração do solo dos módulos



Fonte: Autor.

#### 4.2.2. Dimensionamento dos elementos dos módulos

Conforme descrito na metodologia, foi realizado apenas o dimensionamento hidráulico/hidrológico pelo método da curva envelope, descrito no Anexo B. Após ensaio de infiltração do solo, a taxa de infiltração adotada foi de  $q_s = 8,75 \text{ mm.h}^{-1}$ . Aplicando-se um coeficiente de segurança de 1,5 (WOODS-BALLARD et al., 2015), o valor utilizado nos cálculos foi de  $q_s = 5,83 \text{ mm.h}^{-1}$ . Obteve-se o volume de armazenamento máximo  $V_{\text{máx}} = 48,74 \text{ mm}$ . Considerando um índice de vazios mínimo de  $\eta = 32\%$  do agregado que será utilizado na base granular, obteve-se uma altura  $H = 152,32 \text{ mm}$ . O maior tempo de esvaziamento calculado foi de  $t_{\text{esv}} = 26 \text{ h}$ , valor adequado conforme recomendações da literatura (WOODS-BALLARD et al, 2015; EISENBERG, 2015; PDDU, 2005). Decidiu-se executar uma camada de 20 cm de agregado na camada de base granular para aumentar a margem de segurança. Além disso, especificou-se a espessura mínima do concreto permeável de 10 cm e uma camada de areia de 5 cm para o assentamento dos pavimentos revestidos com blocos (ABNT, 2015).

No dimensionamento das calhas por meio do método racional, a maior vazão obtida foi do módulo com intertravado convencional,  $Q = 0,013 \text{ l.s}^{-1}$ . Constatou-se que tubos de 20 mm seriam suficientes para transferir a água escoada por cada módulo de  $1 \text{ m}^2$  até as caixas

de armazenamento. No entanto, como as calhas devem ser serradas lateralmente, foi especificado diâmetro de 75 mm para receber a água escoada.

As caixas de armazenamento foram dimensionadas pelo produto da vazão calculada e tempo de duração da chuva de projeto (60 minutos) (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Dimensionamento das caixas de armazenamento dos módulos experimentais

Revestimento	Vazão de escoamento (l.s <sup>-1</sup> )	volume necessário (l)
Bloco intertravado	0,013	45,90
Concreto permeável	0,002	5,90
Bloco intertravado permeável	0,002	5,90

Fonte: Autor.

#### 4.2.3. Índice de vazios do concreto permeável

Os índices de vazios dos dois módulos revestidos com o concreto permeável escolhido em laboratório (B80A) foram determinados após o período de monitoramento, no entanto, faz-se necessário apresentá-los antes dos resultados. O módulo C.P.S. apresentou índice de vazios igual a 30,41% e o módulo C.P.C. teve índice de vazios de 38,55%. Estes valores foram superiores aos obtidos em laboratório, variação causada, provavelmente, pela diferença de método de compactação entre laboratório (golpes com haste e mesa vibratória) e campo (apenas golpes com haste).

A seguir são apresentados os resultados dos dois métodos de monitoramento: pelo ensaio de infiltração (item 4.2.4.1) e pelo desempenho hidrológico (item 4.2.4.2).

#### 4.2.4. Monitoramento dos módulos

Conforme mencionado no item 3.2.1, o monitoramento compreende o ensaio de permeabilidade pelo método da norma NBR 16416:2015 e a análise do desempenho hidrológico dos pavimentos pela comparação dos volumes precipitados e escoados superficialmente.

##### 4.2.4.1. Ensaio de infiltração dos módulos

Os resultados de infiltração pelo método da norma NBR 16416 (ABNT, 2015) realizados nos quatro períodos pré-estabelecidos (ao longo de 12 meses, após limpeza 1, colmatação acelerada, após limpeza 2) são mostrados na Tabela 4.8. Os módulos I.P.S., I.C.S.

e C.P.S. receberam o material arenoso na colmatação acelerada e os módulos I.P.C., I.C.C. e C.P.C. receberam material argiloso na colmatação acelerada.

Tabela 4.8 – Taxa de infiltração dos módulos experimentais

Módulo	K médio (cm.s <sup>-1</sup> )					
	Novo	6 meses	12 meses	Limpeza 1	Colmatação acelerada	Limpeza 2
I.P.S.	0,024	0,020	0,014	0,024	0,004	0,015
I.P.C.	0,030	0,014	0,008	0,025	0,001	0,003
I.C.S.	0,013	0,009	0,003	0,004	0,001	0,002
I.C.C.	0,012	0,008	0,003	0,006	0,001	0,001
C.P.S.	0,184	0,090	0,040	0,070	0,002	0,021
C.P.C.	0,202	0,160	0,152	0,155	0,067	0,080

Fonte: Autor.

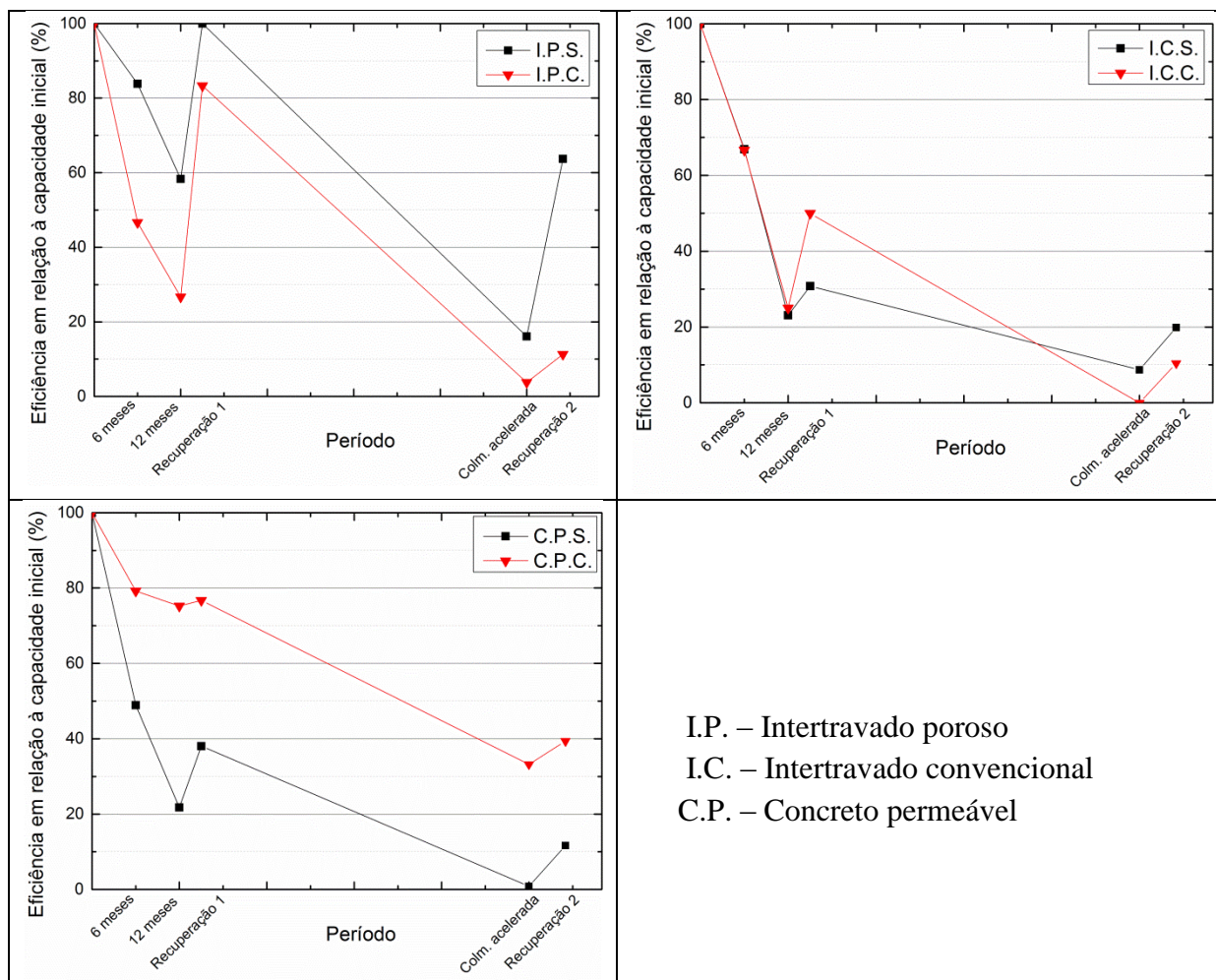
Na condição de recém-construído, os coeficientes de permeabilidade dos pavimentos intertravados ficaram abaixo do mínimo estabelecido pela norma (0,1 cm.s<sup>-1</sup>), já os módulos revestidos com concreto permeável tiveram coeficientes de permeabilidade iniciais de 0,184 cm.s<sup>-1</sup> e 0,202 cm.s<sup>-1</sup>. Em laboratório, a permeabilidade deste concreto permeável (B80A) foi superior, no valor de 0,648 cm.s<sup>-1</sup> através do ensaio de carga variável e 0,966 cm.s<sup>-1</sup> no ensaio de carga constante. No entanto, a permeabilidade do sistema pavimento permeável é dependente de todas as camadas, como descrito por Kia et al. (2017a). A brita, que compõe a base granular do sistema, é um material com coeficiente de permeabilidade alto. Entre a camada de revestimento e agregado foi posto manta geotêxtil com a função de filtrar a água que percola o sistema. Esta camada é responsável pela redução considerável da permeabilidade.

Ao longo dos primeiros 12 meses, todos os módulos apresentaram redução da capacidade de infiltração. Ao fim do período inicial de 12 meses, os módulos com intertravado comum (I.C.) e os módulos I.P.C. e C.P.S. apresentaram coeficientes de permeabilidade abaixo de 30% dos valores apresentados inicialmente, o que demonstra grande redução nas primeiras idades, mesmo sem tráfego de veículos sobre os pavimentos. Note-se que o módulo de concreto permeável C.P.S. teve uma redução mais acentuada que o módulo C.P.C. de mesmo revestimento enquanto que os outros pares tiveram desempenho semelhante entre si.

A primeira limpeza pelo método de aspersão de água sob pressão, realizada após os 12 meses, foi bastante eficiente nos módulos com intertravado permeável (I.P.). A capacidade de infiltração de ambos módulos foi próxima aos seus valores em estado de novo.

A simulação de 10 anos de colmatação (colmatação acelerada) causou redução média de 90% da capacidade de infiltração dos módulos (Figura 4.9), em conformidade com a porcentagem descrita por Marchioni e Silva (2010). Na colmatação acelerada, a argila causou maior redução da capacidade de infiltração nos pavimentos com blocos intertravados (I.P.C. e I.C.C.) do que a areia (I.P.S. e I.C.S.).

Figura 4.9 – Redução da capacidade de infiltração dos módulos em relação à condição inicial



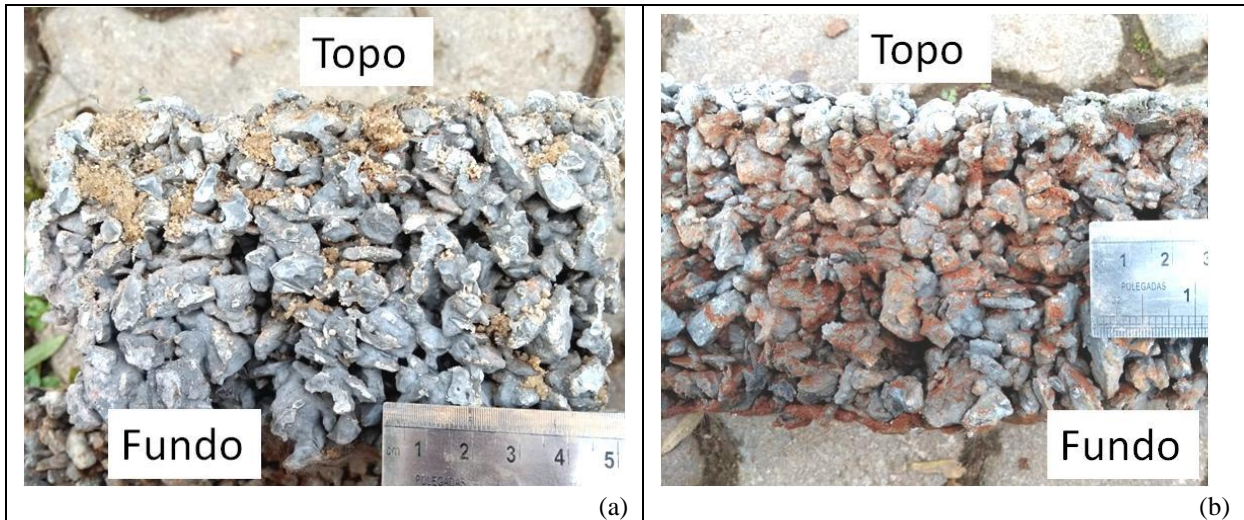
Fonte: Autor.

Observou-se que a areia e a argila preencheram totalmente as frestas entre os blocos, mas a argila foi capaz de colmatar mais internamente o bloco intertravado permeável. Já nos pavimentos com concreto permeável, a argila colmatou a camada inferior do concreto e a areia colmatou a camada superior, dado a granulometria dos dois tipos de material (Figura 4.10) (idem ao apresentado por Kia et al., 2017a, Tong, 2011 e Mata, 2008). Durante o ensaio de infiltração, observou-se que a areia limitou a percolação da água na superfície do módulo C.P.S. No módulo C.P.C. a água percolou em diferentes direções dentro da estrutura do

concreto, inclusive lateralmente. Deste modo, o ensaio de infiltração não se mostrou definitivo na representação da eficiência dos pavimentos.

A segunda limpeza foi feita 3 meses após a colmatação acelerada e, embora tenha ocorrido a recuperação da infiltração, a eficiência foi muito inferior à obtida após a 1ª limpeza.

Figura 4.10 – Distribuição da a) areia e da b) argila em corte lateral do concreto permeável.



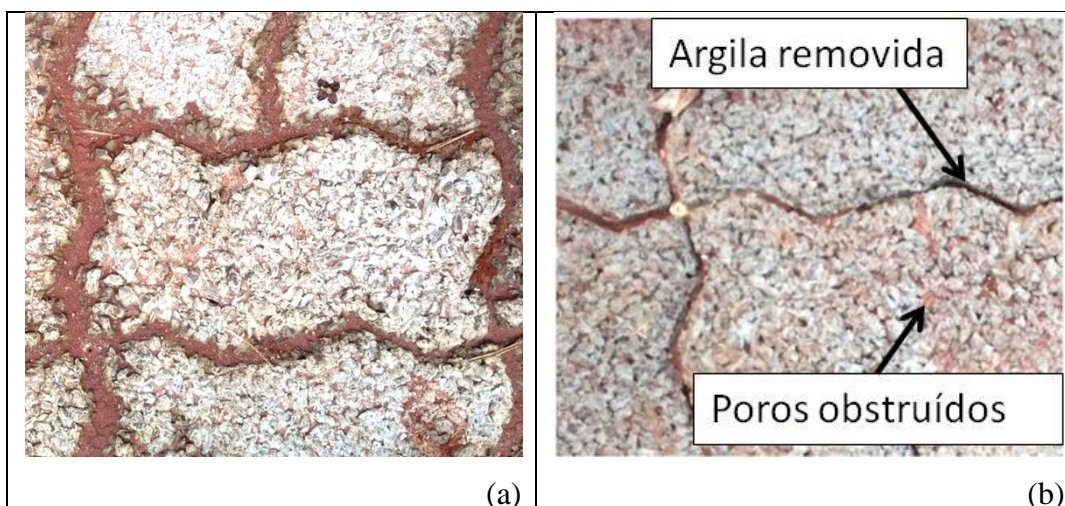
Fonte: Autor.

Com a limpeza 2, o pavimento I.P.S. (colmatado com areia) teve a melhor recuperação entre os seis módulos. Sua capacidade de infiltração final foi de 63% da capacidade inicial. O módulo I.P.C. tinha uma eficiência de 3,77% da capacidade inicial quando foi colmatado com argila e passou para apenas 11,31% após a limpeza 2. Os módulos com intertravado comum (I.C.) tiveram uma recuperação semelhante e continuaram com a mesma característica: o módulo colmatado com areia teve melhores resultados que o módulo colmatado com argila. Já com o concreto permeável (C.P.), a recuperação do módulo colmatado com areia foi maior que a recuperação do módulo colmatado com argila, apesar da taxa de infiltração do módulo com argila (C.P.C.) ter sido maior que do módulo com areia (C.P.S.) antes e depois da limpeza.

Durante os dois processos de recuperação dos pavimentos, observou-se que o jato de água sob pressão retirava com mais facilidade os sedimentos entre os blocos intertravados e não era capaz de ascender e retirar os sedimentos inseridos no concreto permeável, tanto da placa (C.P.) quanto dos blocos (I.P.) (Figura 4.11). Devido a granulometria, a areia ficou locada superficialmente no concreto permeável, limitou a capacidade de infiltração dos módulos I.P.S. e C.P.S. após a colmatação acelerada, porém, foi mais facilmente retirada do

pavimento que o material argiloso, conforme já relatado por Kia et al. (2017a) e Kayhanian et al. (2012).

Figura 4.11 – Módulo I.P.C. a) antes e b) depois da segunda limpeza



Fonte: Autor.

#### 4.2.4.2. Desempenho hidrológico dos módulos

##### **Caracterização dos eventos e validação dos dados**

O período de monitoramento que compreende todos os quatro períodos (colmatação natural, pós limpeza 1, colmatação acelerada e pós limpeza 2) foi de 28 de agosto de 2018 a 14 de julho de 2019. Ao todo foram monitorados em forma contínua 51 eventos com volumes de precipitação entre 3,2 mm e 114,0 mm. A distribuição dos eventos conforme período analisado é mostrado na Tabela 4.9. Os dados pluviométricos foram consistidos com a estação automática do INMET mais próxima, obtendo-se uma constante de proporcionalidade de 0,91 e coeficiente de correlação de Pearson de 0,99.

A duração dos eventos variou de 0,5 horas a 56 horas e as intensidades médias variaram de  $0,31 \text{ mm.h}^{-1}$  a  $42 \text{ mm.h}^{-1}$ . Já as intensidades máximas em um intervalo de 5 minutos foram de  $7,2 \text{ mm.h}^{-1}$  a  $84 \text{ mm.h}^{-1}$  e as estimadas em um intervalo de 30 minutos de  $3,6 \text{ mm.h}^{-1}$  a  $44 \text{ mm.h}^{-1}$  respectivamente. Na maioria dos eventos o tempo de retorno (TR) foi menor a 0,4 anos (Figura 4.12) embora o maior TR foi de 5,01 anos (no período de colmatação natural). Esse evento será investigado em maiores detalhes mais a frente.

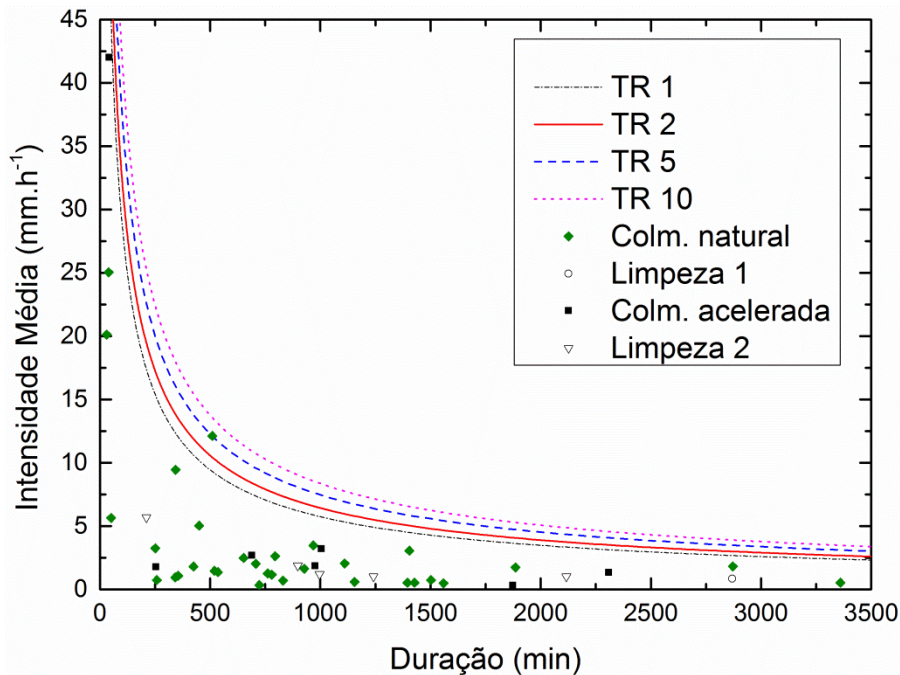


Tabela 4.9 – Eventos monitorados conforme mês e período verificado

Período analisado	Ano	Mês	Eventos registrados	Total precipitado (mm)
Colmatação Natural	2018	Agosto	3	148.4
	2018	Setembro	9	194.8
	2018	Outubro	5	103.4
	2018	Novembro	5	197.8
	2018	Dezembro	5	169.9
	2019	Janeiro	6	163.0
Pós limpeza 1	2019	Fevereiro	1	65.0
Colmatação acelerada	2019	Fevereiro	1	15.0
	2019	Março	4	196.0
	2019	Abril	3	135.4
	2019	Maiο	4	77.8
	2019	Maiο	2	57.0
Pós limpeza 2	2019	Junho	2	40.0
	2019	Julho	1	28.0

Fonte: Autor.

Figura 4.12 – Caracterização dos eventos dos módulos pela IDF de Santa Maria



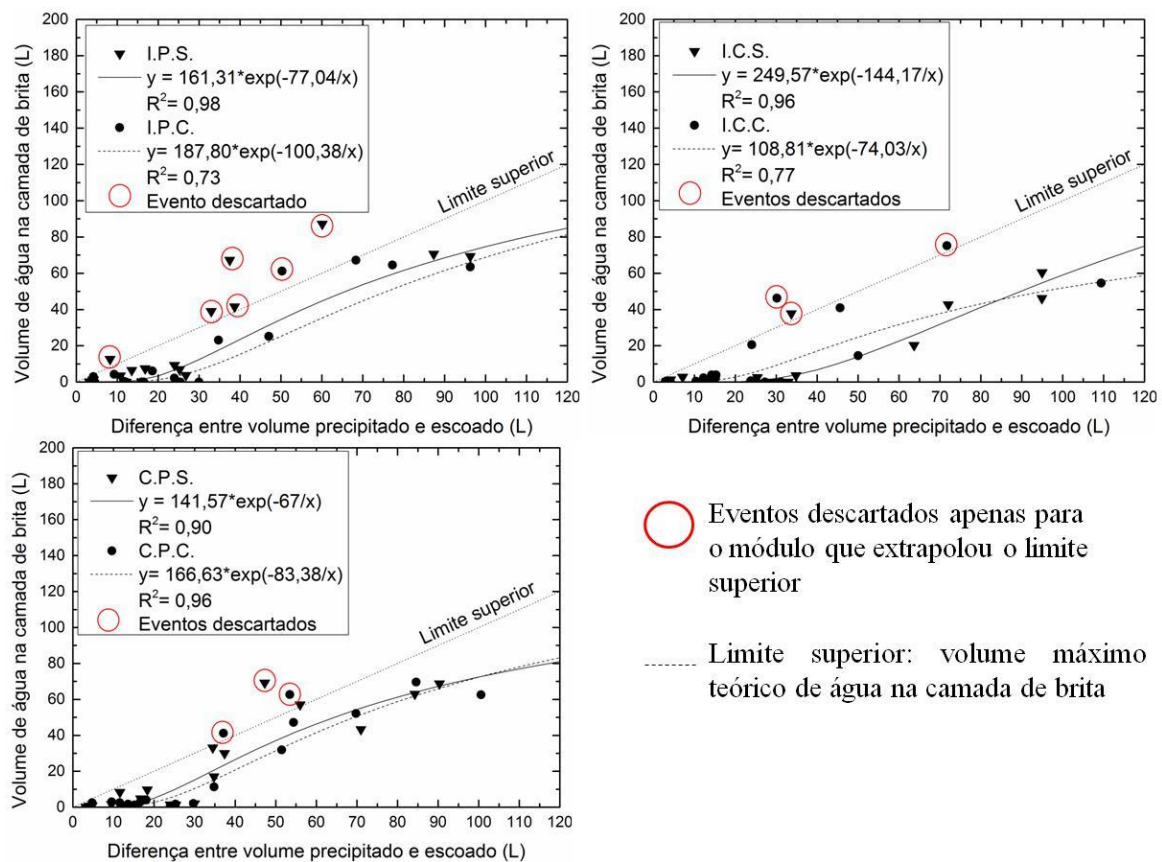
Fonte: Autor.

Os eventos monitorados foram validados pelo volume de água máximo observado na camada de brita pelos sensores ultrassônicos e o volume total escoado para as caixas de armazenamento. Os eventos que extrapolaram a quantidade de água possível na brita de um determinado módulo tiveram alguma influência externa (ingresso de água externa no sistema),

logo, foram descartados para este mesmo módulo. A validação dos seis módulos é apresentada na Figura 4.13. A reta com inclinação de 45° que representa a quantidade de água limite que poderia ter na brita foi chamada de ‘limite superior’. Foram descartados 5 eventos (eventos 9, 11, 13, 20 e 30 em Apêndice B) para o primeiro módulo com intertravado permeável (I.P.S.) e 1 evento (evento 13) para o segundo módulo (I.P.C.); foi descartado 1 evento (evento 13) para o primeiro módulo com intertravado comum (I.C.S.) e 2 eventos (eventos 13 e 25) para o segundo módulo (I.C.C.); e descartado 1 evento (evento 13) para o primeiro módulo de concreto permeável (C.P.S.) e 2 eventos (eventos 13 e 33) para o módulo C.P.C. Todos pertencentes ao período de colmatagem natural.

As linhas de tendência obtidas ao desconsiderar os eventos descartados foram exponenciais com boa correlação. Por balanço hídrico, a distância vertical entre as linhas de tendência e a reta de limite superior é a soma do volume de água absorvido pelo material (revestimento e brita) e o volume de água que infiltrou no solo até o momento de nível máximo.

Figura 4.13 – Validação dos eventos dos módulos

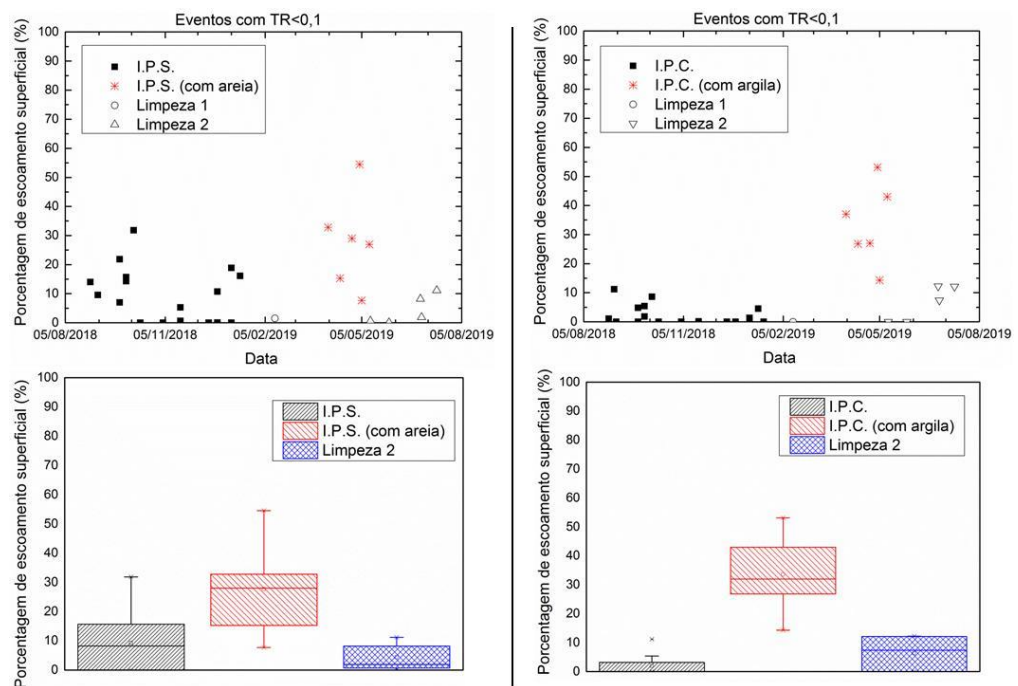


Fonte: Autor.

## Escoamento superficial dos módulos

Para a análise dos dados obtidos pelos sensores e medições manuais que passaram pela validação foi preciso avaliar, primeiramente, se houve variação da eficiência dos pavimentos no período de colmatação natural, que foi o mais extenso. Para isto, fez-se uma verificação cronológica da porcentagem de escoamento superficial ao longo dos períodos de colmatação natural, limpeza 1, colmatação acelerada e limpeza 2. As porcentagens de escoamento superficial dos eventos com tempo de recorrência menor que 0,1 anos foram plotados com a data no eixo das abscissas. Visualmente, não foi constatada nenhuma tendência do escoamento superficial ao longo do período de colmatação natural, então, fez-se uma verificação dos valores obtidos neste período e nos períodos de colmatação acelerada e limpeza 2 para cada módulo por meio de diagrama de caixa (*box plot*), expondo a média, mediana, primeiro quartil, terceiro quartil, mínimo (apenas 1% abaixo deste valor) e máximo (apenas 1% acima deste valor). A Figura 4.14 apresenta o conjunto de dados dos dois módulos com intertravado permeável (I.P.S. e I.P.C.).

Figura 4.14 – Análise cronológica dos eventos com  $TR < 0,1$  anos dos módulos I.P.



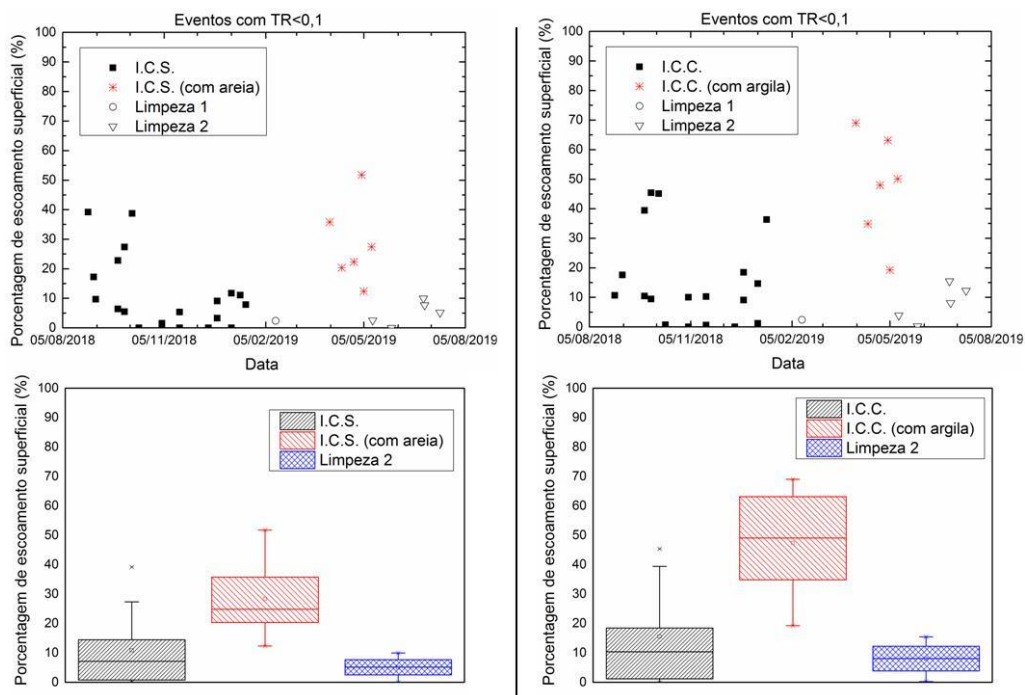
Fonte: Autor.

Nos períodos de colmatação natural e acelerada observa-se uma dispersão maior dos dados no módulo I.P.S. quando comparado ao módulo I.P.C. Antes da colmatação acelerada com areia, o módulo I.P.S. apresentou escoamento superficial entre 0 e 31,8%. Já o módulo I.P.C. apresentou valor máximo de 11,21%. Após o processo de colmatação acelerada, o

módulo I.P.S. apresentou valores mínimo e máximo de 7,7% e 54,5%, respectivamente. Já o módulo I.P.C. apresentou valor mínimo de 14,3% e valor máximo de 53,1%. Visualmente, o dano à permeabilidade do pavimento revestido com intertravado permeável causado pela areia foi igual a argila. Após a limpeza 2, o pavimento I.P.S. apresentou escoamento superficial variando de 0% a 11,1% e o pavimento I.P.C. apresentou valores de 0% a 12,3%. Ou seja, a recuperação dos dois pavimentos foi semelhante.

A Figura 4.15 apresenta o conjunto de dados dos dois módulos com intertravado comum (I.C.S. e I.C.C.). O comportamento dos dois módulos no período de colmatção natural foi semelhante, sem expor um aumento progressivo do escoamento superficial, ou seja, a eficiência dos módulos permaneceu constante. Neste período, os resultados foram semelhantes aos encontrados por Jabur et al. (2015) e superiores aos de Collins et al. (2008). Com o processo de colmatção acelerada, a argila foi mais prejudicial à capacidade de infiltração que a areia, em concordância com o encontrado no ensaio de infiltração. O escoamento superficial do módulo com argila (I.C.C.) variou de 19,2% a 69,0%, já o módulo com areia (I.C.S.) teve escoamento superficial mínimo de 12,3% e máximo de 51,8%. Após executar a limpeza 2, os dois módulos apresentaram boa recuperação.

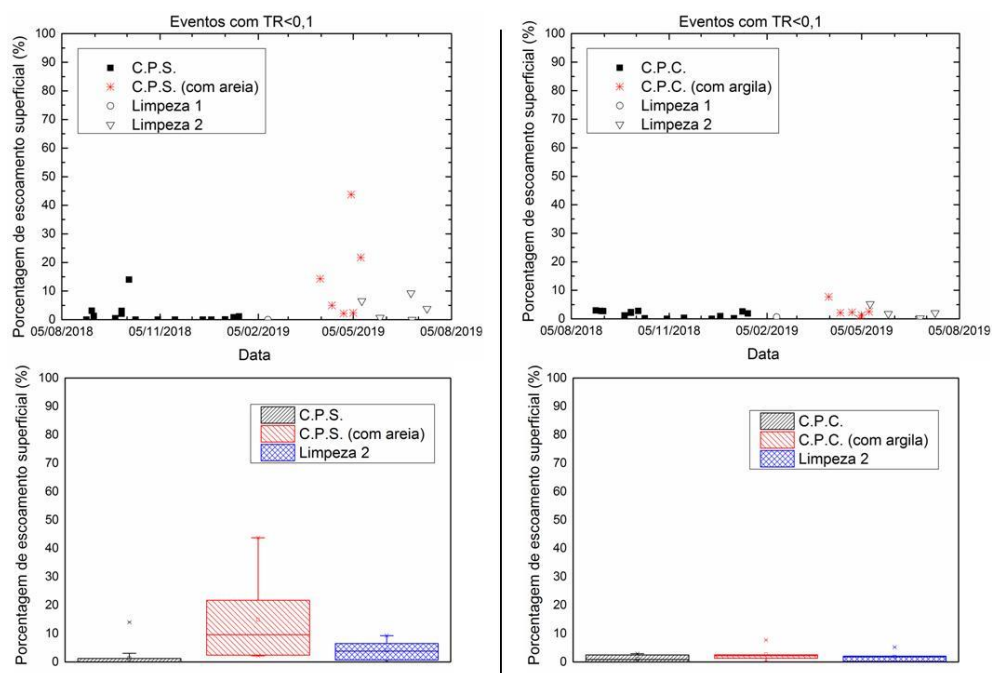
Figura 4.15 – Análise cronológica dos eventos com TR<0,1 anos dos módulos I.C.



Fonte: Autor.

A Figura 4.16 apresenta o conjunto de dados dos dois módulos com concreto permeável (C.P.S. e C.P.C.). Os dois módulos apresentaram resultados semelhantes ao encontrado por Collins et al. (2008) no período anterior à colmatção acelerada.

Figura 4.16 – Análise cronológica dos eventos com TR<0,1 anos dos módulos C.P.



Fonte: Autor.

O módulo C.P.S. apresentou variabilidade dos dados após ser colmatado com areia. O escoamento superficial mínimo do módulo C.P.S. com areia foi de 2,2% e o máximo foi de 43,7%. A recuperação do módulo com a limpeza foi eficiente, pois reduziu o escoamento para valores entre 0% e 9,2%. Já o módulo C.P.C. teve pequena variação dos dados, inclusive após a colmatção com argila. Sua eficiência permaneceu inalterada ao longo dos quatro períodos.

Após esta análise inicial, constatou-se que a redução da capacidade de infiltração demonstrada pelo ensaio de infiltração não foi suficiente para alterar o desempenho dos módulos no período de colmatção natural. Já após o processo forçado de colmatção o desempenho caiu consideravelmente, a exceção do módulo C.P.C. O tempo necessário para comprometer a função dos pavimentos permeáveis mostrou-se superior ao esperado (1 ano). Deste modo, os dados do período de colmatção natural foram tratados como de um período sem modificação.

Em uma análise estatística (método Mann-Whitney) dos resultados de escoamento superficial, obtiveram-se os resultados de p-valor conforme Tabela 4.10. Pôde-se constatar que os módulos revestidos com intertravado poroso (I.P.) não apresentaram resultados

estatisticamente semelhantes. Os outros módulos de mesmo revestimento se comportaram em igualdade. Quando colmatados, apenas o módulo C.P.C. manteve o mesmo comportamento, ou seja, manteve o mesmo desempenho após colmatação. Os outros módulos foram afetados pelos sedimentos. Após a limpeza, todos os seis módulos recuperaram o desempenho e foram considerados estatisticamente idênticos aos módulos em condição de novos.

Tabela 4.10 – Análise estatística dos resultados de escoamento superficial

<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>p-valor*</b>	<b>Conclusão</b>
I.P.S.	I.P.C.	0,047	Diferentes
I.P.S.	I.P.S. com areia	0,012	Diferentes
I.P.C.	I.P.C. com argila	0,001	Diferentes
I.P.S.	Limpeza I.P.S.	0,680	Iguais
I.P.C.	Limpeza I.P.C.	0,090	Iguais
I.C.S.	I.C.C.	0,205	Iguais
I.C.S.	I.C.S. com areia	0,009	Diferentes
I.C.C.	I.C.C. com argila	0,002	Diferentes
I.C.S.	Limpeza I.C.S.	0,473	Iguais
I.C.C.	Limpeza I.C.C.	0,479	Iguais
C.P.S.	C.P.C.	0,138	Iguais
C.P.S.	C.P.S. com areia	0,001	Diferentes
C.P.C.	C.P.C. com argila	0,327	Iguais
C.P.S.	Limpeza C.P.S.	0,072	Iguais
C.P.C.	Limpeza C.P.C.	0,784	Iguais

\*  $p \leq 0,05$ : significativamente diferentes

$p > 0,05$ : não são significativamente diferentes

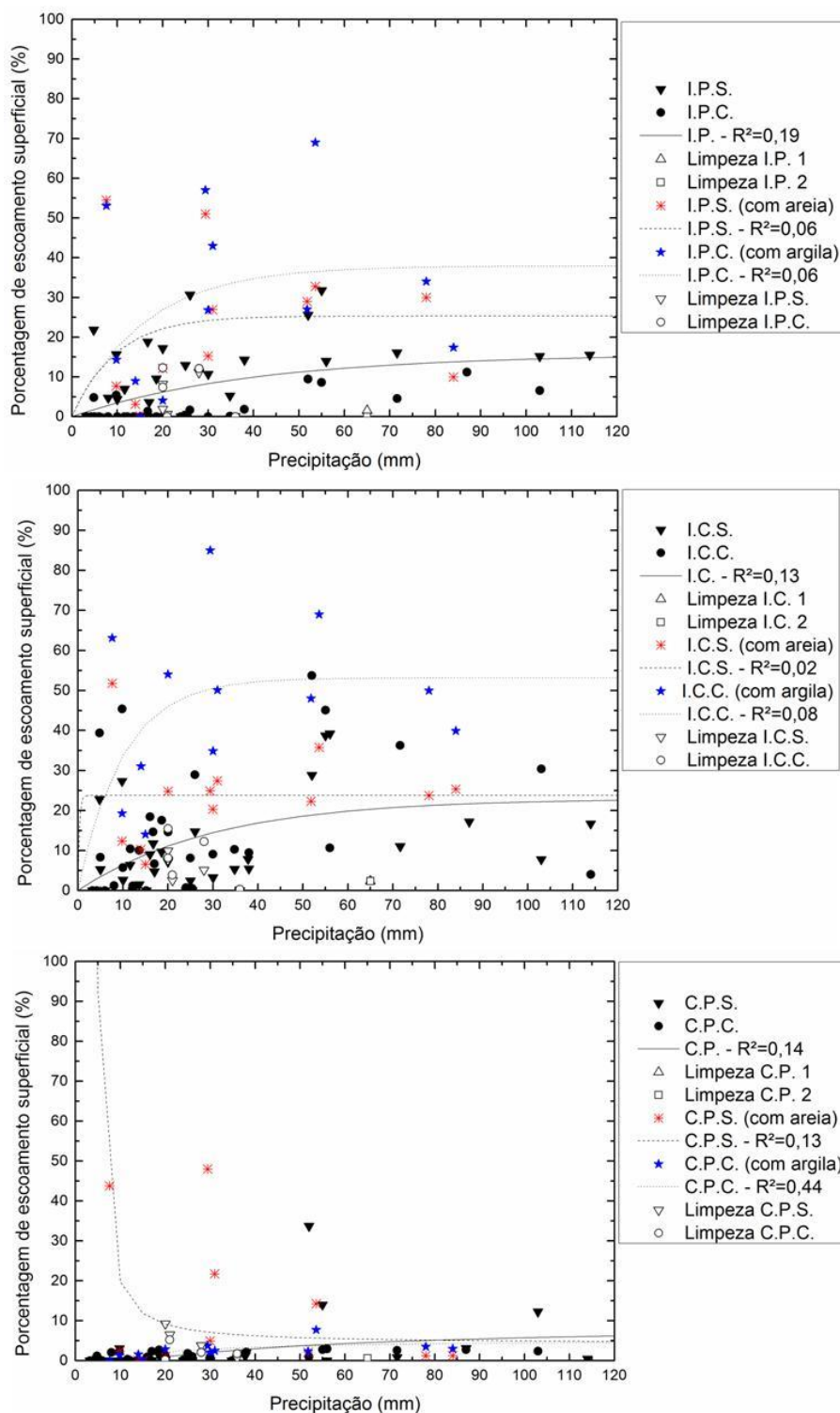
Fonte: Autor.

Algumas correlações foram feitas com os dados dos eventos remanescentes da validação (equações em Apêndice B). O escoamento superficial foi relacionado com precipitação (P) e tempo de retorno (TR), variáveis consideradas mais representativas dos eventos. Os valores apresentados pelos módulos de mesmo revestimento no período de colmatação natural foram tratados com igualdade para se obter uma linha de tendência única. Foram obtidas outras duas linhas de tendência, uma para os dados apresentados pelo módulo colmatado com areia e outra para o módulo colmatado com argila.

A Figura 4.17 apresenta a relação precipitação x escoamento superficial dos módulos nos diferentes períodos. O coeficiente de determinação  $R^2$  foi baixo para todos os módulos, tanto no período de colmatação natural quanto acelerado. Os pavimentos com intertravados

(I.P. e I.C.) tiveram escoamentos semelhantes aos encontrados por Acioli (2005) para precipitações de até 90 mm, apesar de o autor realizar uma correlação linear. Já o pavimento com C.P. teve menores escoamentos superficiais do que o encontrado por Bean et al. (2007a).

Figura 4.17 – Correlação entre precipitação e escoamento superficial dos módulos



Fonte: Autor.

É possível verificar que a colmatação com argila e com areia tiveram efeitos negativos nos pavimentos. Nos módulos revestidos com I.P. não é possível definir qual material causou maiores coeficientes de escoamento. Já nos módulos com I.C. observa-se maior escoamento no módulo com argila (I.C.C.).

A eficiência dos módulos I.C.S. e I.C.C. era semelhante antes da colmatação acelerada, com isto, é plausível definir a argila (partículas de menor dimensão) como o material mais deletério. Nos módulos com C.P., a areia causou quatro pontos de escoamento superficial mais elevado.

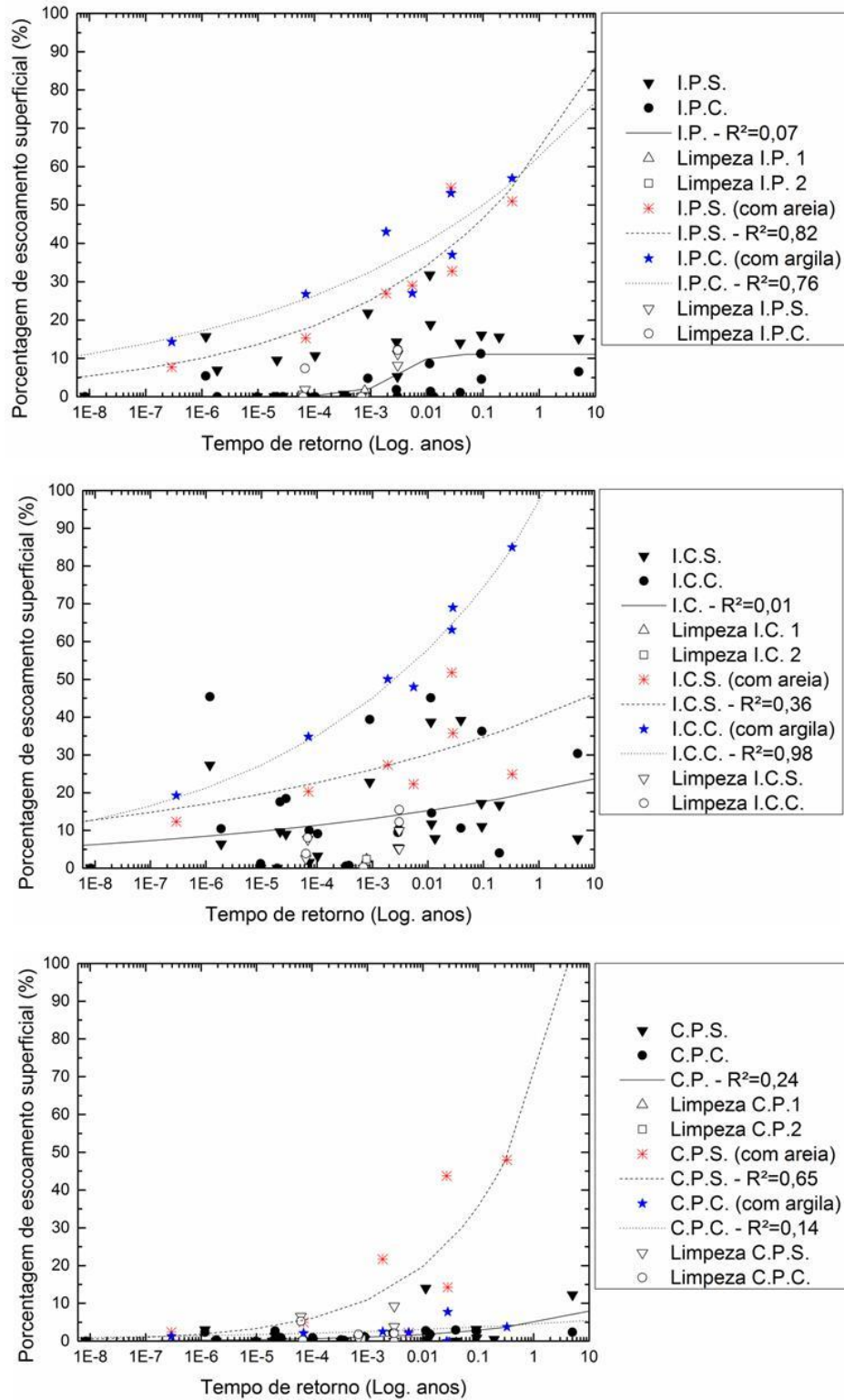
A Figura 4.18 apresenta a relação tempo de retorno x escoamento superficial (escala logarítmica). Os três revestimentos tiveram baixa correlação antes da colmatação acelerada e após a colmatação os módulos com areia e argila tiveram de média a boa correlação. Nos módulos com I.P., os sedimentos causaram aumento no escoamento superficial conforme tempo de retorno. Após a limpeza dos módulos I.P.S. e I.P.C., as porcentagens de escoamento superficial foram menores novamente, próximos aos valores pré-colmatação.

A colmatação com argila danificou com maior intensidade o módulo composto por intertravado comum em comparação à areia. O coeficiente de determinação do módulo I.C.C. com argila foi de 0,98 e, ao observar a extrapolação da sua linha de tendência, o escoamento superficial atinge 100% para um evento de  $TR = 1,5$  ano. Esta extrapolação indica que a argila pode causar completa ineficiência do pavimento revestido com intertravado comum como um sistema de pavimento permeável. No entanto, a limpeza após a colmatação foi efetiva para ambos os módulos, com aparente recuperação total dos módulos I.P.S. e I.P.C.

Nos módulos compostos por C.P. a areia mostra-se como o material mais agressivo, diferentemente do encontrado por Tong (2011) e Mata (2008), pois se deposita superficialmente e limita a passagem da água pluvial. Já a argila colmata uma camada mais interna, permitindo que a água fique retida na estrutura do concreto permeável e penetre com o tempo.



Figura 4.18 – Correlação entre tempo de retorno e escoamento superficial dos módulos



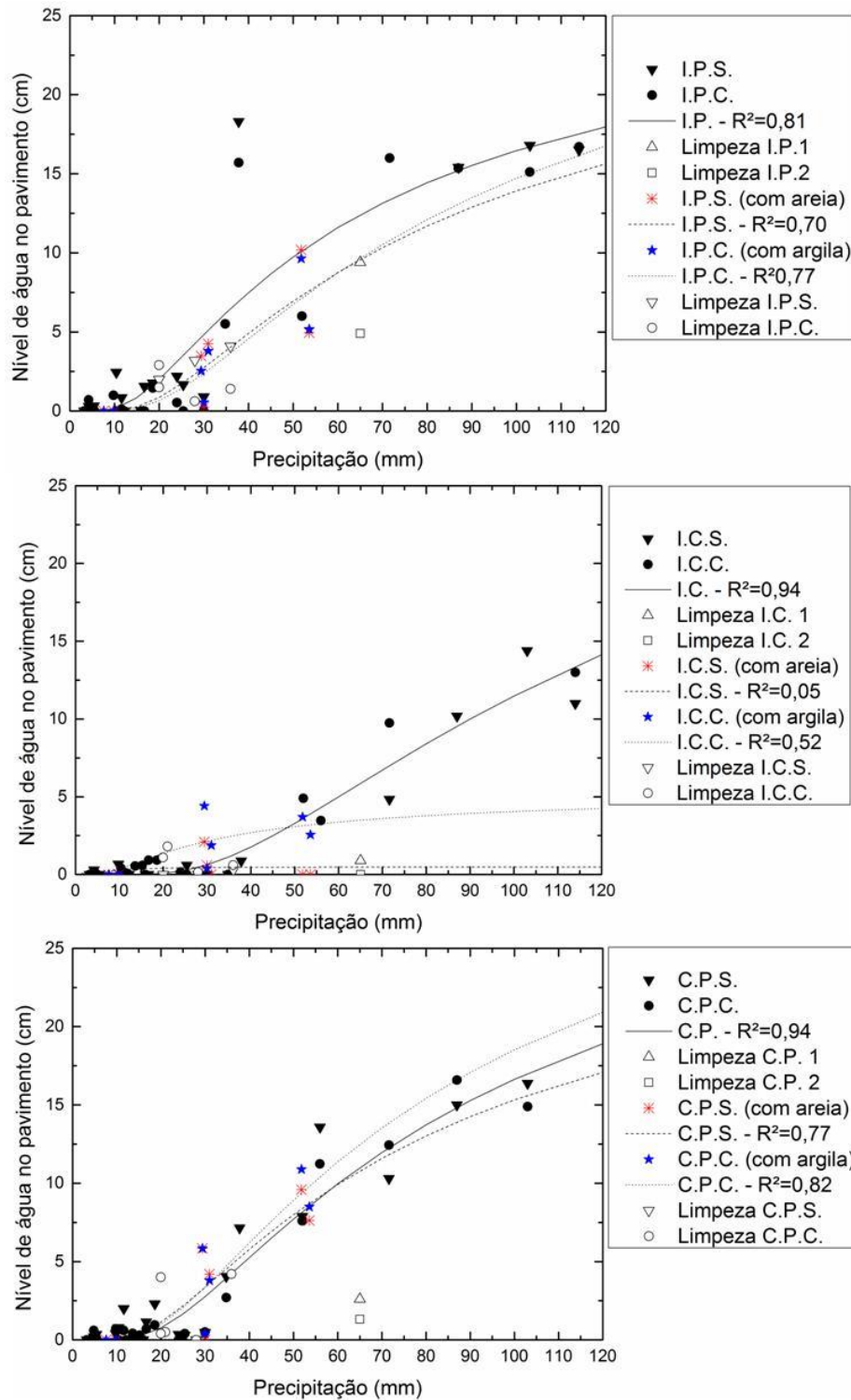
Fonte: Autor.

### **Nível de água nos módulos**

O nível de água máximo (N) no interior de cada módulo medido pelos sensores foi relacionado com as mesmas variáveis representativas dos eventos: precipitação (P) e tempo de retorno (TR). A Figura 4.19 mostra a relação nível versus precipitação dos seis módulos ao longo dos períodos. A exceção do módulo I.C. com areia (I.C.S.), os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) ficaram bons e representaram adequadamente os pontos plotados conforme período. Os níveis de água nos 6 módulos antes da colmatção acelerada tiveram comportamento semelhante, com o início do armazenamento após 15 mm de chuva e níveis de 15 cm a 20 cm com uma chuva de 120 mm. Os módulos de intertravado comum tiveram níveis menores em relação aos outros revestimentos, o que era esperado pela taxa de infiltração inferior.

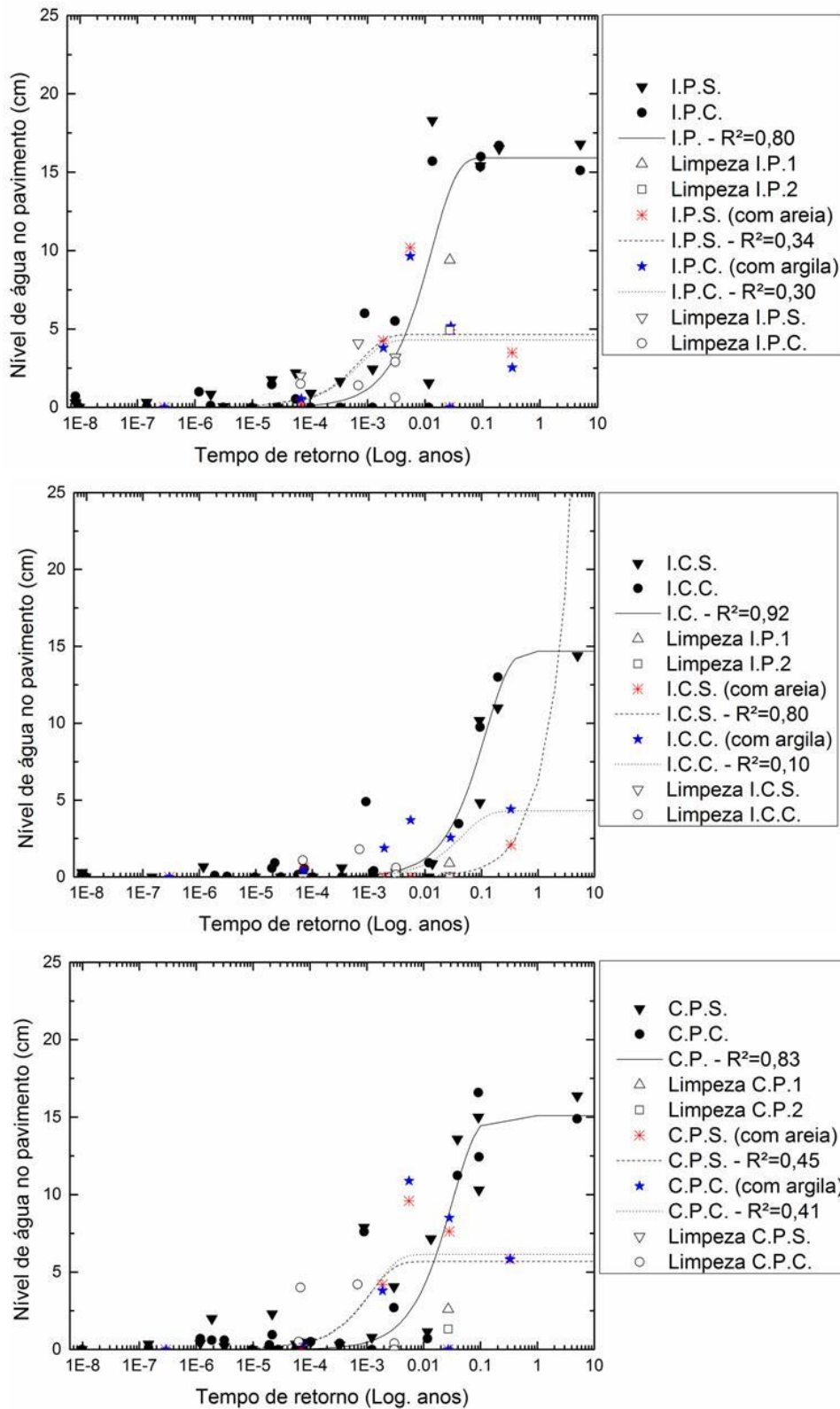
Após o processo de colmatção com areia e argila, os módulos mantiveram o comportamento, apesar das linhas de tendência dos módulos I.P. e I.C. colmatados indicarem menores níveis d'água. Isso é constatado quando se relaciona tempo de retorno (TR) com os níveis máximos (N) (Figura 4.20). Os pontos plotados após colmatção sobrepõem os pontos do período de colmatção natural. Se considerarmos que a falha hidráulica/hidrológica do pavimento é o enchimento total de água em seu interior, neste caso, 20 centímetros da camada de agregado graúdo, seria preciso um evento extremo de no mínimo 120 mm de precipitação e tempo de retorno de, ao menos, 10 anos para ocorrer a falha.

Figura 4.19 – Correlação entre precipitação e nível máximo dos módulos



Fonte: Autor.

Figura 4.20 – Correlação entre tempo de retorno e nível máximo dos módulos



Fonte: Autor.

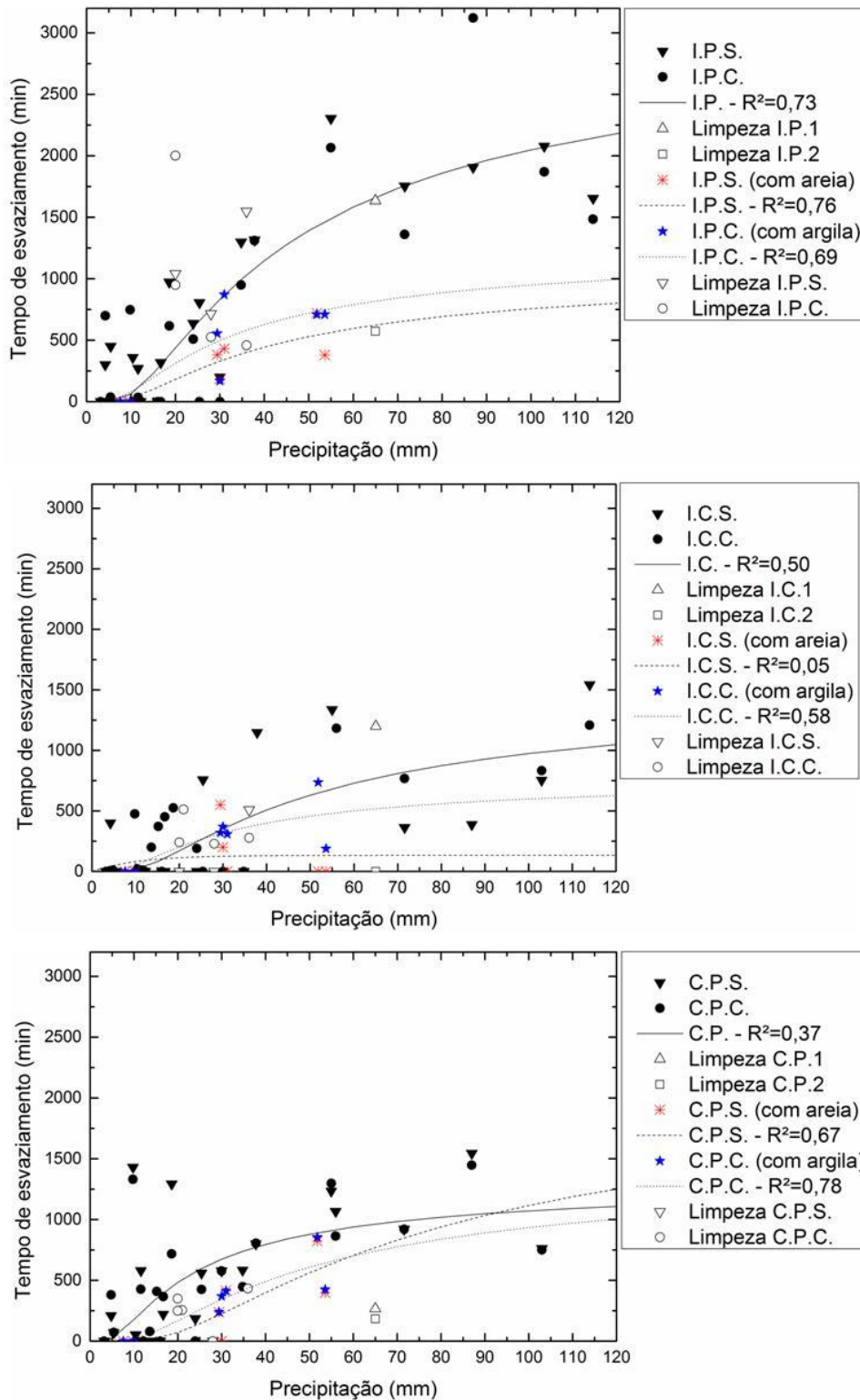
### **Tempo de esvaziamento dos módulos**

O tempo que a água fica armazenada no pavimento é outro aspecto determinante para a eficiência do pavimento. Ocorre a falha quando não há capacidade de reter a precipitação de um novo evento por conta do armazenamento da água de um evento precedente. Foram registrados os tempos entre início de leitura de nível e o momento do esvaziamento total, quando a leitura retornou a zero. O tempo de esvaziamento máximo de referência é de 32 horas (1920 minutos), calculado no dimensionamento.

A Figura 4.21 apresenta a relação entre precipitação e o tempo de esvaziamento, com as linhas de tendência dos módulos antes da colmatação acelerada e após a colmatação com areia e argila. O tempo de esvaziamento dos módulos com intertravado permeável (I.P.) foram superiores aos outros módulos. Isto pode ter sido causado pela variação da permeabilidade do solo local. Seria preciso uma precipitação de 90 mm para atingir o tempo de esvaziamento máximo recomendado. Nos pavimentos com I.C. e C.P. os tempos de esvaziamento ficaram abaixo de 1500 min (25 horas). Todos tiveram o mesmo comportamento exponencial observado em Acioli (2005), no entanto, tempos de esvaziamento inferiores por causa da diferença de permeabilidade de solo.

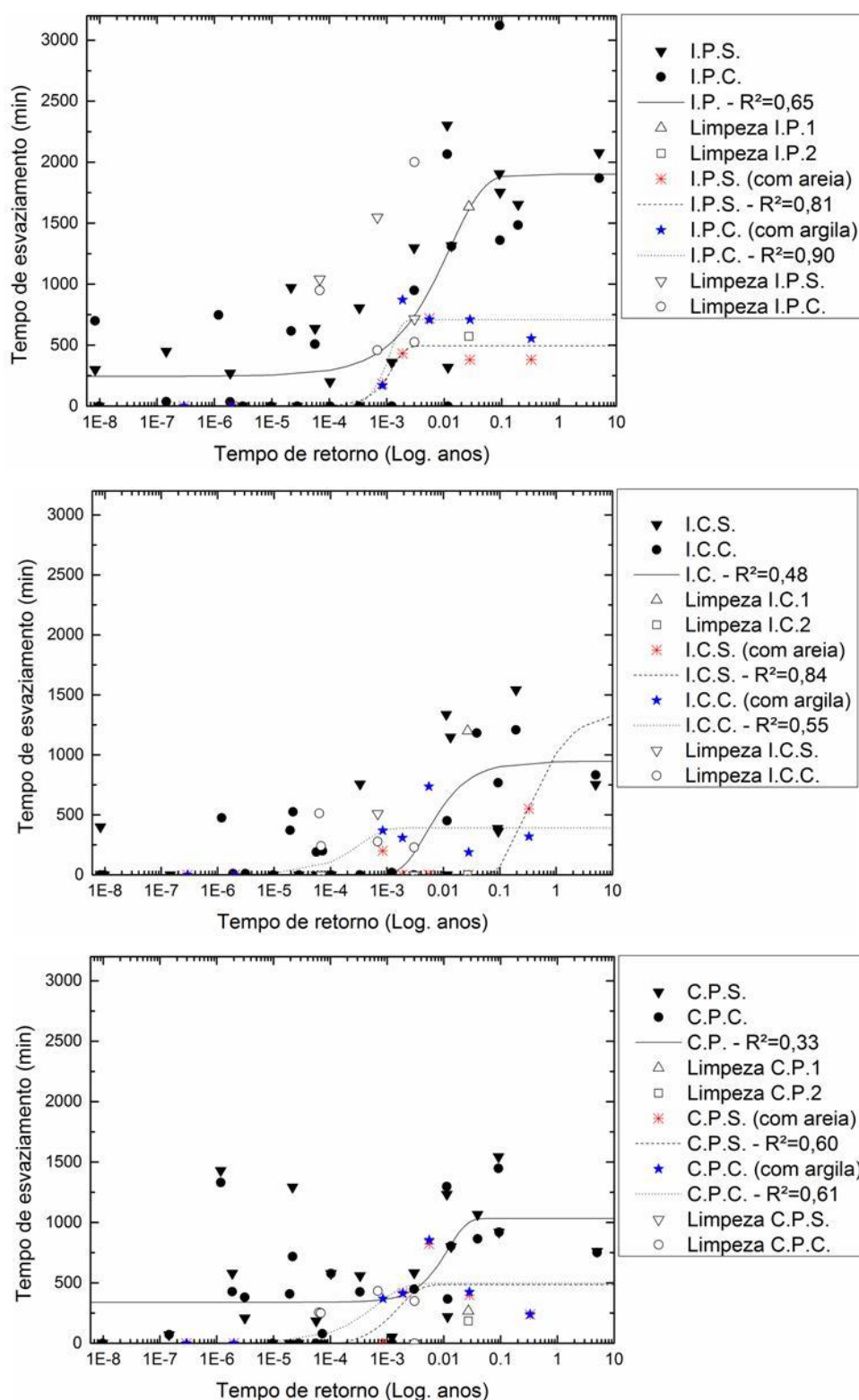
Na Figura 4.22 é apresentada a relação entre o tempo de retorno e esvaziamento. Os coeficientes de determinação  $R^2$  ficaram de regulares a bons e suas linhas de tendência mostram que a colmatação do solo pode reduzir o tempo de esvaziamento por conta da redução da infiltração de água no sistema. Havia a possibilidade do sedimento inserido e/ou o sedimento presente da brita acumular na manta geotêxtil em contato com o solo, desta forma, reduzir a capacidade de infiltração no solo e aumentar o tempo de esvaziamento. Este problema não se confirmou, assegurando a importância da manta geotêxtil abaixo da camada de brita.

Figura 4.21 – Correlação entre precipitação e tempo de esvaziamento dos módulos



Fonte: Autor.

Figura 4.22 – Correlação entre tempo de retorno e tempo de esvaziamento dos módulos



Fonte: Autor

### Infiltração dos sistemas permeáveis para diferentes condições do solo

Fez-se a classificação do solo quanto a sua umidade antecedente de cada evento conforme método SCS (1971) e, a partir dos dados de nível d'água no interior dos módulos,

obteve-se a taxa de infiltração média do solo após o fim da precipitação. Não houve variação significativa na taxa de infiltração nos diferentes módulos, então foi feito o cálculo de um valor médio para o solo local sem distinção de revestimento. A Tabela 4.11 reúne os principais dados de infiltração no solo dos eventos que apresentaram condição de saturação do solo UAS I ao lado da duração e intensidade média de cada evento. A taxa de infiltração média do solo variou de 2,1 mm.h<sup>-1</sup> a 22,3 mm.h<sup>-1</sup>, para intensidade média de precipitação de 0,35 mm.h<sup>-1</sup> e 25,05 mm.h<sup>-1</sup>, respectivamente. Algumas das maiores taxas de infiltração ocorreram em eventos curtos com menos de 1 hora de duração. Observa-se que a infiltração média do solo não foi claramente afetada pelo processo de colmatção acelerada realizado no revestimento. Talvez com um processo longo de colmatção natural ocorra o acúmulo de sedimentos na manta geotêxtil em contato com o solo e reduza a taxa de infiltração. O valor médio da infiltração do solo para os eventos com a condição UAS I foi de 9,24 mm.h<sup>-1</sup>, bastante próximo à taxa de infiltração do solo saturado (8,75 mm.h<sup>-1</sup> com saturação em 15 minutos) obtido previamente no ensaio com anéis concêntricos.

Tabela 4.11 – Infiltração do solo para a condição UAS I

Período	Duração (h)	Intensidade média (mm.h <sup>-1</sup> )	Infiltração média do solo (mm.h <sup>-1</sup> )
Colmatção natural	16,1	3,47	14,6
	5,7	0,95	4,0
	19,2	0,60	4,30
	10,9	2,48	13,0
	18,5	2,05	5,0
	31,4	1,75	5,6
	11,8	2,04	10,0
	13,0	1,17	11,0
	15,4	1,64	6,5
	5,7	9,45	13,5
	12,0	0,35	2,1
	56,0	0,54	8,1
	0,7	25,05	22,3
Colmatção acelerada	16,7	3,20	12,5
	16,3	1,84	9,3
	38,5	1,35	7,6
	0,7	42,00	19,1
	11,5	2,70	9,6
Limpeza 1 e 2	47,8	0,84	7,3
	3,5	5,69	3,3
	15,0	1,87	5,2

Fonte: Autor.



A seguir são apresentadas as taxas de infiltração para os eventos com o solo em condição UAS II (Tabela 4.12). Não houve registro dos sensores no único evento UAS II do período de colmatação acelerada (evento 38). A infiltração do solo mostrou-se mais elevada para esta condição de umidade do solo, com média dos quatro eventos de  $12,93 \text{ mm.h}^{-1}$ , contrário ao que era esperado.

Tabela 4.12 – Infiltração do solo para a condição UAS II

Período	Duração (h)	Intensidade média ( $\text{mm.h}^{-1}$ )	Infiltração média do solo ( $\text{mm.h}^{-1}$ )
Colmatação natural	4,2	3,25	16,00
	0,5	20,13	16,00
	23,4	3,06	15,50
Limpeza 2	16,6	1,20	4,22

Fonte: Autor.

Na Tabela 4.13 os resultados são referente à condição do solo UAS III. São seis eventos e, da mesma forma que para a condição UAS II, não foi possível registrar dados durante a colmatação acelerada. A infiltração no solo variou de  $2,86 \text{ mm.h}^{-1}$  a  $20,68 \text{ mm.h}^{-1}$ , teve média de  $9,32 \text{ mm.h}^{-1}$  nos seis eventos, valor próximo ao verificado na condição UAS I.

Tabela 4.13 – Infiltração do solo para a condição UAS III

Período	Duração (h)	Intensidade média ( $\text{mm.h}^{-1}$ )	Infiltração média do solo ( $\text{mm.h}^{-1}$ )
Colmatação natural	25,0	0,74	11,41
	13,8	0,71	2,86
	13,2	2,63	6,74
	8,5	12,12	20,68
	7,5	5,04	8,70
Limpeza 2	35,3	1,02	5,52

Fonte: Autor.

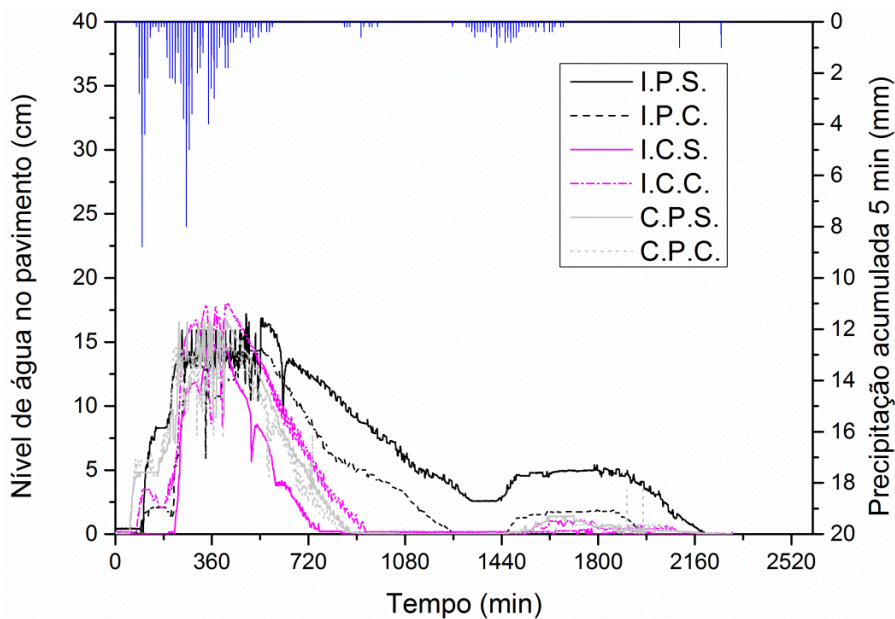
Não foi possível concluir que há alguma alteração na infiltração do solo com alteração na condição de umidade antecedente do solo. O ensaio feito com anéis concêntricos antes da construção dos módulos mostrou que a saturação deste solo ocorre em aproximadamente 15 minutos, então, após este tempo com água no interior do pavimento a infiltração ocorre a uma taxa constante. Na etapa de dimensionamento foi aplicado um coeficiente de segurança de 1,5 sobre o valor da taxa de infiltração do solo no estado saturado ( $8,75 \text{ mm.h}^{-1}$ ), que resultou em um valor de  $5,83 \text{ mm.h}^{-1}$ . Verifica-se que a adoção de um coeficiente de segurança é necessário para o dimensionamento e, conseqüentemente, bom funcionamento do sistema permeável. Outra questão importante foi constatar que a presença da manta geotêxtil em

contato com o solo, recomendada pela NBR 16416 (2015), não alterou a infiltração do solo após processo de colmatção natural e acelerada.

### Evento mais intenso nos módulos

O evento mais intenso ocorreu no dia 20 de dezembro de 2018, com precipitação de 103 milímetros durante 8,50 horas. A intensidade média foi de  $12,12 \text{ mm.h}^{-1}$  e gerou um tempo de retorno (TR) de 5,01 anos. A Figura 4.23 mostra que a água nos módulos atingiram níveis máximos entre 14 e 18 centímetros. O módulo I.P.S. apresentou maior quantidade de água no seu interior ao longo de um grande período do evento e seu tempo de esvaziamento foi superior aos demais, de 2078 minutos (34,6 horas). É possível constatar a semelhança na infiltração do solo nos seis módulos durante os períodos de estiagem.

Figura 4.23 – Hidrograma de precipitação e nível de água nos módulos do evento mais intenso



Fonte: Autor.

O escoamento superficial médio dos módulos revestidos com intertravado permeável (I.P.) variou de 6,5% a 15,2% neste evento. Os módulos revestidos com intertravado comum teve um escoamento médio de 7,8% e 30,4%, já os módulos com concreto permeável (C.P.) desenvolvido em laboratório apresentou porcentagem de escoamento superficial de 2,4% e 12,3%. Foram registrados aproximadamente 35 litros de escoamento superficial do módulo I.C.C. Para a precipitação total de 103 mm (103 litros sobre cada pavimento), seria possível ter 68 litros de água no interior deste módulo, no entanto, o nível máximo registrado de 17,9

cm equivale a 75 litros. Devido a esta incoerência, o evento foi descartado para o módulo I.C.C., conforme já mencionado na validação no item 4.2.4.2.

#### 4.3. RESULTADOS DA ETAPA 3 - VAGAS DE ESTACIONAMENTO COM DIFERENTES REVESTIMENTOS PERMEÁVEIS

Como descrito em maiores detalhes no item 3.3, foi construído um estacionamento experimental com quatro tipos de revestimentos no campus da UFSM – Santa Maria para monitoramento e análise do controle da água pluvial. Foram oito vagas com pavimentos permeáveis que ocupam uma área de 105 m<sup>2</sup>, fazendo parte de um estacionamento de 1285 m<sup>2</sup> que não contribuiu com a área drenada nos pavimentos experimentais. Os quatro revestimentos utilizados foram: intertravado de concreto permeável (bloco de 16 lados comercial - IP), intertravado de concreto convencional (bloco de 16 lados comercial - IC), concreto permeável (traço estudado em laboratório usinado- CP) e bloco de pisograma (PG).

Apesar da liberação para tráfego no início de novembro de 2018, as vagas de estacionamento não foram utilizadas pelos motoristas dentro do período de monitoramento que foi até agosto de 2019 em função do atraso na entrega do prédio anexo ao estacionamento. Assim, eventual carregamento de finos aos pavimentos foi consequência da ação do vento, sem efeito dos veículos, da mesma forma que ocorreu nos módulos experimentais. De qualquer forma, os resultados dessa etapa trazem informações do funcionamento de um estacionamento real, construído com a mesma metodologia e equipamentos que estariam disponíveis para pavimentos ao longo da cidade, servindo como teste de escala real.

##### 4.3.1. Análise prévia – solo local

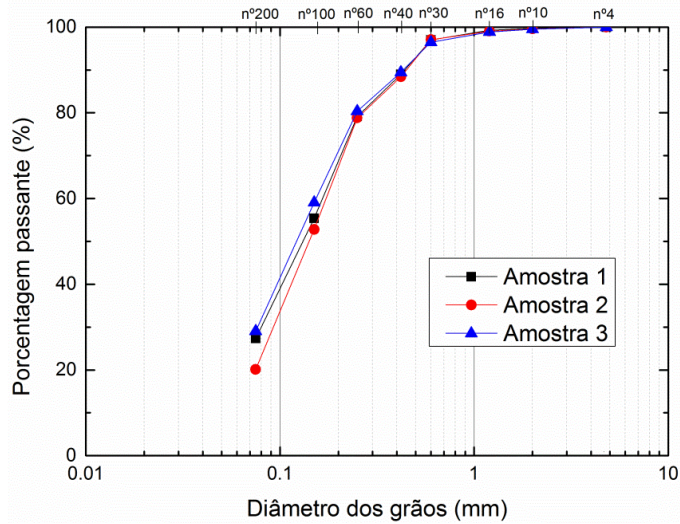
Nesse item são apresentados os resultados da análise do solo local, incluindo a granulometria, índice de suporte Califórnia (CBR); infiltração no solo (anéis concêntricos) e condutividade hidráulica horizontal através do poço invertido.

##### **Granulometria**

O resultado da análise granulométrica das três amostras de solo conforme descrito na metodologia pode ser observado na Figura 4.24. Aproximadamente 20% do material teve granulometria inferior a 0,075 mm, o que corresponde ao material argiloso, embora o solo

tenha majoritariamente granulometria entre 0,075 mm e 0,42 mm, indicando permeabilidade de moderada a baixa.

Figura 4.24 – Curva granulométrica do solo presente na base do estacionamento

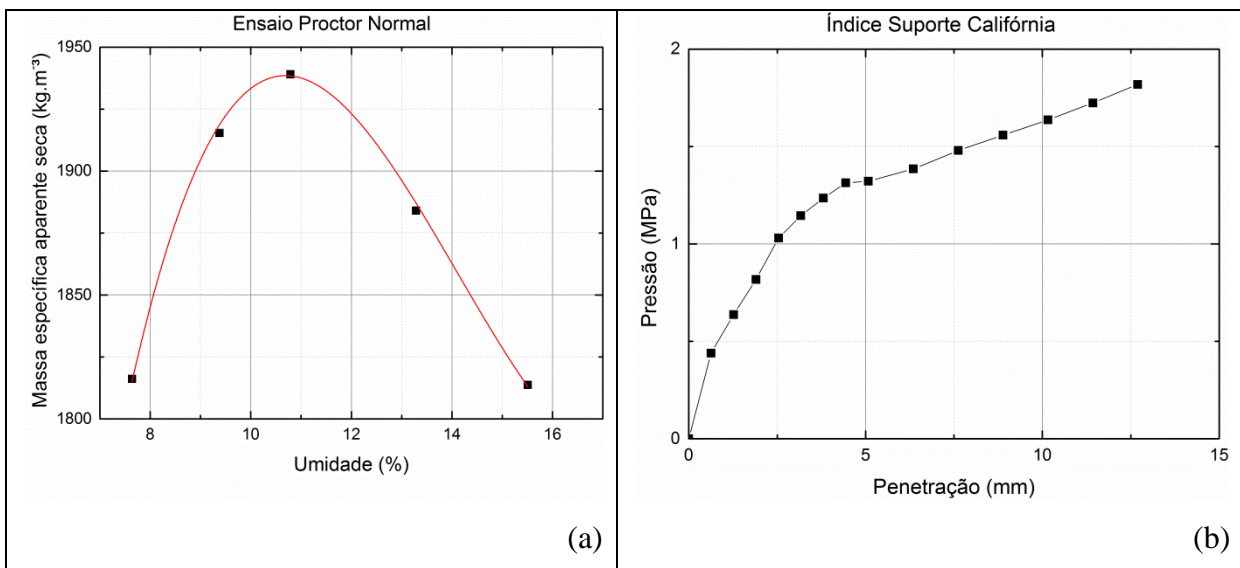


Fonte: Autor.

**Proctor normal com reuso da amostra e Índice de suporte Califórnia (CBR)**

A partir do ensaio Proctor Normal foi determinada a umidade ótima de compactação em 11%, com densidade máxima de 1939 kg.m<sup>-3</sup> (figura 4.25a). Na sequência realizou-se o ensaio CBR, que é primariamente utilizado no dimensionamento mecânico do pavimento, com a amostra na umidade ótima e obteve-se um índice CBR de 15% (Figura 4.25b). Dessa forma, o solo apresenta 15% da resistência à penetração da brita padrão, não havendo problemas de suporte.

Figura 4.25 – Resultado do ensaio de a) Proctor Normal e b) CBR

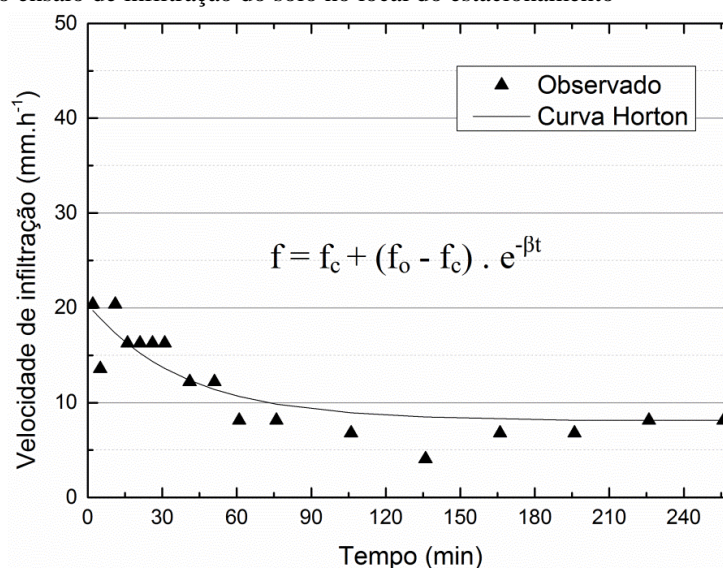


Fonte: Autor.

### Infiltração do solo (anéis concêntricos)

O ensaio foi realizado no dia 06 de julho de 2017 no local escolhido para implantação dos pavimentos permeáveis. A temperatura do ar variou de 14,6°C a 25,2°C e a última precipitação foi de 6,9 mm no dia 30 de junho. O resultado do ensaio de infiltração realizado indicou uma taxa de infiltração do solo saturado ( $f_c$ ) de 8,15 mm.h<sup>-1</sup>, constante de decaimento ajustada  $k$  0,026 min<sup>-1</sup> e a taxa de infiltração inicial ( $f_o$ ) 20,37 mm.h<sup>-1</sup> (Figura 4.26).

Figura 4.26 – Resultado do ensaio de infiltração do solo no local do estacionamento



Fonte: Autor.

Trata-se de uma taxa aceitável que dispensa o uso de dreno na base granular dos pavimentos permeáveis (WOODS-BALLARD et al., 2015; ACIOLI, 2005; TUCCI, 2003; EPA, 1999). No entanto, a taxa de infiltração inicial  $f_o$  (20,37 mm.h<sup>-1</sup>) é baixa, bastante próxima da taxa de infiltração em condição saturada. Dessa forma, na construção, decidiu-se inserir um dreno de 40 mm de diâmetro em cada par de vagas que foram mantidos fechados e poderiam auxiliar, caso necessário, o esvaziamento da camada de agregado dos pavimentos (sistema permeável Tipo B).

### Condutividade hidráulica horizontal: poço invertido

Como mencionado na metodologia, o ensaio pelo método do poço invertido (Tabela 4.14) foi realizado conforme (BARBASSA et al., 2009) em três pontos do estacionamento (Apêndice A – Figura A.3) no dia seguinte ao ensaio de permeabilidade com anéis

concêntricos. Neste dia a temperatura do ar variou de 10,2°C a 25,2°C e não ocorreu precipitação.

Tabela 4.14 – Condutividade hidráulica obtida pelo ensaio de poço invertido

Ponto	Condutividade hidráulica (mm.h <sup>-1</sup> )
PI 1	5,58
PI 2	2,09
PI 3	7,23
<b>Média</b>	<b>4,97</b>

Fonte: Autor.

A permeabilidade do solo na região central do estacionamento foi inferior à permeabilidade das extremidades do estacionamento. O ponto mais próximo às vagas de pavimentos permeáveis apresentou maior permeabilidade, com uma taxa de 7,23 mm.h<sup>-1</sup>, em conformidade com o ensaio de anéis concêntricos. A taxa de infiltração no início do ensaio ( $f_0$ ) do PI3 foi de 23,06 mm.h<sup>-1</sup>, também de acordo com o ensaio de anéis concêntricos. Pelos resultados dos ensaios de infiltração do solo no local das vagas permeáveis, empregou-se a menor taxa de infiltração de  $q_s = 7,23$  mm.h<sup>-1</sup> no dimensionamento hidráulico/hidrológico.

### 4.3.2. Dimensionamento dos elementos do estacionamento

#### 4.3.2.1. Dimensionamento mecânico

Como mencionado na metodologia, foi utilizado o DimPav versão 1.0 (EPUSP, 2018), no dimensionamento da base e revestimentos utilizados no estacionamento.

No dimensionamento para blocos intertravados de concreto – procedimento A, verificou-se espessura mínima de 6,0 cm para a camada de revestimento e 10,0 cm para a camada de base com brita graduada simples. Já no dimensionamento de pavimento de concreto com base granular, foi considerada uma resistência de 7 MPa para o concreto permeável. A simulação com espessura de base igual a 10,0 cm e revestimento de 12,0 cm foi adequada, especificando-se 15,0 cm para a camada de concreto permeável.

#### 4.3.2.2. Dimensionamento hidráulico/hidrológico

O dimensionamento foi realizado conforme método da curva envelope descrito no Anexo B. Aplicando-se um coeficiente de segurança de 1,5 sobre a taxa de infiltração do solo  $q_s = 7,23$  mm.h<sup>-1</sup> obteve-se o valor de  $q_s = 4,82$  mm.h<sup>-1</sup>. O volume de armazenamento máximo

encontrado foi de  $V_{\text{máx}} = 48,74$  mm. Considerando um índice de vazios mínimo de  $\eta = 32\%$  do agregado graúdo, obteve-se uma altura  $H = 157,75$  mm, espessura superior ao exigido pelo dimensionamento mecânico. O maior tempo de esvaziamento calculado foi de  $t_{\text{esv}} = 33$  h.

Após dimensionamento mecânico e hidráulico/hidrológico da base granular, optou-se pela especificação mínima de 16 cm para todos os quatro revestimentos. Essa espessura será maior na região mais alta dos pavimentos (próximo aos reservatórios), pois a base deve ficar nivelada e o revestimento ter caimento.

No dimensionamento das calhas e tubulações, obteve-se a maior vazão do revestimento com blocos de concreto convencional,  $Q = 0,319 \text{ l.s}^{-1}$  (Tabela 4.15). Uma calha de PVC com 75 mm de diâmetro e declividade de 1% suporta uma vazão de  $Q = 0,649 \text{ l.s}^{-1}$ . Especificou-se uma calha de PVC com 100 mm de diâmetro ou equivalente em concreto com capacidade de verter  $Q = 1,399 \text{ l.s}^{-1}$ , considerando a possibilidade de falha pela presença de sedimentos, caimento inadequado etc. O tubo que leva a água pluvial até as caixas de armazenamento por baixo dos pavimentos também deve ter diâmetro de 100 mm.

Tabela 4.15 – Dimensionamento das caixas de armazenamento das vagas de estacionamento

Revestimento	Vazão de escoamento ( $\text{l.s}^{-1}$ )	Volume necessário (l)
Pisograma	0,041	147,10
Bloco intertravado	0,319	1147,38
Concreto permeável	0,041	147,10
Bloco intertravado permeável	0,041	147,10

Fonte: Autor.

### 4.3.3. Índice de vazios do concreto permeável

Após extração de amostras do concreto permeável que reveste as vagas de estacionamento, obteve valor médio do índice de vazios de 9,69% (SANTOS, 2019). Este valor está bastante abaixo do esperado e dos valores de índice de vazios obtidos em laboratório e nos módulos da Etapa 2 (itens 4.1.3 e 4.2.3, respectivamente). Diversos fatores podem ter causado esta variação, como método de compactação, volume de mistura, umidade relativa no momento da concretagem, entre outros. Maiores detalhes podem ser encontrados no trabalho de Santos (2019).

#### 4.3.4. Monitoramento das vagas de estacionamento

De maneira já descrita na metodologia (item 3.3.1), o monitoramento das vagas de estacionamento foi semelhante ao monitoramento dos módulos experimentais, no entanto, com uma verificação mais detalhada do escoamento superficial por meio de sensores.

##### 4.3.4.1. Ensaio de infiltração das vagas de estacionamento

Os resultados de infiltração nas vagas de estacionamento pelo método da norma NBR 16416 (ABNT, 2015) estão na Tabela 4.16. Somente o pavimento com intertravado permeável (I.P.) apresentou taxa de infiltração superior a  $0,1 \text{ cm.s}^{-1}$  exigido por norma (ABNT, 2015). No entanto, diversos pavimentos permeáveis de diversas localidades possuem taxas de infiltração iniciais semelhantes (RAZZAGHMANESH E BEECHAM, 2018).

Tabela 4.16 – Taxa de infiltração das vagas de estacionamento

Vagas	K médio ( $\text{cm.s}^{-1}$ )			
	Novo	4 meses	8 meses	12 meses
Intertravado permeável (I.P.)	0,121	0,142	0,132	0,120
Intertravado comum (I.C.)	0,025	0,027	0,025	0,021
Concreto permeável (C.P.)	0,076	0,074	0,078	0,074
Pisograma (P.G.)	0,030	0,020	0,013	0,015

Fonte: Autor.

A Figura 4.27 apresenta a variação da capacidade de infiltração dos pavimentos permeáveis em relação ao valor inicial no período monitorado. Observa-se que houve redução da capacidade de infiltração do pavimento com pisograma (P.G.) enquanto que se manteve com pouca variação nos demais revestimentos (I.P., I.C. e C.P.) ao longo do período de 12 meses analisados (set 2018 – ago 2019). Importante mencionar, no entanto, uma redução de 20% no revestimento de IC na última medição realizada. No caso de P.G., a alteração da capacidade de infiltração pode ter sido causada pelo crescimento das raízes da grama ou eventual compactação da terra de suporte.

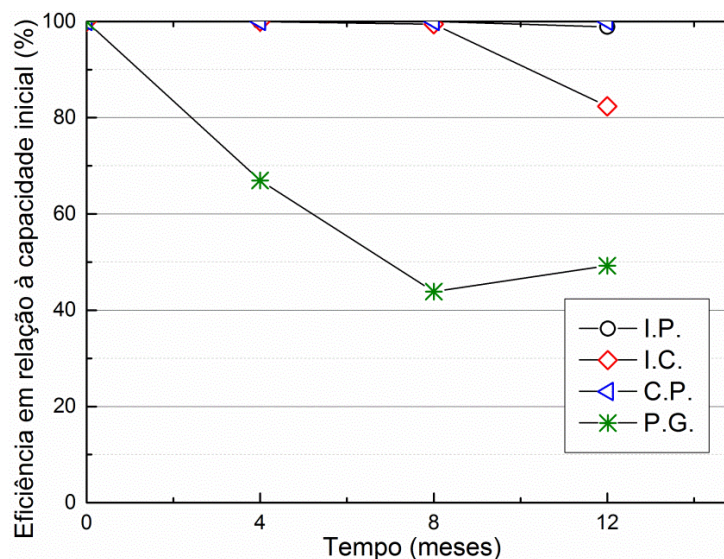
Ao verificar as taxas de infiltração iniciais dos pavimentos, as vagas de estacionamento com intertravados (I.P. e I.C.) foram de 2 vezes a 3 vezes mais altos que as taxas iniciais dos módulos experimentais da Etapa 2 com os mesmos revestimentos, a exceção do C.P. Uma distinção construtiva entre os pavimentos dos experimentos da Etapa 2 e Etapa 3 foi a inclusão de outra camada de manta geotêxtil abaixo da camada de assentamento dos



módulos experimentais, o que contribuiu na redução da capacidade de infiltração inicial dos pavimentos porque retêm os sedimentos em uma camada próxima a superfície.

No C.P., como o índice de vazios dos módulos foi quase 3 vezes superior às vagas de estacionamento, justifica a capacidade de infiltração superior dos módulos.

Figura 4.27 – Redução da capacidade de infiltração das vagas em relação à condição inicial



Fonte: Autor.

Diferentemente do que ocorreu com os pavimentos I.P., I.C. e C.P. do estacionamento, houve redução da capacidade de infiltração dos módulos experimentais com os mesmos revestimentos durante os 12 meses. Ressalta-se a presença de uma estrada não pavimentada próxima ao experimento da Etapa 2 que pode ter causado constante deposição de sedimentos nos módulos, o que não ocorreu nas vagas de estacionamento, pois as vias ao redor são pavimentadas. O local de implantação mostra-se, assim, um fator importante para a velocidade de colmatção e consequente redução da capacidade de infiltração, como afirmam Kia (2017b), Tong (2011) e Chopra (2010).

#### 4.3.4.2. Desempenho hidrológico das vagas de estacionamento

O período de monitoramento compreendeu de setembro de 2018 a agosto de 2019. Os registros de nível máximo de água nos pavimentos (Apêndice C) mostram que ocorreu oscilação do nível d'água com maior frequência no pavimento de concreto permeável, muitas vezes sem a ocorrência de precipitação. Já nos outros três tipos de pavimentos, registraram-se poucos momentos de nível d'água diferente de zero. Ao verificar pelo método de infiltração

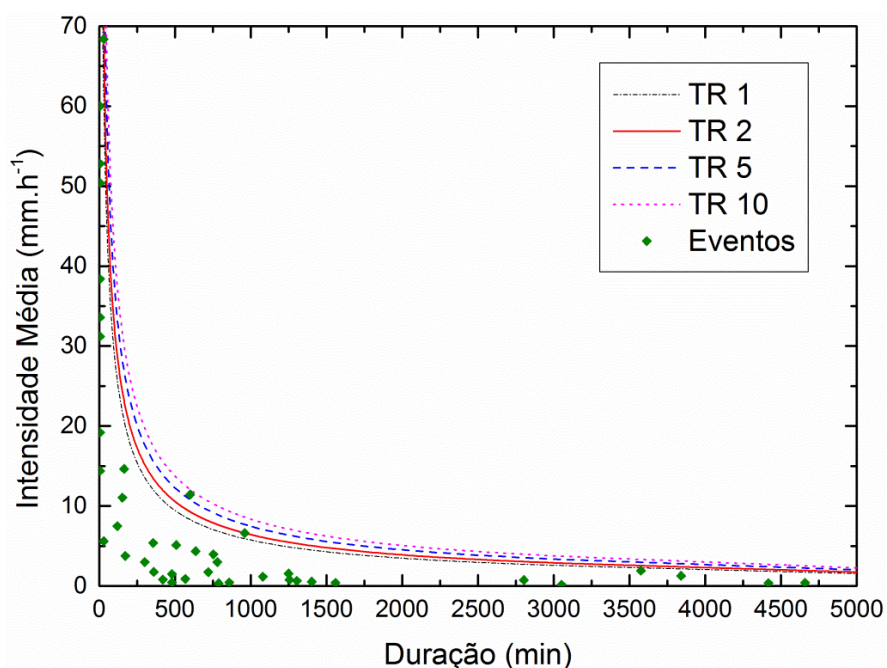
(item 4.3.4.1) que a permeabilidade das vagas com intertravado poroso (I.P.) é superior à permeabilidade das vagas com concreto permeável (C.P.), por exemplo, constata-se que os dados de nível e tempo de esvaziamento dos pavimentos não tiveram confiabilidade, diferentemente dos dados relativos ao escoamento superficial. A discretização do escoamento por meio dos sensores ultrassônicos possibilitou o registro da vazão de entrada d'água nos reservatórios. Logo, buscou-se relacionar os resultados de escoamento superficial com as características dos eventos e comparar as vagas com os módulos experimentais.

### Caracterização dos eventos do estacionamento

Foram monitorados 51 eventos ao longo do período, de 2 a 10 eventos mensais. Os dados pluviométricos foram consistidos com os dados do INMET por Dupla Massa e obteve-se uma constante de proporcionalidade de 0,90 e coeficiente de correlação de Pearson de 0,99. As precipitações variaram entre 3,6 mm e 114,4 mm, totalizando 1516,8 mm e as durações entre 2 e 83,2 horas. O resumo dos registros pode ser consultado no Apêndice C.

O tempo de retorno de cada evento foi calculado pela relação IDF de Santa Maria – RS, adotando o maior valor entre intensidade média, intensidade máxima em 5 minutos de duração e intensidade máxima em 30 minutos de duração (Figura 4.28). A maioria dos eventos tiveram TR's menores que 0,4 anos, no entanto foram registrados 3 eventos significativos, com TRs de 2 e 7 anos e duração de 4,6 a 16 horas.

Figura 4.28 – Caracterização dos eventos do estacionamento pela IDF



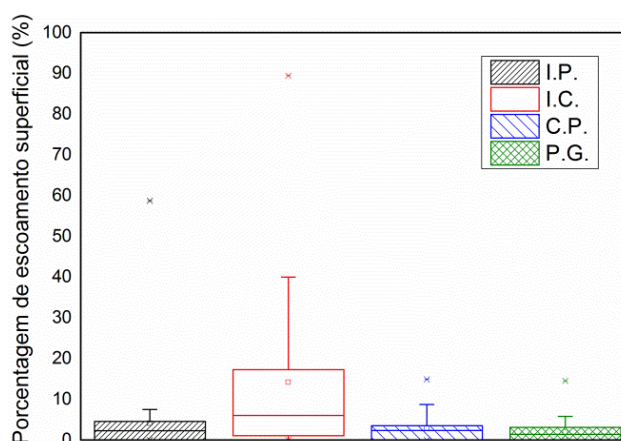
No entanto, o evento de TR 7 anos não será utilizado nas análises por ter acontecido antes da implantação dos sensores e, na leitura manual, foi verificado que ocorreu o extravasamento das caixas de armazenamento dos pavimentos revestidos com intertravado convencional (I.C.), concreto permeável (C.P.) e pisograma (P.G.), não sendo possível a estimativa correta dos volumes escoados.

### Escoamento superficial dos pavimentos do estacionamento

Em oito eventos não ocorreu escoamento superficial nos pavimentos (eventos: 12, 36, 41, 42, 43, 44, 46 e 50 – vide Apêndice C). Destes, o evento mais intenso foi o de número 41, com precipitação de 19 mm e duração de 9,1 horas, apresentou intensidade média de 2,10 mm.h<sup>-1</sup>, intensidade máxima em 5 minutos de 31,20 mm.h<sup>-1</sup> e intensidade máxima em 30 minutos de 9,20 mm.h<sup>-1</sup>. Alguns eventos de menor precipitação total e intensidade geraram escoamento superficial, tais como os eventos 24 e 34, com precipitações de 16,4 mm e 14,0 mm e intensidades médias de 0,32 mm.h<sup>-1</sup> e 1,20 mm.h<sup>-1</sup>, respectivamente. Possíveis explicações levantadas durante a análise dos resultados foi a ação do vento, que pode ter favorecido o escoamento superficial pela direção no momento da precipitação, variações da intensidade da precipitação menores ao intervalo de tempo de registro ou veículo estacionado não observado. Especialmente o vento não foi medido e, desta forma, é recomendada sua leitura e análise para trabalhos futuros.

Observa-se na Figura 4.29 que o pavimento com intertravado convencional (I.C.) teve maior amplitude dos dados e desempenho inferior aos demais. Isso mostra que, além de ser o menos eficiente, um número maior de fatores influencia seu comportamento entre eventos.

Figura 4.29 – Escoamento superficial dos pavimentos do estacionamento – *box spot*



Fonte: Autor.

O pavimento com intertravado permeável (I.P.) teve dois eventos de escoamento superficial maiores que 20%, no entanto, isso representa uma pequena fração e os valores típicos indicam um escoamento superficial de 5%, com valores muito próximos dos obtidos com concreto permeável (3%) e pisograma (2%). Esses valores médios de escoamento foram semelhantes aos encontrados por Castro et al. (2013) e Guedes et al. (2013).

A Tabela 4.17 apresenta o comparativo dos resultados entre os pavimentos do estacionamento pelo método Mann-Whitney. Observa-se que o pavimento com intertravado convencional foi considerado estatisticamente diferente dos outros pavimentos. Os pavimentos I.P., C.P. e P.G. tiveram resultados de escoamentos superficiais semelhantes.

Tabela 4.17 – Análise estatística dos resultados de escoamento superficial do estacionamento

	p-valor* (Mann-Whitney)			
	I.P.	I.C.	C.P.	P.G.
I.P.	1	0,002	0,628	0,144
I.C.	0,002	1	0,001	0,000
C.P.	0,628	0,001	1	0,345
P.G.	0,144	0,000	0,345	1

\*  $p \leq 0,05$ : significativamente diferentes

$p > 0,05$ : não são significativamente diferentes

Fonte: Autor.

Comparando os resultados dos módulos experimentais e vagas de estacionamento (Tabela 4.18), é possível observar que de uma forma geral, os resultados foram muito similares entre eles, embora existam diferenças construtivas:

- 1- Caimento diferente, sendo 2% nos módulos e 4,5% nas vagas de estacionamento;
- 2- A inclusão de uma camada de manta geotêxtil entre agregado graúdo e revestimento nos módulos experimentais que, apesar de não haver recomendação da norma (ABNT, 2015), poderia contribuir com a durabilidade dos pavimentos, mantendo os sedimentos em uma camada mais próxima à superfície;
- 3- Espessura de 10 cm de concreto permeável no experimento da Etapa 2 e espessura de 15 cm de concreto permeável no experimento da Etapa 3;
- 4- Índice de vazios do concreto permeável das vagas quase 3 vezes superior aos módulos.

Isso indica que esses aspectos construtivos não são determinantes na eficiência dos pavimentos e que não existem mudanças no comportamento em diferentes escalas como foi

observado, por exemplo, em telhados verdes (PERSCH et al., 2018; HAKIMDAVAR et al., 2014).

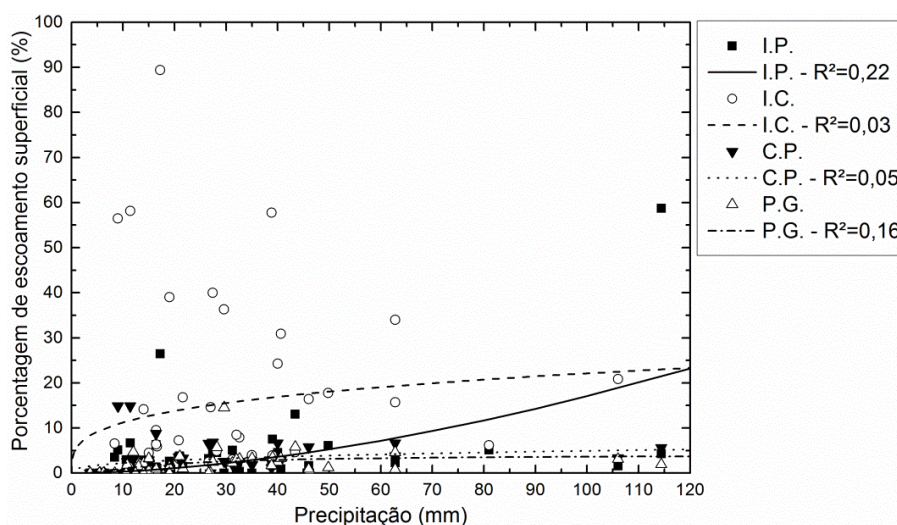
Tabela 4.18 – Comparativo de coeficiente de escoamento entre estacionamento e módulos

Pavimento	Escoamento superficial (%)			
	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
I.P. (vagas)	4,1	8,9	0,0	58,7
I.P.S. (módulo)	8,1	9,0	0,0	30,6
I.P.C. (módulo)	1,8	3,2	0,0	11,2
I.C. (vagas)	14,1	19,5	0,0	89,4
I.C.S. (módulo)	9,2	11,2	0,0	39,2
I.C.C. (módulo)	13,4	15,9	0,0	53,7
C.P. (vagas)	2,9	3,6	0,0	14,9
C.P.S. (módulo)	2,2	6,6	0,0	33,7
C.P.C. (módulo)	1,0	1,1	0,0	2,9
P.G. (vagas)	2,0	2,6	0,0	14,5

Fonte: Autor.

Foram feitas relações entre as variáveis da mesma forma que foi feito com os dados obtidos no experimento da Etapa 2. As equações das correlações podem ser conferidas no Apêndice C. Na relação de escoamento superficial com precipitação (Figura 4.30) e tempo de retorno (Figura 4.31) os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) ficaram baixos. No entanto, percebe-se que os coeficientes de escoamento do pavimento com I.C. ficaram altos em eventos de precipitações entre 10 mm e 65 mm. Os outros três pavimentos tiveram comportamento semelhante para as diferentes precipitações.

Figura 4.30 – Correlação entre precipitação e escoamento superficial das vagas

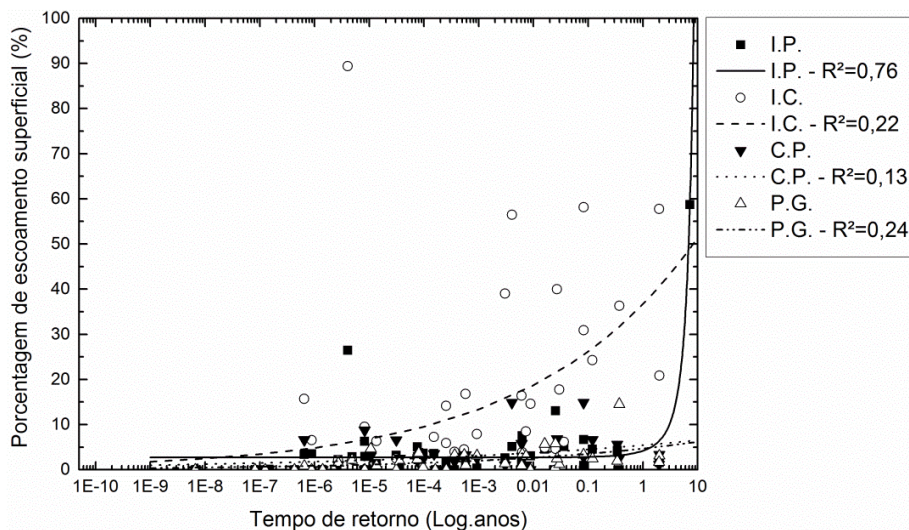


Fonte: Autor.

O pavimento com pisograma (P.G.) teve resultados que convergem com o encontrado por Dreelin et al. (2006), apesar dos autores monitorarem eventos de até 20 mm. O pavimento com concreto permeável teve escoamentos superficiais menores que os encontrados por Bean et al. (2007a) para precipitações de até 90 mm. O pavimento com intertravado permeável teve resultado semelhante ao encontrado por Acioli (2005) ao avaliar blocos vazados.

Na análise de tempo de retorno x escoamento superficial, o pavimento com intertravado convencional (I.C.) teve sua curva de tendência mais elevada que as demais. Para um evento com tempo de retorno de 1 ano o pavimento I.C. apresentaria porcentagens de escoamento superficial em torno de 40%, enquanto os outros três pavimentos apresentariam valores de até 10%.

Figura 4.31 – Correlação entre tempo de retorno e escoamento superficial das vagas



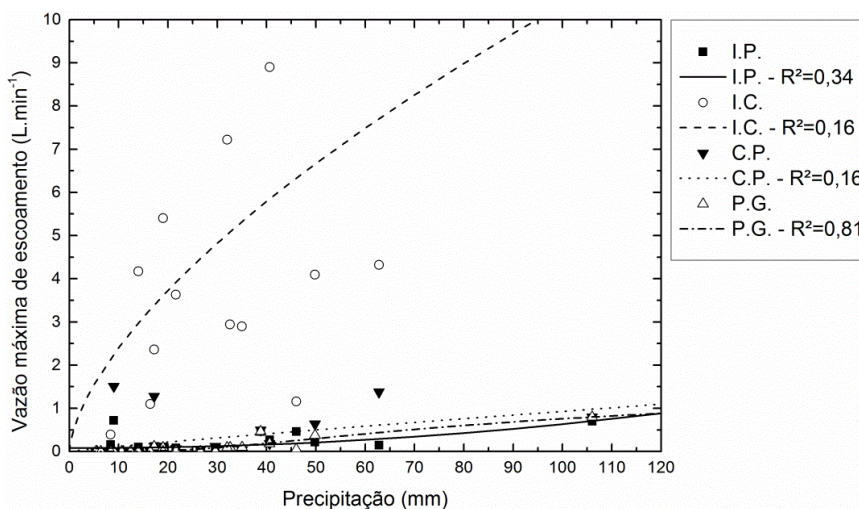
Fonte: Autor.

### Vazão máxima de escoamento nos pavimentos do estacionamento

A vazão máxima de escoamento superficial (Q) foi relacionada às variáveis precipitação (P) e tempo de retorno (TR). A Figura 4.32 apresenta a correlação P x Q dos quatro pavimentos com linhas de tendência para cada pavimento.

Os coeficientes de determinação ficaram baixos com exceção do pavimento com pisograma ( $R^2 = 0,81$ ). O pavimento de intertravado comum teve as maiores vazões de escoamento, inclusive precipitações de pequeno volume, no entanto, vazões abaixo do encontrado por Collins et al. (2008) para as mesmas precipitações.

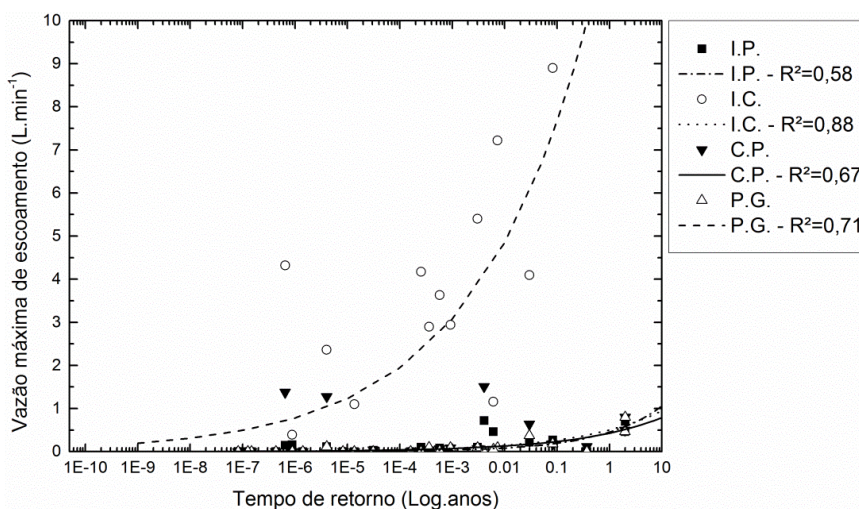
Figura 4.32 – Correlação entre precipitação e vazão máxima de escoamento das vagas



Fonte: Autor.

A Figura 4.33 mostra a relação entre tempo de retorno (TR) e vazão máxima de escoamento (Q). Os coeficientes de determinação ficaram de regulares a bons, mostrando boa correlação entre as variáveis. O pavimento de intertravado convencional teve o pior desempenho ao gerar maior vazão de escoamento quando comparado aos demais pavimentos. Sua vazão de escoamento atinge 12 litros.minuto<sup>-1</sup> em um evento de TR = 1 ano, enquanto que os outros três pavimentos apresentam uma vazão de 0,5 litros.minuto<sup>-1</sup> para o mesmo evento. No dimensionamento foi estimada uma vazão de 0,319 l.s<sup>-1</sup> no pavimento com intertravado convencional para um evento de TR = 10 anos, que corresponde a 19,14 litros.minuto<sup>-1</sup>.

Figura 4.33 – Correlação entre tempo de retorno e vazão máxima de escoamento das vagas



Fonte: Autor.

Os desempenhos hidrológicos dos pavimentos revestidos com intertravado permeável, concreto permeável e pisograma foram semelhante, no entanto, a capacidade de infiltração verificada através do método presente na norma de pavimentos permeáveis (ABNT, 2015) mostrou que o sistema com pisograma tem menor permeabilidade que os outros dois revestimentos. Um fator não considerado nas análises é a capacidade de retenção superficial d'água dos pavimentos. Os espaços em que são plantadas as mudas de grama facilita a retenção d'água e dá maior tempo para que ocorra a infiltração, mesmo após o fim da precipitação, da mesma forma que observado por Collins et al. (2008).

Outro fator importante para a escolha do pavimento é o custo de implantação. O Apêndice D apresenta o custo de cada tipo de pavimento utilizado nesta pesquisa. É possível verificar que, para a região em que a pesquisa foi desenvolvida, o pavimento I.C. teve o menor custo, seguido do pavimento I.P. O pavimento C.P. teve o maior custo entre os quatro pavimentos permeáveis.

#### **4.3.5. Verificação térmica**

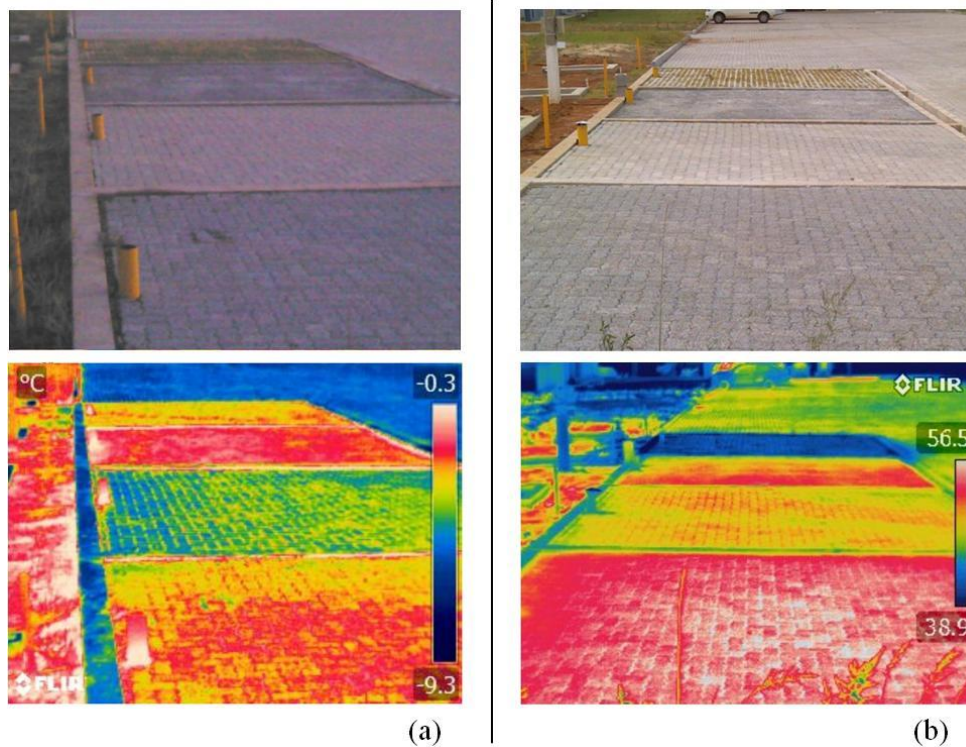
A Figura 4.34 apresenta fotos térmicas que englobaram os quatro tipos de pavimentos. A esquerda é apresentada a imagem captada durante uma onda de frio e a direita a imagem captada durante um dia quente. Em ambas as imagens, a sequência de pavimentos do primeiro ao último é: intertravado permeável, intertravado comum, concreto permeável e pisograma. Deve-se ressaltar que a escala é gerada automaticamente pelo software da câmera conforme variação de temperatura que há na imagem.

No período de extremo frio, observa-se que os pavimentos apresentaram temperaturas próximas entre si, todos com temperaturas abaixo de 0 °C. O concreto permeável teve temperatura levemente mais alta que os demais. Já no dia de alta temperatura, o revestimento mais quente foi o intertravado permeável, seguido do concreto permeável. O revestimento de piso grama foi capaz de manter uma temperatura bem mais baixa que os outros três revestimentos. Para uma análise mais detalhada, fez-se o registro individual de cada pavimento nas duas situações.

A Figura 4.35 apresenta apenas o pavimento com intertravado permeável nas duas datas de verificação.

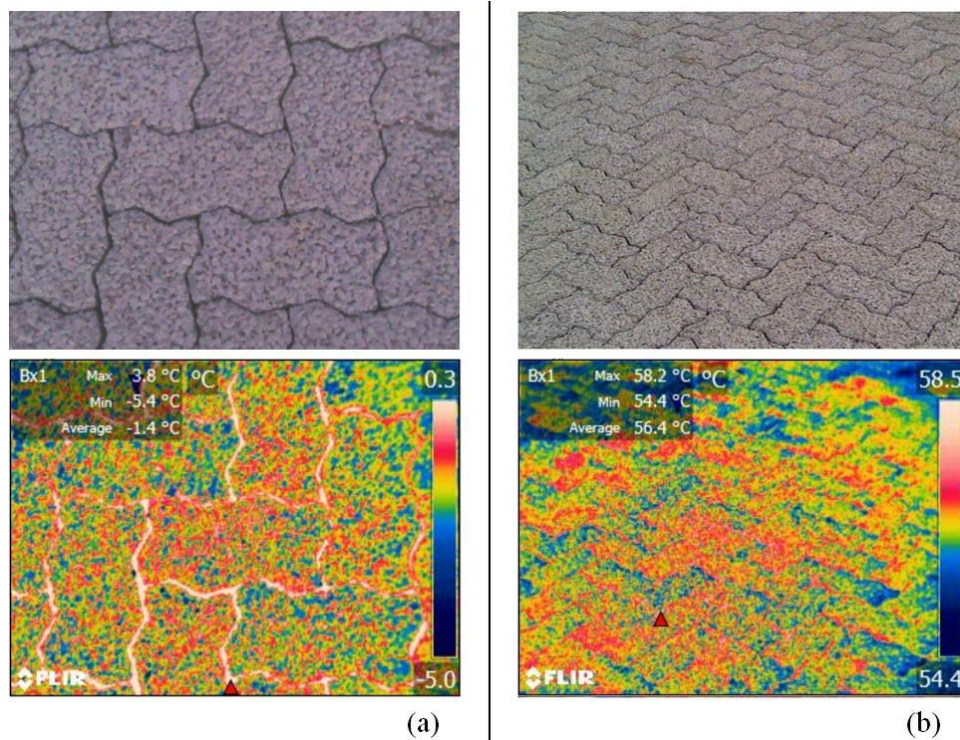


Figura 4.34 – Imagens do espectro visível e térmicas (imagens infravermelhas) das vagas de estacionamento em a) dia frio e b) quente com diferentes escalas colorimétricas



Fonte: Autor.

Figura 4.35 – Imagens do espectro visível e térmicas (imagens infravermelhas) do intertravado poroso em a) dia frio e b) quente com diferentes escalas colorimétricas

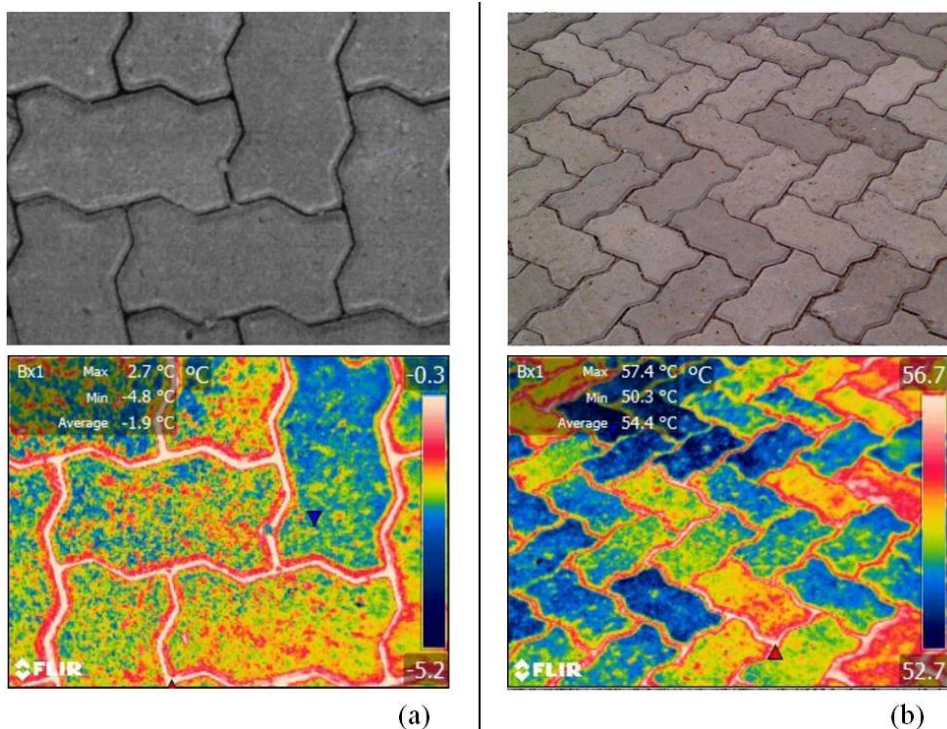


Fonte: Autor.

Por meio do software FLIR TOOLS®, verificou-se temperatura mínima de  $-5,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  no pavimento revestido com intertravado permeável. A média de temperatura na região fotografada foi de  $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . No dia quente, a temperatura no pavimento variou de  $54,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $58,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

A Figura 4.36 mostra as regiões do intertravado comum fotografadas nos dias frio e quente. A temperatura média do pavimento ( $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) foi inferior ao pavimento com intertravado permeável no dia frio, apesar do mínimo registrado ser superior ( $-4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ao mínimo registrado no intertravado permeável ( $-5,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Em ambos os pavimentos intertravados a região mais quente foi nas juntas, conforme escala colorimétrica. Na direita, a foto térmica do intertravado comum no período quente mostra que este pavimento estava a uma temperatura média  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  mais baixa que o intertravado permeável.

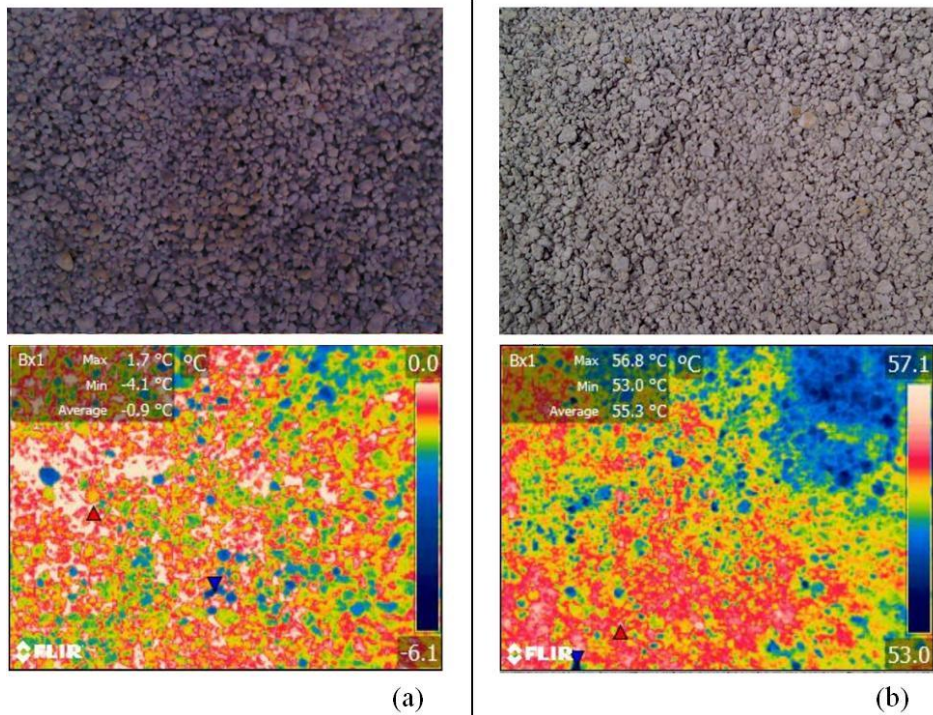
Figura 4.36 – Imagens do espectro visível e térmicas (imagens infravermelhas) do intertravado comum em a) dia frio e b) quente com diferentes escalas colorimétricas



Fonte: Autor.

A imagem térmica da Figura 4.37 mostra que o concreto permeável não atingiu as mesmas temperaturas negativas dos intertravados. Sua média foi de  $-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  e algumas regiões da superfície atingiram temperatura de  $-4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na imagem da direita, observa-se que o pavimento de concreto permeável atingiu temperaturas elevadas, na ordem de  $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

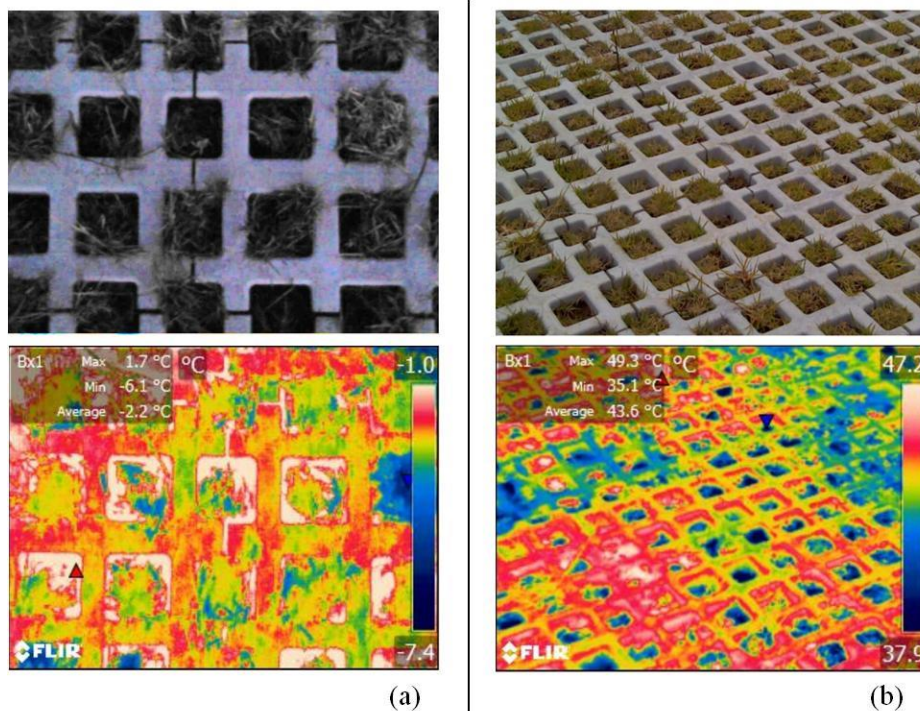
Figura 4.37 – Imagens do espectro visível e térmicas (imagens infravermelhas) do concreto permeável em a) dia frio e b) quente com diferentes escalas colorimétricas



Fonte: Autor.

Na Figura 4.38 são apresentadas as fotos térmicas do pisograma.

Figura 4.38 – Imagens do espectro visível e térmicas (imagens infravermelhas) do pisograma em a) dia frio e b) quente com diferentes escalas colorimétricas



Fonte: Autor.

No dia frio a grama estava congelada, a temperatura variou de  $-6,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  na região fotografada. Pela imagem, nota-se que a grama teve forte influência na média de temperatura mais baixa que os outros pavimentos. As áreas com concreto estavam em temperatura aproximada de  $-2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . No dia quente, o pavimento com piso grama teve as menores temperaturas entre os quatro pavimentos. A temperatura máxima registrada foi de  $49,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  e a média foi de  $43,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ao menos  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  a menos que os demais, resultado semelhante ao encontrado por Lin et al. (2007) e Takebayashi e Moriyama (2009).

Essa verificação das superfícies de pavimentos permeáveis permitiu constatar a grande variabilidade térmica em um ano. Ao considerar a influência das baixas temperaturas sobre os pavimentos, foi verificado no item 4.1.5 que a oscilação na faixa  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}/23\text{ }^{\circ}\text{C}$  não é capaz de danificar significativamente o concreto permeável, diferentemente do que ocorre em países que atingem temperaturas mais baixas (WU et al., 2016; GESOGLU et al., 2014; KEVERN et al., 2010; NEITHALATH et al., 2003). Já quanto às altas temperaturas, muitas cidades sofrem com os efeitos das ilhas de calor urbano devido a maior retenção térmica das estruturas, principalmente os pavimentos (SUN e CHEN, 2017). As fotos térmicas no dia quente mostram que o pisograma manteve temperatura mais baixa, comprovando que a adoção de pavimentos permeáveis vegetados podem trazer vantagens significativas no meio urbano.

#### 4.4 COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DOS PAVIMENTOS PERMEÁVEIS – ANÁLISE GLOBAL

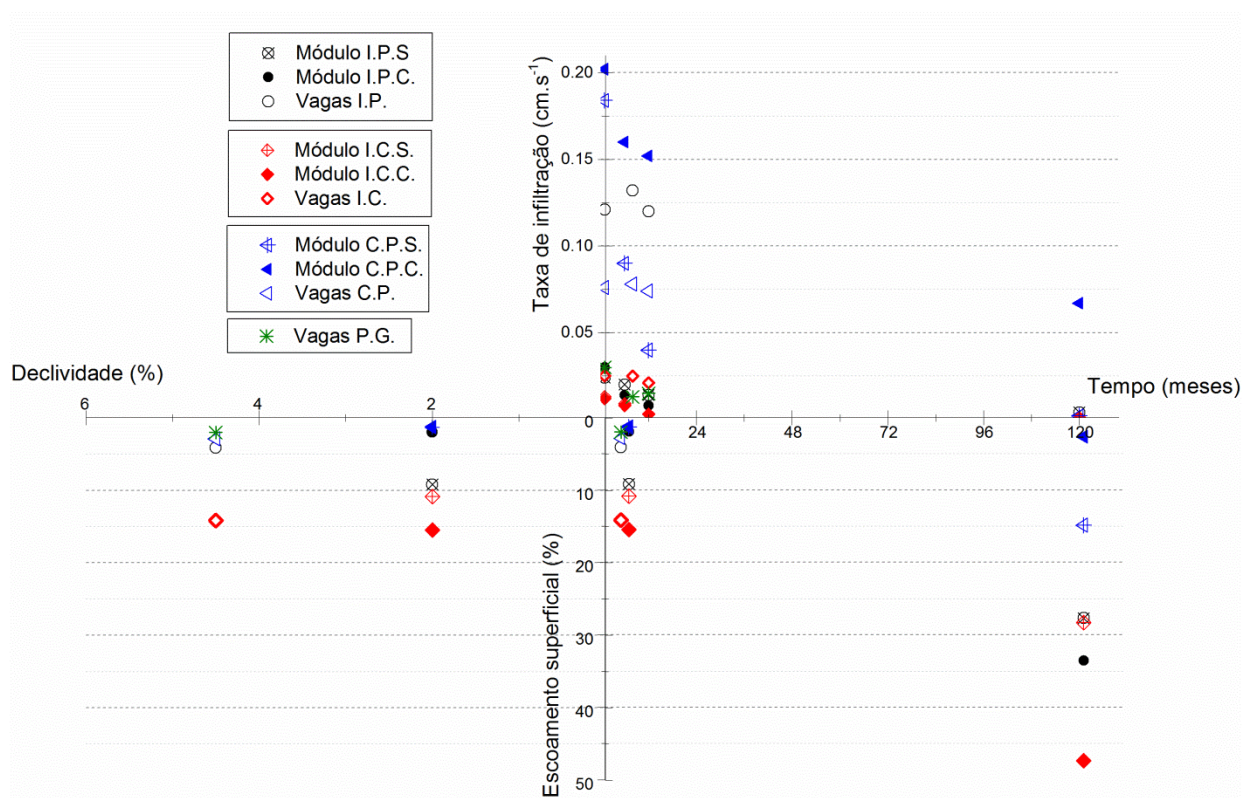
Apesar dos experimentos da Etapa 2 e Etapa 3 terem algumas diferenças construtivas, a destacar a manta geotêxtil entre revestimento e agregado graúdo, variação do índice de vazios e espessura da placa de concreto permeável, são sistemas permeáveis aplicáveis. Foi elaborado um diagrama composto para relacionar alguns dos principais parâmetros dos pavimentos permeáveis de maneira a demonstrar possíveis resultados em campo (Figura 4.39).

O diagrama apresenta o tempo (meses) versus taxa de infiltração ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) obtida pelo ensaio com o anel (ABNT, 2015) no primeiro quadrante. No terceiro quadrante, tem-se a relação da declividade superficial do pavimento (%) versus escoamento superficial médio (%). No quarto quadrante, há a relação tempo (meses, com a mesma escala de eixo da

abscissa) versus escoamento superficial médio (em %, com a mesma escala de eixo da ordenada) de todos os eventos monitorados.

As taxas de infiltração foram obtidas nos períodos de 0 meses, 6 meses, 12 meses e na estimativa de 120 meses (10 anos pelo ensaio de colmatção acelerada). Os coeficientes de escoamento médios foram calculados para uma condição inicial de até 1 ano de idade, ao considerar que os pavimentos mantêm seu desempenho, e para a condição de 10 anos de uso (colmatção acelerada). Para a distinção da declividade, os módulos experimentais da Etapa 2 foram executados com 2% e as vagas de estacionamento da Etapa 3 foram executadas com 4,5%.

Figura 4.39 – Relação entre os principais parâmetros dos pavimentos permeáveis estudados



Fonte: Autor.

A partir do primeiro quadrante, tempo x taxa de infiltração, é possível observar que a permeabilidade dos pavimentos pode ser reduzida nos 12 primeiros meses como também pode se manter a uma mesma taxa inicial, conforme agressividade do ambiente em que os pavimentos estão inseridos. Os pavimentos permeáveis das vagas de estacionamento mantiveram as taxas de infiltração ao longo dos 12 meses, já os módulos tiveram redução da capacidade de infiltração, a destacar o módulo de concreto permeável C.P.S., que teve a maior

redução em 12 meses. O pavimento com pisograma teve taxa de infiltração baixa, próxima à taxa de infiltração dos intertravados convencionais. Após 10 anos, a maioria dos módulos atingiram taxas de infiltração próximas a zero, com exceção do módulo C.P.C.

Paralelamente, o quarto quadrante (tempo x escoamento superficial) mostra que o escoamento superficial médio das estruturas, inicialmente entre 0% e 15%, tende a aumentar para valores médios de até 50%. Este aumento é proporcional à redução da taxa de infiltração do pavimento, portanto, também é dependente da quantidade de sedimento depositado ao longo do tempo (agressividade do ambiente). O tipo de sedimento pode causar diferentes reações nos pavimentos. Sedimentos com maior granulometria afetam mais significativamente o concreto permeável porque acumulam mais superficialmente. Sedimentos de menor granulometria, como materiais argilosos, afetam mais os blocos intertravados ao serem depositados nas juntas. O pavimento de pisograma teve bom resultado, pois apresentou escoamento superficial médio baixo, semelhante ao concreto permeável e intertravado permeável.

No terceiro quadrante (declividade x escoamento superficial), não ficou evidente que o aumento da declividade de 2,0% para 4,5% cause aumento do escoamento, como era esperado. A recomendação da literatura é limitar a declividade dos pavimentos permeáveis em 5,0% (WDNR, 2014; MARCHIONI E SILVA, 2010; ACIOLI, 2005; EPA, 1999; URBONAS E STAHR, 1993), portanto, ambos os experimentos podem ter comportamento muito semelhante para esta variável. É possível que as diferenças construtivas entre os experimentos tenham interferido. Uma alternativa para pesquisas futuras seria o monitoramento de pavimentos com declividade mais acentuada.

## 5. CONCLUSÕES

Um dos objetivos do presente trabalho foi investigar o desempenho hidrológico do concreto permeável desenvolvido com materiais locais típicos do Sul do Brasil. O concreto permeável foi previamente estudado em laboratório e comparado com outros revestimentos permeáveis comumente utilizados. Com base nos resultados obtidos ao longo da pesquisa, verificou-se que o concreto permeável apresentou um desempenho adequado na retenção da água pluvial e redução do escoamento superficial. Foi possível atender as condições mecânicas da norma que rege pavimentos permeáveis no Brasil (ABNT, 2015), no entanto, a variabilidade de sua estrutura, afetada pelo método de compactação, causou grande divergência na capacidade de infiltração, tornando-o incerto no atendimento das condições hidráulicas da mesma norma.

Destaca-se como inovação, primeiramente, o desenvolvimento do permeâmetro de carga constante, já reproduzido por outros autores (ALVES, 2019; SANTOS, 2019; MENEGATTI, 2018), apesar de não ter sido um objetivo da pesquisa e, sim, uma necessidade que surgiu durante o andamento. Também foi realizada a análise da influência do tamanho do grão na colmatção dos pavimentos permeáveis, comparação realizada apenas em outros países, como por exemplo, Tong (2011) Schaefer e Kevern, 2011; Deo et al., 2010. Na sequência, foram construídas vagas de estacionamento com quatro tipos de revestimentos de pavimentos permeáveis para monitoramento. Por fim, o registro de imagens infravermelho das superfícies dos pavimentos permeáveis permitiu a comparação térmica entre eles nas situações mais extremas do sul do País.

A seguir, são colocadas algumas conclusões conforme etapa da pesquisa:

### **Etapa 1 – estudo de concreto permeável em laboratório**

- A utilização de 5% de areia nas misturas de concretos permeáveis resultou em um ganho mecânico de 10% a 100%, dependendo do traço. A combinação de agregados graúdos de diferentes granulometrias também proporcionou maiores resistências mecânicas. Os melhores resultados mecânicos foram dos traços B80A e B60A, ambos com adição de areia e com proporções de 80/20% e 60/20% de brita 4,75/12,5 mm e brita 9,5/25 mm, respectivamente.
- A perda de massa por abrasão foi de 27% a 49%, conforme traço. O traço B80A teve o melhor resultado para perda por abrasão;
- Foi possível desenvolver dois equipamentos para realizar os ensaios de permeabilidade dos concretos permeáveis em laboratório: ensaio de carga variável e ensaio de carga constante. Os

resultados obtidos pelo método de carga variável foram em torno de 25% inferiores aos obtidos pelo método de carga constante;

- O maior empacotamento da estrutura diminuiu a capacidade de percolação d'água, observado pelo índice de vazios. A inserção de areia e a combinação de agregados graúdos reduzem o índice de vazios, logo, reduzem a percolação de água na estrutura de concreto permeável. No entanto, as condutividades hidráulicas dos seis traços analisados ficaram acima de  $0,1 \text{ cm.s}^{-1}$  exigido pela norma NBR 16416 (ABNT, 2015), tanto pelo ensaio de carga variável quanto pelo ensaio de carga constante;

- Em uma segunda moldagem para confecção de CP's destinados ao ensaio de congelamento, os índices de vazios tiveram uma variação de até 2%. Apesar da utilização dos mesmos materiais, traços e procedimentos, o concreto permeável é dependente de muitos fatores. Destaca-se o método e intensidade de compactação;

- As resistências à compressão e desgaste por abrasão dos concretos permeáveis após ciclo térmico que simula as condições da região de Santa Maria foram fracamente alteradas. Constatou-se uma pequena redução na resistência à compressão axial nos traços com areia quando analisados conforme índice de vazios;

- As perdas de massa dos traços ficaram em torno de 1,3% após o ensaio de congelamento. O período de maior perda foi os 30 primeiros ciclos, quando os concretos estavam na idade inicial (menor resistência mecânica). Como o ensaio de simulação é acelerado, conclui-se que a condição climática local não pode ser considerada de risco para a durabilidade do concreto permeável;

- Na comparação entre concretos permeáveis investigados, os traços B80A e B60A tiveram o melhor desempenho, ambos com areia e combinação de agregado graúdo. Foi escolhido o traço B80A para utilizar nas outras etapas da pesquisa.

## **Etapa 2 – módulos experimentais para análise da colmatação**

- O ensaio de infiltração pelo método da norma NBR 16416 (ABNT, 2015) indicou taxas de infiltração inicial abaixo do mínimo estabelecido por norma ( $0,1 \text{ cm.s}^{-1}$ ) para os revestimentos com blocos intertravados e taxa de infiltração em torno de  $0,2 \text{ cm.s}^{-1}$  para o concreto B80A estudado em laboratório;

- Os módulos experimentais foram construídos com duas camadas de manta geotêxtil cada: entre solo e agregado graúdo (recomendado pela norma NBR 16416) e entre agregado graúdo e revestimento. A camada entre agregado graúdo e revestimento causou a redução da capacidade de infiltração dos pavimentos;



- Ao fim dos 12 meses, a permeabilidade dos módulos estava entre 20% e 60% da capacidade inicial. A redução da permeabilidade se deu exclusivamente por fatores naturais, como deposição de sedimentos pela ação do vento e desenvolvimento de vegetação. O local do experimento mostrou-se bastante agressivo em termos de sedimentação, desta forma, é preciso realizar uma investigação prévia do local buscando prever os fatores que poderão afetar a permeabilidade do pavimento ao longo do tempo;
- Apesar da redução na capacidade de infiltração dos módulos ao longo de 12 meses, não foi constatado alteração no desempenho hidrológico. Esperava-se verificar um aumento nos escoamentos superficiais para eventos semelhantes, no entanto, não ocorreu variação;
- O método de limpeza do pavimento pela aspensão de água sob pressão foi capaz de recuperar, em partes, a capacidade de infiltração dos módulos. Após ensaio acelerado de colmatação, a recuperação completa da capacidade de infiltração dos pavimentos é improvável, portanto, recomenda-se uma rotina de limpeza mais frequente que 10 anos;
- Na colmatação acelerada (simulação de 10 anos), verificou-se que a argila afetou mais os módulos com intertravados (I.P. e I.C.) do que a areia. Já nos módulos com concreto permeável ocorreu o inverso, a areia reduziu mais a permeabilidade e desempenho do que a argila. Contudo, a recuperação do concreto permeável com areia (C.P.S.) foi mais efetiva do que do concreto permeável com argila (C.P.C.), visto que a areia tem maior dimensão que a argila, assim, sua deposição foi mais superficial;
- Na verificação da infiltração do solo por meio dos sensores ultrassônicos, constatou-se que a aplicação de um coeficiente de segurança na taxa de infiltração do solo no estado saturado é necessário para o dimensionamento do pavimento, assim como recomendações em Woods-Ballard et al. (2015).

### **Etapa 3 – vagas de estacionamento com diferentes revestimentos permeáveis**

- Diferentemente dos módulos experimentais, as vagas de estacionamento foram construídas com apenas uma camada de manta geotêxtil (entre solo e agregado graúdo), conforme recomendações da norma NBR 16416 (ANBT, 2015). Isto causou aumento na capacidade de infiltração dos pavimentos com intertravado permeável e intertravado comum. O concreto permeável teve sua capacidade de infiltração reduzida pela variação do índice de vazios, influenciada pelo método de adensamento adotado. Isto reforça que o concreto permeável é dependente de muitos fatores e torna-se muito difícil replicar o material com exatidão quando se tem condições ambientais, materiais disponíveis ou, até mesmo, mão de obra distinta;

- Na verificação da infiltração das vagas de estacionamento, houve redução progressiva da capacidade de infiltração ao longo do período de 12 meses analisado apenas do pavimento com pisograma. A alteração pode ter sido causada pelo crescimento das raízes da grama na porção de terra preta colocada abaixo das mudas. Os outros pavimentos tiveram as taxas de infiltração mantidas ao longo deste período, o que leva a concluir que o ambiente em que as vagas estavam inseridas não é agressivo tal como o ambiente dos módulos experimentais. A presença ou não de estradas não pavimentadas tem forte influência sobre a agressividade do meio;
- O desempenho hidrológico do pavimento com intertravado comum foi inferior aos demais. Os pavimentos com intertravado permeável, concreto permeável e pisograma tiveram desempenho semelhante;
- O intertravado permeável e o concreto permeável apresentaram bons resultados de infiltração pelo método da NBR 16416 (ABNT, 2015), justificando o desempenho hidrológico. Já o pisograma teve capacidade de infiltração próxima ao intertravado comum. Seu bom desempenho hidrológico se dá pela retenção superficial d'água proporcionado pelo formato do bloco;
- Na análise térmica in loco, foi constatado que os pavimentos locados em Santa Maria/RS atingem temperaturas próximas a  $-5^{\circ}\text{C}$  em épocas mais frias do ano. O concreto permeável atingiu temperatura mínima de  $-4,1^{\circ}\text{C}$  e temperatura média de  $-0,9^{\circ}\text{C}$  no dia em que foi feita a verificação. Durante o dia de verão analisado, os pavimentos atingiram temperaturas na ordem de  $55^{\circ}\text{C}$ . O pavimento com pisograma foi capaz de manter uma temperatura mais baixa em relação aos outros pavimentos, em torno de  $44^{\circ}\text{C}$ .

### 5.1. RECOMENDAÇÕES

Diante as variáveis construtivas observadas durante a presente pesquisa, recomenda-se fazer uma verificação in loco da agressividade de sedimentação antes da implantação do pavimento permeável para evitar a rápida colmatação. Os resultados mostraram que os desempenhos hidrológicos dos revestimentos de intertravado de concreto permeável (I.P.), concreto permeável (C.P.) e pisograma (P.G.) foram semelhantes, portanto, a escolha do revestimento se dá por critérios como: disponibilidade do revestimento na região, possibilidade ou não de irrigar a grama quando necessário, disponibilidade de mão de obra especializada, exigência de regularidade da superfície para facilitar a locomoção das pessoas,

entre outros. Por questões práticas, recomenda-se que, se optado pelo revestimento pisograma, seja feita a sementeira da grama ao invés do plantio de mudas.

É importante dar continuidade ao monitoramento das vagas de estacionamento para que se analisem os efeitos do uso intensivo de veículos no desempenho hidrológico. Uma série de dados maior permitirá a elaboração de uma modelagem numérica dos pavimentos que dará embasamento a projetos futuros. A partir do momento em que os pavimentos forem utilizados pelos usuários, será possível avaliar o comportamento mecânico e verificar possíveis patologias.

Alguns aspectos que não foram abordados no presente trabalho e surgem como recomendações para pesquisas futuras são:

- investigar a qualidade da água que infiltra nos pavimentos para preservar o lençol freático;
- investigar a ação do vento no escoamento superficial dos pavimentos;
- analisar a influência da compactação para diferentes tipos de solos e em diferentes níveis de intensidade no desempenho dos pavimentos;
- investigar o efeito da substituição dos materiais que compõem o concreto permeável por resíduos, tais como fresados e resíduos de demolição;
- monitorar pavimentos permeáveis com diferentes declividades para aferir a redução da eficiência conforme aumento da declividade.



## REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro; ABNT, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182 – Solo – ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211 – Agregados para concreto**. Rio de Janeiro; ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222 – Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro; ABNT, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 8802 – Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro; ABNT, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 9895 – Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio**. Rio de Janeiro; ABNT, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142 – Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro; ABNT, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 13292 – Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Metodo de ensaio**. Rio de Janeiro; ABNT, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 13403 - Medição de vazão em efluentes líquidos e corpos receptores**. Rio de Janeiro; ABNT, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 14105-2 - Medidores de pressão Parte 2: Medidores digitais de pressão - Requisitos de fabricação, classificação, ensaios e utilização**. Rio de Janeiro; ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 59; Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 15630 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro; ABNT, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 16416 – Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro; ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23 – Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro; ABNT, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro; ABNT, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46 – Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.** Rio de Janeiro; ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro; ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção.** Rio de Janeiro; ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro; ABNT, 2003.

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. **Ensaio de permeabilidade em solos: orientações para sua execução no campo.** São Paulo, 2013.

ACI. Committee 211. **Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete.** 211.3R-02. American Concrete Institute, Michigan, 2002.

\_\_\_\_\_. Committee 522. **Pervious Concrete,** 522R-10. American Concrete Institute, Michigan, 2010.

ACIOLI, L. A.; AGRA, S. G.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L. da. **Implantação de um módulo experimental para a análise da eficiência de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial na fonte.** XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Mato Grosso do Sul, 2003.

ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2005.

ACPT - Advanced Concrete Pavement Technology. **Pervious Concrete.** TechBrief, US Department of Transportation Federal Highway Administration, dezembro, EUA, 2012.

ALENCAR, P. C. D.; NETTO, O. M. C.; VASCONCELLOS, C. A. B. **Use of porous concrete in parking areas for improving urban drainage.** VI International Conference on Flood Management, São Paulo, 2014.

ALESSI, F.; KOKOT, P. J.; GOMES, J. **Comparação do escoamento superficial gerado por pavimentos permeáveis em blocos de concreto e asfalto poroso.** Revista da Vinci, vol. 3, n. 1, p. 139-156, Curitiba, 2006.

ALLAN, K.; BALLERINE, C.; MCGUIRE, M. P.; MCCONKEY, S. **Land and hydrologic analysis for stormwater detention and volume control trading exchange in cook county, Illinois.** Illinois State Water Survey, 2017.

ALVES, A. **Comportamento mecânico, funcional e ambiental de misturas asfálticas porosas.** Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. **Avaliação da eficiência os pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 5, n.3, p. 21-29, Porto Alegre, 2000.

ASTM C1701. **Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete**. Annual Book of ASTM Standards, 2009.

ASTM C1747/C1747M. **Standard Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion**. Annual Book of ASTM Standards, 2013.

ASTM C1754/C1754M. **Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete**. Annual Book of ASTM Standards, 2012.

ASTM C666/C666M. **Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing1**. Annual Book of ASTM Standards, 2015.

AZZOUT, Y., BARRAUD, S., CRES, F. N., ALFAKIH, E. **Techniques alternatives en assainissement pluvial**. Paris: Technique et Documentation – Lavoisier. 372 p., 1994.

BALADES, J. D.; LEGRET, M.; MADIEC, H. **Permeable pavements: Pollution management tools**. Water Science and Technology, v. 32, n. 1, p. 49-56, 1995.

BARBASSA, A. P.; JUNIOR, C. X. O; GUTIERREZ, L. A. R.; LUCAS, A. H. **Coefficiente de permeabilidade em ensaio de poço Invertido: efeito do tempo de umedecimento prévio e métodos de cálculo**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Mato Grosso do Sul, 2009.

BATEZINI, R.; BALBO, J. T. **Estudo da condutividade hidráulica com carga constante e variável em concretos permeáveis**. IBRACON Structures and Materials Journal, vol. 8, n.3, 2015.

BEAN, E. Z.; HUNT, W. F.; BIDELESPACH, D. A. **Evaluation of Four Permeable Pavement Sites in Eastern North Carolina for Runoff Reduction and Water Quality Impacts**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 133, n. 6, p. 583-592, 2007a.

BEAN, E. Z.; HUNT, W. F.; BIDELESPACH, D. A. **Field Survey of Permeable Pavement Surface Infiltration Rates**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering vol. 133, n. 3, p. 249-255, 2007b.

BLECKEN, G.; et al. **Stormwater control measure (SCM) maintenance considerations to ensure designed functionality**. Urban Water Journal, vol. 14, n. 3, p. 278-290, 2017.

BOOGAARD, F.; LUCKE, T.; GIESEN, N. van de; VEN, F. van de. **Evaluating the infiltration performance of eight dutch permeable pavements using a new full-scale infiltration testing method**. Water Journal, 2014a.

BOOGAARD, F.; LUCKE., T.; BEECHAM, S. **Effect of Age of Permeable Pavements on Their Infiltration Function**. Clean Journal – Soil, Air, Water, vol 42, p. 146-152, 2014b.

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

BRUNO, L. O.; AMORIM, R. S. S.; SILVEIRA, A. **estudo da redução do escoamento superficial direto em superfícies permeáveis.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH. Vol. 18, n.2, 2013.

BS. 7533: Part 3: **Pavements constructed with clay, natural stone or concrete pavers.** British Standard Institution, 2009.

BUYUNG, N. R.; GHANI, A. N. A. **Permeable pavements and its contribution to cooling effect of surrounding temperature.** AIP Conference Proceedings. Vol. 1892, n. 1, AIP Publishing, 2017.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes.** 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L.; MARQUES, D. M. **avaliação da evolução do comportamento quantitativo de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH. Vol. 18, n.1, 2013.

CHOPRA, M.; et al. **Effect of rejuvenation methods on the infiltration rates of pervious concrete pavements.** Journal of Hydrologic Engineering, vol. 15, p. 426-433, 2010.

CIZEK, A. R.; HUNT, W. F.; WINSTON, R. J.; LAUFFER, M. S. **Hydrologic performance of regenerative stormwater conveyance in the north carolina coastal plain.** Journal of Environmental Engineering, vol. 143, n. 9, 2017.

COLLINS, K. A.; HUNT, W. F.; HATHAWAY, J. M. **Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern North Carolina.** Journal of Hydrologic Engineering, vol 13, p. 1146-1157, 2008.

COUGHLIN, J. P.; CAMPBELL, C. D.; MAYS, D. C. **Infiltration and clogging by sand and clay in a pervious concrete pavement system.** Journal Hydrology Engineering, vol 17, n. 1, p. 68-73, 2012.

DELATTE, N.; MRKAJIC, A.; MILLER, D. I. **Field and Laboratory Evaluation of Pervious Concrete Pavements.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2113, p. 132-139, 2009.

DEO, O.; SUMANASOORIYA, M.; NEITHLATH, N. **Permeability reduction in pervious concretes due to clogging: experiments and modeling.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 22, n. 7, p. 741-751, 2010.

DREELIN, E. A.; FOWLER, L.; CARROLL, C. R. **A test of porous pavement effectiveness on clay soils during natural storm events.** Water Research. Vol. 40, p. 799 a 805, 2006.



DRESCH, F. et al. **Propriedades acústicas da Camada Porosa de Atrito (CPA)**. *Acústica e Vibrações*, V.1, p. 53-61, 2016.

EISENBERG, B.; LINDOW, K. C.; SMITH, D. R. (Eds.). **Permeable Pavements**. American Society of Civil Engineers, Virginia, 2015.

EPA. **Storm Water Technology Fact Sheet, Porous Pavement**. EPA 832-F-99-023, Washington, D.C. 1999. Disponível em: <http://infohouse.p2ric.org/ref/17/16159.pdf>. Acesso em 18 de maio de 2018.

EPUSP. **DimPav (Dimensionamento de pavimentos pelas normas da PMSP-2004)**. Acesso em 27/05/2018. Disponível em < <http://sites.poli.usp.br/ptr/lmp//sofdown.htm> >, 2018.

FASSMAN, E. A.; BLACKBOURN, S. **Urban Runoff Mitigation by a Permeable Pavement System over Impermeable Soils**. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 15, n. 6, 2010.

FERGUSON, B. K. **Porous Pavements – Integrative Studies In Water Management and Land Development**. Taylor & Francis Group CRC Press, 577p., 2005.

FLETCHER T. D.; et al. **SUDS, LID, BMPs, WSUD and more–The evolution and application of terminology surrounding urban drainage**. *Urban Water Journal*, p. 525-538, 2015.

GESOGLU, M.; GÜNEYISI, E.; KHOSHNAW, G.; IPEK, S. **Abrasion and freezing–thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers**. *Construction and Building Materials*, vol. 73, p. 19-24, 2014.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. **Pavement thickness design for no-fines concrete parking lots**. *Journal of Transportation Engineering*, vol. 121, n. 6, 1995a.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. **Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for Paving materials**. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 7, n. 3, 1995b.

GOEDE, W. G. **Pervious Concrete: Investigation into Structural Performance and Evaluation of the Applicability of Existing Thickness Design Methods**. Master thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, 2009.

GOMEZ-ULLATE, E.; CASTILLO-LOPEZ, E.; CASTRO-FRESNO, D.; BAYON, J. R. **Analysis and contrast of different pervious pavements for management of storm-water in a parking area in northern Spain**. *Water Resour Manage*, 2010.

GUEDES, C. S.; SILVA, E. P.; SIQUEIRA, E. Q. **Análise do coeficiente de escoamento do pavimento permeável do tipo paver**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, 2013.

HAKIMDAVAR, R. et al. **Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance**. *Ecological Engineering*, v. 73, p. 494–508, 2014.

HASELBACH, L.; DUTRA, V. F. P.; SCHWETZ, P.; FILHO, L. C. P. S. **Laboratory evaluations of long-term hydraulic performance and maintenance requirements for pervious concrete mixes: a case study in southern Brazil.** International Conference on Transportation and Development, ASCE, Texas, 2016.

HARPER, G. E.; LIMMER, M. A.; SHOWALTER, W. E.; BURKEN, J. G. **Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri, USA.** Ecological Engineering, vol. 78, p. 127-133, 2015.

HEIN, M. F.; DOUGHERTY, M.; HOBBS, T. **Cleaning methods for pervious concrete pavements.** International Journal of Construction Education and Research, vol. 9, n. 2, p. 102-116, 2013.

HOLLENBECK, I.; GÖBEL, P. **Water-permeable pavements as the sole storm water management strategy - problems and possibilities.** International Conference on Novatech. Lyon, França, 2013.

HÖLTZ, F. C.; et. al. **Aplicação de concreto permeável na drenagem de zonas urbanas.** Anais do 53º Congresso Brasileiro de Concreto, Florianópolis, 2011.

IMRAN, H. M.; AKIB, S.; KARIM, M. R. **Permeable pavement and stormwater management systems: a review.** Environmental Technology, vol. 34, n. 18, p. 2649–2656, 2013.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia.** <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>, acesso em 2018 e 2019.

JABUR, A. S.; et al. **Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis.** Revista Brasileira de Recurso Hídricos, vol. 20 n. 4, Porto Alegre, 2015.

JBM. **Artefatos de cimento.** Urussanga, Santa Catarina, 2015. Disponível em: <<https://jbmartefatos.com.br/portfolio/piso-drenante-de-concreto/>>. Acesso em 01 de junho de 2018.

KARASAWA, A.; SUDA, S. **Characteristics of new type permeable concrete block paving system.** 5th International Concrete Block Paving Conference, p. 613-622, 1996.

KAYHANIAN, M. et al. **Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots.** Journal of Environmental Management, v. 95, p 114-123, 2012.

KEVERN, J. T.; WANG, K.; SCHAEFER, V. R. **Effect of Coarse Aggregate on the Freeze-Thaw Durability of Pervious Concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 22, n. 5, p. 469-475, 2010.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R. **Clogging in permeable concrete: A review.** Journal Environmental Management, n. 193, p. 221-233. 2017a.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R. **Clogging potential of permeable concrete.** 37th Cement and Concrete Science Conference, Londres, 2017b.

KORHONEN, C. J.; BAYER, J. J. **Porous Portland cement concrete as an airport runway overlay**. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Washington, 1989.

LAMB, G. S.; et al. **Study of the drainage properties of pervious concrete**. Int. J. Environment and Sustainable Development, Vol. 16, No. 2, 2017.

LIN, T.; HO, Y.; HUANG, Y. **Seasonal effect of pavement on outdoor thermal environments in subtropical Taiwan**. Building and Environment, v. 42, n. 12, p. 4124-4131, 2007.

LIN, W.; PARK, D. G.; RYU, S. W.; LEE, B. T.; CHO, Y. H. **Development of permeability test method for porous concrete block pavement materials considering clogging**. Construction and building Material, vol. 118, p 20-26. 2016.

LOCATELLI, L. et al. **Determining the extent of groundwater interference on the performance of infiltration trenches**. Journal of Hydrology, vol. 529, p. 1360-1372, 2015.

LUCKE, T.; WHITE, R.; NICHOLS, P.; BORGWARDT, S. **A simple field test to evaluate the maintenance requirements of permeable interlocking concrete pavements**. Water, v. 7, n. 6, p. 2542-2554, 2015.

MAH, D. Y. S.; HO, T. Y. **Alternative use of roundabout as storm water detention pond**. Journal of Civil Engineering, Science and Technology, Vol. 8, n. 1, 2017.

MARCHIONI, M. S; SILVA, C. O. **Métodos de ensaio para avaliação de pavimento permeável executado**. In: Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto. Gramado, 2013.

MARCHINI, M.; SILVA, C. O. **Pavimento intertravado permeável – melhores práticas**. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 24p., São Paulo, 2010.

MARCHIONI, M. L.; SILVA, C. O.; MAYOR, A. V. **Conceitos e Requisitos para Pavimentos de Concreto Permeável**. Prática Recomendada PR-3. Associação Brasileira de Cimento Portland e Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem, 2014.

MATA, L .A. **Sedimentation of pervious concrete pavement system**. Ph.D. dissertation, Raleigh, North Carolina, 2008.

MAUS, V. W.; RIGHES, A. A.; BURIOL, G. A. **Pavimentos permeáveis e escoamento superficial da água em áreas urbanas**. I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste, FAPESP, Mato Grosso, 2007.

MELO, W. W.; et al. **Estudo da Viabilidade do Uso de Concreto Permeável para Emprego como Pavimento de Vias de Tráfego Leve**. Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Minas Gerais, 2016.

MENEGATTI, L. C. **Influência do teor de pasta de cimento na permeabilidade e resistência do concreto permeável**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2018.

MINETTO, B. **Desenvolvimento de sensores de baixo custo para monitoramento hidrológico**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

NEITHALATH, N. *et al.* **Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials**. Final Report, The Institute for Safe, Quiet, and Durable Highways, 179p., 2003.

NEITHALATH, N.; BENTZ, D. P.; SUMANASOORIYA, M. S. **Predicting the permeability of pervious concrete**. Concrete international, v. 32, n. 5, p. 35-40, 2010.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. IBGE, 421p., Rio de Janeiro, 1989.

NJDEP – New Jersey Department of environmental protection. **New Jersey stormwater best management practices manual**. Division of Watershed Management, New Jersey, EUA, 2009.

ONO, B. W.; BALBO, J. T.; CARGNIN, A. P. **Análise da capacidade de infiltração em pavimento permeável de bloco de concreto unidirecionalmente articulado**. Revista Transportes, v. 25, n. 3, São Paulo, 2017.

PAINE, J. E., **Stormwater Design Guide, Portland Cement Pervious Pavement**. Florida Concrete and Products Association, Orlando, Florida, February 1990.

PDDU – PLANO DIRETOR DE DRENAGEM URBANA. **Manual de drenagem urbana**. Departamento de Esgotos Pluviais, Prefeitura Municipal de Porto Alegre. Vol. VI, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

PERSCH, C. G.; et al. **Escoamento pluvial em telhados verdes extensivos de diferentes escalas**. In: XXVIII Congresso Latino Americano de Hidráulica, 2018, Buenos Aires. XXVIII Congresso Latino Americano de Hidráulica, 2018.

PIVETTA, G. G. **Avaliação de cargas poluidoras e contaminantes emergentes na bacia hidrográfica Vacacaí – Vacacaí Mirim**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

RAMA, M.; SHANTHI, V. M. **Experimental study on sedimentation removal of pervious concrete**. Archives of Civil Engineering, v. 64, n. 1, p. 181-195, 2018.

RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S. **A review of permeable pavement clogging investigations and recommended maintenance regimes**. Water, vol. 10, n. 337, 2018.

RITTER. **Innovative products for landscaping and road construction**. Schwabmünchen, Alemanha, 2018. Disponível em: < [http://www.ritter-landscaping.de/wp-content/uploads/sites/4/2017/04/Complete\\_Brochure\\_EN.pdf](http://www.ritter-landscaping.de/wp-content/uploads/sites/4/2017/04/Complete_Brochure_EN.pdf)>. Acesso em 1º de junho de 2018.

ROMAN, C. A. **Controle da drenagem na fonte e sua compatibilização ao plano municipal de saneamento ambiental de Santa Maria**. Dissertação (Mestrado), Programa de

Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia.** Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SANTOS, J. R. **Determinação da resistência mecânica e da permeabilidade de concreto permeável: comparação entre concreto usinado e moldado em laboratório.** Dissertação (Mestrado) em andamento, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

SANTOS, L. P.; CUBA, R. M.; LEITÃO, V. S.; NETO, A. S. **Análise da eficiência de calçadas ecológicas como sistema de drenagem sustentável nos centros urbanos: estudo de caso no Parque Flamboyant, Goiânia-Goiás.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 19, n. 3, p. 837-849. Goiás, 2015.

SCHAEFER, V. R.; KEVERN, J. T. **An integrated study of pervious concrete mixture design for wearing course applications.** Institute for Transportation, Iowa State University, 2011.

SCHAEFER, V. R.; WANG, K.; SULEIMAN, M. T.; KEVERN, J. T. **Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates.** Institute for Transportation, Iowa State University, 2006.

SCHUELER, T. R. **Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs.** Metropolitan Information Center, Washington, 1987.

SCS - Soil Conservation Service. **SCS National Engineering Handbook.** U.S. Department of Agriculture, 1971.

SILVA, G. B. L. da; MOURA, T. A. M.; KOIDE, S.; CAMPANA, N. A. **Influência de aspectos construtivos e de uso na eficiência de revestimentos com superfícies permeáveis.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 14, n.1, p. 123-134, 2009.

SILVEIRA, A. L. L.; GOLDENFUM, J. A. **Metodologia generalizada para pré-dimensionamento de dispositivos de controle pluvial na fonte.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 12, n.2, p. 157-168, 2007.

STOVIN, V.; POË, S.; DE-VILLE, S.; BERRETTA, C. **The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance.** Ecological Engineering, vol. 85, p. 159-172, 2015.

SUN, R.; CHEN, L. (2017). **Effects of green space dynamics on urban heat islands: Mitigation and diversification.** Ecosystem Services, v. 23, n, p. 38–46, 2017.

SWAN, D. J.; SMITH, D. R. **Development of design system for permeable interlocking concrete pavement.** Green Streets and Highways Conference, p. 314-322. ASCE, Reston, Virgínia, 2010.

TAKEBAYASHI, H.; MORIYAMA, M. **Study on the urban heat island mitigation effect achieved by converting to grass-covered parking.** Solar Energy, v. 83, n. 8, p. 1211-1223, 2009.

TANGPITHAKKUL, R. **Study of permeability of pavement base materials.** Master of Science - College of Engineering and Technology, Ohio University, 1997.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. S.; PICCILLI, D. G. A.; PERSCH, C. G. **Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais.** Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 139-154, 2014.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious Concrete Pavements.** EB302, Portland Cement Association, 36p., Skokie, Illinois, 2004.

TONG, B. **Clogging Effects of Portland Cement Pervious Concrete.** Dissertação (mestrado), Iowa State University, 2011.

TUCCI, C. E. M. Inundações e drenagem urbana. **Inundações Urbanas na América do Sul,** Porto Alegre: ABRH, p. 45-129, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da drenagem urbana.** Textos para Discussão CEPAL-IPEA. Brasília, 50 p., 2012.

URBONAS, B.; STAHR, P. **Stormwater best management practices and detention.** Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 450p. 1993.

VIRGILIIS, A. L. C.; et al. **Construção de pavimentos permeáveis com estruturas reservatório e a especificação técnica da PMSP.** XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, 2011.

WDNR. Wisconsin Department of Natural Resources, Site Evaluation for Stormwater Infiltration (1008). **Permeable pavement.** Madison, Wisconsin, 2014.

WEISS, P. T.; KAYHANIAN, M.; GULLIVER, J. S.; KHAZANOVICH, L. **Permeable pavement in northern north american urban areas: research review and knowledge gaps.** International Journal of Pavement Engineering, p. 1-20, 2017.

WOODS-BALLARD, B., et al. **The SUDS manual (C753).** CIRIA - Construction Industry Research and Information Association, London, 2015.

WU, H.; LIU, Z.; SUN, B.; YIN, J. **Experimental investigation on freeze-thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC).** Construction and Building Materials, vol. 117, p. 63-71, 2016.

YANG Z., MA W., SHEN W., ZHOU M., **The Aggregate Gradation for the Porous Concrete Pervious Road Base Material.** Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science, vol. 23, p. 391-294, 2008.

ZHANG, P.; et al. **Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete.** Cement and Concrete Research, vol. 100, p. 60-67, 2017.

## ANEXO A – MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade em laboratório, a NBR 16416:2015 apresenta duas metodologias:

- i. Ensaio pelo anel simples, baseado na ASTM C1701 – *Standard Test Method for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete*. O ensaio consiste em selar temporariamente um anel com diâmetro interno de  $300 \pm 10$  mm com a superfície da amostra de pavimento permeável. Essa amostra deve ter no mínimo  $0,5$  m<sup>2</sup>. É feito um processo chamado de pré-molhagem, com o despejo de  $3,60 \pm 0,05$  kg de água dentro do anel, mantida a um nível entre 10 e 15 mm. Se o tempo para infiltrar completamente essa quantidade for superior a 30 segundos, faz-se o ensaio com o mesmo volume de água, repetindo o processo. Se o tempo for inferior a 30 segundos, utiliza-se um total de  $18 \pm 0,05$  kg de água e procede-se da mesma maneira. O coeficiente de permeabilidade é dado pela equação A.1.

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

Sendo I a taxa de infiltração (mm.h<sup>-1</sup>), M a massa da água infiltrada (kg), D o diâmetro interno do anel (mm), t o tempo necessário para infiltração da água (s) e  $K = 4.583.666.000$  (SI) o fator que converte as unidades.

- ii. Conforme NBR 13292 – solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante (ABNT, 1995). Um corpo de prova cilíndrico deve ser vedado lateralmente para permitir a passagem da água apenas na direção axial. O equipamento é composto por um reservatório que mantém o nível de água interno constante e fornece para a passagem através da amostra. Coleta-se a água de saída em um recipiente para verificar o volume que passou em um tempo previamente estabelecido. A diferença entre a altura de coleta e a altura do nível da água dentro do reservatório de carga constante é a carga hidráulica. A condutividade hidráulica é calculada pela equação A.2.

$$k = \frac{V \cdot L}{h \cdot A \cdot t} \quad (\text{A.2})$$

Sendo  $k$  a condutividade hidráulica ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $V$  o volume de água coletada ( $\text{cm}^3$ ),  $L$  o comprimento do corpo de prova ( $\text{cm}$ ),  $h$  a carga hidráulica ( $\text{cm}$ ),  $A$  a seção transversal da amostra ( $\text{cm}^2$ ) e  $t$  o tempo de coleta da água ( $\text{s}$ ).

Outro método bastante utilizado é baseado nas recomendações da American Concrete Institute (ACI - 522R-10) por meio de um ensaio descrito por Neithalath (2003). Trata-se de um ensaio com carga variável. O equipamento é munido de um registro de esfera para fechamento da circulação da água e uma saída de água com nível constante (Figura A.1).

Figura A.1 – Ensaio de permeabilidade com carga variável



Fonte: Neithalath (2003).

O procedimento de ensaio consiste, inicialmente, com o posicionamento da amostra de concreto permeável no equipamento. Após a instalação, o circuito é aberto permitindo a saturação de água através da amostra de concreto permeável até o dreno, garantindo, assim, a retirada do ar. Em seguida, o circuito é fechado através de um registro de esfera, mantendo-se o nível constante no tubo graduado em 290 mm. Após o momento em que o registro é aberto, mede-se o tempo médio que a água reduz para o nível 70 mm. O coeficiente de permeabilidade, ou condutividade hidráulica, é determinado pela Lei de Darcy (equação A.3):

$$k = \frac{A_1 \cdot L}{A_2 \cdot t} \cdot \log \left( \frac{h_i}{h_f} \right) \quad (\text{A.3})$$



Sendo  $k$  o coeficiente de permeabilidade ( $m.s^{-1}$ ),  $A_1$  a área da seção da amostra ( $m^2$ ),  $A_2$  a área do tubo de carga variável ( $m^2$ ),  $L$  o comprimento da amostra ( $m$ ),  $t$  o tempo ( $s$ ),  $h_i$  a altura inicial ( $m$ ) e  $h_f$  a altura final ( $m$ ).

Em campo, a NBR 16416 (ABNT, 2015) recomenda o mesmo ensaio descrito para determinação da permeabilidade em laboratório, pelo anel simples baseado no método ASTM C1701. Alguns autores (BOOGAARD et al., 2014a; BOOGARD et al., 2014b; FASSMAN et al., 2010; COLLINS et al., 2008; BEAN et al., 2007b) utilizaram o método do duplo anel, ou anéis concêntricos, método também utilizado na determinação da permeabilidade de solos, pois é mais efetivo para criar uma infiltração verdadeiramente vertical. Em compensação, este método despense mais tempo e exige a vedação de dois anéis no contato anel – pavimento.

## **ANEXO B – DIMENSIONAMENTO MECÂNICO E HIDRÁULICO/HIDROLÓGICO**

Na etapa de dimensionamento mecânico é muito importante ter definido qual o tipo de uso: estacionamento, pátio industrial, via de circulação de condomínios residenciais, parques, ciclovias, etc. Além disso, conhecer as vias de acesso, os tipos de usuários, frequência de eventos, composição e magnitude dos veículos de carga.

Ao especificar a camada de revestimento, blocos, placas ou concreto moldado no local, deve-se atender aos requisitos mecânicos exigidos pela NBR 16416 (ABNT, 2015). Esta camada pode agir como um revestimento flexível, a exemplo do bloco intertravado comum, ou como um revestimento rígido, como o concreto moldado no local. Pode-se aplicar alguns procedimentos de cálculo para o dimensionamento, tal como o procedimento AASHTO, WinPAS, PCAPAV, ACI, entre outros (TENNIS et al., 2004). Para o dimensionamento de pavimentos intertravados que agem como revestimento flexível e recebem carregamento elevado, o método empírico da AASHTO é o que melhor se adapta. Este método pode ser usado também para o dimensionamento de revestimento permeável rígido, porém, exige algumas adaptações (BUYUNG E GHANI, 2017; EISENBERG et al., 2015; TENNIS et al., 2004; GHAFUORI et al., 1995a).

Segundo Weiss et al. (2017), o dimensionamento pode ser dispensado quando o pavimento é destinado a carregamentos leves, como veículos de passeio e pedestres. Nestes casos, a necessidade de incrementar as espessuras de um pavimento permeável é oriunda principalmente do dimensionamento hidráulico-hidrológico, conforme características climáticas da região.

No dimensionamento Hidráulico/Hidrológico é determinada a espessura de agregado necessária para armazenar o volume de água calculada. Os dados necessários são características hidráulicas e geomorfológicas do local, bem como a chuva de projeto. As curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) são bastante úteis para o projetista, pois são construídas a partir de registros históricos locais da precipitação versus duração. Com a adoção da IDF há uma maximização das precipitações para cada duração. O que se espera de uma chuva de projeto é que seja representativa e tenha as características de intensidade, volume e duração de uma tormenta de mesma frequência (CANHOLI, 2014). São dois os parâmetros que representam a chuva de projeto:

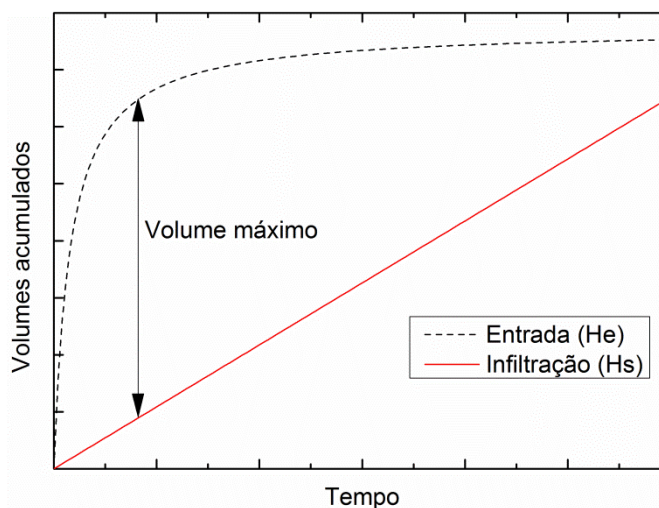
- Tempo de retorno (TR) da precipitação de projeto (anos);

- Duração crítica (t) do evento (minutos).

De acordo com o Anexo B da NBR 16416:2015, o tempo de retorno (TR) da precipitação adotada no dimensionamento de pavimentos permeáveis deve ser no mínimo dez anos e a duração do evento mínima de 60 minutos.

O método conhecido como curva envelope (*rain-envelope method*) ou “método das chuvas” é muito utilizado para o dimensionamento da espessura da camada de base granular. Este método relaciona lâmina d’água acumulada de entrada (He) e de saída (Hs) da estrutura para determinar o volume máximo de armazenamento de estruturas de controle. O armazenamento máximo é obtido pela máxima diferença entre os dois volumes acumulados (Figura A.2).

Figura A.2 – Volume de armazenamento pela diferença entre a curva de entrada e a de saída



Fonte: Adaptado de Urbonas e Stahre (1993).

A equação de entrada (He) é obtida a partir da equação intensidade-duração-frequência (IDF) do local e é afetada pelo coeficiente de escoamento da superfície e relações de áreas, enquanto a equação de saída (Hs) é obtida em função da taxa de infiltração do solo, considerada constante.

Silveira e Goldenfum (2007) utilizaram o método da curva envelope para criar uma metodologia generalizada de pré-dimensionamento de diferentes dispositivos de controle da água pluvial, inclusive pavimentos permeáveis. A determinação das dimensões mínimas dos dispositivos é realizada conforme volume de armazenamento necessário (máxima diferença entre He e Hs). A função Hs é obtida pela multiplicação do tempo pela taxa de saída (equação A.4).

$$H_S = \gamma \cdot H \cdot q_s \cdot \frac{t}{60} \quad (\text{A.4})$$

Sendo  $\gamma$  a razão entre a área de percolação e área do dispositivo,  $H$  a profundidade média do volume de acumulação do dispositivo (mm),  $q_s$  a vazão de saída do dispositivo ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) e  $t$  a duração do evento (minutos).

A vazão de saída do dispositivo ( $q_s$ ) é constante para pavimentos permeáveis com infiltração total, igual à taxa de infiltração do solo saturado. Com o processo de colmatagem da camada de fronteira entre solo e base granular, aplica-se um coeficiente de segurança sobre a taxa de infiltração. WOODS-BALLARD et al. (2015) sugerem um fator de redução de 1,5 para a taxa de infiltração do solo quando o processo de colmatagem não causa danos severos ao sistema.

A taxa de infiltração do solo é obtida por diferentes ensaios em campo ou laboratório, por meio de ensaios de carga d'água constante ou variável. Visto que o nível do lençol freático deve estar a uma distância considerável da base granular de um pavimento permeável e que a determinação da taxa de infiltração do solo será realizada a uma profundidade compatível com cota final da base do pavimento, não é preciso adotar métodos de ensaios que consideram o diferencial de pressão positivo (acima do lençol freático). Um método bastante difundido é o do infiltrômetro de anéis concêntricos. Este equipamento consiste em dois cilindros metálicos de 3mm de espessura e 30cm de altura, com diâmetros de 30 e 50cm, com uma das bordas biseladas para facilitar a cravação no solo. Para a realização do ensaio, os cilindros são instalados à percussão, preenche-se o cilindro interno com uma lâmina constante de 7,5cm de altura de água e o externo com uma altura de água indeterminada, este com a única função de saturar o solo e condicionar a água do cilindro interno a infiltrar uniaxialmente. Utilizando-se de uma régua graduada, o posicionamento do nível é lido em vários intervalos de tempo, propiciando o cálculo da velocidade de infiltração.

A função de entrada  $H_E$  do método da curva envelope é obtida pela multiplicação do tempo pela equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) da região, pelo coeficiente de escoamento e relação de área de contribuição (equação A.5). A equação IDF precisa estar no formato Talbot.

$$I = \frac{a \cdot TR^b}{(t + c)} \rightarrow H_E = \beta \cdot \frac{a \cdot TR^b}{t + c} \cdot \frac{t}{60} \quad (\text{A.5})$$

Sendo  $I$  a intensidade da chuva ( $\text{mm.h}^{-1}$ ),  $TR$  o período de retorno da chuva de projeto (anos),  $t$  a duração da chuva de projeto (min),  $a$ ,  $b$ ,  $c$  os parâmetros da equação IDF e  $\beta$  o produto do coeficiente de escoamento pela razão entre a área de contribuição e área do dispositivo.

O volume máximo armazenado é obtido no momento de maior diferença entre  $H_e$  e  $H_s$ , que ocorre no tempo crítico da chuva de projeto em minutos ( $t_c$ ) (equação A.6).

$$t_c = \sqrt{\frac{\beta \cdot c \cdot a \cdot TR^b}{\gamma \cdot H \cdot q_s}} - c \quad (\text{A.6})$$

Utilizando este tempo crítico nas equações  $H_e$  e  $H_s$  e subtraindo-as, obtém a equação do volume máximo ( $V_{\text{máx}}$ ) em milímetros (equação A.7). Para pavimentos permeáveis, tem-se a área de percolação coincidente com a área do dispositivo em planta. Desse modo

$$\gamma = 1$$

Logo:

$$V_{\text{máx}} = \left( \sqrt{\frac{a}{60}} \cdot \sqrt{\beta} \cdot TR^{\frac{b}{2}} - \sqrt{\frac{c}{60}} \cdot \sqrt{q_s} \right)^2 \quad (\text{A.7})$$

A altura da camada de base granular do dispositivo é calculada pela divisão do volume máximo de armazenamento pela porosidade ( $\eta$ ) do material pétreo utilizado base (equação A.8). A NBR 16416:2015 especifica o valor mínimo de  $\eta = 0,32$ .

$$H = \frac{V_{\text{máx}}}{\eta} \quad (\text{A.8})$$

Sendo  $H$  a altura da camada de base granular (mm),  $V_{\text{máx}}$  o volume máximo na base granular (mm) e  $\eta$  a porosidade do material (valor entre 0 e 1).

É preciso verificar o tempo de esvaziamento da base granular, para permitir a secagem do solo e manutenção da capacidade drenante. De acordo com o Manual de Drenagem Urbana de Porto Alegre (PDDU, 2005), o sistema deve prever um esgotamento do volume acumulado em um período entre 6 e 12 horas. Já no manual SUDS (WOODS-BALLARD et al., 2015) é informado que a determinação do tempo de esvaziamento depende das variáveis hidrológicas adotadas, por exemplo, se o dimensionamento foi realizado para uma chuva com tempo de

retorno entre 10 e 30 anos, é aconselhável especificar que metade do esvaziamento ocorra em 24 horas. Para eventos com tempo de retorno superior, este tempo de esvaziamento pode ser insuficiente até o momento da chuva subsequente. O tempo de esvaziamento é calculado pela equação A.9.

$$t_{\text{esv}} = \frac{H}{q_s} \quad (\text{A.9})$$

Sendo  $t_{\text{esv}}$  o tempo de esvaziamento (h),  $H$  a altura da camada de base granular (mm) e  $q_s$  a taxa de infiltração do solo ( $\text{mm.h}^{-1}$ ).

Quando o tempo de esvaziamento é elevado, uma alternativa é a instalação de drenos no fundo da camada de base granular.

## ANEXO C – ENSAIOS MECÂNICOS

### *Resistência à compressão axial*

A norma NBR 16416 (ABNT, 2015) não exige resistência à compressão axial de concretos permeáveis moldado no local, no entanto, seguiu-se o método de ensaio adotado para concretos convencionais, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007). Os CP's foram mantidos em câmara úmida durante 28 dias, removidos para regularização das superfícies com enxofre e rompidos no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM (LMCC). O rompimento foi realizado em uma prensa marca WPM, modelo DRMB, com capacidade de carga de 300.000 kgf. O cálculo da resistência à compressão axial foi feito conforme equação A.10.

$$F_c = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot D^2} \quad (\text{A.10})$$

Sendo  $F_c$  a resistência à compressão axial (MPa),  $P$  a carga de ruptura (Newtons) e  $D$  o diâmetro do CP (mm).

### *Resistência à tração por compressão diametral*

A mesma prensa foi utilizada na determinação da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, que seguiu a NBR 7222 (ABNT, 2011). Foram colocadas tiras de madeira para a transmissão da carga, uma em cima e outra embaixo. A resistência foi obtida pela equação A.11.

$$F_t = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (\text{A.11})$$

Sendo  $F_t$  a resistência à compressão diametral (MPa),  $P$  a carga de ruptura (Newtons),  $D$  o diâmetro do CP (cm) e  $L$  o comprimento do CP (cm).

### *Resistência à tração na flexão*

Para o ensaio de resistência à tração na flexão aos 28 dias (NBR 12142, 2010) foi adotada uma prensa da marca AMSLER com capacidade de carga de 20.000 kgf. Os corpos de prova prismáticos 10x10x40cm foram preparados com a marcação das distâncias para aplicação de carga e apoios. Marcou-se 2,5 cm de cada extremidade, onde o corpo de prova foi apoiado, deixando um vão central de 35 centímetros. A carga foi aplicada no ponto central deste vão. O cálculo da resistência à tração na flexão foi feito segundo equação A.12.

$$F_f = \frac{P \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (\text{A.12})$$

Sendo  $F_f$  a resistência à tração na flexão (MPa),  $P$  a carga de ruptura (Newtons),  $L$  a dimensão do vão (mm),  $b$  a largura média do CP (mm) e  $d$  a altura média do CP (mm).

A NBR 16416 (ABNT, 2015) exige que concretos permeáveis destinados a tráfego leve e moldados no local devem resistir a 2,0 MPa à tração na flexão.

### *Desgaste por abrasão*

O ensaio de desgaste por abrasão foi realizado segundo as especificações da norma ASTM C1747/1747M (2013): *Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion*, pois se trata de um método específico para o concreto permeável. O ensaio tem início com a pesagem de três CP's. Em seguida, os três corpos de prova são colocados juntos em uma máquina conhecida como *Los Angeles Machine*, este equipamento consiste em um cilindro de aço que gira em torno de seu eixo a uma velocidade controlada. A norma exige que sejam aplicadas 500 rotações a uma velocidade entre 30 e 33 rotações por minuto. O material é retirado e peneirado em uma peneira com abertura de 25 mm. O material retido é pesado e calcula-se a perda de massa (em porcentagem) do processo de abrasão. Fez-se o uso dos mesmos CP's utilizados no ensaio de permeabilidade ao tirá-los dos moldes de PVC após a idade de 28 dias.

### *Módulo de Elasticidade Dinâmico*

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi por equipamento ultrassônico, conforme NBR 8802 (ABNT, 2013) e NBR 15630 (ABNT, 2008). Utilizaram-se corpos de prova 10x7cm Marshall, pois a irregularidade da estrutura interna do concreto permeável é



grande e a adoção de um CP menor é favorável. Fez-se a regularização das superfícies com gesso, segundo recomendação da norma NBR 8802:2013. O equipamento emite uma onda vibratória e mede o tempo de percurso através do concreto. A velocidade de propagação é calculada pela divisão do comprimento do CP e tempo medido. A partir da velocidade, calculou-se o módulo de elasticidade dinâmico segundo equação A.13.

$$E_d = \gamma \cdot V^2 \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (\text{A.13})$$

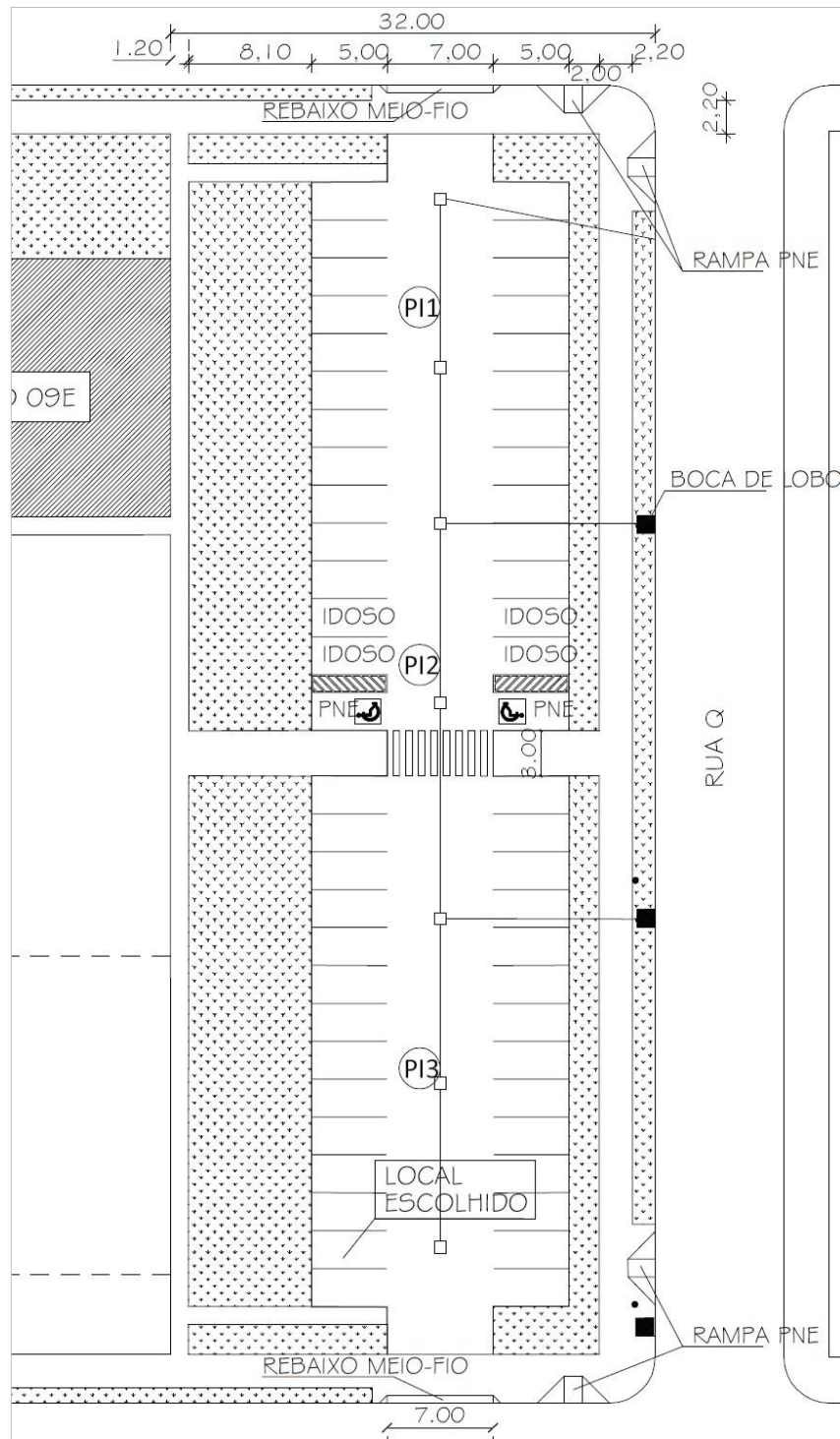
Sendo  $E_d$  o módulo de elasticidade dinâmico (MPa),  $V$  a velocidade longitudinal de propagação de onda ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\gamma$  a massa específica do material ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) e  $\nu$  o coeficiente de Poisson considerado igual a 0,22, conforme Goede (2009).



## APÊNDICE A – PROJETOS DO ESTACIONAMENTO

O projeto original do estacionamento é mostrado na figura A.3. Este projeto foi elaborado pela equipe da Pró-Reitoria de Infraestrutura da UFSM.

Figura A.3 – Projeto original do estacionamento e local escolhido

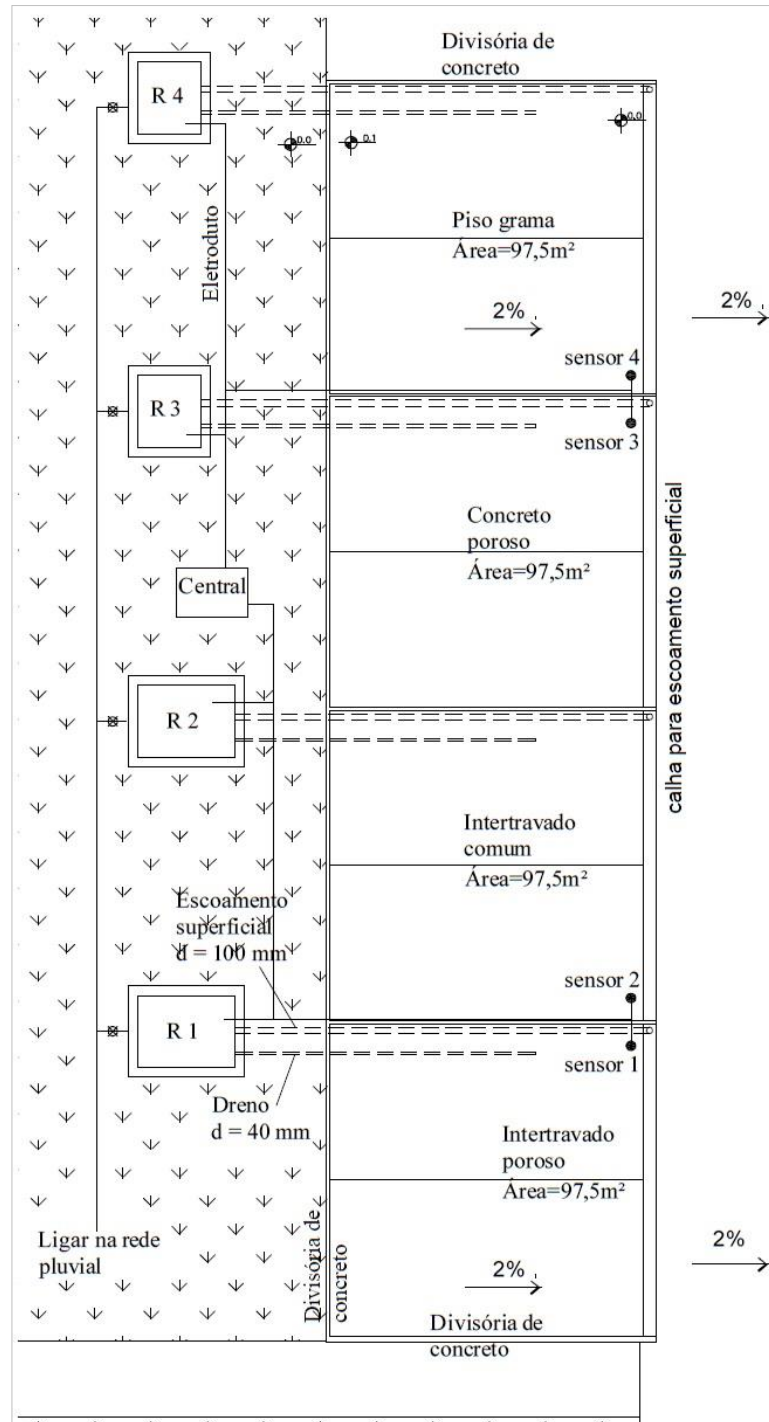


Fonte: Adaptado de UFSM.

A figura A.4 apresenta o projeto das 8 vagas de estacionamento. A água escoada é direcionada às suas respectivas caixas de armazenamento, R1, R2, R3 e R4, por tubos de PVC que passam por baixo das vagas. Cada caixa de armazenamento possui um sensor ultrassônico HC-SR04 instalado em seu interior, a uma altura segura, para monitorar o nível de água. Os pontos denominados sensor 1, sensor 2, sensor 3 e sensor 4 ficam próximos às calhas que captam o escoamento superficial, em locais que os carros podem passar com os pneus. Por este motivo, especificou-se o sensor de pressão MPX5010DP para serem instalados no fundo da camada de agregado em cada um dos quatro pontos. Todos os sensores são ligados à central via eletrodutos enterrados.

As calhas para captação do escoamento superficial foram construídas em concreto. São quatro calhas individuais que captam o escoamento de cada par de vagas com o mesmo revestimento.

Figura A.4 – Projeto das vagas de estacionamento experimentais



Fonte: Autor.

## APÊNDICE B – RELAÇÃO DE EVENTOS E CORRELAÇÕES DOS RESULTADOS DOS MÓDULOS

(continua)

Evento	Data	P (mm)	Duração (h)	Tempo de retorno (anos)	UAS	I méd (mm.h <sup>-1</sup> )	I máx 5 (mm.h <sup>-1</sup> )	I máx 30 (mm.h <sup>-1</sup> )	Nível no pavimento (cm)						Tempo de esvaziamento (min)						Infiltração média do solo (mm.h <sup>-1</sup> )	Escoamento superficial (%)					
									I.P.S.	I.P.C.	I.C.S.	I.C.C.	C.P.S.	I.C.C.	I.P.S.	I.P.C.	I.C.S.	I.C.C.	C.P.S.	I.C.C.		I.P.S.	I.P.C.	I.C.S.	I.C.C.	C.P.S.	I.C.C.
									Colmatção natural																		
1	24/08/2018	56,0	16,1	0,039	I	3,47	31,20	15,60	sd	sd	sd	3,5	13,6	11,2	sd	sd	sd	1183	1066	864	14,6	14,0	1,1	39,2	10,6	0,0	2,9
2	30/08/2018	5,4	5,7	0,000	I	0,95	19,20	3,60	0,3	0,1	0,0	sd	0,4	0,1	450	37	0	sd	71	71	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	31/08/2018	87,0	47,9	0,092	I	1,82	28,80	13,60	15,4	15,4	10,2	sd	15,0	16,6	1906	3121	388	sd	1545	1447	sd	ext	11,2	17,2	ext	3,1	2,8
4	02/09/2018	18,6	25,0	0,000	III	0,74	14,40	3,60	1,8	1,5	sd	0,9	2,3	1,0	972	616	sd	526	1292	717	11,4	9,6	0,0	9,7	17,6	1,3	2,7
5	15/09/2018	25,0	sd	sd	I	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	13,0	0,0	2,5	8,1	0,0	1,8
6	16/09/2018	8,0	sd	sd	II	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	4,7	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0
7	17/09/2018	11,6	19,3	0,000	I	0,60	14,40	8,40	0,8	0,1	sd	0,1	2,0	0,6	270	35	sd	10	579	427	4,3	7,0	0,0	6,4	10,4	0,0	0,3
8	20/09/2018	4,8	0,9	0,000	II	5,65	26,40	9,20	0,0	0,0	sd	0,0	0,2	0,6	3	0	sd	11	209	381	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd
9	23/09/2018	27,0	10,9	0,001	I	2,48	50,40	28,00	9,9	6,0	sd	4,9	7,9	7,6	sd	sd	sd	sd	sd	sd	13,0	21,8	4,8	22,8	39,4	0,5	1,2
10	24/09/2018	52,0	sd	sd	III	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	25,6	9,5	28,8	53,8	33,7	1,0
11	25/09/2018	9,8	13,9	0,000	III	0,71	12,00	10,00	3,0	1,0	0,7	sd	0,4	0,7	sd	747	sd	476	1429	1330	2,9	15,7	5,4	27,3	45,4	3,1	2,3
12	29/09/2018	38,0	18,5	0,003	I	2,05	7,20	4,80	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	5,0	14,3	1,9	5,5	9,5	2,0	2,1
13	01/10/2018	55,0	31,4	0,011	I	1,75	81,60	41,20	16,0	14,6	9,0	11,0	16,5	14,9	2303	2065	1337	sd	1233	1297	5,6	ext	8,6	38,7	45,1	14,0	2,8
14	09/10/2018	3,2	4,3	0,000	I	0,74	9,60	3,60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	12/10/2018	24,0	11,8	0,000	I	2,04	12,00	8,00	2,2	0,5	0,0	0,2	0,4	0,0	637	509	0	191	185	0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,2
16	28/10/2018	6,0	sd	sd	I	sd	sd	sd	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	30/10/2018	15,2	13,0	0,000	I	1,17	9,60	5,60	sd	sd	sd	0,6	0,0	0,3	sd	sd	sd	371	0	408	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	03/11/2018	13,6	4,2	0,000	II	3,25	40,80	15,20	sd	sd	sd	0,5	0,0	0,4	sd	sd	sd	200	0	80	16,0	0,0	0,0	1,6	10,0	0,0	0,0

(continuação)

Evento	Data	P (mm)	Duração (h)	Tempo de retorno (anos)	UAS	I méd (mm.h <sup>-1</sup> )	I máx 5 (mm.h <sup>-1</sup> )	I máx 30 (mm.h <sup>-1</sup> )	Nível no pavimento (cm)						Tempo de esvaziamento (min)						Infiltração média do solo (mm.h <sup>-1</sup> )	Escoamento superficial (%)						
									I.P.S.	I.P.C.	I.C.S.	I.C.C.	C.P.S.	I.C.C.	I.P.S.	I.P.C.	I.C.S.	I.C.C.	C.P.S.	I.C.C.		I.P.S.	I.P.C.	I.C.S.	I.C.C.	C.P.S.	I.C.C.	
19	13/11/2018	25,4	15,5	0,000	I	1,64	28,80	10,00	1,7	0,0	0,6	0,0	0,3	0,4	805	0	758	0	560	425	6,5	0,6	0,0	0,0	0,6	0,0	0,3	
20	17/11/2018	34,8	13,3	0,003	III	2,63	45,60	20,00	9,3	5,5	0,0	0,0	4,1	2,7	1298	950	0	0	584	448	6,7	5,3	0,1	5,4	10,3	0,0	0,0	
21	23/11/2018	114,0	5,7	0,194	I	9,45	31,20	15,20	16,5	16,7	11,0	13,0	sd	sd	1654	1484	1542	1208	sd	sd	13,5	ext	sd	16,7	4,0	0,5	sd	
22	02/11/2018	10,0	sd	sd	I	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	4,4	0,0	2,7	5,8	0,0	0,0	
23	14/12/2018	4,2	12,1	0,000	I	0,35	16,80	4,00	0,3	0,7	0,3	0,0	sd	sd	300	700	400	0	sd	sd	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
24	17/12/2018	30,0	56,0	0,000	I	0,54	38,40	12,80	0,9	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	200	0	0	0	578	578	8,1	10,7	0,0	3,3	9,1	0,0	0,9	
25	20/12/2018	103,0	8,5	5,015	III	12,12	64,80	34,40	16,8	15,1	14,4	17,9	16,4	14,9	2078	1870	754	832	762	752	20,7	15,2	6,5	7,8	30,4	12,3	2,4	
26	20/12/2018	16,0	12,7	0,000	III	1,26	24,00	6,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,1	0,0	9,1	18,5	0,0	0,9	
27	28/12/2018	16,7	0,7	0,012	I	25,05	79,20	29,60	1,6	0,0	0,0	0,9	1,1	0,7	318	0	0	452	220	366	22,3	18,8	1,3	11,7	14,6	0,1	0,2	
28	03/01/2019	12,2	8,9	0,000	I	1,37	19,20	4,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	
29	06/01/2019	10,4	0,5	0,001	II	20,13	43,20	20,80	2,5	0,0	0,0	0,4	0,8	0,0	360	0	0	20	52	0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
30	07/01/2019	71,6	23,4	0,094	II	3,06	45,60	24,80	20,8	16,0	4,8	9,7	10,3	12,4	1754	1360	364	768	920	920	15,5	16,1	4,5	11,1	36,3	0,8	2,6	
31	13/01/2019	5,0	sd	sd	I	sd	sd	sd	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	5,3	8,3	0,0	0,0	
32	15/01/2019	26,0	sd	sd	I	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	30,7	1,7	14,8	28,9	0,0	1,1	
33	17/01/2019	37,8	7,5	0,013	III	5,04	52,80	23,60	18,3	15,7	0,9	sd	7,2	9,8	1314	1311	1148	sd	801	804	8,7	sd	0,0	7,9	sd	1,1	1,9	
Limpeza 1																												
34	14/02/2019	65,0	47,8	0,000	I	0,84	72,00	10,40	9,4	4,9	0,9	0,0	2,6	1,3	1635	572	1200	0	267	184	7,3	1,5	0,0	2,4	2,4	0,0	0,6	
Colmatação acelerada																												
35	24/02/2019	15,0	sd	sd	I	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	0,2	0,0	6,6	14,1	0,0	0,0
36	09/03/2019	84,0	sd	sd	I	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	10,0	17,4	25,4	39,9	1,3	3,0

Evento	Data	P (mm)	Duração (h)	Tempo de retorno (anos)	UAS	I méd (mm.h <sup>-1</sup> )	I máx 5 (mm.h <sup>-1</sup> )	I máx 30 (mm.h <sup>-1</sup> )	Nível no pavimento (cm)						Tempo de esvaziamento (min)						Infiltração média do solo (mm.h <sup>-1</sup> )	Escoamento superficial (%)						
									I.P.S.	I.P.C.	I.C.S.	I.C.C.	C.P.S.	I.C.C.	I.P.S.	I.P.C.	I.C.S.	I.C.C.	C.P.S.	I.C.C.		I.P.S.	I.P.C.	I.C.S.	I.C.C.	C.P.S.	I.C.C.	
37	14/03/2019	14,0	sd	sd	III	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	3,1	9,0	10,3	31,0	0,0	1,6
38	17/03/2019	78,0	sd	sd	II	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	30,0	34,0	23,8	50,0	1,2	3,5
39	19/03/2019	20,0	sd	sd	III	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	12,2	4,1	24,8	54,1	1,0	2,9
40	04/04/2019	53,6	16,8	0,028	I	3,20	84,00	29,20	5,0	5,2	0,0	2,6	7,6	8,5	380	710	0	189	398	425	12,6	32,8	37,0	35,8	69,0	14,3	7,8	
41	15/04/2019	30,0	16,3	0,001	I	1,84	43,20	17,60	0,3	0,6	0,6	0,4	0,0	0,4	186	170	200	370	0	370	9,3	15,3	26,8	20,3	34,8	5,0	2,1	
42	26/04/2019	51,8	38,5	0,006	I	1,35	24,00	12,00	10,2	9,6	0,0	3,7	9,6	10,9	720	710	0	737	822	854	7,6	29,0	27,0	22,3	48,0	2,2	2,3	
43	03/05/2019	29,4	0,7	0,330	I	42,00	79,20	44,00	3,5	2,5	2,1	4,4	5,8	5,8	382	555	550	320	240	240	19,1	51,0	57,0	24,9	85,0	48,0	3,8	
44	03/05/2019	7,6	4,3	0,000	III	1,79	72,00	12,40	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	sd	54,5	53,1	51,8	63,1	43,8	0,0	
45	05/05/2019	9,8	31,2	0,000	III	0,31	19,20	4,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	sd	7,7	14,3	12,4	19,3	2,4	1,3	
46	09/05/2019	31,0	11,5	0,002	I	2,70	38,40	18,40	4,3	3,8	0,0	1,9	4,2	3,8	431	871	0	309	415	415	9,6	26,9	43,0	27,4	50,1	21,7	2,5	
Limpeza 2																												
47	13/05/2019	21,0	20,7	0,000	III	1,02	9,60	5,60	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0,5	0	0	0	513	0	255	sd	0,7	0,0	2,5	3,9	6,5	5,2	
48	30/05/2019	36,0	35,3	0,001	III	1,02	16,80	4,40	4,1	1,4	0,3	0,6	0,0	4,2	1549	458	510	278	0	432	5,5	0,1	0,0	0,0	0,3	0,7	1,8	
49	28/06/2019	20,0	3,5	0,003	I	5,69	50,40	11,60	sd	2,9	sd	sd	sd	0,4	sd	2000	sd	sd	sd	350	3,3	8,2	12,3	10,0	15,5	9,3	0,0	
50	29/06/2019	20,0	16,6	0,000	II	1,20	19,20	6,80	2,0	1,5	0,0	1,1	sd	4,0	1040	950	0	240	sd	250	4,2	1,9	7,4	7,7	8,1	0,0	0,2	
51	13/07/2019	28,0	15,0	0,003	I	1,87	50,40	20,00	3,2	0,6	0,0	0,1	0,0	0,0	715	525	0	229	0	0	5,2	11,1	12,1	5,1	12,2	3,8	2,0	



Equações de correlação dos módulos experimentais apresentados em Resultados

(continua)

Variável principal	Correlação	Módulo	Equação	Parâmetros				R <sup>2</sup>
				a	b	c	d	
Escoamento superficial	P x E	I.P.S. e I.P.C.	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	15,728	0,025			0,19
	P x E	I.P.S. (areia)	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	25,310	0,10459			0,06
	P x E	I.P.C. (arg.)	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	37,907	0,0619			0,06
	TR x E	I.P.S. e I.P.C.	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	11,089	220,248			0,07
	TR x E	I.P.S. (areia)	$y=a.x^b$	63,291	0,133			0,82
	TR x E	I.P.C. (arg.)	$y=a.x^b$	62,019	0,093			0,76
Nível	P x N	I.P.S. e I.P.C.	$y=a.\exp(b/x)$	27,828	-52,522			0,81
	P x N	I.P.S. (areia)	$y=a.\exp(b/x)$	27,919	-69,570			0,70
	P x N	I.P.C. (arg.)	$y=a.\exp(b/x)$	32,121	-78,053			0,77
	TR x N	I.P.S. e I.P.C.	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	15,920	75,834			0,8
	TR x N	I.P.S. (areia)	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	4,645	1357,486			0,34
	TR x N	I.P.C. (arg.)	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	4,300	1367,190			0,3
Tempo de esvaziamento	P x Te	I.P.S. e I.P.C.	$y=a.\exp(b/x)$	3014,761	-38,649			0,73
	P x Te	I.P.S. (areia)	$y=a.\exp(b/x)$	1079,909	-35,610			0,76
	P x Te	I.P.C. (arg.)	$y=a.\exp(b/x)$	1252,562	-27,664			0,69
	TR x Te	I.P.S. e I.P.C.	$y=a-b.\exp(-c.x^d)$	1900,889	1655,876	24,142	0,727	0,65
	TR x Te	I.P.S. (areia)	$y=a-b.\exp(-c.x^d)$	493,997	493,998	204186,6	1,834	0,81
	TR x Te	I.P.C. (arg.)	$y=a-b.\exp(-c.x^d)$	709,271	732,833	2353595	2,170	0,90
Escoamento superficial	P x E	I.C.S. e I.C.C.	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	23,013	0,033			0,13
	P x E	I.C.S. (areia)	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	23,804	3,349			0,02
	P x E	I.C.C. (arg.)	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	53,137	0,101			0,08
	TR x E	I.C.S. e I.C.C.	$y=a.x^b$	20,435	0,064			0,01
	TR x E	I.C.S. (areia)	$y=a.x^b$	40,016	0,0618			0,36
	TR x E	I.C.C. (arg.)	$y=a.x^b$	95,630	0,109			0,98
Nível	P x N	I.C.S. e I.C.C.	$y=a.\exp(b/x)$	40,032	-124,918			0,94
	P x N	I.C.S. (areia)	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	0,477	0,097			0,05
	P x N	I.C.C. (arg.)	$y=a.\exp(b/x)$	5,329	-27,369			0,52
	TR x N	I.C.S. e I.C.C.	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	14,685	8,569			0,92
	TR x N	I.C.S. (areia)	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	312,128	0,0201			0,88
	TR x N	I.C.C. (arg.)	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	4,296	21,302			0,10
Tempo de esvaziamento	P x Te	I.C.S. e I.C.C.	$y=a.\exp(b/x)$	1506,716	-43,545			0,50
	P x Te	I.C.S. (areia)	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	133,198	0,0971			0,05
	P x Te	I.C.C. (arg.)	$y=a.\exp(b/x)$	784,510	-26,986			0,58
	TR x Te	I.C.S. e I.P.C.	$y=a.\exp(b/x)$	947,588	-0,005			0,48
	TR x Te	I.C.S. (areia)	$y=a.\exp(b/x)$	1367,749	-0,300			0,84
	TR x Te	I.C.C. (arg.)	$y=a.(1-\exp(-b.x))$	390,693	3124,776			0,55
Escoamento superficial	P x E	C.P.S. e C.P.C.	$y=a.\exp(b/x)$	8,886	-43,435			0,14
	P x E	C.P.S. (areia)	$y=a.\exp(b/x)$	4,236	15,392			0,13
	P x E	C.P.C. (arg.)	$y=a.\exp(b/x)$	5,329	-18,538			0,44
	TR x E	C.P.S. e C.P.C.	$y=a.x^b$	4,792	0,218			0,24
	TR x E	C.P.S. (areia)	$y=a.x^b$	64,790	0,258			0,65

(continuação)

Variável principal	Correlação	Módulo	Equação	Parâmetros				R <sup>2</sup>
				a	b	c	d	
Escoamento S.	TR x E	C.P.C. (arg.)	$y=a.x^b$	4,511	0,083			0,14
	P x N	C.P.S. e C.P.C.	$y=a.exp(b/x)$	35,883	-76,855			0,94
Nível	P x N	C.P.S. (areia)	$y=a.exp(b/x)$	29,373	-65,061			0,77
	P x N	C.P.C. (arg.)	$y=a.exp(b/x)$	38,446	-73,055			0,82
	TR x N	C.P.S. e C.P.C.	$y=a.(1-exp(-b.x))$	15,107	31,185			0,83
	TR x N	C.P.S. (areia)	$y=a.(1-exp(-b.x))$	5,681	879,883			0,45
	TR x N	C.P.C. (arg.)	$y=a.(1-exp(-b.x))$	6,144	762,255			0,41
	P x Te	C.P.S. e C.P.C.	$y=a.exp(b/x)$	1097,809	-7,288			0,28
Tempo de esvaziamento	P x Te	C.P.S. (areia)	$y=a.exp(b/x)$	380,675	-4,599			0,08
	P x Te	C.P.C. (arg.)	$y=a.exp(b/x)$	466,261	-4,537			0,13
	TR x Te	C.P.S. e C.P.C.	$y=a-b.exp(-c.x^d)$	1033,253	693,866	328,165	1,307	0,33
	TR x Te	C.P.S. (areia)	$y=a-b.exp(-c.x^d)$	485,994	521,242	1460,437	1,132	0,60
	TR x Te	C.P.C. (arg.)	$y=a-b.exp(-c.x^d)$	496,665	498,061	589,918	0,868	0,61

## Equações de correlação dos módulos experimentais não apresentados em Resultados

(continua)

Variável principal	Correlação	Módulo	Equação	Parâmetros				R <sup>2</sup>
				a	b	c	d	
Escoamento superficial	Iméd x E	I.P.S. e I.P.C.	$y=a(1-\exp(-bx))$	6,599	2,751			0,10
	Iméd x E	I.P.S. (areia)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	45,689	-0,652			0,47
	Iméd x E	I.P.C. (arg.)	$y=a(1-\exp(-bx))$	53,287	0,621			0,63
	Imáx30 x E	I.P.S. e I.P.C.	$y=a(1-\exp(-bx))$	207,849	0,002			0,29
	Imáx30 x E	I.P.S. (areia)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	46,386	-5,542			0,34
	Imáx30 x E	I.P.C. (arg.)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	53,867	-5,233			0,50
	Imáx5 x E	I.P.S. e I.P.C.	$y=a(1-\exp(-bx))$	71,053	0,003			0,21
	Imáx5 x E	I.P.S. (areia)	$y=a(1-\exp(-bx))$	80,690	0,010			0,58
	Imáx5 x E	I.P.C. (arg.)	$y=a(1-\exp(-bx))$	58,084	0,023			0,65
Nível	Iméd x N	I.P.S. e I.P.C.	$y=a(1-\exp(-bx))$	9,575	0,548			0,23
	Iméd x N	I.P.S. (areia)	$y=a(1-\exp(-bx))$	3,760	1,961			0,09
	Iméd x N	I.P.C. (arg.)	$y=a(1-\exp(-bx))$	3,511	2,049			0,09
	Imáx30 x N	I.P.S. e I.P.C.	$y=a-b \cdot \exp(-c \cdot x^d)$	11,658	11,749	0,000	5,360	0,57
	Imáx30 x N	I.P.S. (areia)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	4,807	-4,956			0,09
	Imáx30 x N	I.P.C. (arg.)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	4,401	-4,583			0,08
	Imáx5 x N	I.P.S. e I.P.C.	$y=a \cdot \exp(b/x)$	19,863	-33,867			0,37
	Imáx5 x N	I.P.S. (areia)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	2,734	7,151			0,01
	Imáx5 x N	I.P.C. (arg.)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	2,538	7,556			0,01
Tempo de esvaziamento	Iméd x Te	I.P.S. e I.P.C.	$y=a(1-\exp(-bx))$	1042,903	0,927			0,13
	Iméd x Te	I.P.S. (areia)	$y=a(1-\exp(-bx))$	363,937	1,273			0,18
	Iméd x Te	I.P.C. (arg.)	$y=a(1-\exp(-bx))$	660,358	0,598			0,32
	Imáx30 x Te	I.P.S. e I.P.C.	$y=a \cdot \exp(b/x)$	2419,094	-13,338			0,40
	Imáx30 x Te	I.P.S. (areia)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	480,343	-6,466			0,21
	Imáx30 x Te	I.P.C. (arg.)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	853,469	-10,160			0,34
	Imáx5 x Te	I.P.S. e I.P.C.	$y=a(1-\exp(-bx))$	1919,786	0,019			0,28
	Imáx5 x Te	I.P.S. (areia)	$y=a(1-\exp(-bx))$	305,593	0,137			0,01
	Imáx5 x Te	I.P.C. (arg.)	$y=a(1-\exp(-bx))$	467,333	0,075			0,03
Escoamento superficial	Iméd x E	I.C.S. e I.C.C.	$y=a(1-\exp(-bx))$	17,834	0,985			0,06
	Iméd x E	I.C.S. (areia)	$y=a(1-\exp(-bx))$	31,338	1,757			0,29
	Iméd x E	I.C.C. (arg.)	$y=a \cdot (b-\exp(-c \cdot x))$	71,409	1,186	0,383		0,80
	Imáx30 x E	I.C.S. e I.C.C.	$y=a(1-\exp(-bx))$	90,760	0,011			0,27
	Imáx30 x E	I.C.S. (areia)	$y=a(1-\exp(-bx))$	30,625	0,220			0,21
	Imáx30 x E	I.C.C. (arg.)	$y=a \cdot x^b$	12,409	0,503			0,74
	Imáx5 x E	I.C.S. e I.C.C.	$y=a(1-\exp(-bx))$	38,778	0,014			0,19
	Imáx5 x E	I.C.S. (areia)	$y=a(1-\exp(-bx))$	43,390	0,023			0,49
	Imáx5 x E	I.C.C. (arg.)	$y=a \cdot \exp(b \cdot x)$	25,009	0,013			0,73
Nível	Iméd x N	I.C.S. e I.C.C.	$y=a(1-\exp(-bx))$	6,188	0,305			0,18
	Iméd x N	I.C.S. (areia)	$y=a(1-\exp(-bx))$	102,857	0,001			0,91
	Iméd x N	I.C.C. (arg.)	$y=a(1-\exp(-bx))$	4,403	0,216			0,48
	Imáx30 x N	I.C.S. e I.C.C.	$y=a \cdot x^b$	0,104	1,197			0,25
	Imáx30 x N	I.C.S. (areia)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	73361,710	-460,325			0,90
	Imáx30 x N	I.C.C. (arg.)	$y=a \cdot x^b$	0,082	1,040			0,49

(continuação)

Variável principal	Correlação	Módulo	Equação	Parâmetros				R <sup>2</sup>
				a	b	c	d	
Nível	Imáx5 x N	I.C.S. e I.C.C.	$y=a \cdot \exp(b/x)$	12,776	-42,894			0,25
	Imáx5 x N	I.C.S. (areia)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	3,766	-29,740			0,17
	Imáx5 x N	I.C.C. (arg.)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	2,645	-14,602			0,04
Tempo de esvaziamento	Iméd x Te	I.C.S. e I.C.C.	$y=a(1-\exp(-bx))$	594,424	0,445			0,16
	Iméd x Te	I.C.S. (areia)	$y=a(1-\exp(-bx))$	2822,386	0,005			0,86
	Iméd x Te	I.C.C. (arg.)	$y=a(1-\exp(-bx))$	310,774	2,115			0,13
	Imáx30 x Te	I.C.S. e I.C.C.	$y=a \cdot \exp(b/x)$	1062,609	-12,131			0,23
	Imáx30 x Te	I.C.S. (areia)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	18750330,0	-459,251			0,84
	Imáx30 x Te	I.C.C. (arg.)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	389,128	-4,527			0,12
	Imáx5 x Te	I.C.S. e I.C.C.	$y=a(1-\exp(-bx))$	892,272	0,019			0,18
	Imáx5 x Te	I.C.S. (areia)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	479,378	-71,859			0,16
	Imáx5 x Te	I.C.C. (arg.)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	231,984	6,464			0,02
Escoamento superficial	Iméd x E	C.P.S. e C.P.C.	$y=a \cdot (1-\exp(-b \cdot x))$	2,880	9,400			0,02
	Iméd x E	C.P.S. (areia)	$y=a \cdot (1-\exp(-b \cdot x))$	47,511	0,210			0,50
	Iméd x E	C.P.C. (arg.)	$y=a \cdot (1-\exp(-b \cdot x))$	4,635	0,478			0,27
	Imáx30 x E	C.P.S. e C.P.C.	$y=a \cdot \exp(b/x)$	30,611	-49,562			0,19
	Imáx30 x E	C.P.S. (areia)	$y=a \cdot \exp(b \cdot x)$	7,679	0,040			0,38
	Imáx30 x E	C.P.C. (arg.)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	9,030	-20,967			0,44
	Imáx5 x E	C.P.S. e C.P.C.	$y=a \cdot x^b$	0,030	1,214			0,09
	Imáx5 x E	C.P.S. (areia)	$y=a \cdot x^b$	0,125	1,279			0,50
	Imáx5 x E	C.P.C. (arg.)	$y=a \cdot x^b$	0,061	0,969			0,25
Nível	Iméd x N	C.P.S. e C.P.C.	$y=a(1-\exp(-bx))$	6,487	0,649			0,13
	Iméd x N	C.P.S. (areia)	$y=a(1-\exp(-bx))$	6,102	0,535			0,18
	Iméd x N	C.P.C. (arg.)	$y=a(1-\exp(-bx))$	6,052	0,664			0,14
	Imáx30 x N	C.P.S. e C.P.C.	$y=a \cdot x^b$	0,160	1,204			0,38
	Imáx30 x N	C.P.S. (areia)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	7,709	-10,287			0,21
	Imáx30 x N	C.P.C. (arg.)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	7,792	-9,050			0,18
	Imáx5 x N	C.P.S. e C.P.C.	$y=a \cdot \exp(b/x)$	16,540	-38,279			0,33
	Imáx5 x N	C.P.S. (areia)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	4,481	-5,529			0,00
	Imáx5 x N	C.P.C. (arg.)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	4,656	-4,002			0,00
Tempo de esvaziamento	Iméd x Te	C.P.S. e C.P.C.	$y=a(1-\exp(-bx))$	531,841	35,985			0,04
	Iméd x Te	C.P.S. (areia)	$y=a(1-\exp(-bx))$	305,236	1,939			0,09
	Iméd x Te	C.P.C. (arg.)	$y=a(1-\exp(-bx))$	374,439	1,991			0,15
	Imáx30 x Te	C.P.S. e C.P.C.	$y=a \cdot \exp(b/x)$	1307,099	-19,892			0,37
	Imáx30 x Te	C.P.S. (areia)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	2215,903	-68,643			0,67
	Imáx30 x Te	C.P.C. (arg.)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	1435,494	-42,974			0,78
	Imáx5 x N	C.P.S. e C.P.C.	$y=a \cdot \exp(b/x)$	827,062	-8,818			0,16
	Imáx5 x N	C.P.S. (areia)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	216,259	8,074			0,01
	Imáx5 x N	C.P.C. (arg.)	$y=a \cdot \exp(b/x)$	288,631	5,005			0,01

## APÊNDICE C – RELAÇÃO DE EVENTOS E CORRELAÇÕES DOS RESULTADOS DO ESTACIONAMENTO

(continua)

Evento	Data	P (mm)	Duração (h)	Tempo de retorno (anos)	UAS	I méd (mm.h <sup>-1</sup> )	I máx 5 (mm.h <sup>-1</sup> )	I máx 30 (mm.h <sup>-1</sup> )	Nível no pavimento (cm)				Tempo de armazenamento (min)				Vazão máxima de escoamento (L.min <sup>-1</sup> )				Infiltração média do solo (mm.h <sup>-1</sup> )	Escoamento superficial (%)				
									I.P.	I.C.	C.P.	P.G.	I.P.	I.C.	C.P.	P.G.	I.P.	I.C.	C.P.	P.G.		I.P.	I.C.	C.P.	P.G.	
1	24/09/2018	46,2	10,6	0,025	III	4,35	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	0,0	0,0	sd	sd	
2	29/09/2018	43,4	8,5	0,025	III	5,13	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	13,0	4,6	sd	5,8	
3	01/10/2018	28,2	2,6	0,016	III	11,06	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	4,6	4,9	sd	5,7	
4	01/10/2018	14,0	21,7	0,000	III	0,64	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	2,9	2,2	sd	2,2	
5	08/10/2018	13,0	23,4	0,000	I	0,56	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	2,2	2,1	1,1	1,5	
6	09/10/2018	31,2	77,6	0,000	I	0,40	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	5,1	3,0	2,0	2,3	
7	31/10/2018	12,0	8,0	0,000	I	1,50	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	0,0	4,0	3,0	4,6	
8	03/11/2018	15,0	2,0	0,001	I	7,50	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	3,1	4,5	2,9	3,3	
9	13/11/2018	21,0	18,0	0,000	I	1,17	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	3,8	3,1	3,1	3,7	
10	17/11/2018	39,0	13,0	0,006	II	3,00	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	7,5	3,9	3,0	3,4	
11	23/11/2018	81,0	64,0	0,036	I	1,27	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	5,1	6,2	ext	sd	
12	27/11/2018	3,6	8,0	0,000	III	0,45	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	0,0	0,0	0,0	0,0	
13	30/11/2018	40,0	2,7	0,120	I	14,63	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	4,6	24,2	6,7	2,5	
14	18/12/2018	15,0	5	0,000	I	3,00	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	3,7	0,0	2,3	0,5	
15	20/12/2018	114,4	10	7,179	II	11,44	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	58,7	ext	ext	ext	
16	21/12/2018	20,8	12	0,000	III	1,73	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	3,6	7,3	3,6	sd	
17	07/01/2019	10,6	6,0	0,000	III	1,77	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	3,0	0,0	0,0	0,0	
18	08/01/2019	62,8	26	0,000	I	0,41	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	0,15	4,32	1,38	sd	sd	sd	3,4	15,7	6,6	0,8
19	10/01/2019	27,0	26,0	0,009	III	0,32	60,00	16,40	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	3,1	14,6	0,0	0,0

Evento	Data	P (mm)	Duração (h)	Tempo de retorno (anos)	UAS	I méd (mm.h <sup>-1</sup> )	I máx 5 (mm.h <sup>-1</sup> )	I máx 30 (mm.h <sup>-1</sup> )	Nível no pavimento (cm)				Tempo de armazenamento (min)				Vazão máxima de escoamento (L.min <sup>-1</sup> )				Infiltração média do solo (mm.h <sup>-1</sup> )	Escoamento superficial (%)			
									I.P.	I.C.	C.P.	P.G.	I.P.	I.C.	C.P.	P.G.	I.P.	I.C.	C.P.	P.G.		I.P.	I.C.	C.P.	P.G.
									20	14/01/2019	11,4	83,2	0,083	II	1,57	86,40	19,60	sd	sd	sd		sd	sd	sd	sd
21	15/01/2019	9,0	7,3	0,004	III	0,69	52,80	9,20	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	0,72	19,00	1,51	0,00	sd	5,2	56,5	14,9	sd
22	16/01/2019	17,2	13,1	0,000	III	0,34	14,40	6,40	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	0,11	2,36	1,28	0,11	sd	26,5	89,4	sd	sd
23	18/01/2019	10,6	50,9	0,000	II	0,17	7,20	1,60	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	0,00	0,00	0,00	0,00	sd	0,1	0,0	0,2	sd
24	15/02/2019	16,4	61,9	0,000	II	0,32	19,20	5,60	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	6,3	9,5	8,8	sd
25	24/02/2019	16,6	20,1	0,000	I	0,82	33,60	6,80	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	0,5	5,9	0,0	0,0
26	08/03/2019	26,6	73,6	0,000	I	0,36	19,20	6,40	0,0	0,0	2,1	0,0	0	0	893	0	0,03	0,03	0,04	0,00	5,02	3,2	2,5	6,6	0,0
27	16/03/2019	49,8	12,6	0,030	I	3,97	26,40	17,60	0,0	0,0	5,0	0,0	0	0	704	0	0,22	4,10	0,64	0,37	4,41	6,1	17,7	sd	1,2
28	18/03/2019	8,4	9,5	0,000	III	0,89	sd	sd	0,0	0,0	1,4	0,0	0	0	180	0	0,16	0,39	0,00	0,00	5,83	3,5	6,6	0,0	0,0
29	04/04/2019	106,0	16,0	1,994	I	6,63	115,20	66,40	1,3	0,0	5,8	0,9	46	0	433	36	0,70	12,60	0,80	0,80	4,80	1,6	20,9	3,4	3,1
30	15/04/2019	29,6	15,7	0,371	I	1,88	110,40	31,20	0,0	0,0	1,2	1,2	0	0	913	819	0,00	12,50	0,12	0,00	6,73	0,0	36,3	2,6	14,5
31	25/04/2019	16,4	20,9	0,000	III	0,78	14,40	5,20	0,0	0,0	0,9	0,0	0	0	180	0	0,00	1,10	0,00	0,00	3,86	1,3	6,4	0,0	0,9
32	26/04/2019	62,8	sd	sd	I	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	2,3	34,0	3,8	4,6
33	03/05/2019	38,8	4,6	1,975	I	8,50	127,20	68,40	0,7	sd	4,2	1,0	25	sd	180	25	0,47	13,35	0,50	0,47	6,00	1,7	57,7	1,2	1,7
34	03/05/2019	14,0	11,6	0,000	III	1,20	33,60	10,80	0,0	sd	1,8	0,0	0	sd	166	0	0,10	4,17	0,00	0,00	12,00	1,7	14,1	0,0	0,0
35	05/05/2019	19,0	18,9	0,003	III	1,01	50,40	15,20	0,0	sd	2,6	0,0	0	sd	208	0	0,10	5,40	0,07	0,09	8,57	2,6	39,0	1,0	1,4
36	08/05/2019	10,6	10,4	0,000	III	1,02	19,20	8,00	0,0	0,0	0,7	0,0	0	0	198	0	0,00	0,00	0,00	0,00	4,28	0,0	0,0	0,0	0,0
37	09/05/2019	40,6	12,0	0,083	III	3,38	86,40	35,20	0,0	0,0	4,5	1,0	0	0	305	52	0,27	8,90	0,19	0,19	8,11	1,0	30,9	2,8	3,3
38	13/05/2019	32,6	20,8	0,001	III	1,56	24,00	10,40	0,0	0,0	3,0	0,0	0	0	569	0	0,00	2,94	0,09	0,09	5,00	0,4	7,9	2,6	3,1
39	20/05/2019	32,0	5,9	0,007	I	5,39	50,40	18,00	0,0	0,0	2,0	0,0	0	0	425	0	0,00	7,22	0,05	0,09	6,24	0,0	8,5	1,1	3,0
40	22/05/2019	35,0	46,7	0,000	I	0,75	21,60	10,00	0,0	0,0	2,1	0,0	0	0	500	0	0,00	2,90	0,04	0,10	13,09	0,0	4,0	1,8	3,2
41	27/05/2019	19,0	9,1	0,000	III	2,10	31,20	9,20	0,0	0,0	1,2	0,0	0	0	440	0	0,00	0,00	0,00	0,00	6,75	0,0	0,0	0,0	0,0
42	30/05/2019	12,4	36,4	0,000	II	0,34	14,40	5,20	0,0	0,0	1,0	0,0	0	0	213	0	0,00	0,00	0,00	0,00	6,84	0,0	0,0	0,0	0,0

(Continuação)

Evento	Data	P (mm)	Duração (h)	Tempo de retorno (anos)	UAS	I méd (mm.h <sup>-1</sup> )	I máx 5 (mm.h <sup>-1</sup> )	I máx 30 (mm.h <sup>-1</sup> )	Nível no pavimento (cm)				Tempo de armazenamento (min)				Vazão máxima de escoamento (L.min <sup>-1</sup> )				Infiltração média do solo (mm.h <sup>-1</sup> )	Escoamento superficial (%)				
									I.P.	I.C.	C.P.	P.G.	I.P.	I.C.	C.P.	P.G.	I.P.	I.C.	C.P.	P.G.		I.P.	I.C.	C.P.	P.G.	
									43	08/06/2019	5,6	7,0	0,000	I	0,80	9,60	3,60	0,0	0,0	0,0		0,0	0	0	0	0
44	25/06/2019	5,4	5,4	0,000	I	1,01	9,60	5,60	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
45	29/06/2019	21,6	16,0	0,001	I	1,35	38,40	8,00	0,0	0,0	4,0	4,0	0	0	758	791	0,09	3,63	0,06	0,02	7,00	1,5	16,8	3,3	1,0	
46	13/07/2019	6,4	14,3	0,000	I	0,45	7,20	3,60	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
47	22/07/2019	114,4	59,6	0,339	I	1,92	64,8	30	0,9	0	3,5	0	11	0	1939	0	sd	sd	sd	sd	12	4,3	sd	5,6	1,9	
48	26/07/2019	10,8	2,9	0,000	III	3,77	24	10,4	0	0	2,5	0	0	0	300	0	sd	sd	sd	sd	18	0,0	sd	2,5	1,8	
49	29/07/2019	27,4	9,3	0,027	III	2,95	72	16	0	0	4,2	0	0	0	340	0	sd	sd	sd	sd	18	5,1	40,0	6,8	2,5	
50	01/08/2019	6,2	3,8	0,000	II	1,62	14,4	5,6	0	0	1	0	0	0	242	0	sd	sd	sd	sd	16,21	0	0	0	0	
51	09/08/2019	46,0	23,7	0,006	I	1,94	40,8	15,2	0	0	3,2	0	0	0	800	0	0,46	1,16	sd	0,05	7,2	1,7	16,4	5,8	0,9	

Equações de correlação das vagas de estacionamento apresentadas em Resultados

Variável principal	Correlação	Pavimento	Equação	Parâmetros				R <sup>2</sup>
				a	b	c	d	
Escoamento superficial	P x E	I.P.	$y=a.x^b$	0,007	1,692			0,22
	P x E	I.C.	$y=a.x^b$	5,741	0,293			0,03
	P x E	C.P.	$y=a.x^b$	1,008	0,345			0,05
	P x E	P.G.	$y=a.exp(b/x)$	4,174	-14,097			0,16
	TR x E	I.P.	$y=a.exp(b.x)$	2,741	0,426			0,76
	TR x E	I.C.	$y=a.x^b$	36,714	0,147			0,22
	TR x E	C.P.	$y=a.x^b$	5,439	0,081			0,13
	TR x E	P.G.	$y=a.x^b$	4,691	0,123			0,24
Vazão de escoamento	P x Q	I.P.	$y=a+b.x+c.x^2$	0,082	$-4.10^{-4}$	$5.10^{-5}$		0,34
	P x Q	I.C.	$y=a.x^b$	0,559	0,634			0,16
	P x Q	C.P.	$y=a.x^b$	0,015	0,899			0,16
	P x Q	P.G.	$y=a.exp(b/x)$	1,916	-92,597			0,81
	TR x Q	I.P.	$y=a.x^b$	0,429	0,264			0,58
	TR x Q	I.C.	$y=a.x^b$	12,128	0,199			0,88
	TR x Q	C.P.	$y=a.x^b$	0,503	0,276			0,67
	TR x Q	P.G.	$y=a.x^b$	0,450	0,369			0,71



## Equações de correlação das vagas de estacionamento não apresentadas em Resultados

Variável principal	Correlação	Pavimento	Equação	Parâmetros				R <sup>2</sup>
				a	b	c	d	
Escoamento superficial	Iméd x E	I.P.	$y=a. \exp(b. x)$	2,653	0,138			0,13
	Iméd x E	I.C.	$y=a. \exp(b. x)$	12,157	0,047			0,01
	Iméd x E	C.P.	$y=a. \exp(b. x)$	2,541	0,049			0,01
	Iméd x E	P.G.	$y=a. (1-\exp(-b. x))$	3,374	0,589			0,14
	Imáx30 x E	I.P.	$y=a. (1-\exp(-b. x))$	2,784	0,4317			0,01
	Imáx30 x E	I.C.	$y=a. (1-\exp(-b. x))$	40,886	0,059			0,21
	Imáx30 x E	C.P.	$y=a. (1-\exp(-b. x))$	4,185	0,139			0,07
	Imáx30 x E	P.G.	$y=a. (1-\exp(-b. x))$	4,514	0,041			0,22
	Imáx5 x E	I.P.	$y=a. (1-\exp(-b. x))$	2,721	0,197			0,01
	Imáx5 x E	I.C.	$y=a. (1-\exp(-b. x))$	65,539	0,009			0,29
	Imáx5 x E	C.P.	$y=a. (1-\exp(-b. x))$	5,283	0,027			0,15
	Imáx5 x E	P.G.	$y=a. x^b$	0,013	1,269			0,33
	Vazão de escoamento	Iméd x Q	I.P.	$y=a. \exp(b. x)$	0,081	0,228		
Iméd x Q		I.C.	$y=a. \exp(b. x)$	2,609	0,203			0,29
Iméd x Q		C.P.	$y=a. \exp(b. x)$	0,227	0,099			0,01
Iméd x Q		P.G.	$y=a. \exp(b/x)$	1,204	-6,163			0,69
Imáx30 x Q		I.P.	$y=a. x^b$	0,011	0,919			0,39
Imáx30 x Q		I.C.	$y=a. \exp(b/x)$	15,424	-14,253			0,50
Imáx30 x Q		C.P.	$y=a. x^b$	0,072	0,482			0,08
Imáx30 x Q		P.G.	$y=a. x^b$	0,001	1,473			0,74
Imáx5 x Q		I.P.	$y=a. \exp(b/x)$	0,614	-48,646			0,39
Imáx5 x Q		I.C.	$y=a. \exp(b/x)$	20,600	-53,477			0,70
Imáx5 x Q		C.P.	$y=a. \exp(b/x)$	0,505	-18,539			0,08
Imáx5 x Q		P.G.	$y=a. \exp(b/x)$	4,467	-274,319			0,43

## APÊNDICE D – LEVANTAMENTO DE CUSTO DOS PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Para o levantamento dos custos dos pavimentos permeáveis de concreto de cimento Portland utilizados na presente pesquisa, tomou-se como base a tabela SINAPI do Rio Grande do Sul do mês de outubro de 2019, visto que era a versão mais atual no momento. Também foram levados em consideração os orçamentos dos fornecedores e despesas para a compra de cada item. A seguir são apresentados os valores unitários de material (MAT) e mão-de-obra (M.O.) e o total geral de cada etapa dos pavimentos.

Pavimento	Banco	Código	Descrição	Und	Quant.	Valor Unit. com BDI (R\$)			Total Geral (R\$)		
						MAT	M. O.	Total	MAT	M. O.	Total
I.P.	SINAPI - RS 10/2019	83338	Escavação	m³	12,5	2,28	0,81	3,09	28,50	10,125	38,62
I.P.	SINAPI - RS 10/2019	73710	Base compactada	m³	5,0	97,72	3,99	101,71	488,60	19,95	508,55
I.P.	SINAPI e fornecedor	92404	Revestimento finalizado	m²	25,0	50,00	9,66	59,66	1250,00	241,50	1491,50
I.C.	SINAPI - RS 10/2019	83338	Escavação	m³	12,5	2,28	0,81	3,09	28,50	10,12	38,62
I.C.	SINAPI - RS 10/2019	73710	Base compactada	m³	5,0	97,72	3,99	101,71	488,60	19,95	508,55
I.C.	SINAPI - RS 10/2019	92404	Revestimento finalizado	m²	25,0	46,45	9,66	56,11	1161,25	241,50	1402,75
C.P.	SINAPI - RS 10/2019	83338	Escavação	m³	12,5	2,28	0,81	3,09	28,50	10,12	38,62
C.P.	SINAPI - RS 10/2019	73710	Base compactada	m³	5,0	97,72	3,99	101,71	488,60	19,95	508,55
C.P.	SINAPI e fornecedor	94997	Concreto usinado colocado	m²	25,0	106,11	12,25	118,36	2652,75	306,25	2959,00
P.G.	SINAPI - RS 10/2019	83338	Escavação	m³	12,5	2,28	0,81	3,09	28,50	10,12	38,62
P.G.	SINAPI - RS 10/2019	73710	Base compactada	m³	5,0	97,72	3,99	101,71	488,60	19,95	508,55
P.G.	SINAPI - RS 10/2019	40515	Revestimento assentado	m²	25,0	47,37	9,66	57,03	1184,25	241,50	1425,75
P.G.	Fornecedor	-	Gramma	m²	12,0	7,00	0	7,00	84,00	0	84,00
P.G.	SINAPI - RS 10/2019	98503	Plantio de grama	m²	25,0	0	20,31	20,31	0	507,75	507,75

A partir dos valores finais de cada etapa construtiva, calculou-se o custo total de cada pavimento (25 m<sup>2</sup> cada) e o custo por metro quadrado.

<b>Pavimento</b>	<b>Custo total (R\$)</b>	<b>Custo por metro quadrado (R\$/m<sup>2</sup>)</b>
I.P.	2038,68	81,55
I.C.	1949,93	78,00
C.P.	3506,18	140,25
P.G.	2564,68	102,59