FILIPPE DE OLIVEIRA CURVO

**ESTUDO DA DRENABILIDADE DE CALÇADAS EXPERIMENTAIS EM
CONCRETO PERMEÁVEL NO CAMPUS ARMANDO SALLES DE
OLIVEIRA DA USP**

**SÃO PAULO
2017**

FILIPPE DE OLIVEIRA CURVO

**ESTUDO DA DRENABILIDADE DE CALÇADAS EXPERIMENTAIS EM CONCRETO
PERMEÁVEL NO CAMPUS ARMANDO SALLES DE OLIVEIRA DA USP**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Ciências

Orientador: Prof. Dr. José Tadeu Balbo
Departamento de Engenharia de Transportes

São Paulo
2017

FILIPPE DE OLIVEIRA CURVO

Engenheiro Civil, Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, 2014

**ESTUDO DA DRENABILIDADE DE CALÇADAS EXPERIMENTAIS EM CONCRETO
PERMEÁVEL NO CAMPUS ARMANDO SALLES DE OLIVEIRA DA USP**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia de
Transportes – Infraestrutura de Transportes

Orientador: Prof. Dr. José Tadeu Balbo
Departamento de Engenharia de
Transportes

São Paulo
2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Curvo, Filipe de Oliveira

Estudo da drenabilidade de calçadas experimentais em concreto permeável no campus Armando Salles de Oliveira da USP / F. O. Curvo -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

105 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Pavimento de concreto 2.Drenagem 3.Concreto permeável 4.Taxa de infiltração 5.Comportamento hidráulico I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

***“Whatever tomorrow brings I’ll be there
with open arms and open eyes”***

(Incubus)

AGRADECIMENTOS

Para agarrar a oportunidade que surgiu na minha vida de fazer um programa de pós-graduação e desenvolver toda a pesquisa, tive que contar com o apoio de muitos. Dessa forma, nada mais justo do que agradecer por todos que, de alguma forma, contribuíram em alguma etapa do processo, desde o incentivo à dedicação para conclusão.

Primeiramente agradeço a toda a minha família (pai, mãe, padrasto, irmãos) que se dispôs a me ajudar de todas as formas para que fosse possível a realização desse projeto. Sem a participação de cada um, nada teria sido realizável;

Aos outros membros da família que, de alguma forma, se fizeram presentes no incentivo à continuidade no projeto. Deixo a lembrança da minha Tia Geyhsa, que nos deixou precocemente. Acompanhar toda a sua luta pela vida, de maneira indireta, deixou um exemplo a ser seguido;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por conceder fundos por meio do Projeto Universal 2014 ao coordenador da pesquisa;

Ao Prof. Dr. José Tadeu Balbo por acreditar no meu potencial, inclusive nas horas mais difíceis. Além disso, e o mais importante, pela orientação e ensinamentos durante todo o Mestrado. Agradeço por termos criado um vínculo de amizade, além de tudo. Agradeço pela oportunidade de assistir às suas e demais aulas brilhantes durante o período de estudos;

À Prof^a Liv Haselbach por todos os ensinamentos transmitidos na área de Concreto Permeável, por passar um pouco de sua vasta experiência na área, além da amizade criada durante o período que ficou em São Paulo;

Aos parceiros que ajudaram, tanto financeiramente quanto tecnicamente, durante todo o processo de estudo da mistura e construção das calçadas:

- Lafarge Holcim;
- EP Engenharia de Pisos;
- Odebrecht Ambiental;
- Grace Brasil;

- Prefeitura do Campus da Capital da Universidade de São Paulo; e
- Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento.

Aos inicialmente colegas Lúcio e Andréia, que, ao passar do tempo, se tornaram grandes amigos, por me apoiarem, incentivarem e se tornarem grandes participantes desse projeto, seja de forma direta ou indireta;

Às minhas amigadas que, mesmo à distância, se fizeram presentes de diversas formas, fazendo com que eu não desistisse em momento algum. Agradeço em especial ao Vinícius Resende Domingues, um grande amigo e incentivador;

E, por fim, à Giovana Nóbrega que se mostrou uma grande parceira, admiradora e torcedora. Com suas palavras e incentivos, desde o momento da minha mudança para São Paulo até a apresentação do trabalho, todas as dificuldades se mostraram mais fáceis de serem superadas e os objetivos tornaram-se palpáveis.

Para me resguardar de qualquer esquecimento, meus sinceros agradecimentos àqueles que, de alguma forma, tornaram possível o êxito nesse projeto. Muito obrigado a todos.

RESUMO

A tecnologia de pavimento em concreto permeável surgiu como potencial solução para problemas relacionados à drenagem urbana provenientes da diminuição da área permeável de uma metrópole. Desta forma, sua utilização vem crescendo cada vez mais, inclusive no Brasil. Para avaliar o comportamento hidráulico de uma calçada em concreto permeável, o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LMP-EPUSP) desenvolveu duas misturas para a aplicação em duas calçadas em concreto permeável construídas no Campus da Universidade de São Paulo. A primeira estrutura possui dimensões de 1,00 m x 8,65 m, sem manta permeável, ao passo que a segunda estrutura possui 1,50 m x 84,80 m com sua área dividida em 3 trechos que diferem entre si da seguinte forma: primeiro trecho com manta permeável e infiltração de água no solo; segundo trecho com lona impermeável e sistema de drenagem; e terceiro trecho sem manta e com infiltração de água no solo. Além da análise do comportamento hidráulico da mistura, os métodos construtivos adotados foram avaliados, desde a escolha do local até a cura do concreto. Todas as adequações do método de execução da primeira calçada para a segunda são explícitas e justificadas nesse trabalho, tais como a existência da manta permeável, que na primeira calçada não existia e na segunda surge como uma das soluções para se evitar a colmatagem por bombeamento, e detalhes na compactação do revestimento, mantendo uma superfície mais regular. Feita a análise do método construtivo, essa pesquisa também apresenta diversos resultados de taxas de infiltração, em cm/s, in loco obtidos através do ensaio baseado na ASTM C-1701, além de mostrar, através de comparações com diversas referências, o grande potencial hidráulico das misturas desenvolvidas. Esses resultados mostram o comportamento hidráulico das misturas com o tempo. Das informações apresentadas, fica evidente a dependência da escolha do local para um bom comportamento hidráulico a longo prazo, além de explicitar o quão a taxa de infiltração diminui com o tempo em um pavimento construído em ambiente pouco suscetível à colmatagem proveniente de árvores e em local muito suscetível. Além disso, o estudo mostra que, apesar de pequenas diferenças nos pavimentos, tais como a infiltração ou não de água no solo, e, no caso contrário, a existência de um sistema de drenagem, o comportamento hidráulico é semelhante. A mesma conclusão é obtida comparando-se os ensaios realizados em bordas e centro do pavimento. Todos os resultados mostrados e conclusões tiradas a partir desses mostram o grande potencial drenante do

pavimento de concreto permeável, potencializando com a seleção adequada de materiais, local e método construtivo.

Palavras chave: concreto permeável; taxa de infiltração; comportamento hidráulico.

ABSTRACT

Pervious concrete pavement came as a potential solution to problems related to urban drainage, consequence of the decrease of the permeability area of a metropolis. In this way, its use has been increasing all over the world, including Brazil. In order to evaluate the hydraulic behavior of a permeable concrete sidewalk, the Pavement Mechanics Laboratory of the University of São Paulo developed two mixtures. These mixtures were made for an application on two sidewalks in permeable concrete built in the Campus of the University of São Paulo. The first sidewalk has 1.00 m x 8.65 m, without a geotextile, and the second has 1.50 m x 84.80 m, divided into 3 stretches differing from each other as follows: first section with a geotextile and infiltration of water on soil; Second stretch with waterproof tarpaulin and drainage system; And the third stretch has not a geotextile, but count with the infiltration of water on soil. In addition to the analysis of the hydraulic behavior of the mixture, the constructive methods adopted were evaluated, since the choice of the construction site, until the concrete cure. All adaptations of the method of execution of the first sidewalk to the second one are explicit and justified in this work, such as the existence of the geotextile, that in the first sidewalk did not exist and in the second it appears as one of the solutions to avoid the clogging. Another adaptation was the compaction adopted, which is more regular on the second sidewalk. After the analysis of the constructive method, this research also presents several results of infiltration rates, in cm/s, obtained through the test based on ASTM C-1701, besides showing, through comparisons with several references, the great potential Hydraulic of the mixtures applied. These results show the hydraulic behavior of the mixtures over time. From the information presented, the dependence on the choice of site for a good long-term hydraulic behavior is verified, it is also evidente how much the rate of infiltration decreases with time in a pavement built in a site next to trees and another types of vegetation. In addition, this research shows that the little differences in the methods results in little differences in the infiltration rate, but the hydraulic behavior remains similar. The same conclusion is obtained by comparing the tests performed at the edges and center of the pavement. All presented results and conclusions shows the great potential of the mixtures developed by the LMP-USP, which can be enhanced though the suitable materials selection, construction place and constructive method.

Keywords: pervious concrete; infiltration rate; hydraulic behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo V-I-S	5
Figura 2 - Tendência da relação entre ocupação x impermeabilidade	6
Figura 3 - Concreto permeável	9
Figura 4 - Variação da porosidade com adições na mistura e variação na granulometria	14
Figura 5 - Variação da densidade com a porosidade	15
Figura 6 - Variação da resistência à compressão com a densidade	16
Figura 7 - Variação da porosidade com adição de areia e variação no grau de compactação	17
Figura 8 - Porosidade de mistura permeável com diferentes proporções de substituição do agregado	18
Figura 9 - Variação da permeabilidade com a porosidade.....	22
Figura 10 - Permeabilidade das misturas com adição de látex, areia e fibra.....	23
Figura 11 - Variação da permeabilidade com alteração no grau de compactação e com adição de areia	24
Figura 12 - Variação permeabilidade após ciclos de colmatção com argila.....	25
Figura 13 - Permeabilidade do concreto com substituição de agregado em diversas proporções	27
Figura 14 - Relação entre densidade e condutividade hidráulica (permeabilidade)	31
Figura 15 - Efeito na resistência à compressão com a adição de látex e areia	33
Figura 16 - Efeito na resistência à compressão com a adição de fibra	34
Figura 17 - Resistência à compressão das misturas com substituição de agregado.....	35
Figura 18 - Relação entre densidade e resistência à compressão	35
Figura 19 - Variação da perda de massa por abrasão com a adição de agregado reciclado ...	40
Figura 20 - Resistência à fadiga do concreto permeável com adição de polímeros.....	41
Figura 21 - Regularização da base da calçada executada na USP	45
Figura 22 - Rolo para compactação sendo utilizado na Calçada Preliminar na USP	47
Figura 23 - Rolo para compactação sendo utilizado	48
Figura 24 - Calçada realizada na USP sem juntas de indução de fissuras	49
Figura 25 - Equipamento para execução das juntas.....	50
Figura 26 - Calçada Preliminar na USP coberta com lona plástica.....	51
Figura 27 - Utilização de duas camadas de lona plástica para proteção	51
Figura 28 - Permeabilidade pré e pós manutenção por varredor e a vácuo	54

Figura 29 - Mapa da localização da calçada preliminar na Universidade de São Paulo.....	57
Figura 30 - Local da calçada preliminar	58
Figura 31 - Seção transversal - Calçada preliminar	59
Figura 32 - Curva granulométrica – RCD aplicado na base da calçada	59
Figura 33 - Mapa da localização da calçada definitiva	60
Figura 34 - Local calçada definitiva - Lado pista	61
Figura 35 - Local calçada definitiva - Lado praça	61
Figura 36 - Seções transversais dos trechos 1 e 2 - Mistura LMP	62
Figura 37 - Seção Transversal da caixa coletora com sistema de drenagem da calçada definitiva - Trecho 2.....	63
Figura 38 - Curvas granulométricas dos agregados utilizados	64
Figura 39 - Corpos de prova colmatados.....	65
Figura 40 - Etapas execução calçada preliminar	68
Figura 41 - Etapas da construção da calçada definitiva	72
Figura 42 - Anel de Infiltração	75
Figura 43 - Locação dos pontos do ensaio de infiltração – calçada preliminar	76
Figura 44 - Locação dos pontos do ensaio de infiltração – calçada definitiva - trecho 1	77
Figura 45 - Locação dos pontos do ensaio de infiltração – calçada definitiva - trecho 2	77
Figura 46 - Locação dos pontos do ensaio de infiltração – calçada definitiva - trecho 3	78
Figura 47 - Médias - Taxas de Infiltração - Calçada Preliminar	80
Figura 48 - Situação calçada preliminar antes do ensaio de 26/01/2017.....	81
Figura 49 - Diferença de nível no início da calçada preliminar com terreno natural.....	82
Figura 50 - Médias das taxas de infiltração - Trechos 1, 2 e 3 - calçada definitiva	85
Figura 51 - Mapa da área afetada pela desagregação	86
Figura 52 - Detalhe - superfície da área com desagregação	86
Figura 53 - Médias - trecho 2 - área com desagregação	87
Figura 54 - Detalhe da superfície - trechos 1 e 2.....	88
Figura 55 - Detalhe da superfície - trecho 3	89
Figura 56 - Taxas de infiltração - Trecho 1 - Bordas e centro.....	90
Figura 57 - Taxas de infiltração - Trecho 2 - Bordas e centro.....	91
Figura 58 - Taxas de infiltração - Trecho 3 - Bordas e centro.....	91
Figura A.1 - Dimensões – Anel de infiltração	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Quantidades dos materiais em mistura de concreto permeável	11
Tabela 2.2. Variação da resistência a compressão com adição de superplastificante	12
Tabela 2.3. Variação da porosidade e densidade com adição de agregado reciclado	19
Tabela 2.4. Porosidade em misturas de alto desempenho	20
Tabela 2.5. Variação da permeabilidade após simulação de colmatção em corpos de prova cilíndricos.....	25
Tabela 2.6. Variação da permeabilidade após simulação de colmatção em testemunhos ...	25
Tabela 2.7. Variação porosidade após simulação de colmatção com argilas, limpeza e ciclos de chuva.....	26
Tabela 2.8. Variação da permeabilidade com a adição de agregado reciclado	27
Tabela 2.9. Porosidade obtida e permeabilidade de concreto permeável	28
Tabela 2.10. Permeabilidade de concreto permeável de alto desempenho	30
Tabela 2.11. Resistência à compressão de mistura de alto desempenho	37
Tabela 2.12. Dados de permeabilidade após manutenção por aspiração a vácuo.....	53
Tabela 3.1. Misturas preparadas para a Calçada Preliminar.....	65
Tabela 3.2. Misturas preparadas para a Calçada Definitiva	66
Tabela 4.1. Taxas de infiltração - Calçada Preliminar.....	79
Tabela 4.2. Taxas de Infiltração - Trecho 1.....	83
Tabela 4.3. Taxas de Infiltração - Trecho 2.....	84
Tabela 4.4. Taxas de Infiltração - Trecho 3.....	84
Tabela 4.5 - Resumo dos Testes de Hipóteses - Trecho 2	88
Tabela 4.6. Resumo dos Testes de Hipóteses - Trecho 1 e Trecho 2	90
Tabela 4.7 - Resumo dos Testes de Hipóteses - Centro e Bordas	92
Tabela 4.8. Comparativo de infiltração - Calçadas x Referências.....	93
Tabela 4.9. Taxas de infiltração - Concreto permeável x Outros pavimentos permeáveis.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCP	Concreto de Cimento Portland
CPA	Camada Porosa de Atrito
CRMCA	<i>Colorado Ready Mixed Concrete Association</i>
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
EUA	Estados Unidos da América
HPPC	<i>High Performance Pervious Concrete</i>
LMP	Laboratório de Mecânica de Pavimentos
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
PVC	Policloreto de Vinila
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
UHMP	<i>Ultra High Performance Matrix</i>
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
Ai	Área Impermeável
a/c	Água / Cimento
D	Diâmetro
I	Taxa de Infiltração
Km	Quilômetro
M	Massa
Qp	Vazão Máxima da Bacia
t	Tempo
Tc	Tempo de Concentração

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Motivação para a pesquisa	1
1.2.	Objetivos da pesquisa	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1.	Desenvolvimento e Drenagem Urbana	4
2.2.	Histórico dos Pavimentos Permeáveis	6
2.3.	Pavimento Permeável x Revestimento Drenante.....	7
2.4.	Tipos de Pavimentos Permeáveis	8
2.4.1.	Revestimento em Concreto Asfáltico Poroso.....	8
2.4.2.	Revestimento em Blocos Pré-Moldados de CCP.....	8
2.4.3.	Revestimento CCP Poroso	8
2.5.	Concreto Permeável.....	9
2.5.1.	Benefícios do Concreto Permeável	10
2.5.2.	Proporções da Mistura	11
2.5.3.	Propriedades do Concreto Permeável Fresco	12
2.5.4.	Propriedades do Concreto Permeável Endurecido	13
2.5.5.	Colmatção do Concreto	42
2.5.6.	Projeto	42
2.5.7.	Métodos e Etapas de Construção e Manutenção	44
3.	METODOLOGIA DE PESQUISA	56
3.1.	Projetos de Calçadas em Concreto Permeável na Universidade de São Paulo	56
3.1.1.	Calçada Preliminar.....	57
3.1.2.	Calçada Definitiva	59
3.2.	Misturas Empregadas nas Calçadas em Concreto Permeável na Universidade de São Paulo	63

3.2.1.	Calçada Preliminar.....	63
3.2.2.	Calçada Definitiva	65
3.3.	Execução das Calçadas em Concreto Permeável na Universidade de São Paulo	67
3.3.1.	Calçada Preliminar.....	67
3.3.2.	Calçada Definitiva	70
3.4.	Ensaio de Infiltração <i>In Situ</i>.....	75
3.4.1.	Calçada Preliminar.....	75
3.4.2.	Calçada Definitiva	76
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79
4.1.	Resultados dos Ensaio de Infiltração <i>In Situ</i>.....	79
4.1.1.	Calçada Preliminar.....	79
4.1.2.	Calçada Definitiva	82
4.1.3.	Análise e Comparação dos Resultados.....	93
5.	CONCLUSÕES	95
5.1.	Recomendações para trabalhos futuros.....	97
	ANEXO A.....	103

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação para a pesquisa

O grande aumento da densidade populacional, proveniente do desenvolvimento urbano ocorrido a partir da década de 60, fez com que aumentasse proporcionalmente a área impermeável das grandes cidades e suas regiões metropolitanas, sobretudo em regiões como São Paulo. Essas áreas impermeáveis podem ser telhados, calçadas, vias de tráfego, ciclovias, estacionamentos, aeroportos, ou qualquer outro tipo de construção ou situação que diminua a porcentagem de solo exposto. Maiores áreas impermeáveis causam aumento da vazão máxima (Q_p) de uma bacia, decorrente do menor tempo de concentração (T_c), da redução da evapotranspiração e do escoamento subterrâneo.

Assim, as onerosas soluções de drenagem, com objetivo de escoar a água o mais rápido possível, surgiram como únicas soluções para os problemas de escoamento de águas pluviais. A canalização desse escoamento transporta todo o problema para jusante.

Recentemente, vêm se intensificando as pesquisas sobre pavimento asfáltico ou de concreto. Nesta base surgem os pavimentos permeáveis, capazes de escoar parte da água precipitada e fazendo com que esta infiltre no solo do subleito ou seja armazenada na sua estrutura ou em estruturas complementares ao projeto. Ou seja, surgem novos tipos de pavimentos com objetivo de diminuir a quantidade de área impermeável de uma bacia, evitando a canalização, aumentando o tempo de concentração de uma bacia.

Dentre os tipos de pavimentos permeáveis está o concreto permeável, uma mistura que contém alto índice de vazios (entre 15 e 30 %) e, conseqüentemente, elevadas permeabilidades. Essa característica é consequência da pequena quantidade, quando não nula, de agregado miúdo. Assim, o material que teria função de preencher os vazios do agregado graúdo não existe ou é muito escasso. Evidentemente o maior desafio desse tipo de pavimento é resistir ao tráfego da maneira como resistem outros tipos convencionais de pavimento, além de sua manutenção, que, mesmo sendo simples, requer o mínimo de planejamento e eficácia por parte dos responsáveis. De qualquer forma, alguns estudos apresentam resultados satisfatórios no quesito “resistência”, ampliando os horizontes de aplicação deste material.

No âmbito do Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LMP-EPUSP), Batezini (2013) estudou as propriedades hidráulicas de misturas de concreto permeável, tendo como referência demandas de projeto comumente encontradas para casos de projetos para áreas de veículos leves. Seu estudo, porém, não contemplou a aferição desses parâmetros em uma pista experimental, focando-se apenas nos resultados encontrados em laboratório. Sendo assim, os objetivos da presente pesquisa foram definidos e são elencados abaixo.

1.2. Objetivos da pesquisa

O presente estudo tem como objetivo:

- Aplicar uma mistura desenvolvida no LMP-EPUSP em calçadas no Campus da Capital da Universidade de São Paulo e analisar seu comportamento hidráulico através de ensaios de infiltração, que serão comparados com diversas referências;
- Avaliar os métodos construtivos adotados e observar se as diferenças existentes entre os projetos das calçadas e dos locais onde os ensaios foram realizados trazem alguma mudança significativa no comportamento hidráulico da mistura;
- Analisar criticamente o ensaio adotado para a obtenção das taxas de infiltração.

Para que os objetivos citados fossem alcançados com êxito, fez-se necessária a execução de projetos de calçada em concreto permeável, sendo a primeira delas um modelo preliminar em escala reduzida, com 9,65 m de extensão, executada nas proximidades do Edifício Paulo Souza (Prédio da Engenharia Civil da EPUSP), na Avenida Professor Almeida Prado. Após a verificação dos métodos construtivos e comportamento da mistura utilizada na calçada preliminar, a calçada definitiva foi construída na Praça do Pôr do Sol, situada na Avenida Professor Lineu Prestes, com aproximadamente 90 metros de extensão, dividindo-se em três diferentes trechos, sendo um com o traço desenvolvido pelo LMP-EPUSP permitindo infiltração no solo. O segundo trecho, também com o traço desenvolvido pelo LMP-EPUSP, conta com um sistema de drenagem, sem infiltração no solo, e caixa coletora com ligação na rede pública. O terceiro e último trecho conta com

um material semelhante desenvolvido por indústria particular e permite a infiltração da água no solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Desenvolvimento e Drenagem Urbana

No Brasil, o desenvolvimento urbano se deu entre os anos 1960 e 1990, período em que a população urbana brasileira passou de 55% para 76%. Esse aumento se deu, principalmente, nas grandes metrópoles e, conseqüentemente, a área impermeável (AI) também aumentou, sendo subordinado à densidade habitacional (Dh). Esse aumento expressivo das áreas impermeáveis em decorrência do aumento da área construída acaba provocando o aumento da vazão máxima (Qp) de uma bacia urbana.

Tucci (2003) afirma que essa vazão máxima pode ser até seis vezes maior do que a vazão na situação de pré-desenvolvimento. Esse aumento deve-se a redução da evapotranspiração, redução do escoamento subterrâneo e redução do tempo de concentração (Tc) da bacia.

A existente e ultrapassada política de drenagem utilizada em muitos casos é de escoar toda a água precipitada o mais rápido possível. Conseqüências imediatas são inundações a jusante devido à canalização do escoamento superficial. A prática desse conceito no Brasil não é de bom retrospecto. No rio Tamanduateí, por exemplo, as obras para canalização tiveram custo de US\$50 milhões/km. Mesmo com elevado custo, ocorreu retorno de inundações. Outro exemplo, agora em Belo Horizonte, as obras no rio Arrudas chegaram a custar US\$25 milhões/km, e, logo após a conclusão das obras, voltaram as inundações (TUCCI, 2003).

Com o objetivo de relacionar a densidade habitacional com a área impermeável, algumas equações e modelos foram propostos. Como exemplo, Ridd (1995), em seu trabalho, propôs o modelo V-I-S (Vegetação – Impermeável – Solo), ilustrado na Figura 1. Esse modelo deixa bem explícito a relação inversamente proporcional que a área impermeável tem com a vegetação e com o solo exposto (MENEZES FILHO, 2013).

Figura 1 - Modelo V-I-S

(Adaptado de: MENEZES FILHO, 2013)

Alguns estudos a nível nacional começaram a ser realizados com o objetivo de estabelecer uma relação entre a área impermeável e densidade habitacional. Menezes Filho (2013) contemplou estudos passados estimando essa relação para Curitiba e São Paulo, como representado graficamente na Figura 2. Nota-se que para uma densidade habitacional de aproximadamente 100 habitantes/hectare resulta em uma área impermeável de aproximadamente 50%. Esse valor pode chegar a 65% quando se tem uma densidade maior ou igual a 150 habitante/hectare.

Figura 2 - Tendência da relação entre ocupação x impermeabilidade

(Adaptado de: CAMPANA e TUCCI, 1994 *apud* MENEZES FILHO, 2013)

Estimar as áreas impermeáveis, relacionando-as com a densidade habitacional, é, portanto, um processo fundamental para bom planejamento urbano e ordenamento territorial, tendo em vista que está diretamente ligada à infraestrutura urbana, como saneamento e transportes (MENEZES FILHO, 2013)

2.2. Histórico dos Pavimentos Permeáveis

Tradicionalmente, os projetos de pavimentação procuram um material de revestimento que seja o mais impermeável possível, para evitar eventuais patologias que são consequências da presença de água no interior da estrutura do pavimento. Essas patologias podem ser, por exemplo: redução da resistência dos materiais granulares, bombeamento de finos, oxidação do ligante asfáltico, empenamento da placa de Concreto de Cimento Portland (CCP), entre outros.

O crescimento populacional e da malha viária fizeram com que as superfícies impermeáveis aumentassem ao ponto de causar alguns problemas, principalmente em regiões metropolitanas, tais como: aumento da frequência e intensidade de inundações; diminuição da segurança do usuário devido à presença de poças de água; dentre outros.

A partir dos problemas citados, surge como alternativa a construção de um pavimento permeável, capaz de permitir a infiltração da água sem que haja qualquer prejuízo técnico. Os primeiros países que aplicaram esse tipo de pavimento foram os Estados Unidos da América (EUA), a França, o Japão e a Suécia. Nos EUA, por exemplo, alguns estados estão criando legislações que exigem a construção de um pavimento impondo a máxima infiltração ou armazenamento temporário da água. Na França, após um programa de pesquisas para explorar soluções para as inundações, os pavimentos permeáveis surgiram como potencial solução para esse problema. Após isso, a tecnologia passou a ser utilizada amplamente em calçadas, vias, praças, estacionamentos, etc.. Essa tecnologia pode também ser aplicada a calçadas e ciclovias, o que aumentaria o conforto de usuários por possibilitar uma redução no número de juntas. O conforto consequente da utilização dessa tecnologia também é notável principalmente em períodos de chuva.

Visto o sucesso da implantação desse sistema, outros países têm investido na pesquisa em pavimentos permeáveis para a diminuição dos mesmos problemas, que são corriqueiros em grandes cidades (SUZUKI *et al.*, 2013).

2.3.Pavimento Permeável x Revestimento Drenante

A diferenciação entre os termos pavimento permeável e revestimento drenante é importante para se evitar quaisquer problemas com a comparação entre eles, bem como problemas de comparações entre suas propriedades hidráulicas e mecânicas entre eles.

Suzuki *et al.* (2013) definem um pavimento permeável como uma estrutura que apresente sua função hidráulica associada a um reservatório. Ou seja, deve-se ter uma retenção temporária da água infiltrada no interior da sua estrutura, revestimento e camadas subjacentes, até que infiltre no solo ou até se ter um sistema de drenagem que colete a água infiltrada e a destine.

Já os revestimentos drenantes podem exercer as seguintes funções: melhorar condições de segurança (hidroplanagem, derrapagem); e reduzir ruído provocado pela ação do tráfego. Normalmente a camada de apoio do revestimento drenante é uma camada impermeável, justo por ter como objetivo evitar a infiltração de água nas camadas subjacentes (SUZUKI *et al.*, 2013).

2.4. Tipos de Revestimentos Permeáveis

Quanto ao tipo de revestimento, os pavimentos permeáveis podem ser classificados em três diferentes tipos, que são: revestimento em concreto asfáltico poroso; revestimento em blocos pré-moldados de CCP e revestimento em CCP poroso.

2.4.1. Revestimento em Concreto Asfáltico Poroso

Também conhecido como Camada Porosa de Atrito (CPA), o revestimento em concreto asfáltico poroso é uma mistura usinada a quente com graduação aberta, tendo os agregados com granulometrias próximas. Normalmente um CPA possui porosidade entre 18 e 25%, o que possibilita a infiltração da água em sua estrutura até que alcance a rede de drenagem. O CPA é aplicado sobre uma camada de mistura densa e estrutural. Ou seja, pode-se dizer que é uma camada de sacrifício de um pavimento asfáltico, onde apenas o revestimento é permeável e não possui função estrutural, apenas função drenante, melhorando de diversas formas a segurança do usuário, como reduzindo a lâmina d'água na superfície, redução de spray proveniente dos veículos, além do aumento da aderência entre o pneu e o pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.4.2. Revestimento em Blocos Pré-Moldados de CCP

Outro tipo de revestimento drenante é o revestimento em blocos intertravados de CCP. Comumente, o tipo de revestimento de blocos intertravados com juntas alargadas são os mais utilizados, seja com juntas em trama ou em espinha de peixe. Nesse caso, são as juntas que permitem a infiltração da água na camada de revestimento.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), existem outros tipos de revestimento em blocos de CCP que são utilizados além dos já citados neste trabalho, tais como: revestimento em blocos de concreto vazados e revestimento em blocos de concreto unidirecionalmente articulados (ABNT, 2015).

2.4.3. Revestimento CCP Poroso

Foco desta pesquisa, o revestimento em CCP poroso é constituído de uma mistura com ligante hidráulico, cimento Portland, agregado graúdo, pouca ou nenhuma quantidade de agregado miúdo, água e eventuais aditivos. Cabe a pasta formada pela água e o cimento a ligação entre

os agregados graúdos. A ausência de material fino configura à mistura um alto volume de vazios, que é responsável por permitir a infiltração da água. Há um leque de opções para a aplicação de um pavimento com revestimento em CCP poroso, que vai de calçadas, passando por estacionamentos e chegando a vias de tráfego leve (TENNIS *et al.*, 2004; MONTES, 2006; SHU *et al.*, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014; VANCURA, 2011).

2.5. Concreto Permeável

O pavimento de concreto permeável, ilustrado na Figura 3, é uma potencial solução para os problemas do ponto de vista ambiental. Capaz de absorver a água precipitada, o pavimento pode permitir o armazenamento dessa água capturada e a infiltração gradativa no solo, reduzindo assim problemas causados pela canalização e aumento de áreas impermeáveis (TENNIS *et al.*, 2004).

Figura 3 - Concreto permeável

(Fonte: CONCRETE ANSWERS, 2016)

Como já descrito, o concreto permeável é composto por água, cimento, agregado graúdo, eventuais aditivos e uma pequena quantidade, quando não nula, de material fino. A água e o cimento são os responsáveis por criarem uma pasta capaz de revestir os agregados. A mínima ou nula presença de agregado miúdo garante uma interconectividade entre os vazios do concreto, configurando a alta porosidade, atingindo valores entre 15 e 25%, permitindo uma permeabilidade do concreto próxima de 0,34 cm/s, superando facilmente os valores do concreto convencional. Porém, esses valores de permeabilidade e porosidade podem ser

muito maiores, sendo dependente dos materiais escolhidos e suas correspondentes propriedades, além das suas quantidades no traço do concreto (TENNIS *et al.*, 2004; MONTES, 2006; SHU *et al.*, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014; VANCURA, 2011).

Uma mistura de concreto permeável pode atingir resistências de 20,5 MPa e 3,5 MPa em compressão e tração na flexão, respectivamente. Tais valores podem atender demandas de projetos para vias de tráfego leve, estacionamentos e calçadas. Porém, maiores demandas requerem uma mistura não convencional do concreto permeável, fazendo com que o mesmo atinja resistências ainda maiores, que são obtidas a partir de um projeto estrutural e práticas construtivas especiais, além da utilização de aditivos químicos (TENNIS *et al.*, 2004; MEHTA e MONTEIRO, 2014)

2.5.1. Benefícios do Concreto Permeável

A utilização de concretos drenantes em pavimentação pode atingir benefícios em três diferentes vertentes, que são: segurança, benefícios ambientais e vantagens econômicas.

Segurança

Devido à alta porosidade desse tipo de concreto, é praticamente inexistente o excesso de água na superfície de pavimentos tipos como impermeáveis. Assim, situações de risco, como aquaplanagem, são evitadas. Outro fator positivo é a maior aderência entre pneu e pavimento, devido, também, a ausência de finos, o que deixa os agregados graúdos expostos na superfície, tornando-a mais rugosa e aumentando a segurança em casos de direção sob mau tempo.

Benefícios Ambientais

Diversos benefícios ambientais são alcançados com a utilização do concreto permeável. Dentre eles, destacam-se: a recarga do lençol freático, tendo em vista que este fica empobrecido em casos de superfícies impermeáveis; redução do efeito de ilhas de calor na superfície dos pavimentos, como mostrado por Haselbach *et al.* (2011) e Kevern *et al.* (2009); diminuição de ruídos da interação pneu-pavimento, como mostrado por Park *et al.* (2005); dentre outros.

Vantagens Econômicas

A utilização desse tipo de concreto pode diminuir ou, até mesmo, eliminar a necessidade de medidas de alto custo para controlar o escoamento de águas pluviais (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

2.5.2. Proporções da Mistura

As faixas de proporções da mistura de um concreto permeável foram realizadas através de procedimentos empíricos, de tentativa e erro. Diversas moldagens em laboratórios foram feitas e testadas em campo para garantir o comportamento e desempenho esperados. As faixas típicas de quantidades de materiais são apresentadas na Tabela 2.1, e a grande variação entre os valores deve-se ao fato de que a mistura é altamente sensível a granulometria do material desejado, e qual tipo desse agregado (o que causa uma variação entre diferentes regiões), relação água/cimento (a/c), mínima ou nula presença de agregado miúdo (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Tabela 2.1. Quantidades dos materiais em mistura de concreto permeável
(Adaptado de: Mehta e Monteiro, 2014)

<i>Materiais</i>	<i>Quantidades</i>
Cimento (kg/m ³)	270 a 415
Agregado (kg/m ³)	1190 a 1480
Relação água/cimento	0,27 a 0,34
Relação agregado/cimento	4 a 5,5
Relação agregado miúdo-agregado graúdo	0 a 1

Em algumas misturas podem ser adicionados os aditivos superplastificantes, também chamados de aditivos redutores de água. Sua composição faz com que, quando adsorvido nas partículas de cimento, ajude a diminuir consideravelmente a tensão superficial da água, elevando a fluidez do sistema. A utilização desse tipo de aditivo pode ocasionar, também, um aumento das resistências mecânicas proporcionais à redução na relação a/c. A Tabela 2.2 apresenta a variação dos resultados de resistência à compressão em misturas de concreto convencional com adição de superplastificante, ilustrando, também, o ganho de resistência inicial quando o aditivo é utilizado. É explícito o ganho de trabalhabilidade que a mistura ganha com a adição do superplastificante, o que deve ser visto com bastante importância tendo em

vista a consistência de um concreto sem adição e seu difícil manuseio (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Tabela 2.2. Variação da resistência a compressão com adição de superplastificante (Adaptado de: Mehta e Monteiro, 2014)

Mistura	Consumo de cimento (kg/m³)	Relação água/cimento	Abatimento (mm)	Resistência à compressão simples (MPa)			
				1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Referência relação a/c (0,6)	360	0,6	225	10	21	32	45
2% Superplastificante – menor relação a/c (0,45)	360	0,45	225	20	35	43	55
Sem superplastificante - menor relação a/c (0,45)	360	0,45	30	16	28	37	52

2.5.3. Propriedades do Concreto Permeável Fresco

O concreto permeável é um concreto muito seco, fazendo com que o ensaio de abatimento não seja tão significativo para o controle de qualidade quando se comparado ao concreto convencional. Quando realizados, os valores aproximam-se, comumente, de 2 cm. Porém, algumas misturas trabalham com valores mais altos, próximos de 5 cm, com o objetivo de ter uma maior trabalhabilidade do concreto. Para o controle de qualidade do concreto permeável é preferível que se tenha o peso de uma amostra ou a densidade aparente, que normalmente são valores entre 1.600 e 2.000 kg/m³.

O tempo de trabalho do concreto permeável é menor quando comparado ao concreto convencional. Normalmente o período de 1 hora entre o início da mistura e a aplicação é o recomendado. Porém, esse período pode ser ampliado para até 1,5 hora quando utilizado algum aditivo como o retardador de pega (TENNIS *et al.*, 2004).

2.5.4. Propriedades do Concreto Permeável Endurecido

Neste item serão expostas algumas propriedades do concreto permeável endurecido e suas inter-relações. Serão observadas as importâncias dessas propriedades, principalmente da porosidade, propriedade chave para o comportamento da mistura de concreto permeável. Dentre as propriedades, serão descritas e analisadas diversas pesquisas sobre:

- Densidade e porosidade;
- Permeabilidade;
- Resistência à compressão;
- Resistência à tração na flexão;
- Resistência à abrasão; e
- Fadiga.

Densidade e Porosidade

A densidade do concreto permeável é fator que depende das propriedades dos materiais constituintes e suas proporções na mistura, além do modo de compactação. Normalmente os valores de densidade ficam entre 1.600 e 2.000 kg/m³ (TENNIS *et al.*, 2004).

A porosidade, por sua vez, é a propriedade mais importante do concreto permeável, tendo em vista que ela dita o comportamento mecânico e hidráulico da mistura. Os concretos com porosidade abaixo de 15% são considerados de baixa porosidade para fins de drenagem, enquanto os que tem mais de 30% são considerados de alta porosidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Quanto a porosidade, um pavimento com aproximadamente 12 cm de espessura, tendo uma porosidade de 20%, valor comumente encontrado em concretos permeáveis, é capaz de armazenar água de precipitações de 25 mm em seus vazios. Quando a espessura chega a valores de 15 cm aproximadamente, sobre uma base de brita, a capacidade de armazenamento pode atingir valores de precipitações de até 75 mm (TENNIS *et al.*, 2004).

Pesquisas sobre as propriedades mecânicas e hidráulicas de um concreto permeável modificado por polímero foram realizadas com a finalidade de comparar os valores dessas propriedades com uma referência. A comparação consistiu em uma mistura de controle e outras três misturas com a adição de, respectivamente: látex; látex e areia; e látex, areia e fibra. Além disso, houve uma variação na granulometria dos agregados utilizados na mistura. Os resultados, apresentados graficamente na Figura 4, demonstram uma diminuição da porosidade, o que, conseqüentemente, trará uma alteração nos valores de permeabilidade e nos valores das resistências mecânicas da mistura, como, por exemplo, a adição de látex para a granulometria de 12,5 mm, onde a porosidade de aproximadamente 30% diminuiu, atingindo aproximadamente 23%. A redução da porosidade causada pela adição de látex entre as três granulometrias estudadas por Huang *et al.* (2010) foi de 24,07% (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Figura 4 - Variação da porosidade com adições na mistura e variação na granulometria

(Adaptado de: HUANG *et al.*, 2010)

Ibrahim *et al.* (2014) estudou o comportamento hidráulico e mecânico de misturas de concreto permeável, incluindo como esses parâmetros variam com a mudança da porosidade. Pode-se notar a partir da Figura 5 que o aumento da porosidade gera uma diminuição do peso específico da amostra, comportamento que se deve ao fato de que as misturas não possuem porções de agregados miúdos para preenchimento dos vazios, ou possuem pequenas quantidades.

Figura 5 - Variação da densidade com a porosidade

(Adaptado de: Ibrahim *et al.*, 2014)

Na Figura 6 verifica-se a modificação na resistência à compressão, mostrando sua variação com diferentes densidades provocadas pela mudança da porosidade entre as misturas. Para uma densidade de 1.800 kg/m³, por exemplo, tem-se uma resistência à compressão de, aproximadamente, 5 MPa, valor considerado muito baixo. Porém, a densidade de 1.800 kg/m³ equivale a uma porosidade de, aproximadamente, 33%, o que é considerado muito alto. Então fica explícito a grande influência que a porosidade tem no comportamento mecânico de uma mistura, uma vez que valores muito altos de índice de vazios acarreta em um concreto com pobres resistências à compressão e à tração na flexão (IBRAHIM *et al.*, 2014; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Figura 6 - Variação da resistência à compressão com a densidade

(Adaptado de: Ibrahim *et al.*, 2014)

Bonicelli *et al.* (2015), em sua pesquisa, tinham como objetivo estudar variações de misturas de concreto permeável para se ter um traço com possível aplicação em vias de tráfego médio a pesado. As mudanças em diversos parâmetros (porosidade, permeabilidade e resistências) foram observadas após a adição de pequenas quantidades de areia, 5% e 10%, e modificando o grau de compactação da amostra. Três diferentes misturas foram realizadas com diferentes relações a/c (0,35, 0,30 e 0,27), e, a partir dessas três referências, adicionou-se as porcentagens citadas de areia e compactou-se as amostras. A Figura 7 expõe que a adição de areia acarreta em uma diminuição do índice de vazios, quando analisados os resultados com menor grau de compactação. A diminuição é de cerca de 4% para a mistura A, 7% na mistura B e 6% na mistura C, sendo essas porcentagens valores médios, existindo uma pequena variação dependente da quantidade de areia adicionada (5% ou 10%). É um comportamento lógico tendo em vista que o agregado miúdo é responsável pelo preenchimento dos vazios, diminuindo, assim, a porosidade do concreto. O grau de compactação elevado faz com que os valores se aproximem bastante nas misturas A e C, tendo diferença mais significativa na mistura B, onde a adição de 10% de areia com alto grau de compactação faz com que a porosidade decresça de forma mais acentuada, aumentando a diferença para as demais misturas. Vale ressaltar que o método de compactação foi o Marshall, indicado para misturas

asfálticas, o que pode ter feito com que a análise dos resultados após elevados graus de compactação não tenha tanta relevância. Vale a ressalva de que a compactação por golpes não é recomendada para misturas de concreto permeável.

Figura 7 - Variação da porosidade com adição de areia e variação no grau de compactação

(Adaptado de: Bonicelli *et al.*, 2015)

Rizvi *et al.* (2010) pesquisaram e avaliaram o comportamento de misturas de concreto permeável com diferentes proporções de substituição dos agregados por agregados reciclados de concreto. A Figura 8 apresenta o comportamento dessa propriedade, onde quanto maior a quantidade de agregado reciclado, maior a porosidade, o que afeta diretamente nos parâmetros hidráulicos e mecânicos da mistura. Rizvi *et al.* (2010) adotaram a mistura com 15% de agregado reciclado como a de maior potencial dentre as estudadas, tendo em vista que possui um índice de vazios aceitável, não muito alto, o que não prejudica as propriedades mecânicas do concreto.

Figura 8 - Porosidade de mistura permeável com diferentes proporções de substituição do agregado

(Adaptado de: Rizvi *et al.*, 2010)

Chindaprasirt *et al.* (2016) também estudaram as propriedades do concreto permeável com a substituição do agregado natural por porcentagens (20, 40, 60, 80 e 100%) de agregado reciclado de blocos e de peças de concreto. As propriedades do agregado foram anotadas, destacando-se a diferença entre o agregado natural e os reciclados na porcentagem de absorção, onde estes apresentam absorções próximas de 5%, enquanto o agregado natural apresenta-se com absorção muito inferior, por volta de 0,5%. Uma mistura de referência foi preparada com 100% de agregado natural, cimento, água e superplastificante, para efeito de comparação de resultados. No caso da porosidade, ou índice de vazios, a Tabela 2.3 mostra a pequena ou nenhuma variação, quando se trata do agregado reciclado de concreto, entre a referência e as misturas com porcentagens de agregado substituído. No caso do agregado reciclado de blocos nota-se o decréscimo da porosidade à medida que se adiciona o agregado reciclado, o que causa uma alteração na permeabilidade. Esse comportamento é justificado pela grande perda de massa por abrasão que ocorre com os agregados reciclados de bloco (52%). Essa perda por abrasão ocasionou um aumento de volume de pasta de concreto na mistura, diminuindo consideravelmente o índice de vazios do concreto, o que afeta a permeabilidade e outros parâmetros. Quando analisada a substituição dos agregados por

reciclados provenientes de peças de concreto, o comportamento, independente da porcentagem de substituição, aproximou-se ao da mistura referência, sempre próximo dos 25%.

Tabela 2.3. Variação da porosidade e densidade com adição de agregado reciclado
(Adaptado de: Chindaprasirt *et al.*, 2016)

Mistura	% de agregado reciclado	Densidade (kg/m³)	Porosidade (%)
Referência	0	1920	25
Agreg Bloco 1	20	1910	23
Agreg Bloco 2	40	1980	20
Agreg Bloco 3	60	1940	19
Agreg Bloco 4	80	1960	17
Agreg Bloco 5	100	2000	13
Agreg Concreto 1	20	1900	24
Agreg Concreto 2	40	1860	24
Agreg Concreto 3	60	1820	24
Agreg Concreto 4	80	1800	25
Agreg Concreto 5	100	1830	23

Em suma, pode-se dizer que não existe uma regra para analisar o comportamento de uma mistura de concreto permeável com substituição de agregado por material reciclado. Depende da origem desse agregado, da mistura e proporções de materiais utilizados, entre outros fatores.

Wille e Zhong (2015) baseiam-se nas limitações do concreto permeável, tais como a alta suscetibilidade aos tipos de colmatação e a fraca ligação entre os agregados que limita estruturalmente o pavimento, para a realização da pesquisa a qual consiste no desenvolvimento e análise de diferentes misturas de concreto permeável de alta performance, *High Performance Pervious Concrete* (HPPC), afim de minimizar as consequências das limitações já citadas. Para isso os autores prepararam suas misturas seguindo três características: desenvolvimento de uma matriz de alta performance, *Ultra High Performance Matrix* (UHPM), para que o envolvimento e as ligações entre os agregados sejam mais fortes; melhoramento da zona de transição com adição de aditivo redutor de água, sílica, com objetivo de diminuir a relação a/c tornando a microestrutura mais densa; e a obtenção de uma relação agregado/cimento ideal além da padronização do tamanho dos agregados

utilizados na mistura para obter uma mistura que atenda as demandas mecânicas e hidráulicas de projeto. Seis misturas com diferentes relações agregado/cimento, tamanho de agregado, foram preparadas e os resultados obtidos pelos autores encontram-se na Tabela 2.4, onde o primeiro número da mistura corresponde à relação agregado/cimento, e o segundo número ao diâmetro do agregado utilizado.

Tabela 2.4. Porosidade em misturas de alto desempenho
(Adaptado de: Wille e Zong, 2015)

	Mistura	Porosidade (%)
HPPC	UHPM-2,5-1,19	19,84
	UHPM-3,0-1,19	24,65
	UHPM-3,5-1,19	29,18
	UHPM-2,5-4,75	22,46
	UHPM-3,0-4,75	26,97
	UHPM-3,5-4,75	30,22

Batezini (2013), tinha como objetivo estudar diferentes misturas de concreto permeável para utilização na camada de revestimento de pavimentos em áreas de veículos leves. Dentre as caracterizações realizadas, Batezini (2013) determinou a porosidade das três misturas preparadas. A média das três misturas, cada uma com aproximadamente 20 corpos de prova, foi de 24, 25 e 25%. Esse valor está totalmente de acordo quando comparado, por exemplo, ao intervalo citado por Tennis *et al.* (2004) de 15 a 25%, ou quando comparado aos valores de Chindaprasirt *et al.* (2016), em que ambos, em média, aproximam-se dos 25%. Ao comparar os resultados de Batezini (2013) com os de Rizvi *et al.* (2010), observa-se uma diferença de, aproximadamente, 6% entre os índices de vazios, onde este, em sua mistura dita ideal, atinge uma porosidade de 31,32%. Portanto, é correto dizer que os valores encontrados por Batezini (2013) estão totalmente de acordo com várias referências da área, não havendo nenhuma discrepância significativa entre os resultados. As variações se dão pelo tipo de material utilizado e às diferenças naturais entre misturas dosadas para diferentes situações.

Textura

Por apresentar pequena ou nula quantidade de agregado miúdo, a textura de um concreto permeável é bastante diferente da textura de um concreto convencional. Sua superfície rugosa, proveniente dos agregados graúdos, lhe configura alguns benefícios, tais como a segurança do usuário com a diminuição do *spray* causado em dias chuvosos, aumento do

coeficiente de atrito e consequente diminuição de fenômenos de aquaplanagem (BATEZINI, 2013).

Por outro lado, essa textura rugosa pode ser um aspecto negativo quando o concreto permeável é aplicado a calçadas, dificultando o caminhar dos usuários. Também deve-se ressaltar o problema de desprendimento do agregado, prejudicando visualmente e tecnicamente a superfície do pavimento. Neste caso, sugere-se o uso de uma máquina de polir, porém utilizada de tal forma que confira mais regularidade à superfície, sem efetivamente polir o revestimento.

Permeabilidade e Taxa de Infiltração

Os vazios interconectados presentes na estrutura de uma amostra de concreto permeável são responsáveis pela alta porosidade que lhe é característica, que depende da porosidade, tamanho dos poros e, até mesmo, rugosidade dos poros (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A permeabilidade é importante parâmetro, tendo em vista as funções para as quais o material é projetado, altamente dependente das características dos materiais que compõem o traço do concreto permeável, bem como do modo de aplicação do concreto e tratamento do mesmo. Valores típicos de permeabilidade ficam entre 0,2 e 0,54 cm/s, porém valores maiores que 1,0 cm/s já foram encontrados por diversas referências (TENNIS et al., 2004).

A taxa de infiltração é resultado de ensaio regido pela ASTM C-1701 realizado *in loco* que determina o quão rápido a água infiltra numa estrutura permeável. Nesse ensaio, o escoamento lateral após a infiltração é considerado, e nenhuma carga é aplicada para que a infiltração ocorra.

A NBR 16416 (ABNT, 2015) adota o valor de permeabilidade de 10^{-3} m/s, ou 0,1 cm/s, como valor mínimo que o pavimento deve apresentar nos primeiros dias após sua execução.

Ibrahim *et al.* (2014) estudaram a relação entre o índice de vazios, ou porosidade, nos resultados de permeabilidade do concreto, ilustrados graficamente na Figura 9. Nota-se que se tem a maior permeabilidade, pouco maior que 2 cm/s, quando se tem um índice de vazios em torno de 40%, valores demasiadamente altos quando comparados àqueles comumente encontrados na área, que são de até 25% de porosidade para uma permeabilidade de 0,34

cm/s. Analisando a permeabilidade para o menor valor de porosidade encontrado, pouco menor que 30%, Ibrahim *et al.* (2014) observaram uma permeabilidade de 1,5 cm/s, valores que estão mais de acordo com outros encontrados (TENNIS *et al.*, 2004).

Figura 9 - Variação da permeabilidade com a porosidade

(Adaptado de: Ibrahim *et al.*, 2014)

Já Huang *et al.* (2010) executaram um concreto modificado por polímeros para observar a mudança de valores nos parâmetros mecânicos e hidráulicos do concreto permeável, visando o incremento das propriedades mecânicas sem maiores prejuízos nos resultados hidráulicos. No caso da permeabilidade, adotou-se uma mistura de controle com permeabilidade próxima de 2 cm/s, valor considerado alto quando comparado a outras referências. Sendo assim, a adição de látex, areia e fibras, além da variação da granulometria do agregado graúdo, fez com que essa permeabilidade atingisse valores entre 1,2 e 1,5 cm/s, aproximadamente, dependendo da granulometria, os quais se aproximaram dos resultados encontrados por outros autores. Analisando apenas a adição de látex, onde as porosidades decresceram

24,07%, em média, as permeabilidades tiveram valores compreendidos entre 1,2 e 1,6 cm/s, partindo dos quase 2 cm/s da mistura de referência, apresentando uma redução média dentre as granulometrias de 19,70% em relação ao valor da permeabilidade da mistura de referência. A influência da adição de látex, areia e fibras é tão significativa quanto a granulometria utilizada, como apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Permeabilidade das misturas com adição de látex, areia e fibra

(Adaptado de: Huang *et al.*, 2010).

Bonicelli *et al.* (2015) observaram a mudança em diversos parâmetros (porosidade, permeabilidade e resistências) com a adição de pequenas quantidades de areia, 5% e 10%, e modificando o grau de compactação da amostra. Três diferentes misturas foram preparadas com diferentes relações a/c (0,35, 0,30 e 0,27), e, a partir dessas três referências, adicionou-se as porcentagens citadas de areia e compactou-se as amostras. Analisando os resultados com o menor grau de compactação, nota-se que a adição de areia reduz consideravelmente a permeabilidade das misturas, como apresentado graficamente na Figura 11. Na mistura B tem-se a maior disparidade entre a mistura referência e a adição de 10% de areia, tendo inicialmente uma permeabilidade de 3,1cm/s e reduzindo-a em, aproximadamente, 50% após a adição. Na mistura C os valores das três misturas mantiveram-se bem próximas, com mínimas variações entre elas. Comparando a mistura B, com adição de 10% de areia e grau de compactação mínimo, Bonicelli *et al.* (2015) encontraram uma permeabilidade de 1,5 cm/s, valor mais coerente com as diversas pesquisas da área, como, por exemplo, os valores entre 1,2 e 1,5 cm/s encontrados por Huang *et al.* (2010) com adição de areia, fibra e látex.

Figura 11 - Variação da permeabilidade com alteração no grau de compactação e com adição de areia

(Adaptado de: Bonicelli *et al.*, 2015)

Haselbach *et al.* (2015) simularam o efeito de colmatção, *clogging*, em três diferentes misturas de concreto permeável, que diferem entre si no peneiramento dos agregados utilizados. Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos e em testemunhos de diâmetro de 100 mm retirados de uma placa retangular previamente moldada. Os autores utilizaram o procedimento da ASTM C1701 para a realização dos ensaios, que conta com parte em desenvolvimento para realização da metodologia em corpos de prova cilíndricos. O *clogging* foi simulado com a inserção de uma certa massa de solo no topo dos corpos de prova, simulando a colmatção a longo prazo, que, posteriormente, foram varridos, o que fez com que o solo preenchesse os vazios do concreto permeável. As permeabilidades, em média, chegaram a valores de 20% das permeabilidades iniciais no caso dos corpos de prova cilíndricos, como mostrado na Tabela 2.5, onde se tem as médias das 3 diferentes misturas, e chegam a apenas 5%, aproximadamente, quando se analisa os testemunhos retirados da placa retangular, como mostrado na Tabela 2.6.

Tabela 2.5. Variação da permeabilidade após simulação de colmatação em corpos de prova cilíndricos
(Adaptado de: Haselbach *et al.*, 2015)

Mistura	Porosidade (%)	Permeabilidade Inicial (cm/s)	Permeabilidade Final (cm/s)	Razão Final/Inicial
Média Mistura 1	19,6	0,29	0,059	0,20
Média Mistura 2	19,6	0,33	0,0575	0,17
Média Mistura 3	24,4	0,60	0,1353	0,23

Tabela 2.6. Variação da permeabilidade após simulação de colmatação em testemunhos
(Adaptado de: Haselbach *et al.*, 2015)

Mistura	Porosidade (%)	Permeabilidade Inicial (cm/s)	Permeabilidade Final (cm/s)	Razão Final/Inicial
Média Mistura 1	25,0	0,51	0,025	0,049
Média Mistura 2	26,8	0,436	0,0192	0,044
Média Mistura 3	25,9	0,505	0,0258	0,051

Haselbach (2010), anteriormente, estudou o efeito da colmatação nas taxas de infiltração, permeabilidade, proveniente de diferentes tipos de argila. Nota-se a partir das taxas de infiltração apresentadas graficamente na Figura 12 o decremento da taxa de infiltração após um ciclo de colmatação, ou *clogging cycle*, que é o processo de infiltração de toda a argila suspensa em água em determinadas concentrações. A Tabela 2.7 mostra que após os ciclos de colmatação, limpeza da superfície do corpo de prova e simulações de ciclo de chuva, as taxas finais de infiltração tiveram valores variando de 1% a 18% da permeabilidade inicial, dependendo do tipo de argila e da porosidade da amostra.

Figura 12 - Variação permeabilidade após ciclos de colmatação com argila

(Adaptado de: Haselbach, 2010)

Tabela 2.7. Variação porosidade após simulação de colmatção com argilas, limpeza e ciclos de chuva

(Adaptado de: Haselbach, 2010)

<i>Tipo de Argila</i>	<i>Porosidade Média (%)</i>	<i>Permeabilidade Inicial (cm/s)</i>	<i>Permeabilidade Final (cm/s)</i>	<i>Razão Final/Inicial</i>
Caulim (>30%)	38,2	1,025	0,186	0,18
Caulim (<30%)	27,9	0,064	0,004	0,0625
Bentonita (>30%)	37,7	1,106	0,013	0,0117
Bentonita (<30%)	27,1	0,169	0,00194	0,01148
Argila Vermelha	30,5	0,264	0,0439	0,166

Ambos os trabalhos deixam claro que o concreto permeável é muito suscetível ao efeito do *clogging*, fazendo-se necessário um cuidado na implantação do local e uma manutenção frequente e eficiente para ter uma mistura eficiente tanto no âmbito mecânico quanto no hidráulico, tendo seus resultados de infiltração aceitáveis.

Rizvi *et al.* (2010) avaliaram o comportamento de misturas de concreto permeável com substituição do agregado natural por agregado reciclado em diferentes proporções. Seus

resultados de permeabilidade seguem o comportamento da porosidade da mistura, aumentando à medida que aumenta a quantidade de agregado substituído. Para a mistura com 15% de agregado reciclado, porcentagem tida como ideal após análise de todos os resultados, Rizvi *et al.* (2010) obtiveram uma permeabilidade de 1,57 cm/s, valor relativamente próximo à sua referência, sem substituição de agregado, que é de 1,47 cm/s. A Figura 13 apresenta as permeabilidades encontradas para todas as porcentagens de substituição estudadas.

Figura 13 - Permeabilidade do concreto com substituição de agregado em diversas proporções

(Adaptado de: Rizvi *et al.*, 2010)

Chindaprasirt *et al.* (2016), a exemplo de Rizvi *et al.* (2010), verificaram a alteração da permeabilidade com a adição de porcentagens de agregado reciclado proveniente de blocos e de peças de concreto. A Tabela 2.8 mostra o comportamento encontrado por Chindaprasirt *et al.* (2016), onde a substituição dos agregados por reciclados de blocos de concreto acarreta em valores de permeabilidade cada vez menores, devido à resistência à abrasão desse agregado reciclado. Por outro lado, a substituição do agregado por aqueles provenientes de peças estruturais resultou em permeabilidades próximas da mistura de referência.

Tabela 2.8. Variação da permeabilidade com a adição de agregado reciclado
(Adaptado de: Chindaprasirt *et al.*, 2016)

<i>Mistura</i>	<i>% de agregado reciclado</i>	<i>Porosidade (%)</i>	<i>Permeabilidade (cm/s)</i>

Referência	0	25	1,01
Agreg Bloco 1	20	23	0,79
Agreg Bloco 2	40	20	0,8
Agreg Bloco 3	60	19	0,56
Agreg Bloco 4	80	17	0,36
Agreg Bloco 5	100	13	0,22
Agreg Concreto 1	20	24	0,95
Agreg Concreto 2	40	24	0,98
Agreg Concreto 3	60	24	0,89
Agreg Concreto 4	80	25	0,91
Agreg Concreto 5	100	23	1,01

Resumindo, na pesquisa de Rizvi *et al.* (2010), a substituição de 15% dos agregados da mistura por agregados reciclados resultou em uma permeabilidade de 1,57 cm/s, valor relativamente próximo de 1,47 cm/s da sua mistura de referência. Enquanto Chindaprasirt *et al.* (2016), substituindo 20%, mantendo a mínima quantidade substituída nas duas pesquisas, encontrou uma permeabilidade de 0,95 cm/s, garantindo um comportamento praticamente igual ao da mistura de referência, que atingiu 1,01 cm/s. Ou seja, do ponto de vista da permeabilidade, a substituição parcial do agregado natural por reciclado de peças de concreto torna-se viável, pois não há prejuízo no resultado deste parâmetro e é de grande valor do ponto de vista sustentável, dando destino a grandes quantidades de resíduos de construção e demolição. Porém, nota-se que não se pode estabelecer um padrão de comportamento quando se utiliza material reciclado. Este comportamento, assim como na análise do índice de vazios, depende de diversos fatores como as proporções da mistura, a origem do material reciclado, sua granulometria, etc.

Fwa *et al.* (2015) estudaram, analisaram e compararam os resultados de permeabilidade, antes e após simulação de colmatação, de uma mistura de concreto permeável com de uma mistura asfáltica porosa. Os autores dosaram os corpos de prova para porosidades de 10%, 15%, 20% e 25%, e, após isso, obtiveram as diferentes misturas, tanto do concreto permeável quanto do concreto asfáltico. A Tabela 2.9 mostra as permeabilidades obtidas e fica nítida a relação direta que a permeabilidade tem com a porosidade da mistura.

Tabela 2.9. Porosidade obtida e permeabilidade de concreto permeável
(Adaptado de: Fwa et al., 2015)

Porosidade Desejada (%)	Porosidade Obtida (%)	Permeabilidade (cm/s)
10	9,95	0,47
	7,3	0,194
	7,24	0,158
15	16,23	0,879
	16,2	1,142
	15,46	0,981
20	21,61	1,462
	20,65	1,515
	19,3	1,46
25	24,06	2,623
	26,28	2,34
	26,66	2,528

Kayhanian *et al.* (2013) tinham como objetivo estabelecer uma relação entre os resultados de permeabilidade encontrados pelos métodos da *National Center for Asphalt Technology*, NCAT, e *American Society for Testing and Materials*, ASTM C-1701 (*Standart Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete*). Para tal, os autores construíram 6 diferentes seções de 4 x 4 m de 3 diferentes tipos de pavimentos permeáveis, que são o pavimento de blocos intertravados de concreto, pavimento asfáltico poroso e o pavimento em concreto permeável. Feito isso, realizaram diversos ensaios utilizando ambos os métodos. Para as seções construídas em concreto permeável, foco desta pesquisa, observou-se resultados completamente diferentes quando comparados os 2 métodos. Em uma das seções, utilizando o método da ASTM, os autores obtiveram uma permeabilidade de 0,28 cm/s, muito inferior ao valor encontrado quando utilizado o método da NCAT, que é de 0,78 cm/s. Na outra seção a diferença é ainda maior, onde encontraram 0,29 cm/s utilizando o método da ASTM e 1,27 cm/s utilizando o da NCAT. Ou seja, fica evidente que a comparação de resultados de permeabilidade, encontrados através de diferentes métodos, é um equívoco, tendo em vista a variabilidade dos valores obtidos. Quando o cálculo é realizado pelo método da ASTM, a taxa de infiltração é, em média, 25% menor do que a obtida pelo método da NCAT. Ao final, os autores estabelecem uma relação não tão confiável entre os 2 métodos, tendo em vista o grande desvio padrão quando a relação é utilizada.

Como dito, Kayhanian *et al.* (2013) executaram 6 seções de 3 diferentes tipos de pavimento. Cada tipo de pavimento (blocos intertravados, asfáltico poroso e concreto poroso) foi

executado em 2 diferentes seções, que se diferenciam na espessura da camada de revestimento e, também, da base no caso do revestimento com blocos intertravados. Os autores obtiveram, para o concreto poroso, foco desta pesquisa, uma permeabilidade de 0,28 cm/s com 10 cm de espessura da camada de revestimento, e 0,29 cm/s quando esta é de 20 cm.

Wille e Zhong (2015) tiveram como objetivo a execução de diferentes misturas de concreto permeável de alto desempenho com diferentes relações agregado/cimento e diferentes graduações dos agregados. Feito isso, estudou as propriedades mecânicas e hidráulicas das misturas obtidas. Executado através de um permeâmetro de carga constante, os autores obtiveram os resultados ilustrados na Tabela 2.10. É evidente, mais uma vez, a reação direta entre porosidade e permeabilidade, com exceção da mistura UHPM-2,5-4,75.

Tabela 2.10. Permeabilidade de concreto permeável de alto desempenho
(Adaptado de: Wille e Zhong, 2015)

	Mistura	Porosidade (%)	Permeabilidade (cm/s)
HPPC	UHPM-2,5-1,19	19,84	0,025
	UHPM-3,0-1,19	24,65	0,121
	UHPM-3,5-1,19	29,18	0,199
	UHPM-2,5-4,75	22,46	0,052
	UHPM-3,0-4,75	26,97	0,41
	UHPM-3,5-4,75	30,22	0,515

Batezini (2013) determinou diversas características mecânicas e hidráulicas das misturas preparadas. Apesar de apresentar uma porosidade relativamente alta, 25%, as permeabilidades encontradas não foram tão altas, e aproximam-se do mínimo no intervalo de 0,2 a 0,54 cm/s estabelecido por Tennis *et al.* (2004). Suas misturas apresentaram média de 0,14 e 0,13 cm/s, dependendo da mistura. Apesar de não estar dentro do intervalo sugerido por Tennis *et al.* (2004), esses valores estão dentro da normalidade quando comparado aos valores encontrados por Schaefer *et al.* (2006), entre 0,01 e 1,5 cm/s, e por Montes e Haselbach (2006), entre 0,014 e 1,19 cm/s. Além disso, os valores encontrados por Batezini (2013) se aproximam dos encontrados por Haselbach *et al.* (2015), que são 0,29, 0,33 e 0,60 cm/s para as 3 misturas preparadas.

Curvo *et al.* (2016) tinham como objetivo testar algumas misturas com adição de superplastificante e avaliar seu comportamento hidráulico tanto em campo quanto em

laboratório. Para a avaliação em campo, utilizando a norma ASTM C-1701, duas das misturas foram aplicadas em uma placa de 1 x 1 m e espessura de 10 cm e compactadas com rolo confeccionado seguindo as orientações da *Carolina Ready Mixed Concrete Association*, CRMCA. Três pontos nas áreas correspondentes a cada mistura foram ensaiados e apresentaram as médias respectivas de 1,66 cm/s e 0,64 cm/s. Mesmo apresentando, principalmente na primeira mistura, alta segregação e colmatção no fundo da placa, as taxas de infiltração encontradas demonstram alto potencial hidráulico das misturas. Essa colmatção mostra a sensibilidade da mistura, principalmente com adição de superplastificante, à sua dosagem.

Em suma, pode-se dizer que a permeabilidade do concreto permeável é de alto potencial para escoar fortes precipitações, sendo solução para diversos problemas de drenagem urbana. Porém, constata-se também que é um material muito suscetível à colmatção, o que exige uma manutenção frequente e eficaz no pavimento de concreto permeável. Além disso, nota-se que existe uma dependência dessa propriedade com o índice de vazios e a densidade do concreto. Um exemplo é o já citado estudo de Haselbach *et al.* (2015) que mostra, nos casos de corpos de prova moldados, Tabela 2.4, um índice de vazios maior na terceira mistura, que tem a permeabilidade acompanhando esse incremento, tudo isso analisando os dados antes do processo de *clogging* realizado. McCain e Dewoolkar (2010) plotaram a relação entre a densidade e a permeabilidade, ou condutividade hidráulica, como apresentado na Figura 14. O comportamento plotado da mistura, independente das dimensões do corpo de prova, obedece esta tendência de seguir a porosidade, que, por sua vez, é inversamente proporcional à densidade da mistura. Ou seja, quanto mais densa a mistura, menos porosa e com menor permeabilidade.

Figura 14 - Relação entre densidade e condutividade hidráulica (permeabilidade)

(Adaptado de: McCain e Dewoolkar, 2010)

Resistência à compressão

A resposta do concreto às tensões de compressão aplicadas depende da combinação de como vários fatores afetam a porosidade do material. Dentre esses fatores, incluem-se propriedades e proporções dos materiais componentes da mistura, grau de compactação e condições de cura (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Um concreto permeável pode ter sua resistência à compressão com valores compreendidos entre 3,5 MPa e 28 MPa, o que possibilita sua utilização em diversos projetos, se analisarmos apenas esse parâmetro mecânico. Essa variabilidade é consequência da alta porosidade do concreto, o que é inversamente proporcional à resistência. Ou seja, concretos com porosidades elevadas, maior que 30%, apresentam, normalmente, resistências muito baixas quando comparadas àquelas de concretos convencionais. A média da resistência à compressão dos concretos drenantes é de 17 MPa. Como ainda não existe padronização para moldagem dos corpos de prova, a extração é mais confiável para a determinação da resistência de uma determinada mistura. Ao contrário de um concreto convencional, o concreto drenante não tem essa propriedade para fins de controle de qualidade (TENNIS *et al.*, 2004; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Huang *et al.* (2010), em sua pesquisa, tinham como objetivo o incremento da resistência com adição de látex, fibras e areia, mantendo uma permeabilidade que viabilizasse a utilização do

concreto em vias de tráfego pesado sem perder suas funções hidráulicas. Os autores constataram que a resistência à compressão aos 7 dias cresce com a adição de látex, fibras e areia natural, além da utilização de agregados graúdos de menor graduação. Ele justifica esse comportamento de incremento da resistência pela adição da areia pois o agregado miúdo aumenta o volume de pasta presente no concreto, diminuindo assim a porosidade do material, aumentando a área de contato entre os agregados graúdos, comportamento semelhante ao que acontece com a adição de látex, como apresentado na Figura 15. As fibras, por sua vez, não apresentam uma mudança significativa da resistência do concreto, como indicado na Figura 16. Fica, então, evidente a forte dependência entre a porosidade da mistura e a resistência à compressão da mesma, já que a justificativa é, justamente, a diminuição da porosidade com o maior volume de pasta criado com os materiais adicionados.

Figura 15 - Efeito na resistência à compressão com a adição de látex e areia

(Adaptado de: Huang *et al.*, 2010)

Figura 16 - Efeito na resistência à compressão com a adição de fibra

(Adaptado de: Huang *et al.*, 2010)

Rizvi *et al.* (2010) estudaram, também, as propriedades mecânicas da sua mistura de concreto permeável com substituição do agregado por reciclado em diferentes proporções. No caso da resistência à compressão, os resultados obtidos decresceram à medida que se substituiu o agregado. Com 48 dias, idade considerada pelo autor para análise da resistência, a mistura com 15% de agregado reciclado obteve resistência mais próxima da mistura de referência, como exposto graficamente na Figura 17. O comportamento das misturas com maior porcentagem de agregado reciclado deve-se ao fato do incremento da porosidade, onde o decréscimo da resistência é consequência certa, como apresentado na Figura 18. McCain e Dewoolkar (2010) conseguiram relacionar a variação da resistência à compressão com a modificação da densidade, de uma das misturas ensaiadas. É notável o quanto a densidade interfere na resistência, independente da dimensão do corpo de prova ensaiado. Uma mistura mais densa, que pode ser obtida através de um determinado grau de compactação, possui um índice de vazios menor. Ou seja, quanto mais densa a mistura, menos porosa e maior sua resistência à compressão.

Figura 17 - Resistência à compressão das misturas com substituição de agregado

(Adaptado de: Rizvi *et al.*, 2010)

Figura 18 - Relação entre densidade e resistência à compressão

(Adaptado de: McCain e Dewoolkar, 2010)

Chindaprasirt *et al.* (2016), além de terem estudado a influência da adição de agregado reciclado na mistura de concreto permeável nos parâmetros hidráulicos (porosidade e

permeabilidade), também observaram o comportamento mecânico da mistura. No caso das adições de agregado reciclado de bloco, tem-se a resistência à compressão variando de 14 MPa a 17 MPa aproximadamente, tendo como referência 13,4 MPa. A substituição de 100% do agregado natural pelo reciclado, neste caso, não causa nenhuma mudança significativa nesse parâmetro. No caso do agregado reciclado de concreto as resistências são mais próximas da referência, variando de 12 MPa a 15 MPa aproximadamente. O incremento da resistência à compressão se deu pelo fato de que o agregado reciclado tem uma superfície mais rugosa quando comparado ao agregado natural, facilitando a ligação com a pasta de cimento, o que normalmente é bastante fraco no caso do concreto permeável. Além disso, no caso do agregado reciclado de blocos, a alta perda de massa por abrasão, 52%, contribui para um maior volume de pasta, diminuindo a porosidade, aumentando a densidade da mistura e, conseqüentemente, incrementando a resistência à compressão.

Mais uma vez, não se pode estabelecer uma relação direta entre a utilização dos agregados reciclados e as propriedades do concreto permeável, inclusive sua resistência à compressão. O comportamento dependerá de como varia o índice de vazios da mistura, que, por sua vez, é subordinado aos tipos dos materiais utilizados, granulometria dos agregados, proporções das misturas, compactação, etc. Se a porosidade apresenta pouca variação, como mostrado por Chindaprasirt *et al.* (2016) com agregados reciclados de concreto, a tendência da resistência à compressão, é, também, mostrar pouca variação mesmo com maiores porcentagens de substituição do agregado.

Wille e Zhong (2015) dosaram diferentes misturas de um concreto permeável de alto desempenho visando minimizar as limitações deste, como a baixa resistência ao tráfego devido a fraca ligação entre os agregados. Sendo assim, aprimorou a matriz do concreto adicionando alguns materiais à mistura, como sílica ativa e superplastificante. Os resultados de resistência à compressão encontram-se na Tabela 2.11, junto com suas respectivas porosidades. Para as misturas preparadas, quanto menor a graduação utilizada e menor a relação agregado/cimento, mais densa a mistura, apresentando resistência muito elevada quando comparada à demais referências, como os 10 MPa encontrados por Rizvi *et al.*, 2010, além dos 15 MPa encontrados por Huang *et al.*, 2010, valor máximo encontrado pelos autores com adição de areia e látex. Ou seja, a mudança da matriz com incorporação de teores de

sílica e superplastificante, trouxe uma melhora significativa na resistência à compressão do concreto, sem prejuízos à porosidade e permeabilidade, como já mostrado em seus respectivos tópicos.

Tabela 2.11. Resistência à compressão de mistura de alto desempenho
(Adaptado de: Wille e Zhong, 2015)

	Mistura	Porosidade (%)	Resistência à Compressão (MPa)
HPPC	UHPM-2,5-1,19	19,84	65,8
	UHPM-3,0-1,19	24,65	52,9
	UHPM-3,5-1,19	29,18	42,3
	UHPM-2,5-4,75	22,46	34,9
	UHPM-3,0-4,75	26,97	-
	UHPM-3,5-4,75	30,22	14,6

Batezini (2013) estudou algumas propriedades de três misturas de concreto permeável que foram preparadas na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Quanto às resistências à compressão, os resultados obtidos foram considerados próximos aos resultados de referências nas quais o índice de vazios aproximava-se do índice de suas misturas, 25% em média. Essas resistências foram, em média, próximas de 8 MPa. Apesar de ser um valor relativamente baixo, está de acordo com muitas referências que estudaram a resistência à compressão do concreto permeável, tal como Huang *et al.* (2010) que, para sua mistura de controle, sem nenhum tipo de adição, encontraram valores entre 5 e 7 MPa, dependendo apenas do diâmetro do agregado graúdo utilizado. Os valores de Batezini (2013) também se aproximam da resistência encontrada por Rizvi *et al.* (2010), pouco maior que 9 MPa, em sua mistura de controle, sem substituição de agregado natural por reciclado, e aproximando de 10 MPa em sua mistura dita ideal com 15% de agregado reciclado. Além disso, os 8 MPa em média encontrado por Batezini (2013) está dentro do intervalo citado por Tennis *et al.* (2004), de 3,5 a 28 MPa, de valores comumente encontrados em concretos permeáveis. Esse valor relativamente baixo de resistência à compressão em alguns casos, inclusive o de Batezini (2013), deve-se ao fato da alta porosidade das misturas preparadas, confirmando a proporção inversa entre essas características.

Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão não é regularmente requerida nos projetos, porém, tal parâmetro é fundamental em diversos casos de dimensionamento de pavimentos. Diversos fatores, assim como na resistência à compressão, interferem na resistência à tração, tais como grau de compactação, porosidade e relação a/c. Normalmente os concretos permeáveis apresentam uma resistência à tração na flexão de 1 MPa a 3,8 MPa, valor que pode ser mais alto quando o concreto sofre alguma adição, ou que se tenha um processo de execução que possibilite o incremento desse parâmetro (TENNIS et al., 2004; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Ibrahim *et al.* (2014) conseguem plotar o que seria uma relação da resistência a compressão com a tração na flexão. O valor máximo para a resistência à tração na flexão encontrado foi, aproximadamente, 2,2 MPa, o que chega a ser alto se levado a consideração que o valor da resistência à compressão da mesma mistura foi 7 MPa, chegando a ser 30% o valor desta. Evidentemente que essa relação entre a resistência à compressão e a tração na flexão não é algo constante e aplicável a qualquer mistura, como mostrado por Franco (1976) em seu trabalho sobre o controle tecnológico da Rodovia dos Imigrantes.

Chindaprasirt *et al.* (2016) conseguem, além da resistência à compressão, analisar a resistência a tração na flexão com suas misturas com adições de agregados reciclados de blocos e de concretos. Para os agregados reciclados de bloco a resistência à tração na flexão mantem-se sempre próxima dos 5MPa. E, no caso dos agregados reciclados de concreto, o comportamento é semelhante, com exceção da adição de 80% e substituição total dos agregados, onde a resistência decresce para valores próximos de 3 MPa.

Batezini (2013), em sua dissertação de mestrado, desenvolveu três misturas de concreto permeável com o objetivo de aplica-lo a vias de tráfego leve. Entre os ensaios realizados nas misturas está o de resistência à tração na flexão. Todas as misturas apresentaram resultados aceitáveis quando comparados às resistências de outras referências. Nenhuma das três misturas apresentou resistência média de tração na flexão menor que 2 MPa, e a média máxima dentre as misturas foi de 2,22 MPa, praticamente idêntico ao valor encontrado por Ibrahim *et al.* (2014) e dentro do intervalo citado por Tennis *et al.* (2004), 1 a 3,8 MPa, de valores encontrados em diversas pesquisas de concreto permeável.

Resistência a Abrasão

Devido a superfície rugosa e a estrutura com muitos vazios, o concreto permeável pode ter problemas quando se trata de resistência a abrasão e suas consequências, como, por exemplo, o desprendimento de partículas de agregado. Em locais com presença de neve, a utilização de limpa-neve pode agravar esse problema. Esse é um dos motivos pelos quais o concreto permeável não é aplicado a rodovias. Normalmente as vias em concreto permeável perdem algumas partículas de agregado quando abertas ao tráfego, porém, após algumas semanas, a rugosidade do pavimento diminui consideravelmente a ponto de tornar a superfície mais estável. A compactação do concreto e o processo de cura são fundamentais para que a superfície seja menos rugosa e para que haja o aumento da sua resistência a abrasão (TENNIS et al., 2004).

Chindaprasirt *et al.* (2016) compararam a perda de massa por abrasão superficial do concreto referência, que perdeu 8,2 g com agregado natural, e com diferentes percentuais de adição de concreto reciclado proveniente de blocos (RBA) e peças estruturais (RBC). Observa-se a partir da Figura 19 o aumento da resistência, ou diminuição da perda de massa, com incremento de 20% de agregado reciclado de qualquer tipo. Esse fato justifica-se pelo aumento de pasta de concreto e aumento da ligação entre a pasta e o agregado. Porém, quando se trata do agregado reciclado de blocos, com perda de massa por abrasão de 52%, maior que os 50% estabelecidos na ASTM C33, o aumento para teores de 40, 60, 80 e 100% ocasiona uma diminuição da resistência por abrasão, justamente por se tratar de um agregado mais fraco que o agregado natural. Quando o agregado reciclado é de origem de peças estruturais, esse comportamento, apesar de existir a partir dos 40% de adição, acontece de maneira menos acentuada.

Shu *et al.* (2011) também estudaram a perda de massa por abrasão das misturas feitas em laboratório, em campo, além de testemunhos dos concretos utilizados em campo. Observou-se uma perda, dentre todos os concretos analisados, de, no máximo, 15% da massa, valor que o remeteu a considerar o concreto com boa resistência a abrasão.

Figura 19 - Variação da perda de massa por abrasão com a adição de agregado reciclado

(Adaptado de: Chindaprasirt *et al.*, 2016)

Fadiga

A resistência à fadiga dos pavimentos em concreto convencional é estudada extensivamente, tendo em vista que é crucial para se ter ideia da resistência do pavimento ao tráfego. Quando se trata de um pavimento em concreto permeável, são poucos os estudos acerca deste comportamento. Josa *et al.* (1999) estudaram o comportamento à fadiga de concretos permeáveis com adição de polímeros. Esse estudo tinha como principal objetivo observar a diferença de comportamento à fadiga de um concreto permeável com e sem polímero. Para isso, quatro misturas foram feitas, sendo a primeira a referência, a segunda e terceira misturas são com adição de polímero em diferentes teores e, por fim, a quarta mistura com microssílica. Os testes foram realizados com diferentes níveis de tensão. Os resultados obtidos, apresentados na Figura 20, mostram que o aumento da quantidade de polímeros aumenta a resistência à fadiga do concreto. A adição de microssílica pouco influencia essa resistência, apresentando resultados semelhantes aos do concreto referência. Nota-se que o incremento da resistência à fadiga devido a adição de polímeros não é um comportamento constante, e é maior quanto maior for o nível de tensão. Para baixos níveis de tensão, a fadiga tende a se aproximar dos concretos sem a adição dos polímeros.

Figura 20 - Resistência à fadiga do concreto permeável com adição de polímeros

(Adaptado de: Josa *et al.*, 2009)

Ainda é pouco explorado o comportamento à fadiga dos concretos permeáveis. Outro dos poucos estudos de resistência à fadiga por tração na flexão é o realizado por Chen *et al.* (2013), onde os autores estudaram o comportamento à fadiga de diferentes misturas de concretos permeáveis aplicando diferentes níveis de tensão. As misturas eram concretos com adições, tais como superplastificante e sílica ativa, e concretos modificados por polímeros. Obteve-se até 600.000 ciclos para levar o material à falha quando sujeito a baixos níveis de tensão e sendo uma das misturas modificadas por polímero. Este comportamento foi justificado por Chen *et al.* (2013) pelo fato de que os polímeros atrasam o crescimento das fissuras.

Algumas ressalvas devem ser levadas em consideração com os ensaios de fadiga. As altas frequências, segundo Balbo (2009), simulam um processo que demora muito mais para ocorrer em pista. Desta forma o concreto fica sujeito a situações irreais, tais como o curto tempo de descarregamento e tempo de duração da carga. Sendo a ruptura por fadiga um processo de microfissuração progressiva do material, o tempo de atuação das cargas nos ensaios não ilustra a realidade em campo. Esta ideia é mostrada por Cervo (2004) quando expõe que quanto menor a frequência de aplicação de cargas e maior o tempo de atuação das

mesmas, menor a resistência à fadiga do concreto. Além disso, a geometria da carga imposta ao corpo de prova em laboratório não é semelhante às cargas do tráfego.

2.5.5. Colmatação do Concreto

Como mostrado, a colmatação é grande responsável pela perda de permeabilidade de um pavimento permeável ao longo do tempo. Em alguns estudos citados, o processo foi simulado com a introdução de material sólido em um corpo de prova. Para melhor entender como ocorre essa perda de permeabilidade, faz-se necessário o entendimento dos tipos possíveis de colmatação em um pavimento em concreto poroso.

Existem dois principais tipos de colmatação que ocorrem nesse tipo de pavimento, que são:

- Colmatação Física; e
- Colmatação Biológica.

O primeiro tipo é caracterizado pelo acúmulo ou intrusão de material sólido, proveniente do solo e do local de implantação do pavimento (folhas, brita, etc.), no interior da camada de revestimento em concreto permeável, na camada de base, ou entre as camadas. Além disso, a própria mistura pode apresentar excesso de pasta na mistura, fechando, principalmente, a face inferior da camada (BATEZINI, 2013; SILVA, 2013).

Já o segundo tipo ocorre com o crescimento bacteriano no interior do revestimento ou base granular proveniente da presença de micro-organismos no solo do subleito. Destaca-se ainda que a colmatação biológica é dependente de diversos fatores, tais como o tipo de solo e a temperatura propícia para crescimento bacteriano (BAGCHI, 2004; SILVA, 2013).

2.5.6. Projeto

As propriedades hidráulicas, tais como permeabilidade e índice de vazios, e as mecânicas, módulo de elasticidade e resistências, são as que determinam a espessura de um pavimento em concreto permeável. Um pavimento em concreto permeável deve ser projetado para suportar o tráfego no local e contribuir para a estratégia de escoamento de águas pluviais. Para o dimensionamento, é efetuada a análise hidráulica e mecânica. A espessura a ser utilizada será a maior encontrada dentre as duas análises (TENNIS et al., 2004).

Para o dimensionamento hidráulico do pavimento permeável, devem ser considerados a precipitação esperada no local, as características do pavimento e as propriedades do solo do subleito.

Quanto à precipitação, deve-se prever uma precipitação apropriada, que seja comum ao local, a sua duração. O tempo de retorno também é fundamental para o dimensionamento, pois é o que estabelece o volume da precipitação a ser considerada em projeto. Por isso é fundamental que o dimensionamento seja feito conforme características locais.

A sub-base do pavimento merece especial atenção, não devendo ser composta por um solo expansivo ou argiloso. Porém, quando é inevitável a presença de materiais com essas características, algumas medidas devem ser tomadas para que o pavimento não perca sua funcionalidade. Em alguns casos, a camada do solo argiloso/expansivo é retirada e substituída por outro material que atenda aos requisitos da camada do pavimento. Quando o solo do subleito é impermeável, uma camada espessa de uma base permeável é utilizada com o objetivo de aumentar o volume para armazenamento de água dentro do pavimento, diminuindo, assim, a importância da infiltração da água no solo. Outra solução para os casos de solo que não ajudam no processo de escoamento da água é a instalação de poços e canais de drenagem visando o acréscimo de camadas drenantes ou retenção da água infiltrada.

Quanto às cargas provenientes do tráfego, são considerados os eixos simples equivalentes de caminhões e o tráfego médio diário, tendo em vista que são esses veículos os mais críticos para o pavimento. Caso este seja instalado em vias de tráfego leve, onde não transitam veículos pesados, o dimensionamento deverá ser feito com cargas provenientes de automóveis e veículos utilitários.

Outros fatores devem ser incorporados, dependendo do projeto do pavimento. A transferência de cargas entre as juntas pela ligação agregado-agregado, por exemplo, entra como importante quesito quando no projeto há juntas de indução de fissuras de retração (TENNIS et al., 2004).

2.5.7. Métodos e Etapas de Construção e Manutenção

A seguir serão descritas as etapas, desde a preparação do subleito até a manutenção do pavimento em uso, de construção de uma estrutura de pavimento em concreto permeável, abrangendo algumas alternativas e a importância de cada etapa para o produto final poder atender às demandas de projeto.

As etapas, em ordem de execução, analisadas serão:

- Preparação do Subleito e Base;
- Mistura e Materiais;
- Transporte;
- Lançamento e tratamento;
- Execução de juntas de retração;
- Proteção e cura; e
- Manutenção.

Preparação do Subleito e Base

A uniformidade do subleito é um dos fatores mais importantes para a execução de um pavimento com revestimento em concreto permeável. Em um pavimento convencional, o grau de compactação do subleito é, normalmente, um valor entre 90% e 95%, porém, no caso de um pavimento permeável, a compactação do subleito causaria um decréscimo da permeabilidade, tendo em vista a dificuldade de infiltração da água no solo. Porém o pavimento permeável pode não depender somente da infiltração de água no solo, mas também de sistemas de captação e coleta da água infiltrada na estrutura do pavimento.

Tendo em vista que a mistura de um concreto permeável contém baixíssima quantidade de água e elevada porosidade, alguns cuidados devem ser tomados para que o pavimento não perca água e seque prematuramente. Pré-umedecer o subleito, ou a base quando existente, é uma técnica recomendada para pavimentos de concreto convencionais, mas, pela alta porosidade da estrutura de um concreto permeável, facilitando a perda de água, essa técnica

torna-se fundamental para este tipo de revestimento, fazendo com que a superfície inferior não perca água, prejudicando o processo de hidratação do cimento. A não realização desta etapa pode acarretar em menores resistências mecânicas do concreto e menor durabilidade (TENNIS et al., 2004).

A Figura 21 é um exemplo da regularização da base da calçada, neste caso com aproximadamente 9 metros de comprimento executada na USP. Nela não houve compactação do subleito, tendo em vista que o projeto exigia a infiltração da água no solo. Também não houve qualquer tipo de compactação da base, apenas a regularização da mesma para que todas as funções a ela designadas fossem cumpridas sem quaisquer problemas.

Figura 21 - Regularização da base da calçada executada na USP

(Fonte: acervo pessoal)

Mistura e materiais

O controle da quantidade de materiais é fundamental para a obtenção de um concreto permeável com bons parâmetros de resistência e permeabilidade. A água, principalmente, deve ser rigorosamente controlada, tendo em vista que o excesso de água pode fazer com que a pasta solte dos agregados obstruindo, assim, os vazios que deveriam existir na mistura. A quantidade adequada de água pode ser constatada com um brilho que ela proporciona,

através da pasta, nos agregados envoltos. Vale ressaltar que as proporções da dosagem do concreto variam em cada localidade, tendo em vista a procedência dos materiais constituintes da mistura (agregado, cimento e eventuais aditivos).

Para a mistura, a betoneira utilizada é a mesma utilizada em misturas de concretos convencionais. Devido a quantidade de materiais totalmente diferente dos concretos convencionais, o tempo de mistura na betoneira é maior.

Transporte

Devido à baixa quantidade de água presente na mistura do concreto permeável, o tempo de transporte e descarregamento, quando utilizado caminhões betoneira, deve ser de, no máximo, 1 hora, podendo ser elevado para 1,5 hora caso seja utilizado algum tipo de aditivo retardador de pega. Esse tempo pode sofrer, ainda, alguma alteração caso o ambiente de aplicação seja um local com elevadas temperaturas e com fortes rajadas de vento.

Por ser um concreto muito seco, o descarregamento através de caminhões betoneira pode ser mais lento quando comparado ao concreto convencional. Aberturas maiores nesses caminhões, por exemplo, pode ajudar nesse quesito, diminuindo o tempo de descarga (TENNIS et al., 2004).

Lançamento e tratamento

Levando em consideração que o concreto permeável não pode ser bombeado, o caminhão betoneira, caso seja utilizado, deve lançar o concreto, que é espalhado manualmente dentro da área de concretagem já com as fôrmas laterais e subleito e base checados. Por ter que ser lançado e espalhado manualmente, um planejamento de logística dos caminhões deve ser feito. Todo concreto descarregado proveniente de caminhão, ou betoneira, deverá ser checado visualmente, consistência e envolvimento do agregado pela pasta, e, também, com a anotação dos pesos, garantindo a densidade desejada.

O processo de lançamento deve ser um processo contínuo e, em seguida, a compactação e tratamento deve ser rápido tendo em vista o curto espaço de tempo que se tem para trabalhar com o concreto. A compactação e tratamento do concreto podem ser realizados através de régua vibratória ou manual. No caso da régua vibratória, deve-se atentar ao excesso de

vibração, que pode causar a segregação e, conseqüentemente, uma alteração nas propriedades da mistura, sendo uma delas a inevitável diminuição da porosidade e permeabilidade do concreto (TENNIS et al., 2004; BALBO, 2009).

Outra forma de compactação, que já oferece o tratamento superficial da mistura, é a utilização de um rolo compactador. Normalmente maior que a largura do local de aplicação, o rolo apoia-se nas fôrmas. A compactação é maior, evidentemente, na superfície, porém sem prejudicar as funções drenantes do concreto. O tempo para compactação e tratamento do concreto permeável após seu lançamento é curto, aproximadamente 15 minutos. Isso devido à alta taxa de evaporação e curto tempo para início da pega no concreto. Na calçada executada na USP, a Figura 22 apresenta o rolo utilizado. Já a Figura 23 expõe o mesmo método de compactação utilizado por Schaefer *et al.* (2010) em pesquisa.

Figura 22 - Rolo para compactação sendo utilizado na Calçada Preliminar na USP

(Fonte: acervo pessoal)

Figura 23 - Rolo para compactação sendo utilizado

(Adaptado de: Schaefer *et al.*, 2010)

Execução de juntas de retração

Assim como os pavimentos de concreto convencionais, as juntas de indução das fissuras por retração também são executadas em pavimentos em concreto permeável. As fissuras de retração ocorrem quando as deformações internas devido a alterações volumétricas causadas por oscilações térmicas superam a capacidade resistente adquirida pelo concreto até o momento. Caso o corte seja executado após o momento em que a retração supera a capacidade de deformações do concreto, fissuras paralelas às juntas, ou diagonais, surgem. Porém, por se tratar de uma mistura onde a tendência à fissuração é menor quando comparado a um concreto convencional, o espaçamento entre essas juntas pode ser maior, chegando, em alguns casos, a 13 metros, valor que não é usual quando o pavimento é em concreto convencional. Como exemplo da Figura 24, onde, na Cidade Universitária da USP, uma calçada em concreto permeável foi executada com aproximadamente 9 metros de extensão sem nenhum tipo de juntas para indução das fissuras por retração.

Figura 24 - Calçada realizada na USP sem juntas de indução de fissuras

(Fonte: acervo pessoal)

Como já visto, o concreto permeável, por ter estrutura porosa, tende a perder água muito rapidamente, e seu tempo para ser trabalhado é mais curto. Então, recomenda-se que a execução da junta, com profundidade semelhante à dos concretos convencionais (25% da espessura da camada), seja realizada simultaneamente à compactação, no início da pega do concreto, com a utilização de um rolo de compactação com uma serra acoplada no seu ponto médio, como exposto na Figura 25, equipamento popularmente conhecido como *pizza cutter*, ou “cortador de pizza”. Este método, porém, pode causar, durante a serragem das juntas, o esborcinamento destas (TENNIS et al., 2004; BALBO, 2009).

Figura 25 - Equipamento para execução das juntas

(Fonte: www.concretenetwork.com)

Proteção e cura

Etapa fundamental para que o concreto adquira todas as propriedades em laboratório constatadas. Por ter uma estrutura porosa, o concreto permeável tem uma área de superfície exposta maior, deixando a pasta de cimento mais suscetível à evaporação. A perda de água para a atmosfera acarreta em prejuízos nas propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto, tendo em vista que a água é fundamental para as reações químicas de hidratação do cimento que levam ao desenvolvimento da resistência do material. Isso faz com que as demandas de projeto não sejam atendidas. Sendo assim, o processo de cura e proteção é de suma importância para a manutenção das propriedades do concreto permeável. É comum que se use retardadores de evaporação antes, minimizando a perda de água da superfície. A utilização de lona plástica, como ilustrado na Figura 26, também é muito utilizada, servindo de cobertura para o concreto, evitando a perda de água por evaporação. Esse método também foi utilizado por Schaefer *et al.* (2010) em sua pesquisa, onde os autores utilizaram duas camadas do plástico para a proteção após o tratamento do concreto, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 26 - Calçada Preliminar na USP coberta com lona plástica

(Fonte: acervo pessoal)

Figura 27 - Utilização de duas camadas de lona plástica para proteção

(Adaptado de: Schaefer *et al.*, 2010)

O processo de cura e proteção deve começar logo após as etapas de lançamento, compactação e execução de juntas. Recomenda-se que o intervalo entre esses procedimentos e o início de cura e proteção seja, no máximo, 20 minutos. Evidentemente que em casos de climas extremos, com muita incidência solar, altas temperaturas e fortes ventos, esse tempo

pode ser reduzido, tendo em vista que todos esses fatores podem colaborar com uma evaporação mais rápida da água presente no concreto.

A proteção é mantida normalmente até 7 dias após a execução, viabilizando a abertura ao tráfego. De qualquer forma, a cura continua ocorrendo mesmo após a abertura ao tráfego (TENNIS et al., 2004).

Manutenção

A manutenção dos pavimentos em concreto permeável resume-se na prevenção da colmatação através da limpeza periódica do pavimento. A prevenção consiste na escolha e preparação do local, drenagem dos arredores para impossibilitar o acúmulo de materiais na superfície do pavimento.

Mesmo após tomar essas medidas, o pavimento exposto sofrerá, obrigatoriamente, efeito da colmatação e deverá receber alguns procedimentos periódicos, normalmente anuais, que possibilitam a limpeza, tais como: aspiração, forte expiração ou lavagem pressurizada. Em alguns casos a lavagem pressurizada pode restaurar até 90% da permeabilidade do concreto permeável (TENNIS et al., 2004).

Montes e Haselbach (2006) estudaram o efeito da permeabilidade com a inserção de areia no topo dos corpos de prova e com a simulação de vários eventos de chuva. Foi observado o decremento da permeabilidade de forma acentuada, passando de valores entre 0,2 e 1,0 cm/s para valores entre 0,002 e 0,005 cm/s.

Um estudo semelhante foi realizado por Joung e Grasley (2007), onde tentaram relacionar o material utilizado para realizar a colmatação com as propriedades do material, como a porosidade. Assim, observou-se, após a inclusão de material fino, que as misturas com altas porosidades, acima de 33%, não são prejudicadas pelo efeito da colmatação proveniente desse material fino. Porém, porosidades abaixo de 33% apresentam decrementos nos valores de permeabilidade, atingindo até 40% de redução destes. Vale ressaltar que uma porosidade de 33% é considerada por diversas referências da área como uma porosidade muito elevada, podendo acarretar em menores resistências mecânicas do concreto, impossibilitando, assim, sua utilização em vias de tráfego mais pesado.

Neithalath *et al.* (2010) também estudaram a redução da permeabilidade do concreto sujeito a colmatação. Porém houve a variação do tamanho do agregado da mistura. A colmatação foi realizada com a inserção de 25 gramas de areia no topo do corpo de prova, que foi transportado pela água para o interior do concreto. A diminuição da permeabilidade foi de até 30%.

Henderson *et al.* (2009), em seu trabalho, iniciou com a construção de um pavimento permeável em 3 diferentes localidades e observou o seu comportamento após etapas de manutenção para situações de invernos rigorosos e neve. Essa manutenção normalmente consiste em adicionar cloreto de sódio na superfície, pois tem a capacidade de diminuir a temperatura de congelamento, solidificação, da água. Ou seja, a inserção do cloreto de sódio dificulta a formação de camadas de gelo na superfície do pavimento. No caso do concreto permeável, o efeito indesejado dessa manutenção é a diminuição da porosidade do pavimento, o que acarreta na diminuição da permeabilidade. Então, os autores estudaram, também, etapas de manutenção para recuperação da porosidade e permeabilidade do concreto após a inserção do cloreto de sódio, e os resultados mostrados na Tabela 2.12 mostram incrementos de até 287% da permeabilidade média de cada local após utilizar-se uma aspiração à vácuo.

Tabela 2.12. Dados de permeabilidade após manutenção por aspiração a vácuo
(Adaptado de: Henderson *et al.*, 2009)

Localização	Massa removida (g)	Permeabilidade (cm/s)		Incremento da permeabilidade (%)
		Pré-aspiração	Pós-Aspiração	
Local A	211	0,003	0,356	119
Local B	1550	0,013	3,728	287
Local C	900	0,106	0,139	1,3

Suozzo e Dweoolkar (2012) estudaram o resultado da manutenção, em porcentagem de permeabilidade que foi recuperada. Seus testes foram realizados em diversos pontos de dois diferentes locais. A Figura 28 apresenta a permeabilidade inicial medida em um dos locais estudados e a porcentagem de incremento antes e depois da utilização de dois equipamentos para manutenção, que são: varredor e uma limpeza a vácuo feita por um caminhão. Nota-se que o processo de limpeza feita pelo varredor já causa um incremento considerável na permeabilidade do ponto estudado, em média causando incremento de 28%. Já a limpeza a

vácuo causa um aumento, em alguns casos, surpreendente, duplicando a permeabilidade do ponto, atingindo média de 89%. Suozzo e Dewoolkar (2012) desconsideraram os resultados dos pontos B e D, tendo em vista a discrepância destes pontos quando comparado aos demais. Assim, os incrementos resultantes da manutenção pelo varredor e a vácuo passam a ser, respectivamente, 21% e 30%. De qualquer forma, é evidente a maior eficácia da limpeza a vácuo. Ressalta-se, ainda, que em alguns pontos o processo de manutenção não obteve o resultado esperado, fazendo com que não houvesse aumento da permeabilidade em comparação a esta antes da manutenção.

Figura 28 - Permeabilidade pré e pós manutenção por varredor e a vácuo

(Adaptado de: Suozzo e Dewoolkar, 2012)

Drake e Bradford (2013) tinham como objetivo avaliar o potencial de restauração de alguns tipos de pavimentos permeáveis após alguns tipos de manutenção. Dentre os pavimentos estudados está o pavimento de concreto permeável, que antes da manutenção apresentava taxa de infiltração de 0,001 cm/s. Diferentes tipos de manutenção foram feitos na área cujo revestimento era o concreto permeável, tais como a lavagem pressurizada e sucção à vácuo. Ambos os métodos resultaram em uma melhora na taxa de infiltração, porém o aumento quando a lavagem pressurizada é utilizada é maior, atingindo 0,006 cm/s. Quando se compara

os resultados obtidos pelos autores com demais referências percebe-se que o pavimento já não apresenta uma alta funcionalidade hidráulica, porém fica evidente que a manutenção é capaz de recuperar essa função. Ou seja, se essa manutenção for periódica, aliada a uma boa mistura, aplicação e escolha do local de implantação do pavimento, pode fazer com que a vida útil deste seja muito maior.

Sendo assim, fica evidente a necessidade de uma manutenção periódica com o objetivo de se ter um concreto permeável com todas as suas funções, tanto hidráulicas quanto mecânicas. A falta de manutenção acarreta em uma mistura que não atende mais os requisitos de projeto, perdendo sua principal função hidráulica: a capacidade de fazer com que a água infiltre rapidamente na sua estrutura, além da capacidade de armazená-la nos seus vazios.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

Batezini (2013) desenvolveu uma mistura de concreto permeável considerando sua possível aplicação em áreas de veículos leves. A presente pesquisa tem como objetivo a aplicação de um traço em desenvolvimento junto à Tese de Doutorado de Rafael Batezini, bem como a análise crítica de todas as etapas construtivas, desde a escolha do local ao acabamento do pavimento, com o objetivo maior de aferição da drenabilidade dos concretos permeáveis *in loco* ao longo dos meses que se seguiram após sua construção. Para tanto, desenvolveu-se no LMP-EPUSP os projetos a serem seguidos nas execuções das calçadas preliminar e definitiva.

Para a execução das calçadas, a equipe do LMP-EPUSP contou com a ajuda dos seguintes parceiros:

- LafargeHolcim cedendo materiais para as misturas e laboratório para realização das moldagens e ensaios;
- EP – Engenharia de Pisos cedendo mão de obra, fabricando os rolos de compactação utilizados e cedendo equipamentos e ferramentas para auxiliar as diversas etapas das construções;
- Grace Brasil por fornecer os aditivos utilizados nas misturas preparadas;
- Odebrecht Ambiental por fornecer o agregado reciclado de Resíduo de Construção e Demolição, RCD, que foi utilizado na camada de base de ambas as calçadas projetadas;
- Prefeitura do Campus da Capital da Universidade de São Paulo com o aval para as execuções nos locais escolhidos, por ceder maquinário e mão de obra para algumas das etapas das construções.

3.1. Projetos de Calçadas em Concreto Permeável na Universidade de São Paulo

Para a execução das calçadas foram projetadas, de acordo com análises do local para evitar possíveis interferências e para se ter um comprimento suficiente para coleta de dados, as seções transversais das calçadas.

3.1.1. Calçada Preliminar

Em dezembro de 2015, com a ajuda dos parceiros citados, foi executada uma calçada preliminar com 8,65 metros de comprimento com o objetivo de testar o traço desenvolvido pelo LMP-EPUSP aplicado e sujeito a agentes externos para eventuais ajustes para a calçada definitiva e, principalmente, aplicar os métodos construtivos para análise crítica do que foi eficiente e o que poderia ser aperfeiçoado para a execução da calçada definitiva posteriormente.

A calçada preliminar está localizada na Travessa 1 da Avenida Professor Almeida Prado, ao lado do Edifício Paulo Souza, como mostrado na Figura 29 a localização grifada em vermelho.

Figura 29 - Mapa da localização da calçada preliminar na Universidade de São Paulo

O local foi escolhido após análise nas proximidades do Edifício Paulo Souza na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Buscou-se um local onde seria difícil ter alguma interferência com as redes hidráulica e elétrica, e perto de local que possibilitasse a ligação de energia e água para a mistura *in loco*. Nesta etapa, a escolha do local se deu também para avaliar o comportamento hidráulico em ambiente suscetível às folhagens, então nota-se que

a construção ocorreu em local próximo de árvores tropicais e exóticas de diversos tipos, além de ser próxima a área gramada. Na Figura 30 é mostrado o local com a calçada já construída.

Figura 30 - Local da calçada preliminar

(Fonte: acervo pessoal)

A estrutura da calçada, ilustrada na Figura 31, conta com 15 cm de base de agregado reciclado de RCD na granulometria de 19 a 25mm, como mostrado na curva granulométrica apresentada na Figura 32, e permite a infiltração gradativa da água armazenada em toda a estrutura no solo do subleito.

Figura 31 - Seção transversal - Calçada preliminar

Figura 32 - Curva granulométrica – RCD aplicado na base da calçada

3.1.2. Calçada Definitiva

Nos dias 14/05/2016 e 21/05/2016, após verificados, na execução da calçada preliminar, os métodos construtivos e a mistura desenvolvida pelo LMP-EPUSP, foram concretados os trechos da calçada definitiva com envolvimento de todos os parceiros citados.

A calçada definitiva está localizada na Praça do Pôr do Sol, na Avenida Professor Lineu Prestes, como indicado na Figura 33.

Figura 33 - Mapa da localização da calçada definitiva

O local foi escolhido, dentre algumas opções, após apresentar melhores condições para a construção das calçadas, tais como: pequena e irrelevante inclinação natural do terreno; extensão razoável para execução de três diferentes trechos; e, principalmente, local com baixa influência de árvores ao seu redor, como mostrado nas Figuras 34 e 35, o que pode levar a diminuição dos efeitos da colmatação e, conseqüentemente, de manutenções periódicas na calçada. Além disso, nota-se, ao lado da calçada, uma área com blocos intertravados de concreto com grama já existentes no local. Esse tipo de revestimento era, inclusive, o pavimento que existia no local antes da construção da calçada definitiva.

Figura 34 - Local calçada definitiva - Lado pista

Figura 35 - Local calçada definitiva - Lado praça

A calçada definitiva tem extensão de 85,80 metros que são divididos em três trechos, que diferem entre si da seguinte maneira:

- Trecho 1: 21,50 metros para a mistura desenvolvida pelo LMP-EPUSP contando com a infiltração de água no solo do subleito e com manta geotêxtil com permeabilidade de 0,40 cm/s (concretado no dia 14/05/2016);
- Trecho 2: 19,50 metros para a mistura desenvolvida pelo LMP-EPUSP contando com caixa coletora, sistema de drenagem e lona plástica impermeável em duas camadas (concretado no dia 14/05/2016); e
- Trecho 3: 44,80 metros para a mistura desenvolvida pela empresa parceira LafargeHolcim (concretado no dia 21/05/2016).

A Figura 36 apresenta as diferentes seções transversais dos trechos 1 e 2. A principal diferença entre os trechos é que o primeiro permite a infiltração gradativa da água precipitada no solo do subleito, enquanto o segundo trecho conta com uma lona impermeável, impossibilitando a infiltração no solo, e com sistema de drenagem que liga a uma caixa coletora executada ao lado da calçada, e tem seção transversal ilustrada na Figura 37. A ligação entre a calçada e a caixa coletora é feita através de um tubo de Policloreto de Vinila, PVC, perfurado, envolto a uma manta geotêxtil com permeabilidade de 0,40 cm/s. Esse tubo é colocado transversalmente na calçada e é o ponto mais baixo, onde todas as inclinações, tanto a proveniente do início quanto a do fim da calçada, encerram-se no ponto de instalação do tubo. Neste ponto, a camada de base da calçada contou com espessura de aproximadamente 25 cm.

Outra diferença que se nota na Figura 37 é a espessura da camada de concreto permeável, que é maior no trecho 2. Essa diferença deve-se ao fato de que se pretende, futuramente, estudar a diferença em propriedades mecânicas que a maior espessura impõe, além de poder armazenar uma maior quantidade de água precipitada.

Figura 36 - Seções transversais dos trechos 1 e 2 - Mistura LMP

TRECHO 1
ESTRUTURA DO LMP PERVIOUS – REGIÃO
C/ MANTA PERMEÁVEL

TRECHO 2
ESTRUTURA DO LMP PERVIOUS – REGIÃO
COM LONA IMPERMEÁVEL

Figura 37 - Seção Transversal da caixa coletora com sistema de drenagem da calçada definitiva - Trecho 2

3.2. Misturas Empregadas nas Calçadas em Concreto Permeável na Universidade de São Paulo

3.2.1. Calçada Preliminar

Para a escolha da mistura ideal a ser empregada nas calçadas, oito misturas (A – H) foram preparadas e moldadas em corpos de prova cilíndricos e prismáticos. As moldagens ocorreram nos dias 21/05/2015 (misturas A, B e C), dia 04/08/2015 (misturas D e E) e no dia 03/09/2015 (misturas F, G e H). Todas as moldagens aconteceram na usina da LafargeHolcim localizada na Rua Vereador José Nanci em Santo André-SP.

Dois diferentes tipos de agregado foram utilizados nas moldagens das oito diferentes misturas. Nas misturas de A a E, além da mistura H, foram utilizados agregados com granulometria entre 6,3 e 9,5 mm, sem nenhuma quantidade de material fino. As demais misturas foram preparadas com material de mesma granulometria, porém com certa quantidade de finos, denominado agregado comercial, como apresentado nas curvas da Figura 38.

Figura 38 - Curvas granulométricas dos agregados utilizados

O cimento utilizado nas misturas de A a H foi o comumente utilizado pela parceira LafargeHolcim na época das moldagens, que foi do tipo CP-III 40 RS, que é também conhecido como Cimento Portland de Alto Forno. Possui em sua composição uma porcentagem entre 35% e 70% de escória de alto forno.

Com o objetivo de se obter uma mistura com boas resistências mecânicas e vazios que propiciassem bons resultados de infiltração, algumas misturas foram testadas com adições de diferentes percentuais de superplastificante do tipo ADVA™ CAST 585 da Grace (0,25%; 0,35%; 0,45%; 0,47%; 0,55% e 0,70%), com relação água/cimento fixada em 0,3. Logo, os ajustes na mistura deveriam ser na quantidade de superplastificante. O primeiro passo para a escolha da mistura ideal foi a inspeção visual dos corpos de prova após a moldagem e a retirada da fôrma. Alguns desses corpos de prova apresentaram colmatção, como ilustrado na Figura 39, e, por este motivo, as misturas A, D e E foram descartadas. A Tabela 3.1 mostra, resumidamente, as informações de quantidades de materiais pertinentes a cada uma das oito misturas preparadas para a calçada preliminar. Tendo em vista que o concreto aplicado na calçada

preliminar foi misturado *in loco*, não houve necessidade de outro aditivo no concreto, como o retardador de pega. Ao final, a mistura G foi a escolhida para ser aplicada na calçada preliminar.

Figura 39 - Corpos de prova colmatados

(Fonte: acervo pessoal)

Tabela 3.1. Misturas preparadas para a Calçada Preliminar

Identificação da Mistura	Graduação do Agregado	Tipo de Cimento	Quantidade de Cimento (kg/m³)	Quantidade de Agregado (kg/m³)	Relação a/c	Porcentagem de Superplastificante sobre a quantidade de Cimento (%)	Porcentagem de Aditivo Retardador de Pega (%)
Ra	Graduação Única (6,3 a 9,5mm)	CP III - 40 RS	374	1.660	0,3	0,70	-
Rb	Graduação Única (6,3 a 9,5mm)	CP III - 40 RS	374	1.660	0,3	0,00	-
Rc	Graduação Única (6,3 a 9,5mm)	CP III - 40 RS	374	1.660	0,3	0,35	-
Rd	Graduação Única (6,3 a 9,5mm)	CP III - 40 RS	374	1.660	0,3	0,45	-
Re	Graduação Única (6,3 a 9,5mm)	CP III - 40 RS	374	1.660	0,3	0,55	-
Rf	Agregado Comercial	CP III - 40 RS	374	1.660	0,3	0,25	-
Rg	Agregado Comercial	CP III - 40 RS	374	1.660	0,3	0,35	-
Rh	Graduação Única (6,3 a 9,5mm)	CP III - 40 RS	374	1.660	0,3	0,47	-

3.2.2. Calçada Definitiva

Para a escolha da mistura a ser aplicada na calçada definitiva, houve a necessidade de fazer novas misturas, devido ao fato de que o cimento utilizado pela parceira, LafargeHolcim, foi modificado, passando a ser o cimento do tipo CP-V ARI RS. Esse tipo de cimento, a exemplo do empregado na calçada preliminar, também é um cimento resistente a sulfatos. A grande e

importante diferença que a mudança de cimento traz à pesquisa é que o empregado na calçada definitiva é um cimento de alta resistência inicial, obtido através de uma diferente produção do clínquer, com quantidades modificadas de argila e calcário. Além disso, a moagem mais enérgica do cimento também gera uma resistência elevada nas primeiras idades do concreto, já que desta forma gera um material mais fino que reage com a água com maior facilidade (ISAIA, 2011).

Conforme Balbo (2009), a utilização do cimento CP-V ARI exige um cuidado extremo, tendo em vista que a reação mais rápida com a água pode resultar em maior retração por secagem.

Outro fator fundamental para preparação de novas misturas foi que os concretos, nos dias das concretagens, foram misturados na usina da LafargeHolcim localizada em Santo André, na rua Vereador José Nanci, a 35 km do local de aplicação do concreto. Esse fato fez com que a mistura necessitasse do aditivo retardador de pega, já que apenas o tempo de deslocamento da usina ao Campus da Universidade de São Paulo foi estimado em 1 hora.

Sendo assim, três novas misturas (I, J e L) foram preparadas e moldadas no dia 12/04/2016, e ensaiadas posteriormente para se obter os valores de resistências mecânicas e parâmetros hidráulicos, tais como porosidade e taxa de infiltração das misturas. As três misturas tiveram variação na quantidade de superplastificante e na quantidade do aditivo retardador de pega, como mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Misturas preparadas para a Calçada Definitiva

Identificação da Mistura	Graduação do Agregado	Tipo de Cimento	Quantidade de Cimento (kg/m³)	Quantidade de Agregado (kg/m³)	Relação a/c	Porcentagem de Superplastificante sobre a quantidade de Cimento (%)	Porcentagem de Aditivo Retardador de Pega (%)
Ri	Agregado Comercial	CP V ARI RS	374	1.660	0,3	0,45	0,20
Rj	Agregado Comercial	CP V ARI RS	374	1.660	0,3	0,35	0,40
Rl	Agregado Comercial	CP V ARI RS	374	1.660	0,307	0,45	0,40

Após se obter alguns valores dos ensaios realizados, e observado o tempo em que a mistura não iniciou o processo de pega e continuava a possibilitar sua moldagem, a mistura L foi a indicada para ser aplicada na calçada definitiva nos trechos 1 e 2. Essa mistura conta com 0,45% de superplastificante e 0,40% de aditivo retardador de pega. Além disso, ocorreu uma pequena variação na relação a/c, passando a ser 0,307.

A mistura aplicada no trecho 3 foi aquela desenvolvida pela parceira LafargeHolcim, que não forneceu maiores informações a respeito do material aplicado, por julgarem ser necessário manter segredo industrial sobre o material designado por Hydromedia. O produtor, Lafarge Holcim¹, afirma que “Hydromedia™ é uma solução inovadora e exclusiva de piso com alta capacidade de drenagem. Contém pelo menos 20% de espaços vazios, o que faz com que a água de superfície percorra diretamente através do concreto. Esta solução permite a absorção de até 400 litros de água por m² por minuto. Com propriedade antiderrapante, o piso apresenta aspecto rústico e está disponível em uma diversificada gama de cores”.

3.3.Execução das Calçadas em Concreto Permeável na Universidade de São Paulo

3.3.1. Calçada Preliminar

A calçada preliminar tinha justamente o objetivo de testar, além da mistura, as etapas de construção e adaptá-las da melhor forma para a calçada definitiva. Sendo assim, no 03/12/2015 a calçada preliminar foi executada com a participação de todos os parceiros anteriormente citados. Os materiais foram transportados pelos parceiros previamente à concretagem e todo o equipamento necessário, tais como baldes, balança, betoneira, carrinho de mão, foram solicitados antecipadamente ao laboratório de Concreto e Corrosão do Departamento de Engenharia e Construção Civil da EPUSP para estarem disponíveis no dia da concretagem.

A área da calçada foi delimitada por piquetes de madeira e linha de nylon, e após isso iniciou-se o processo de escavação com retroescavadeira, que escavou com profundidade de 25 cm, aproximadamente. A regularização final do subleito foi executada manualmente. Feito isso, o material da base foi colorado com auxílio da retroescavadeira e regularizado manualmente com auxílio de nível a laser, equipamento que pertence a parceira EP – Engenharia de Pisos.

A calçada, como citado, tem 8,65 m de comprimento e 1 metro de largura, medidas que foram delimitadas com fôrmas metálicas acima da camada de agregado reciclado de RCD. As fôrmas também serviram de apoio para o rolo de compactação, que foi fabricado com 1,5 metro de largura, suficiente para ter apoio de ambos os lados, além de ter carga de 68 kg/m, exercendo

---

¹ Informação fornecida pelo fabricante Lafarge Holcim através do site http://www.lafarge.com.br/wps/portal/br/3_A_3_A_5-Hydromedia

uma pressão de 0,07 MPa, como sugerido pela *Colorado Ready Mixed Concrete Association*, CRMCA².

Com todos os materiais à disposição, o material da base foi umedecido, fazendo com que o concreto não perdesse água para a camada de base. A mistura foi executada na betoneira do local e transportado para o interior da calçada com o auxílio do carrinho de mão e espalhado manualmente. Após espalhado, foi compactado com o rolo apoiando-se nas fôrmas metálicas. Quando não utilizado, o rolo ficava apoiado nas fôrmas metálicas laterais.

A medida que a calçada era concretada, era imediatamente coberta por uma lona plástica, para evitar a perda de água da mistura para o ambiente. Alguns dias após a concretagem, as fôrmas metálicas foram retiradas. As etapas construtivas são apresentadas na Figura 40.

Figura 40 - Etapas execução calçada preliminar

i. Locação da calçada

ii. Escavação

---

² Informação fornecida pela Associação no informativo *Specifier's Guide for Pervious Concrete Pavement Design*, disponível em www.crmca.org

iii. Base em Agregado Reciclado

iv. Regularização Base

v. Colocação das fôrmas

vi. Aplicação do Concreto

vii. Compactação com rolo

viii. Cobertura com lona plástica

(Fonte: acervo pessoal)

3.3.2. Calçada Definitiva

Após análise e preparação dos procedimentos construtivos adotados na calçada preliminar, a calçada definitiva teve sua execução ocorrendo nos dias 14/05/2016 (Trechos 1 e 2) e 21/05/2016 (Trecho 3).

As principais diferenças entre as construções foram o local da mistura do concreto, que na calçada definitiva foi dosado na usina em Santo André e transportado em caminhão betoneira até a USP, a não utilização de fôrmas metálicas e sim de guias pré-moldadas de concreto, a utilização de Máquina Acabadora de Piso para se ter um melhor acabamento superficial da calçada e, por fim, a utilização de manta permeável no Trecho 1 e de Lona Plástica impermeável no trecho 2, que também teve a instalação do dreno e a construção da caixa coletora.

As guias pré-moldadas de concreto assumem o papel que, na calçada preliminar, foi das fôrmas metálicas. Delimitaram os 85,80 metros de calçadas divididos nos três diferentes trechos já citados, bem como serviram como divisória entre os trechos e de apoio para o rolo de compactação.

A execução iniciou-se com a retirada do pavimento em blocos intertravados existente no local anteriormente com auxílio de retroescavadeira. Feito isso, a mesma retroescavadeira executou a escavação dos dois primeiros trechos, com todas as profundidades e inclinações pertinentes a cada trecho. A regularização do subleito ocorreu de forma manual. Logo após a regularização, iniciou-se o processo da instalação das guias de concreto, com bolotas de concreto em suas juntas.

Com todas as guias assentadas e niveladas, a manta e a lona plástica foram colocadas em seus respectivos trechos. No trecho 2, o dreno foi instalado e ligado à caixa coletora que foi instalada simultaneamente. O material da base, que já tinha sido transportado, foi colocado com auxílio da retroescavadeira e teve sua espessura regularizada manualmente.

Um novo rolo de compactação foi confeccionado pela empresa parceira, EP Engenharia de Pisos, para atender a nova largura da calçada, porém obedecendo as recomendações da CRMCA. O rolo foi transportado para o local da concretagem, assim como a Máquina Acabadora de Piso, popularmente conhecido como “Bambolê”.

Os dois caminhões foram pesados na usina em Santo André às 07:46 e 09:00 e iniciaram a viagem até o local de execução. Antes do início do lançamento do concreto, a base em agregado reciclado em RCD foi umedecida para evitar perda da água do concreto para a camada subjacente. O concreto foi lançado na pista, espalhado manualmente e o rolo foi passado no sentido longitudinal apoiando-se nas guias laterais. O segundo caminhão, mesmo saindo da usina mais de 1 hora depois do primeiro caminhão, teve que aguardar no local da calçada e teve sua mistura lançada após pouco mais de 2 horas depois de sua saída da usina em Santo André. O primeiro caminhão iniciou o lançamento às 09:05, aproximadamente, e sua mistura foi aplicada no trecho 1 em quase sua totalidade. Em seus metros finais, a mistura começou a apresentar-se mais seca e, desta forma, o final do trecho 1 foi concretado com a mistura do segundo caminhão, às 10:20, que já estava no local. O mesmo problema ocorreu nos metros finais do trecho 2, porém a concretagem continuou.

Feito o acabamento, a calçada foi coberta com lona plástica para impossibilitar a perda de água do concreto para o ambiente.

A Figura 41 apresenta todas as etapas da execução da calçada definitiva na Praça do Pôr do Sol da Universidade de São Paulo.

Figura 41 - Etapas da construção da calçada definitiva

i. Escavação e retirada dos blocos intertravados

ii. Assentamento de guias

iii. Colocação de lona plástica

iv. Colocação manta permeável

v. Colocação e regularização da base com RCD

vi. Execução da caixa coletora

vii. Pré umedecimento da base

viii. Lançamento do concreto

ix. Compactação com rolo

x. Acabamento superficial

xi. Proteção após concretagem

(Fonte: acervo pessoal)

Para a execução do trecho 3, quase todas as etapas foram seguidas de forma rigorosamente iguais, com exceção da manta ou lona plástica sob a camada de base, que o projeto deste trecho não contemplava. Outra diferença foi a respeito da passagem do rolo de compactação, que nos trechos 1 e 2 se deu no sentido longitudinal, enquanto no trecho 3 se deu no sentido transversal. Tendo em vista que o trecho 3 conta com infiltração de água no solo, nenhuma caixa coletora e instalação de drenagem foi construída.

3.4. Ensaio de Infiltração *In Situ*

Com a finalidade de se observar o comportamento hidráulico das misturas aplicadas nos diferentes trechos da calçada definitiva, ensaios para determinar a taxa de infiltração foram executados seguindo a norma ASTM C-1701. O ensaio resulta em uma taxa de infiltração em mm/h.

O ensaio consiste em limpar o pavimento previamente e fixar um anel de infiltração de 300 mm de diâmetro e vedá-lo para evitar o escoamento de água entre a superfície e o anel, como mostrado na Figura 42. Feito isso, passa-se para a etapa de pré-molhagem, onde 3,6 L de água são despejados no interior do anel, mantendo o nível de 10 a 15 mm de lâmina d'água. O tempo para total infiltração dos 3,6 L é anotado e, se esse for menor que 30 segundos, o ensaio é realizado com 18 L de água e os mesmos procedimentos da pré-molhagem são seguidos. Por fim, o tempo de escoamento dos 18 L é anotado e inserido na equação exposta na norma, como mostrado no Anexo A.

Figura 42 - Anel de Infiltração

Caso o tempo, na etapa de pré-molhagem, for maior ou igual a 30 segundos, o ensaio é realizado com 3,6 L e os valores inseridos na Equação 1 já mostrada. Nesta situação caso, a etapa com os 18 L não é executada.

3.4.1. Calçada Preliminar

Seguindo os procedimentos descritos, ensaios de infiltração *in loco* foram realizados na calçada preliminar em sete diferentes ocasiões (11/12/2015; 05/04/2016; 29/07/2016;

02/09/2016; 20/10/2016; 09/12/2016; e 26/01/2017) a partir de sua concretagem. Todos os ensaios foram realizados nos pontos mapeados e ilustrados na Figura 43.

Figura 43 - Localização dos pontos do ensaio de infiltração – calçada preliminar

3.4.2. Calçada Definitiva

A exemplo do que ocorreu na calçada preliminar, 47 diferentes pontos, divididos em três trechos, foram mapeados e ensaiados em cinco diferentes oportunidades a partir de sua concretagem (29/07/2016; 01 e 02/09/2016; 20/10/2016; 08 e 09/12/2016; e 26/01/2017) para tornar possível a análise do comportamento hidráulico dos diferentes trechos da calçada definitiva. O mapeamento dos pontos ensaiados nos Trechos 1, 2 e 3 seguem, respectivamente nas Figura 44, 45 e 46. Os pontos foram marcados seguindo o padrão de distância de 2 metros entre eles, e variando entre bordas e centro. No início do terceiro trecho, devido a existência de uma caixa de passagem de instalação elétrica/telefônica, os pontos fogem do padrão em uma pequena extensão da calçada, voltando a normalidade a partir do quarto ponto.

Figura 44 - Locação dos pontos do ensaio de infiltração – calçada definitiva - trecho 1

Figura 45 - Locação dos pontos do ensaio de infiltração – calçada definitiva - trecho 2

Figura 46 - Locação dos pontos do ensaio de infiltração – calçada definitiva - trecho 3

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Resultados dos Ensaios de Infiltração *In Situ*

Em ambas as calçadas, ensaios de infiltração *in loco* foram realizados seguindo a norma ASTM C-1701. Os resultados mostram a eficácia do pavimento permeável no âmbito hidráulico. Os ensaios foram realizados diversas vezes em todas as calçadas para avaliar a diminuição da taxa de infiltração com o tempo decorrente de uma possível colmatagem.

4.1.1. Calçada Preliminar

Na calçada preliminar, nos seis pontos mapeados, foram realizados sete diferentes ensaios. Todos eles seguiram rigorosamente as instruções contidas na norma ASTM C-1701. Preliminarmente a cada ensaio uma limpeza superficial da calçada foi realizada com vassouras, com exceção dos dois últimos, nos quais a limpeza foi através de um forte jato d'água.

Os valores da taxa de infiltração obtidos ao longo dos meses de estudos estão indicados na Tabela 4.1. Os pontos destacados em cinza foram os que apresentaram resultados maiores que 30 segundos na etapa de pré-molhagem e, por isso, foram ensaiados com 3,6 L.

A Tabela 4.1 também indica o percentual de perda de taxa de infiltração em relação ao primeiro ensaio, além das médias dos seis pontos em cada data na qual o ensaio foi realizado, os desvios padrão e os coeficientes de variação, além da redução média da taxa de infiltração em relação ao primeiro ensaio.

Tabela 4.1. Taxas de infiltração - Calçada Preliminar

	11/12/2015		05/04/2016		29/07/2016		02/09/2016		20/10/2016		09/12/2016		26/01/2017	
	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda
Ponto 1	0,56	0%	0,04	92%	0,05	90%	0,08	85%	0,06	90%	0,08	85%	0,12	79%
Ponto 2	0,56	0%	0,23	58%	0,21	62%	0,30	47%	0,29	48%	0,11	80%	0,14	74%
Ponto 3	0,36	0%	0,22	39%	0,13	64%	0,14	62%	0,13	64%	0,10	72%	0,12	67%
Ponto 4	0,18	0%	0,11	37%	0,05	69%	0,08	54%	0,08	56%	0,08	56%	0,09	50%
Ponto 5	1,06	0%	0,55	48%	0,51	52%	0,76	28%	0,76	28%	0,65	39%	0,72	32%
Ponto 6	0,63	0%	0,43	32%	0,29	55%	0,31	52%	0,57	10%	0,41	36%	0,30	52%
Média (cm/s)	0,56		0,27	52%	0,21	63%	0,28	50%	0,31	44%	0,24	57%	0,25	55%
Desvio Padrão (cm/s)	0,30		0,19		0,17		0,26		0,29		0,24		0,24	
Coef de Variação (%)	53,44		72,75		83,85		92,93		92,64		99,78		97,64	

Fica evidente, após a análise dos resultados, que a perda da taxa de infiltração do primeiro para o segundo ensaio, em um intervalo de quatro meses, foi bastante alta, onde alguns pontos apresentaram perda maior que 90%. Nesse período, as taxas de infiltração não foram coletadas, e essas taxas explicitariam o comportamento hidráulico ao longo desses quatro

meses, que foi um período com alto índice pluviométrico e com grande incidência de folhagens na superfície da calçada, o que explica a queda drástica da média das taxas de infiltração, que após esse período, tenderam a uma estabilização, mostrado pela média sempre próximas de 0,24 cm/s, apesar do alto valor de coeficiente de variação.

Como já explicado, a escolha do local de implantação do pavimento é de fundamental importância para um bom desempenho hidráulico, e, no caso da calçada preliminar, permitiu analisar a influência das folhagens nesse desempenho. A Figura 47 apresenta graficamente a diminuição da taxa de infiltração com o tempo. Fica claro, mais uma vez, que a diminuição crítica se deu no período entre Dezembro/2015 e Abril/2016, onde dados não foram coletados, o que impossibilitou maior análise de como se deu essa redução nesse período. Após esse período, há uma tendência aproximadamente linear das médias dos ensaios realizados a partir de Abril/2016, sendo que suas taxas de infiltração são praticamente iguais. Considerando que o ensaio adotado pode trazer algumas imprecisões nos resultados, não se pode afirmar que após Abril/2016 houve uma redução na taxa de infiltração média.

Figura 47 - Médias - Taxas de Infiltração - Calçada Preliminar

Apesar de uma taxa média de 0,24 cm/s, menor média obtida, ser uma taxa com bom potencial drenante, o percentual de perda apresentado é algo que chama a atenção. A Figura

48 apresenta a situação da calçada antes da limpeza realizada para a execução do ensaio. Vale a ressalva que o período em que a calçada ficou exposta sem limpeza foi de 48 dias, entre o penúltimo e último ensaio. Fica evidente que a quantidade de material na superfície do pavimento é bastante grande, o que reforça o quanto o desempenho hidráulico depende da quantidade de folhagens ou outros materiais em sua superfície.

Figura 48 - Situação calçada preliminar antes do ensaio de 26/01/2017

(Fonte: acervo pessoal)

A Figura 49 expõe a situação no início da calçada, onde o terreno natural está acima do nível do pavimento e, por isso, é uma área que recebe muito material sólido proveniente do terreno próximo.

Figura 49 - Diferença de nível no início da calçada preliminar com terreno natural

(Fonte: acervo pessoal)

As taxas no final da calçada, pontos 5 e 6, onde o pavimento está mais próximo do nível do terreno natural e mais distante de árvores, apresentam resultados muito superiores e, até o sétimo ensaio realizado, tiveram a taxa determinada com 18 L no ensaio. Ou seja, apresentam tempo de infiltração menor que 30 segundos na etapa de pré-molhagem, o que não acontece com os demais pontos.

Vale destacar que a própria metodologia para realização do ensaio pode ter feito com que os resultados apresentassem uma dispersão, tendo em vista que é um ensaio muito suscetível a variações provenientes de diversos fatores, tais como a mudança do operador do ensaio, erros de cronometragem, fixação perfeita do anel na superfície, entre outros.

4.1.2. Calçada Definitiva

Em cima dos 47 pontos mapeados e já ilustrados anteriormente, cinco ensaios foram realizados em cada um desses pontos. Todos os ensaios seguiram a norma ASTM C-1701.

Ao contrário do que aconteceu na calçada preliminar, a definitiva não apresentou material sólido em sua superfície, tornando desnecessária uma limpeza superficial pré-ensaio, exceto em casos pontuais. Certamente essa situação foi devida ao fato de que a escolha do local da calçada definitiva foi feita procurando um local onde a influência de árvores fosse mínima. A situação da calçada anteriormente a cada ensaio mostrou a importância da escolha de implantação da mesma, que, a longo prazo, vai requerer uma manutenção em períodos mais longos quando comparados aos da calçada preliminar.

As Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 mostram os resultados obtidos após os ensaios realizados nos trechos 1, 2 e 3, respectivamente. Nota-se que todos os trechos apresentam uma queda na taxa de infiltração média com o tempo. Apesar disso, essas diminuições nas taxas de infiltração não são tão altas quanto na calçada preliminar, quando a diminuição foi de 55%, e continuam apresentando excelente comportamento hidráulico. Além disso, os coeficientes de variação apresentados mostram que os pontos ensaiados apresentam comportamentos mais semelhantes, diferente do que ocorre na calçada preliminar.

Tabela 4.2. Taxas de Infiltração - Trecho 1

	29/07/2016		01/09/2016		20/10/2016		08/12/2016		26/01/2017	
	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda
Ponto 1	0,40	0,00%	0,64	-58,43%	0,25	37,13%	0,29	0,27	0,31	22,07%
Ponto 2	1,56	0,00%	1,48	5,06%	1,23	21,25%	1,27	18,41%	1,29	17,21%
Ponto 3	2,05	0,00%	2,10	-2,14%	2,03	1,12%	1,82	11,42%	1,74	15,41%
Ponto 4	1,85	0,00%	2,37	-28,00%	1,88	-1,40%	2,02	-9,29%	1,76	4,78%
Ponto 5	2,03	0,00%	1,95	3,91%	2,04	-0,56%	1,89	7,11%	1,84	9,26%
Ponto 6	1,99	0,00%	1,87	6,09%	2,06	-3,73%	1,89	4,83%	1,56	21,52%
Ponto 7	2,44	0,00%	2,46	-0,97%	2,05	16,00%	1,81	25,78%	2,03	16,87%
Ponto 8	2,03	0,00%	1,94	4,42%	1,94	4,71%	1,67	18,00%	1,51	25,59%
Ponto 9	2,17	0,00%	2,27	-4,55%	2,19	-0,60%	2,10	3,54%	1,91	12,02%
Ponto 10	2,47	0,00%	2,13	14,02%	2,05	17,20%	2,18	11,97%	1,91	22,90%
Ponto 11	3,31	0,00%	3,02	8,66%	2,87	13,29%	2,49	24,66%	3,08	7,00%
Ponto 12	2,94	0,00%	2,74	6,98%	2,68	8,84%	2,47	16,17%	2,20	25,09%
Média (cm/s)	2,10	0,00%	2,08	1,14%	1,94	7,88%	1,82	13,29%	1,76	16,26%
Desvio Padrão (cm/s)	0,72		0,61		0,67		0,59		0,64	
Coef de Variação (%)	34,14		29,34		34,36		32,09		36,13	

Tabela 4.3. Taxas de Infiltração - Trecho 2

	29/07/2016		01/09/2016		20/10/2016		08/12/2016		26/01/2017	
	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda
Ponto 1	2,20	0,00%	2,43	-10,71%	2,29	-4,23%	2,31	-5,08%	1,68	23,72%
Ponto 2	2,39	0,00%	2,44	-1,91%	2,43	-1,53%	2,14	10,43%	2,04	14,66%
Ponto 3	3,18	0,00%	2,99	6,21%	3,19	-0,13%	2,80	11,89%	3,01	5,33%
Ponto 4	1,52	0,00%	1,75	-14,93%	1,91	-25,19%	1,60	-4,77%	1,41	7,43%
Ponto 5	2,39	0,00%	1,92	19,62%	1,59	33,64%	1,26	47,20%	1,31	45,16%
Ponto 6	1,86	0,00%	1,84	1,15%	1,64	11,78%	1,88	-1,26%	1,43	23,34%
Ponto 7	2,28	0,00%	2,05	10,08%	2,21	3,38%	2,25	1,59%	1,90	16,98%
Ponto 8	2,31	0,00%	2,18	5,98%	2,35	-1,57%	1,98	14,46%	1,71	26,12%
Ponto 9	2,64	0,00%	2,93	-10,94%	3,31	-25,23%	2,76	-4,45%	2,40	9,07%
Ponto 10	3,00	0,00%	3,12	-4,17%	2,79	7,00%	2,95	1,39%	2,59	13,44%
Ponto 11	3,03	0,00%	3,00	0,83%	3,20	-5,52%	2,73	9,86%	2,54	15,98%
Média (cm/s)	2,44	0,00%	2,42	0,59%	2,44	-0,29%	2,24	7,99%	2,00	17,85%
Desvio Padrão (cm/s)	0,50		0,51		0,61		0,54		0,56	
Coef de Variação (%)	20,62		21,21		25,02		24,09		28,21	

Tabela 4.4. Taxas de Infiltração - Trecho 3

	29/07/2016		02/09/2016		20/10/2016		09/12/2016		26/01/2017	
	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda	I (cm/s)	% Perda
Ponto 1	1,54	0,00%	1,07	30,42%	1,31	15,08%	1,06	30,91%	1,45	6,02%
Ponto 2	1,76	0,00%	1,23	29,95%	1,26	28,50%	1,15	34,51%	1,20	31,44%
Ponto 3	1,33	0,00%	0,99	25,58%	1,28	4,11%	0,88	34,13%	0,95	28,69%
Ponto 4	1,17	0,00%	1,01	14,07%	1,03	12,05%	0,70	40,05%	0,81	31,21%
Ponto 5	1,63	0,00%	1,31	19,95%	1,56	4,35%	1,27	22,11%	1,34	17,63%
Ponto 6	1,19	0,00%	1,11	6,85%	1,31	-9,49%	0,99	16,71%	1,10	7,78%
Ponto 7	1,72	0,00%	1,39	19,39%	1,51	12,37%	1,41	17,78%	1,36	20,98%
Ponto 8	1,57	0,00%	1,48	5,64%	1,55	0,92%	1,19	24,02%	1,26	19,65%
Ponto 9	1,59	0,00%	1,58	0,50%	1,35	15,01%	1,44	9,08%	1,41	11,24%
Ponto 10	1,94	0,00%	1,52	21,73%	1,48	24,04%	1,29	33,82%	1,17	39,53%
Ponto 11	1,75	0,00%	1,28	27,15%	1,63	6,74%	1,51	13,50%	1,45	17,06%
Ponto 12	1,30	0,00%	1,18	8,84%	1,10	14,97%	0,97	25,59%	0,95	26,92%
Ponto 13	1,67	0,00%	1,68	-0,99%	1,59	4,50%	1,45	12,84%	1,37	17,58%
Ponto 14	1,46	0,00%	1,55	-5,97%	1,46	0,40%	1,18	19,12%	1,34	8,81%
Ponto 15	1,31	0,00%	1,22	6,76%	1,36	-3,68%	1,14	12,66%	1,23	6,31%
Ponto 16	1,83	0,00%	1,78	2,65%	1,76	3,53%	1,63	10,46%	1,29	29,19%
Ponto 17	1,55	0,00%	1,43	7,87%	1,31	15,94%	1,28	17,63%	1,08	30,30%
Ponto 18	1,65	0,00%	1,66	-0,85%	1,54	6,53%	1,45	11,81%	1,22	26,21%
Ponto 19	1,26	0,00%	1,28	-1,10%	1,45	-14,75%	1,27	-0,30%	1,21	4,14%
Ponto 20	1,49	0,00%	1,55	-4,40%	1,43	3,66%	1,25	16,14%	1,19	19,87%
Ponto 21	1,70	0,00%	1,55	8,66%	1,73	-1,90%	1,41	16,96%	1,34	21,32%
Ponto 22	1,61	0,00%	1,75	-8,79%	1,68	-4,76%	1,52	5,49%	1,20	25,49%
Ponto 23	1,26	0,00%	1,29	-2,64%	1,37	-8,78%	1,16	7,68%	0,98	22,43%
Ponto 24	1,45	0,00%	1,86	-28,65%	1,72	-18,92%	1,40	2,92%	1,06	26,54%
Média (cm/s)	1,53	0,00%	1,41	8,08%	1,45	5,33%	1,25	18,21%	1,21	21,14%
Desvio Padrão (cm/s)	0,21		0,25		0,19		0,22		0,17	
Coef de Variação (%)	13,74		17,67		13,22		17,84		14,11	

Na Figura 50 estão representadas graficamente as médias dos trechos 1, 2 e 3.

Figura 50 - Médias das taxas de infiltração - Trechos 1, 2 e 3 - calçada definitiva

Nota-se que, diferentemente da representação gráfica das médias da calçada preliminar, os três trechos apresentam um comportamento mais linear e sem apresentar a queda drástica na média como apresentado na primeira calçada. Por se tratar de um local mais distante de árvores, além de não ser em área gramada, a queda nos resultados não aconteceu na calçada definitiva. Por outro lado, a estabilização apontada na calçada preliminar tende a ocorrer também na calçada definitiva, pois, apesar de estar num local com as características citadas, também está sujeita à colmatção, mesmo que em taxas reduzidas quando comparadas à calçada preliminar.

Percebe-se também, analisando os pontos correspondentes ao trecho 2, que esse trecho apresenta um comportamento mais irregular de suas médias, que pode ser decorrente do trecho 2 ter os seus últimos metros concretados com os finais das misturas dos caminhões betoneira. Mesmo com o retardador de pega, as misturas apresentaram-se mais secas nos finais do caminhão betoneira, e após sua aplicação, apresentou trechos com alto grau de desagregação, como mostrado no mapa da Figura 51 que ilustra justamente as áreas mais afetadas. Lembrando que o caminhão betoneira que lançou o concreto na área abaixo, estava com a mistura por um período de pouco mais de 2 horas.

Figura 51 - Mapa da área afetada pela desagregação

Essa desagregação afeta a calçada em diversos aspectos, inclusive na sua taxa de infiltração. Além disso, a realização do ensaio em si se torna mais difícil, tendo em vista que a superfície se torna extremamente irregular, como apresentado na Figura 52, dificultando a fixação do anel de infiltração.

Figura 52 - Detalhe - superfície da área com desagregação

Quando comparada a média da taxa de infiltração da área que não apresenta desagregação com a que apresenta, se tem um aumento médio de 18% nas taxas que possuem esse problema. O gráfico exposto na Figura 53 mostra a média geral da calçada 2, a média até o ponto 6 (pontos que não apresentaram desagregação), e a média a partir do ponto 7 (pontos que apresentaram desagregação).

Figura 53 - Médias - trecho 2 - área com desagregação

Nota-se, a partir dos resultados representados graficamente na Figura 53, que, além de apresentar taxas de infiltração superiores às apresentadas nos pontos de 1 a 6, os ensaios realizados nos pontos de 7 a 11 apresentam resultados mais irregulares.

Com a finalidade de verificar se o problema da desagregação interfere de fato no comportamento hidráulico do trecho 2, testes de hipóteses do tipo t-Student foram realizados. O teste baseia-se em uma hipótese nula e uma alternativa e após algumas análises estatísticas alguma das hipóteses é aceita. Esclarecimentos sobre o teste de hipóteses utilizado podem ser encontrados, por exemplo, em Bolfarine e Sandoval (2010). Para a realização dos testes, foi fixado um valor de significância de 5% e a hipótese nula é de que não existe diferença entre as médias comparadas, e a alternativa de que existe diferença. Em outras palavras, a hipótese nula é de que os pontos apresentam o mesmo comportamento hidráulico no que se diz respeito à taxa de infiltração, e a alternativa que apresentam comportamentos diferentes. Além disso, os testes foram realizados considerando variâncias equivalentes, visto que o teste F para variância de duas amostras mostrou que elas podem ser assim consideradas. A Tabela 4.5 apresenta o resumo dos testes de hipóteses realizados para os cinco diferentes ensaios.

Tabela 4.5 - Resumo dos Testes de Hipóteses - Trecho 2

	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5	
Pontos	7 a 11	1 a 6	7 a 11	1 a 6	7 a 11	1 a 6	7 a 11	1 a 6	7 a 11	1 a 6
Média	2,65	2,26	2,66	2,23	2,77	2,17	2,53	2,00	2,23	1,81
Variância	0,127182	0,318326	0,25	0,23	0,24	0,36	0,16	0,30	0,16	0,41
n	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6
Stat t	1,35		1,45		1,77		1,81		1,25	
t crítico	2,26		2,31		2,26		2,26		2,31	

n = tamanho da amostra; Stat t = t de Student calculado; t crítico = t crítico do limite inferior e superior.

Realizados os testes de hipóteses, fica explícito que, apesar de a desagregação parecer alterar as médias das taxas de infiltração, os intervalos de pontos apresentam comportamento hidráulico iguais considerando a significância adotada, já que o valor encontrando de Stat t está sempre entre os valores positivo e negativo de t crítico. Ou seja, deve-se considerar a hipótese nula de que as médias são iguais.

Focando nas médias dos 3 trechos, no terceiro a redução apresentada é maior quando comparado às reduções dos demais trechos. Esse comportamento ocorre, provavelmente, devido ao tamanho do agregado utilizado, que, apesar de não terem sido fornecidas pelo parceiro maiores informações da dosagem da mistura, é visivelmente menor que o agregado utilizado na mistura desenvolvida pelo LMP-EPUSP, mostrando, assim, uma superfície mais fechada e lisa, como mostrado nas Figura 54 e 55.

Figura 54 - Detalhe da superfície - trechos 1 e 2

(Fonte: acervo pessoal)

Figura 55 - Detalhe da superfície - trecho 3

(Fonte: acervo pessoal)

Postas as constatações citadas, não se pode desconsiderar os pontos 7 a 11 do segundo trecho da calçada, pois os testes de hipóteses mostram que as médias são equivalentes.

Em suma, percebe-se valores médios do trecho 2 próximos do trecho 1, sendo ligeiramente maiores, possivelmente devido a alguns fatores, tais como uma maior espessura da camada de revestimento e, devido a inclinação necessária para a drenagem, também da camada de base em alguns pontos, que chegou a ser 25 cm, aproximadamente. Assim, com maiores espessuras de base e revestimento, com materiais aplicados idênticos, o pavimento do trecho 2 é capaz de armazenar maior volume de água em seus vazios. Mesmo com a conclusão de que o trecho 2 tem maior capacidade de armazenamento, novos testes de hipóteses do tipo t-Student foram realizados para se atestar se os comportamentos hidráulicos dos trechos são equivalentes ou não. Os testes foram realizados considerando variâncias equivalentes, uma vez que o teste F para variância de duas amostras indicou que elas podem ser assim consideradas. A Tabela 4.6 apresenta os dados obtidos com os 5 testes realizados, sendo um para cada ensaio de infiltração executado.

Tabela 4.6. Resumo dos Testes de Hipóteses - Trecho 1 e Trecho 2

	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5	
Trecho	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
Média	2,44	2,1	2,42	2,08	2,44	1,94	2,24	1,82	2,00	1,76
Variância	0,25	0,52	0,26	0,37	0,37	0,44	0,29	0,34	0,32	0,41
n	11	12	11	12	11	12	11	12	11	12
Stat t	1,28		1,45		1,89		1,78		0,95	
t crítico	2,09		2,08		2,08		2,08		2,08	

n = tamanho da amostra; Stat t = t de Student calculado; t crítico = t crítico do limite inferior e superior.

Mesmo com o trecho 2 apresentando médias de taxa de infiltração maiores em todos os ensaios executados, os testes realizados apontam que ambos os trechos analisados possuem comportamento hidráulico semelhantes postas as condições dos testes, de significância de 5%, e considerando as variâncias equivalentes, já que os valores encontrados de Stat t estão sempre entre os valores positivo e negativo de t crítico. Ou seja, deve-se considerar a hipótese nula de que as médias são iguais.

Com o objetivo de comparar as taxas de infiltração entre as bordas e o centro da calçada, análises da Figura 56, 57 e 58 foram realizadas.

Figura 56 - Taxas de infiltração - Trecho 1 - Bordas e centro

Figura 57 - Taxas de infiltração - Trecho 2 - Bordas e centro

Figura 58 - Taxas de infiltração - Trecho 3 - Bordas e centro

Por ter suas extremidades limitadas por guias de concreto pré-moldado, imaginou-se que os resultados das taxas de infiltração nas bordas da calçada sofreriam alguma interferência, pois

as guias poderiam limitar o escoamento lateral da água infiltrada. Porém, os dados apresentados nos gráficos acima mostram que não existe nenhuma relação direta da posição do ponto ensaiado com a taxa de infiltração. No primeiro trecho as bordas apresentam taxas de infiltração ligeiramente menores quando comparadas as encontradas no centro. No segundo trecho essa relação se inverte e a diferença das taxas médias é maior. Enquanto no terceiro, não é possível concluir nada a partir do gráfico apresentado.

A exemplo das comparações realizadas entre os pontos do trecho 2 com e sem desagregação, entre as médias de taxas de infiltração entre os trechos 1 e 2, os testes de hipóteses do tipo t-Student entre bordas e centro e todos os trechos foram realizados e tem seus dados resumidos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Resumo dos Testes de Hipóteses - Centro e Bordas

	TRECHO 1									
	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5	
Pontos	Centro	Borda	Centro	Borda	Centro	Borda	Centro	Borda	Borda	Centro
Média	2,14	2,07	2,09	2,07	1,97	1,90	1,92	1,73	1,82	1,71
Variância	0,24	0,89	0,19	0,63	0,22	0,76	0,17	0,56	0,78	0,10
n	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Stat t	0,17		0,04		0,17		0,52		0,29	
t crítico	2,31		2,31		2,31		2,31		2,45	
	TRECHO 2									
	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5	
Pontos	Borda	Centro	Borda	Centro	Borda	Centro	Borda	Centro	Borda	Centro
Média	2,62	2,22	2,56	2,26	2,63	2,22	2,35	2,11	2,14	1,84
Variância	0,165338	0,313489	0,24	0,30	0,50	0,20	0,34	0,26	0,39	0,24
n	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5
Stat t	1,39		0,93		1,11		0,72		0,88	
t crítico	2,36		2,31		2,26		2,26		2,26	
	TRECHO 3									
	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5	
Pontos	Borda	Centro	Centro	Borda	Centro	Borda	Borda	Centro	Borda	Centro
Média	1,54	1,51	1,50	1,33	1,46	1,44	1,27	1,23	1,26	1,14
Variância	0,035577	0,058439	0,08	0,04	0,06	0,02	0,03	0,07	0,03	0,02
n	13	11	11	13	11	13	13	11	13	11
Stat t	0,34		1,69		0,28		0,33		1,72	
t crítico	2,09		2,11		2,11		2,11		2,07	

n = tamanho da amostra; Stat t = t de Student calculado; t crítico = t crítico do limite inferior e superior.

A análise dos resultados dos testes de hipóteses da diferença entre as médias dos centros e bordas de cada trecho deixa claro que os comportamentos hidráulicos dos pontos ensaiados são iguais postas as condições do teste de significância de 5%, tendo em vista que os valores

encontrados de Stat t estão sempre entre os valores positivo e negativo de t crítico, o que significa que a hipótese nula de que as médias são iguais deve ser a hipótese considerada. Outro critério adotado para a realização dos testes é que as variâncias são equivalentes em todos os ensaios, exceto no quinto ensaio do primeiro trecho, onde as variâncias foram consideradas diferente, uma vez que o teste F para variância de duas amostras indicou que deveriam ser consideradas desta forma. Mais uma vez, as variações nos resultados obtidos podem ser devidas ao fato de que o ensaio adotado é muito suscetível a pequenos erros, que podem ocasionar resultados ligeiramente divergentes da realidade (BOLFARINE e SANDOVAL, 2010).

4.1.3. Análise e Comparação dos Resultados

Para se ter um comparativo do potencial hidráulico dos diferentes trechos da calçada definitiva com outras misturas de concreto permeável, inclusive com os da calçada preliminar, a Tabela 4.8 mostra alguns resultados de diferentes referências. Ressalva-se que todos os valores são referentes à taxa de infiltração, ou seja, foram obtidos através da realização do ensaio regido pela norma ASTM C-1701. Todos os resultados são das primeiras idades dos pavimentos e, no caso do segundo trecho da calçada definitiva, foram considerados apenas os pontos de 1 a 6.

Tabela 4.8. Comparativo de infiltração - Calçadas x Referências

MISTURA	Taxa de Infiltração (cm/s)
LMP USP - Calçada preliminar	0,56
LMP USP - Calçada definitiva - Trecho 1	2,1
LMP USP - Calçada definitiva - Trecho 2	2,26
Calçada definitiva - Trecho 3	1,53
Curvo <i>et al.</i> (2016) - Mistura 1	1,66
Curvo <i>et al.</i> (2016) - Mistura 2	0,64
Haselbach <i>et al.</i> (2015) - Mistura 1	0,51
Haselbach <i>et al.</i> (2015) - Mistura 2	0,44
Haselbach <i>et al.</i> (2015) - Mistura 3	0,51
Kayhanian <i>et al.</i> (2013)	0,29
Lamb <i>et al.</i> (2013)	0,93

Fica, então, evidente que ambas as misturas desenvolvidas pelo LMP-EPUSP apresentam grande potencial drenante, tendo em vista que a calçada definitiva, independente do trecho, apresenta as maiores taxas de infiltração da tabela. Evidentemente esse alto potencial

hidráulico pode significar baixo potencial mecânico do pavimento, tendo em vista que normalmente esses fatores são inversamente proporcionais.

Já a Tabela 4.9 mostra, além das taxas de infiltração média das calçadas desenvolvidas pelo LMP-EPUSP, resultados de outros tipos de pavimento, como, por exemplo, CPA ou pavimentos com blocos pré-moldados de concreto.

Tabela 4.9. Taxas de infiltração - Concreto permeável x Outros pavimentos permeáveis

Mistura - Autor(es)	Tipo de Revestimento	I (cm/s)
LMP EPUSP - Calçada Preliminar	Concreto permeável	0,56000
LMP EPUSP - Calçada Definitiva - Trecho 1	Concreto permeável	2,10000
LMP EPUSP - Calçada Definitiva - Trecho 2	Concreto permeável	2,26000
Calçada Definitiva - Trecho 3	Concreto permeável	1,53000
Ono <i>et al.</i> (2016)	Blocos Intertravados de CCP - Unidirecionalmente articulados	0,48971
Martins (2014)	Blocos Intertravados de CCP - Juntas Alargadas - Espinha de peixe	0,00088
Martins (2014)	Blocos Intertravados de CCP - Juntas Alargadas - Trama	0,00072
Pellizzari (2013)	Camada Porosa de Atrito	0,00525
Kayhanian <i>et al.</i> (2013) - Mistura A	Camada Porosa de Atrito	0,20000
Kayhanian <i>et al.</i> (2013) - Mistura B	Camada Porosa de Atrito	0,15000
Kayhanian <i>et al.</i> (2013) - Mistura C	Camada Porosa de Atrito	0,11000

Nota-se que, ao se tratar de potencial drenante, as misturas de concreto permeável desenvolvidas pelo LMP-EPUSP e desenvolvida pelo parceiro e aplicada no terceiro trecho da calçada definitiva apresentam-se muito superiores aos demais materiais. O pavimento com blocos unidirecionalmente articulados apresenta alta eficácia, com ótimo resultado drenante, equiparando-se com o resultado encontrado na calçada preliminar. Os resultados apresentados na tabela são sempre nas primeiras idades do concreto, ou pavimento, com exceção da camada porosa de atrito estudada por Pellizzari (2013), onde o ensaio foi realizado em um pavimento existente, porém com manutenção. Nas outras misturas de camada porosa de atrito, todas estudadas por Kayhanian *et al.* (2013), os resultados foram obtidos antes da simulação de tráfego pesado e são resultados satisfatórios do ponto de vista hidráulico, porém abaixo dos valores encontrados nas misturas de concreto permeável.

5. CONCLUSÕES

O comportamento hidráulico de pavimentos com revestimento em concreto permeável desenvolvido pelo LMP-USP foi avaliado a partir de duas calçadas construídas no Campus da Capital da Universidade de São Paulo. Após a análise dos resultados, além de toda a análise crítica de todo o método construtivo, o presente estudo ensejou as seguintes conclusões:

- A escolha do local é de fundamental importância para se ter um pavimento funcional por mais tempo, com menor exigência de tempo para manutenção, tendo em vista que em quatro meses a perda da taxa de infiltração na calçada preliminar, cuja localização é próxima de árvores e com inclinação considerável, foi de 52%. Os trechos 1, 2 e 3 da calçada definitiva, cuja localização foi escolhida de modo que se tornasse possível avaliar o comportamento hidráulico em local menos suscetível à colmatagem proveniente de árvores, apresentaram, até 6 meses após suas construções, reduções próximas de 20%;
- A manutenção e limpeza do pavimento é de fundamental importância, tendo em vista que em locais com muitas árvores sua perda de infiltração é significativa. Mesmo em locais propícios para a aplicação desse tipo de pavimento, a manutenção se faz necessária tendo em vista que, a longo prazo, o pavimento tende a perder sua função drenante;
- A correta dosagem da mistura, principalmente com adição de superplastificante, é essencial, tendo em vista que qualquer quantidade diferente da dosagem pode acarretar em uma mistura com diferentes propriedades e, até mesmo, com segregação e colmatagem no fundo da camada;
- Mesmo com a adição do retardador de pega, o tempo de trabalhabilidade do concreto permeável pode vir a ser um problema. Por se tratar de um material diferente do concreto convencional, desde a sua dosagem ao tratamento, o tempo pode não ser suficiente para a aplicação de toda a mistura em boas condições. Os caminhões betoneira continham 4 m³ cada um, e o tempo limite para a aplicação do concreto sem que haja qualquer patologia consequente da perda de água da mistura para o ambiente é em torno de 2 horas e 2 horas e 15 minutos;

- A desagregação do concreto, consequência da aplicação de uma mistura com pouca água, além de provocar um desconforto ao usuário, diminui a segurança do pavimento e aumenta a taxa de infiltração em pequenos percentuais quando comparado ao mesmo concreto aplicado em um revestimento de uma mesma estrutura de pavimento. Apesar disso, os testes de hipóteses realizados apontam que os comportamentos hidráulicos são iguais;
- A estrutura do trecho 2, com maior espessura de revestimento e caixa coletora, sem contar com infiltração de água no solo, apresenta taxas de infiltração ligeiramente maiores quando comparado às taxas no trecho 1. Esse aumento não significa necessariamente um comportamento hidráulico diferente, como apontado pelos testes de hipóteses realizados;
- Não existem diferenças no comportamento hidráulico ao se comparar exclusivamente as taxas de infiltração das bordas com as do centro do pavimento, como apontado pelos testes de hipóteses realizados;
- Menores diâmetros dos agregados podem acarretar na densificação da mistura e redução da taxa de infiltração, como o caso do trecho 3 quando comparado aos demais trechos da calçada definitiva. Por outro lado, o aspecto visual da superfície do pavimento é melhor e, também, o conforto do usuário;
- O concreto permeável, quando comparado aos demais tipos de revestimentos permeáveis referenciados nesta pesquisa, apresenta maior potencial drenante;
- O ensaio para obtenção da taxa de infiltração regido pela ASTM C-1701 apresenta uma significativa variabilidade nos resultados. Isso se dá pelo fato de que é um ensaio muito suscetível aos erros, tanto do operador do cronômetro, quanto de quem está despejando a água no anel de infiltração. Até mesmo a fixação do anel de infiltração na superfície do pavimento é algo que pode influenciar a variabilidade e confiabilidade do ensaio;
- A passagem do rolo compactador no sentido longitudinal do pavimento garante uma regularidade na espessura, enquanto no sentido transversal esse controle é perdido,

podendo ocasionar problemas de acabamento superficial e, conseqüentemente, desconforto ao usuário.

Sendo assim, a utilização de um revestimento em concreto permeável mostrou-se de enorme potencial do ponto de vista drenante. A redução da área impermeável de uma cidade pode trazer grandes benefícios, evitando problemas a jusante proveniente do escoamento rápido da água precipitada. Evidentemente que se tem o desafio de aplicar esse tipo de revestimento em vias de tráfego, tendo em vista que é um tipo de concreto que normalmente tem menores resistências mecânicas, já que a ligação entre os agregados se dá por uma pequena camada de pasta de cimento. Logo, diversos estudos apontam para o desenvolvimento de uma mistura que resista ao tráfego, seja leve ou pesado. Porém, sua utilização não deve se limitar apenas a vias de tráfego leve e pesado. Por isso, mesmo que uma mistura não atinja valores suficientes de seus parâmetros mecânicos ela pode ser aplicada em calçadas, estacionamentos, ciclovias, entre outros locais potenciais que não demandem altas resistências mecânicas. Outro grande desafio da utilização dessa tecnologia é a manutenção que esse revestimento exige para que não se perca sua capacidade de infiltração. A colmatção faz com que uma mistura em concreto permeável perca essa capacidade drenante, e uma manutenção eficaz e periódica se torna necessária. De qualquer forma, o concreto permeável é uma tecnologia relativamente recente, que vem sendo estudada cada vez mais, mostrando seu enorme potencial técnico.

5.1.Recomendações para trabalhos futuros

Para possíveis trabalhos futuros que podem ser realizados com as calçadas construídas no Campus Armando Salles de Oliveira da USP, os seguintes tópicos são sugeridos:

- Continuação da realização de ensaios de taxa de infiltração para observar o comportamento hidráulico a longo prazo, possibilitando concluir em quanto tempo uma manutenção se faz necessária;
- Extração de corpos de prova para medição da permeabilidade pelo método NCAT, comparando com os resultados encontrados de taxa de infiltração obtidos através do ensaio regido pela ASTM C-1701. Além disso, a extração possibilitaria a realização de

ensaios mecânicos que podem ser comparados com resultados obtidos em laboratório;

- Estudar a qualidade da água coletada no trecho 2 da calçada definitiva, tendo em vista que o concreto permeável possui uma capacidade filtrante; e
- Verificar quais espécies de árvores estão nas proximidades das calçadas e estudar como se dá a colmatação causada pelos materiais destas espécies.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM C1701/C1701M - 09 - Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete**. West Conshohocken, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16416 - Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2015.

BAGCHI, A. **Design of landfills and integrated waste management**. John Wiley and Sons, Nova Iorque, 2004.

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. Oficina de Textos, São Paulo, 2009.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2013.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, 2007.

BOLFARINE, H; SANDOVAL, M. C. **Introdução à inferência estatística**. SBM, São Paulo, 2010.

BONICELLI, A.; GIUSTOZZI, F.; CRISPINO, M. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 102-110, 2015.

CERVO, T.C. **Estudo de resistência à fadiga de concretos de cimentos portland para pavimentação**. (Tese) Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2004.

CHEN, Y. Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 97-104, 2013.

CHINDAPRASIRT, P.; ZAETANG, Y.; SATA, V.; WONGSA, A. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycle concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v.111, p. 15-21, 2016.

CONCRETE ANSWERS. **Concrete Answers Series Hub for Architects, Engineers and Developers**. Disponível em <http://www.concreteanswers.org>. Acesso em 15/03/2016.

CURVO, F.; BATEZINI, R.; BALBO, J. T. Estudo sobre o comportamento hidráulico de concretos permeáveis em laboratório e campo. **Anais do 30º Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET**, Rio de Janeiro, 2016.

DRAKE, J.; BRADFORD, A. Assessing the potential for restoration of surface permeability for permeable pavements through maintenance. **Water Science & Technology**, v. 68.9, p. 1950-1958, 2013.

FRANCO, J. E. J. Controle Tecnológico na rodovia dos imigrantes. **Primeiro Seminário DERSA Rodovia dos Imigrantes**, p. 114-123, São Paulo, 1976.

FWA, T.F.; LIM, E.; TAN, K.H. Comparison of permeability and clogging characteristics of porous asphalt and pervious concrete pavement materials. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2511, p. 72-80, 2015.

HASELBACH, L. Nondestructive method for estimating porosity of in-situ pervious concrete. **Journal of Testing and Evaluation**. Submetido em 2016.

HASELBACH, L.; DUTRA, V.; SCHWETZ, P.; SILVA FILHO, L.C.P. A pervious concrete mix design based on clogging performance in Rio Grande do Sul. **Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON**, Bonito, 2015.

HASELBACH, L.; BOYER, M.; KEVERN, J.T., SCHAEFER, V.R. Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2240, p. 107-115, 2011.

HASELBACH, L. Potential for clay clogging of pervious concrete under extreme conditions. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 15, p. 67-69, 2010.

HENDERSON, V.; TIGHE, S.; NORRIS, J. Pervious concrete pavement: Integrated laboratory and field study. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2113, p. 13-21, 2009.

HUANG, B.; WU, H.; SHU, X.; BURDETTE, E.G. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 818-823, 2010.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V.C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 524-529, 2014.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. V.1, IBRACON. São Paulo, 2011.

JOSA, A.; PINDADO, M.A.; AGUADO, A. Fatigue behavior of polymer-modified porous concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1077-1083, 1999.

JOUNG, Y.; GRASLEY, C.Z. Evaluation and optimization of durable pervious concrete for use in urban areas. **Technical Report - Texas Transportation Institute**, 2008.

KEVERN, J.T.; SCHAEFER, V.; WANG, K. Temperature behavior of pervious concrete systems. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2098, p. 94-101, 2009.

KAYHANIAN, M.; LI, H.; HARVEY, J. T. Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. **Journal of Environmental Management**, v. 118, p. 144-152, 2013.

KAYHANIAN, M.; COLERI, E.; HARVEY, J. T.; YANG, K.; BOONE, J. M. Clogging evaluation of open graded friction course pavements tested under rainfall and heavy vehicle simulators. **Journal of Environmental Management**, v. 129, p. 164-172, 2013.

LAMB, G.S.; OLIVEIRA, I.A.; PERERA, G.; PASSUELO, A.; LORENZI, A.; SILVA FILHO, L.C.P. Estudo do comportamento de elementos de drenagem confeccionados em concretos permeáveis. **Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON**, Gramado, 2013.

MARTINS, R. M. **Análise da capacidade de infiltração do pavimento intertravado de concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

MCCAIN, G.N.; DEWOOLKAR, M. Porous concrete pavements: mechanical and hydraulic properties. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2164, p. 65-75, 2010.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - Microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª ed., IBRACON. São Paulo, 2014.

MENEZES FILHO, F.C.M. Estimativa das áreas impermeáveis de bairros de Porto Alegre-RS como etapa ao planejamento urbano. **Ciência & Natura**, v. 35, p. 33-42, 2013.

MONTES, F.; HASELBACH, L. Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete. **Environmental Engineering Science**, v. 23, p. 960-969, 2006.

NEITHALATH, N.; DEO, O.; SUMANASOORIYA, M. Permeability reduction in pervious concretes due to clogging: experiments and modeling. **Journal of materials in civil engineering**, v. 22, n. 7, 2010.

ONO, B. W.; BALBO, J. T.; CARGNIN, A. P. Análise da capacidade de infiltração em pavimento permeável de bloco de concreto unidirecionalmente articulado. **Anais do 30º Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET**, Rio de Janeiro, 2016.

PARK, S. B.; SEO, D. S.; LEE, J. Studies on the sound absorption characteristics of porous concrete based on the content of recycled aggregate and target void ratio. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1846-1854, 2005.

PELLIZZARI, V. **Avaliação da eficácia da restauração da capacidade de infiltração da camada superior de pavimentos porosos**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Orientador: Joel Avruch Goldenfum. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

RIDD, M.K. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model of urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, p.2165-2185, 1995.

RIZVI, R.; TIGHE, S.; HENDERSON, V.; NORRIS, J. Evaluating the use of recycled concrete aggregate in pervious concrete pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2164, p. 132-140, 2010.

SCHAEFER, V.R.; WANG, K.; SULEIMAN, M.; KEVERN, J. Mix design development for pervious concrete in cold weather climates. **Final report, Civil Engineering, Iowa State University**, 2006.

SCHAEFER, V.R.; KEVERN, J.; IZEBEKHAI, B.; WANG, K.; CUTLER, H.; WIEGAND, P. Construction and performance of pervious concrete overlay at Minnesota road research project. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2164, p. 82-88, 2010.

SHU, X.; HUANG, B.; WU, H.; DONG, Q.; BURDETTE, E.G. Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3187-3192, 2011.

SILVA, J.L.V. **Colmatação biológica de geotêxteis**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

SUOZZO, M.J.; DEWOOLKAR, M.M. Long-term field monitoring and evaluation of maintenance practices for pervious concrete pavement in Vermont. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2292, p. 94-103, 2012.

SUZUKI, C.Y.; AZEVEDO, A.M.; KABBACH, F.I. **Drenagem subsuperficial de pavimentos: conceitos e dimensionamento**. Oficina de Textos, São Paulo, 2013.

TENNIS, P.D.; LEMMING, M.L.; AKERS, D.J. **Pervious concrete pavements**, EB302, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 36p., 2004.

TUCCI, C.E.M. Drenagem Urbana. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. 4, p. 36-37, 2003.

TUCCI, C.E.M. Parâmetros do hidrograma unitário para bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 195-199, 2003.

VANCURA, M.; MACDONALD, K.; KHAZANOVIC, L. Structural analysis of pervious concrete pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2226, p. 13-20, 2011.

WILLE, K.; ZHONG, RUI. Material design and characterization of high performance pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 51-60, 2015.

ANEXO A

O presente anexo tem como objetivo explicar resumidamente como realizar o ensaio para obtenção da taxa de infiltração *in loco* de um pavimento permeável seguindo a ASTM C-1701. Para a realização do ensaio, um anel de infiltração, seguindo o modelo da Figura A.1, com 300 mm de diâmetro e 50 mm de altura é necessário. Além disso, deve existir no interior do anel marcações em 10 mm e 15 mm de altura. O anel deve ser totalmente aberto no topo e no fundo e com material rígido o suficiente manter sua forma quando em contato com água.

Figura A.1 - Dimensões - Anel de infiltração

Além do anel, para a realização do ensaio outros materiais são necessários, como um cronômetro, uma balança, um recipiente de 20 L, algum material para vedação entre o fundo do anel e a superfície do pavimento, e a água.

Recomenda-se que o ensaio não seja realizado em menos de 24 horas após uma chuva, e que se mantenha uma distância de 1 m entre os pontos de realização dos ensaios.

Para a realização do ensaio, a limpeza do pavimento se faz necessária e, após isso, fixa-se o anel de infiltração com auxílio de algum material, como a massa de calafetar. Após a fixação do anel, inicia-se a etapa chamada de “pré-molhagem”, onde 3,6 L de água são pesados na balança e despejados no interior do anel, e o nível d’água deve manter-se entre as marcações de 10 mm e 15 mm. O tempo até que toda a água infiltre no pavimento é anotado e se esse tempo for maior que 30 s, o procedimento é repetido e o tempo anotado após a infiltração dos 3,6 L de água é anotado e inserido na Equação . Caso esse tempo seja menor que 30 s, o procedimento é realizado com 18 L de água, e o tempo para a infiltração total é anotado e inserido na Equação . Após isso, tem-se a taxa de infiltração em mm/h. Se o ensaio seguinte for no mesmo local ou 1 m próximo, deve-se esperar 5 min para a sua realização.

$$I = \frac{KM}{D^2 t} \quad (1)$$

onde:

I = Taxa de infiltração (mm/h);

K = Constante (4583666000);

M = Massa de água infiltrada (kg);

D = Diâmetro interno do anel (mm);

t = Tempo de infiltração de toda a massa de água (s).