



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

RODRIGO GAROZI DA SILVA

ESTUDO DE CONCRETO PERMEÁVEL COMO PAVIMENTO

Ilha Solteira
2019

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RODRIGO GAROZI DA SILVA

ESTUDO DE CONCRETO PERMEÁVEL COMO PAVIMENTO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área do conhecimento: Estruturas

Nome do orientador

Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586e Silva, Rodrigo Garozi da.
Estudo de concreto permeável como pavimento / Rodrigo Garozi da Silva. --
Ilha Solteira: [s.n.], 2019
136 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2019

Orientador: Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque
Inclui bibliografia

1. Concreto permeável. 2. Taxa de infiltração. 3. Colmatação. 4. Análises
mecânicas. 5. Manutenção.


Raiane da Silva Santos



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

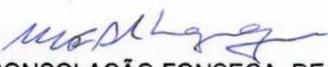
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO DE CONCRETO PERMEÁVEL COMO PAVIMENTO

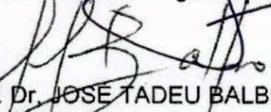
AUTOR: RODRIGO GAROZI DA SILVA

ORIENTADORA: MARIA DA CONSOLAÇÃO FONSECA DE ALBUQUERQUE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL,
área: Estruturas pela Comissão Examinadora:


Prof. Dra. MARIA DA CONSOLAÇÃO FONSECA DE ALBUQUERQUE
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JOSÉ TADEU BALBO
Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes / Universidade de São Paulo

Ilha Solteira, 14 de junho de 2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a
minha família que
sempre me apoiou em
todo meu caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelas oportunidades, sem as quais não seria possível a caminhada em busca de alcançar os meus sonhos e colaborar também no crescimento e incentivo pessoal e profissional de outras pessoas.

Agradeço à UNESP e aos professores, parceiros e colaboradores de todos os setores da universidade que sempre se empenharam para ajudar e colaborar para o sucesso da pesquisa.

Agradeço em especial a minha Orientadora Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque pelo auxílio e direcionamento do trabalho.

Agradeço ao professor Wendel Cleber Soares pelo apoio e incentivo ao meu ingresso no mestrado.

Agradeço a todos os amigos e colegas que fizeram parte de toda a construção do trabalho, por suas contribuições profissionais e pessoais e em especial aos queridos amigos Marcelo Bortoletto e Felipe de Almeida Spósito que jamais mediram esforços para colaborar e incentivar a realização deste trabalho.

Agradeço às empresas parceiras Votorantim Cimentos, GCP *Applied Technologies*, concreteira Brambilla e Mineração Grandes Lagos pelo apoio em serviços e materiais, sem os quais não seria possível realizar a pesquisa e a Capes pela bolsa de auxílio durante o mestrado.

Por fim, agradeço a toda minha família, a Ana Laura e, em especial a meus pais Joel e Claudinéia e meu irmão Jean, por todo o apoio que sempre me deram em todas as minhas escolhas.

Meu muito obrigado de coração a todos!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva por toda a humanidade.”

(Marie Curie)

RESUMO

Inúmeros problemas sociais e ambientais são causados pela impermeabilização dos solos em decorrência da urbanização descontrolada e sem planejamento. O pavimento em concreto permeável aparece como uma forma de mitigação de enchentes, devido à sua característica de permitir a infiltração total ou parcial de água proveniente de precipitações. O objetivo deste trabalho foi estudar um traço eficiente e empregá-lo de maneira efetiva em uma calçada, para promover a captação total de eventos pluviométricos ocorridos no local e observar, com o decorrer do tempo, a eficiência de manutenção periódica na superfície do pavimento permeável quanto à colmatação. Foram experimentadas três proporções de misturas: 1:3,5; 1:5 e 1:6,5, sendo que em nenhuma foi utilizado agregado miúdo. Também foi observado o comportamento das misturas com duas granulometrias de agregados graúdos de 9,5/25,0 e 4,75/12,5. Ensaio destrutivos e não destrutivos foram realizados, entre eles: resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, tração na flexão e taxa de infiltração. A mistura mais eficiente e escolhida para a construção da calçada foi a de teor 1:5, com a utilização do agregado de faixa granulométrica 4,75/12,5. Testes estatísticos “*t* Student” foram utilizados para comparar os resultados obtidos na presente pesquisa com trabalhos semelhantes. A calçada foi dimensionada para ter eficiência de caráter pluviométrico, de acordo com incidência pluviométrica regional e mecânico através de análises no programa computacional EverFE, seguido de cálculo à fadiga. A taxa de infiltração na calçada foi acompanhada semanalmente com o passar do tempo, durante 4 meses, a fim de observar a eficiência da manutenção com uso de soprador. Em metade da calçada, foi realizada manutenção mensal e na outra, manutenção semanal. Uma análise de variância (ANOVA) foi realizada e não foram observadas diferenças significativas nas taxas de infiltração. O uso de soprador se mostrou eficiente tanto para a manutenção mensal quanto para a manutenção semanal.

Palavras-chave: Concreto permeável. Taxa de infiltração. Colmatação. Análises mecânicas. Manutenção.

ABSTRACT

Uncounted social and environmental problems are caused by the waterproofing of soils as a result of uncontrolled and unplanned urbanization. The pervious concrete pavement appears as a form of flood mitigation due to its characteristic of allowing total or partial infiltration of water from rainfall. The aim of this work was to study an efficient mixture and to use it effectively on a sidewalk, to promote the total retention of rainfall events occurring locally and to observe the efficiency of periodic maintenance on the pervious pavement surface, regarding clogging over time. Three proportions of mixtures were tested: 1:3.5; 1:5 and 1:6.5, in which none fine aggregates was used. Furthermore, the behavior in the mixtures of two coarse aggregates gradations of 9.5/25.0 and 4.75/12.5 was observed. Destructive and non-destructive tests were performed, such as: compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength and infiltration rate. The most efficient and chosen mixture for the construction of the sidewalk was 1:5, with the use of the aggregate size 4.75/12.5. "Student's t" statistical tests were used to compare the results obtained in the present research with similar works. The sidewalk was dimensioned to have rainfall efficiency, according to regional rainfall incidence, and mechanical efficiency, through analysis in the EverFE computational program, followed by calculation of fatigue life. The permeability rate of the pavement was monitored weekly over time, during 4 months, in order to observe the efficiency of the maintenance with the use of blower. Monthly maintenance was performed in a half of the pavement while in the another half, weekly maintenance was performed. An analysis of variance (ANOVA) was performed and no significant differences in the permeability rates were observed. The use of a blower appeared to be efficient for both monthly maintenance and weekly maintenance.

Keywords: Pervious concrete. Infiltration rate. Clogging. Mechanical analysis. Maintenance.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Seção transversal esquemática de um sistema típico de drenagem urbana sustentável incorporando uma camada de concreto permeável.....	28
FIGURA 2 - Canal de afastamento em pavimento permeável com manta de impermeabilização	30
FIGURA 3 - Concreto permeável: (a) na posição original de moldagem e (b) girado	35
FIGURA 4 - Amostras de concreto permeável com diferentes teores de água: (a) pouca água, (b) quantidade adequada de água e (c) muita água	36
FIGURA 5 - Relação entre resistência à compressão e índice de vazios	37
FIGURA 6 - Relação entre a resistência à tração e o Índice de vazios	38
FIGURA 7 - Módulo de elasticidade dinâmico em função do índice de vazios	39
FIGURA 8 - Relação de resistência à flexão pela de compressão em concretos permeáveis	43
FIGURA 9 - LnS–LnN de diferentes concretos abaixo de 50% de probabilidade de ruptura	45
FIGURA 10 - Efeito da porosidade total do agregado no coeficiente de permeabilidade e na resistência à compressão.....	47
FIGURA 11 - Esquema mostrando como partículas de tamanhos diferentes podem entupir o concreto permeável.....	48
FIGURA 12 - Médias - Taxas de Infiltração - Calçada Preliminar	50
FIGURA 13 - Médias das taxas de infiltração - Trechos 1, 2 e 3 - calçada definitiva	51
FIGURA 14 - Coeficiente de permeabilidade do concreto permeável em dois diferentes métodos.....	53
FIGURA 15 - Esquemas de vedação lateral e comportamento de percolação da água através do corpo de prova.....	55
FIGURA 16 - Corpos de prova para ensaio de infiltração: à esquerda sem envolvimento total e à direita com envolvimento por material plástico.....	56
FIGURA 17 - Adensamento de concreto permeável com utilização de régua vibratória	59

FIGURA 18 - Adensamento de concreto permeável com utilização de rolo	60
FIGURA 19 - Acabamento superficial com máquina Acabadora de piso	60
FIGURA 20 - Execução de juntas através da utilização do <i>pizza cutter</i>	61
FIGURA 21 - Faixa granulométrica da brita 0.....	64
FIGURA 22 - Faixa granulométrica da brita 1.....	64
FIGURA 23 - Aparência das misturas em estado fresco: a) M3,5-1-1; b) M5-1-1; c) M6,5-1-1	69
FIGURA 24 - Vista da face inferior dos corpos de prova desmoldados: a) M3,5-1-1; b) M5-1-1; c) M6,5-1-1	69
FIGURA 25 - Aspecto das misturas em estado fresco: a) M5-0-1; b) M5-1-2; c) M5-1/0-1	70
FIGURA 26 - Vista da face inferior dos corpos de prova desmoldados: a) M5-0-1; b) M5-1-2; c) M5-1/0-1	71
FIGURA 27 - Etapas de fabricação do concreto permeável	72
FIGURA 28 - Corpos de prova logo após moldados.....	74
FIGURA 29 - Corpos de prova prismáticos após moldagem	74
FIGURA 30 - Corpo de prova em ensaio de resistência à compressão axial	75
FIGURA 31 - Corpo de prova em ensaio de resistência à compressão axial com capeamento em pasta de cimento	76
FIGURA 32 - Corpo de prova em ensaio de resistência à tração por compressão diametral	76
FIGURA 33 - Corpo de prova em ensaio de resistência à tração na flexão.....	77
FIGURA 34 - Ensaio para aferição de taxa de infiltração conforme indicado pela ISO 17785-1 (ISO, 2016)	79
FIGURA 35 - Interface do sistema para configuração da geometria.....	84
FIGURA 36 - Interface do sistema para aplicação do carregamento.....	84
FIGURA 37 - Face superior com maior solicitação de tensão	85
FIGURA 38 - Deformação na calçada com escala de aumento em 100 vezes	86

FIGURA 39 - Placa preliminar: a) lançamento do concreto; b) Adensamento e acabamento superficial; c) superfície superior da placa finalizada; d) superfície inferior da placa finalizada.....	89
FIGURA 40 - Perfil transversal da calçada.....	90
FIGURA 41 - Etapas construtivas da calçada: a) demarcação; b) escavação; c) regularização; d) assentamento da guia e concretagem da guia e regularização da base; f) concretagem; g) adensamento e acabamento; h) calçada finalizada	91
FIGURA 42 - a) Anel fixado na calçada; b) realização do ensaio de infiltração	93
FIGURA 43 - a) Equipamento soprador; b) Realização da limpeza na calçada.....	94
FIGURA 44 - Vista superior da calçada e disposição dos pontos de ensaio de infiltração	95
FIGURA 45 - Porcentagem de vazios em função da massa específica aparente...	100
FIGURA 46 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral em função da porcentagem de vazios.....	100
FIGURA 47 - Porcentagem de vazios em função do consumo de cimento	101
FIGURA 48 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral em função do consumo de cimento.....	102
FIGURA 49 – Taxas de infiltração médias das misturas pelos métodos E1 e E2...	106
FIGURA 50 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral em função da porcentagem de vazios.....	107
FIGURA 51 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral em função do consumo de cimento.....	107
FIGURA 52 - Comportamento das resistências à compressão axial, à tração por compressão diametral e porcentagem de vazios em decorrência do aumento da massa específica aparente para as misturas M5-1-1 e M5-1-2.....	108
FIGURA 53 - Comportamento das resistências à compressão axial, à tração por compressão diametral e porcentagem de vazios em decorrência do aumento da massa específica aparente para as misturas M5-0-1 e M5-0-2.....	111
FIGURA 54 – Comparação da resistência média à compressão axial, à tração por compressão diametral e à tração na flexão da presente pesquisa e autores que trabalharam com concretos semelhantes.....	112

FIGURA 55 - Comparação de permeabilidade da presente pesquisa e autores que trabalharam com concretos semelhantes	114
FIGURA 56 – Taxas de infiltração iniciais na calçada	117
FIGURA 57 - Superfície da calçada	118
FIGURA 58 - Comparação entre as taxas de infiltração dos pontos 1 e 8 com o passar do tempo	119
FIGURA 59 - Comparação entre as taxas de infiltração dos pontos 2 e 7 com o passar do tempo	119
FIGURA 60 - Comparação entre as taxas de infiltração dos pontos 3 e 6 com o passar do tempo	120
FIGURA 61 - Comparação entre as taxas de infiltração dos pontos 4 e 5 com o passar do tempo	120
FIGURA 62 - Médias mensais de cada ponto durante todo o período de coleta de dados	122
FIGURA 63 - Médias mensais dos quatro pontos de cada metade limpa mensalmente e semanalmente	123

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Tipos de solo de subleito e variações aproximadas de valores de k.....	30
TABELA 2 - Diferentes teores de água utilizados em concretos permeáveis por diferentes autores	34
TABELA 3 - Resistência à compressão e flexão, perda de massa à abrasão e índice de vazios de algumas amostras de acordo com Zaetang <i>et al.</i> (2016).....	40
TABELA 4 – Resumo de algumas características físicas e mecânicas de dois traços de concreto permeável.....	41
TABELA 5 - Caracterização das misturas de Chandrappa e Biligiri (2017)	42
TABELA 6 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP II F- 40.....	63
TABELA 7 - Propriedades químicas do cimento CP II F- 40.....	63
TABELA 8 - Propriedades dos agregados graúdos	65
TABELA 9 - Ensaio realizado em laboratório.....	66
TABELA 10 - Proporções dos materiais utilizados nas misturas desenvolvidas para a escolha do traço.....	68
TABELA 11 - Proporções das misturas variando-se a granulometria do agregado ..	68
TABELA 12 - Lâmina d'água acumulada no pavimento permeável em decorrência de incidências máximas de chuva para um período de retorno de 100 anos em Andradina, segundo o DAEE (2018), considerando a taxa de infiltração do solo	82
TABELA 13 – Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios, consumo de cimento e massa específica aparente para o traço M3,5-1-1 aos 14 dias.....	98
TABELA 14 – Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios, consumo de cimento e massa específica aparente para traço M5-1-1 aos 14 dias	98
TABELA 15 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios, consumo de cimento e massa específica aparente para traço M6,5-1-1 aos 14 dias.....	99
TABELA 16 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios, consumo de cimento, massa específica aparente e taxa de infiltração para a mistura M5-1-2 aos 28 dias.....	103

TABELA 17 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios, consumo de cimento, massa específica aparente e taxa de infiltração para a mistura M5-0-1 aos 28 dias.....	104
TABELA 18 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios, consumo de cimento, massa específica aparente e taxa de infiltração para a mistura M5-1/0-1 aos 28 dias.....	104
TABELA 19 – Resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios, consumo de cimento, massa específica aparente e taxa de infiltração para o traço M5-0-2 aos 28 dias	109
TABELA 20 – Resistência à tração na flexão, massa específica aparente, consumo de cimento e porcentagem de vazios para os corpos de prova prismáticos do traço M5-0-3 aos 28 dias	110
TABELA 21 - Resumo das análises estatísticas.....	113
TABELA 22 - Média e coeficiente de variação para a resistência à compressão axial com capeamento em madeirite e em pasta de cimento	115
TABELA 23 - Média e coeficiente de variação máximos para a resistência à compressão axial de diversos autores	116
TABELA 24 - Resumo estatístico	124

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a/c	Água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BMPs	<i>Best Management Practices</i>
CBR	<i>California bearing ratio</i>
CP	Corpo de prova
M5-0	Mistura com traço 1:5 com agregado brita 0
M5-1/0	Mistura com traço 1:5 com agregados misturados britas 0 e 1
M3,5-1	Mistura com traço 1:3,5 com agregado brita 1
M5-1	Mistura com traço 1:5 com agregado brita 1
M6,5-1	Mistura com traço 1:6,5 com agregado brita 1
DAEE	Departamento de águas e energia elétrica
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
Hz	Hertz
MPa	Megapascal
NBR	Norma brasileira
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
PCI	<i>Pavement condition index</i>
Psi	Libra-força por polegada quadrada
UNESP	Universidade Estadual Paulista
Valor – R	Valor de resistência

LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
f_c	Resistência à compressão do concreto
ρ_c	Massa específica do concreto
cm	centímetro
cm ²	centímetro quadrado
cm ³	centímetro cúbico
E	Módulo de elasticidade
ft ³	pé cúbico
g	grama
h	hora
in ²	polegada quadrada
kg	quilograma
lb	Libra
lbf	Libra força
m	metro
m ³	metro cúbico
min	minuto
mm	milímetro
Ø	diâmetro
°C	graus centígrados
s	segundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
1.2	JUSTIFICATIVAS RELEVANTES.....	18
1.3	OBJETIVOS	20
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	22
2.1	PROBLEMÁTICA DE ÁREAS URBANAS IMPERMEÁVEIS.....	22
2.2	TIPOS DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS	24
2.3	ESTRUTURA DO PAVIMENTO REVESTIDO EM CONCRETO PERMEÁVEL	27
2.4	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS PAVIMENTOS EM CONCRETO PERMEÁVEL	31
2.4.1	Composição e características dos materiais utilizados no concreto permeável	31
2.4.2	Características em estado fresco.....	34
2.4.3	Características em estado endurecido	36
2.4.3.1	Resistência e demais aspectos mecânicos	36
2.4.3.2	Permeabilidade de concretos permeáveis	46
2.4.3.3	Ensaio de permeabilidade e taxa de infiltração.....	52
2.4.4	Projeto do pavimento	57
2.4.5	Fabricação e lançamento de concretos permeáveis	58
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	62
3.1	MATERIAIS	62
3.1.1	Aglomerante	62
3.1.2	Agregados.....	63
3.1.3	Aditivo	65
3.2	DESENVOLVIMENTO DO TRAÇO	65
3.3	DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS.....	71
3.3.1	Procedimentos de mistura.....	71
3.3.2	Moldagem dos corpos de prova.....	72
3.3.3	Cura dos corpos de prova	75
3.3.4	Ensaio mecânicos	75

3.3.5	Procedimentos para encontrar a massa específica aparente	77
3.3.6	Procedimentos para encontrar a porcentagem de vazios	78
3.3.7	Ensaio de condutividade hidráulica em laboratório	78
3.4	DESENVOLVIMENTO DO PAVIMENTO TESTE EM CAMPO	80
3.4.1	Projeto da calçada	80
3.4.1.1	Dimensionamento hidráulico	81
3.4.1.2	Dimensionamento mecânico	82
3.4.2	Procedimentos para a construção da calçada	88
3.4.2.1	Construção da placa preliminar	88
3.4.2.2	Construção da calçada	89
3.4.3	Ensaio de determinação das taxas de infiltração em campo	92
3.5	METODOLOGIA DO ESTUDO EM CAMPO	93
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	95
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	97
4.1	RESULTADOS E DISCUSSÕES LABORATORIAIS	97
4.1.1	Resultados da Fase 1	97
4.1.2	Resultados da Fase 2	102
4.1.3	Resultados da Fase 3	109
4.1.4	Comparação de Resultados com a Literatura	111
4.1.5	Comparação entre tipos de capeamento para a resistência à compressão axial	114
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES DA ANÁLISE EM CAMPO	116
4.2.1	Taxa de infiltração inicial	116
4.2.2	Comparação entre diferentes pontos	118
4.2.3	Médias mensais para os oito pontos	122
4.2.4	Médias mensais das partes com limpeza mensal e semanal	123
5	CONCLUSÕES	126
	REFERÊNCIAS	128

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a evolução da humanidade, surgiu a necessidade e a tendência do ser humano viver em comunidade e com isso iniciar os processos de urbanização. A partir daí, com o desenvolvimento, as construções começaram a crescer cada vez mais e a necessidade de ir e vir crescente da sociedade levou a construção de estradas, que causou a impermeabilização de superfícies.

Atualmente devido às grandes aglomerações urbanas existentes, a impermeabilização de superfícies assume dimensões fortemente consideráveis, gerando muitos problemas ambientais advindos desta questão.

Essa impermeabilização pode gerar problemas principalmente relacionados às precipitações, que não infiltram no solo, podendo causar situações de enchentes, carreamento de poluentes que ficam impregnados nas superfícies dos pavimentos para os cursos d'água, mudanças no ciclo hidrológico, dentre outros problemas ambientais (ESTEVES, 2006).

Portanto, é essencial buscar-se técnicas construtivas que colaborem com a diminuição das áreas impermeáveis. A utilização de pavimentos permeáveis tem papel fundamental nessa questão, podendo reduzir consideravelmente os problemas relacionados à impermeabilização de superfícies.

Os pavimentos permeáveis construídos a partir de concreto permeável podem ser uma opção, visto que o concreto permeável apresenta uma alta capacidade de permeabilidade.

1.2 JUSTIFICATIVAS RELEVANTES

Recentemente, de acordo com Batezini (2013), algumas práticas de controle hidrológico têm se tornado relevante na realidade brasileira: são as *Best Management Practices* (BMPs), que visam resolver problemas advindos do escoamento de bacias, o mais próximo possível de sua fonte e não somente quando estes chegam nos cursos d'água. A ideia de BMPs foi desenvolvida pela *Environmental Protection Agency* (EPA) e baseia-se no controle aplicando-se o planejamento, com a utilização de pavimentos permeáveis, reservatórios e

trincheiras de infiltração, como ferramentas de armazenamento e infiltração do escoamento, em locais prejudicados pela urbanização acelerada (BATEZINI, 2013; ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2018).

De acordo com Aciole (2005), ferramentas como essas buscam realizar o controle na fonte de geração do escoamento das águas pluviais, não permitindo que ocorra o escoamento.

A utilização do concreto permeável é uma técnica muito eficiente, do ponto de vista ambiental, para o gerenciamento de águas pluviais, colaborando em vários fatores. Por exemplo, a redução de inundações, visto que ele reduz ou até elimina o escoamento das águas pluviais que ocorre devido à impermeabilização do solo. (ACI, 2010).

Também podemos citar como benefício a redução considerável dos níveis de poluição das águas, devido ao menor carreamento de água com poluentes. Outro exemplo são as reduções de temperatura nos ambientes urbanos, devido à menor absorção de calor de pavimentos de concreto permeável. Ainda, outro aspecto que colabora na redução de calor é a maior permissibilidade de árvores (reguladoras naturais de temperatura) se desenvolverem, devido à manutenção de umidade e ar no solo. (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

É possível também desenvolver sistemas de captação das águas pluviais em calçadas ou estacionamentos, utilizando o concreto permeável, com a realização da impermeabilização da base, promovendo dessa forma o encaminhamento das águas para reservatórios, para posterior reutilização.

Além dos benefícios ambientais, o concreto permeável proporciona maior conforto e segurança. Em estacionamentos, que tem como característica também o tráfego de pedestres, sua utilização pode gerar maior conforto ao usuário devido à eliminação de poças e lâmina d'água em dias chuvosos. Além disso, a segurança do pavimento é aumentada quando se tem a ocorrência de gelo ou neve na pista, uma vez que há melhor aderência do veículo com o pavimento, que apresenta uma maior rugosidade.

Embora normalmente não seja empregável em vias de tráfego pesado, o concreto permeável melhora bastante a segurança de dirigibilidade durante chuvas intensas, eliminando a lâmina d'água sob o pavimento e, conseqüentemente, reduzindo os fenômenos de "spray", risco de hidroplanagem de veículos e melhora na visibilidade principalmente à noite. (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

A porosidade deste tipo de concreto, embora seja bastante útil para a mitigação dos problemas relacionados a precipitações, tem uma desvantagem: a colmatação ou entupimento dos poros por detritos, que ocorre de maneira progressiva com o passar do tempo. Desta forma, o estudo de técnicas de retardamento da perda de permeabilidade é importante para manutenção da eficiência deste tipo de dispositivo.

1.3 OBJETIVOS

Tendo em vista os aspectos relevantes que a utilização do concreto permeável pode apresentar, este trabalho tem por objetivos gerais os seguintes itens:

- a) apresentar uma breve revisão da literatura para melhor conhecer as principais características do concreto permeável e os estudos realizados sobre este material;
- b) desenvolver traços de concreto permeável, com os materiais disponíveis comercialmente na região do estudo, para verificar sua aplicabilidade em estruturas de pavimentos;
- c) a partir de um traço escolhido, desenvolver um sistema de pavimento com a utilização do concreto permeável, para captação e promoção de infiltração total das águas pluviais no solo;
- d) aplicar o pavimento desenvolvido em escala real, verificando a aplicabilidade e eficiência do sistema na prática.

A partir deste panorama geral, o trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- a) verificar a eficiência de manutenção periódica através de limpeza em pavimento teste de concreto permeável com uso de soprador, em duas diferentes periodicidades, a fim de aferir se tal manutenção promove redução da perda de permeabilidade com o passar do tempo;
- b) aferir a condutividade hidráulica no pavimento, com periodicidade semanal, principalmente nos primeiros meses após a construção, a fim de observar o comportamento da taxa de infiltração com a limpeza.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo da presente dissertação traz uma breve introdução sobre áreas urbanas e o prejuízo das superfícies impermeáveis. Também traz as justificativas relevantes para utilização de pavimento em concreto permeável e os objetivos deste trabalho.

O segundo capítulo apresenta as principais características deste material, sua aplicabilidade como pavimento e realiza uma revisão da literatura sobre pesquisas desenvolvidas e resultados alcançados em diversos trabalhos com concreto permeável.

O terceiro capítulo engloba todo o trabalho laboratorial e em campo, apresentando os materiais utilizados e toda metodologia aplicada nas etapas de evolução da pesquisa.

O quarto capítulo retrata os resultados, bem como a discussão e as considerações importantes através da análise dos resultados.

O quinto capítulo apresenta as conclusões e os pontos mais relevantes do trabalho de maneira geral em todos os aspectos abordados para o concreto permeável.

O sexto e último capítulo retrata as referências que serviram de base para o desenvolvimento do trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PROBLEMÁTICA DE ÁREAS URBANAS IMPERMEÁVEIS

Com o crescimento do desenvolvimento urbano na segunda metade do século XX, houve a concentração da população nos centros urbanos gerando disputas pelos recursos naturais disponíveis e degradação da biodiversidade natural. Isto levou ao aumento da impermeabilização de áreas, promovendo a alteração do ciclo hidrológico natural (TUCCI, 2005).

Nas áreas urbanizadas, com o aumento da impermeabilização dos solos, alguns impactos podem ser percebidos como o aumento de vazões de águas pluviais, encaminhadas a cursos d'água e maiores cargas poluidoras nesses escoamentos. Esses fatores colaboram para a deterioração da qualidade de água superficial e subterrânea (TUCCI, 2005).

Ocorre também que as áreas impermeáveis conduzem, além de maiores vazões, maiores velocidades de escoamento superficial, devido a menores rugosidades dos pavimentos impermeáveis. Este fator provoca erosões dos solos, expostos nas margens dos cursos d'água, receptores dos escoamentos pluviais. Estas partículas acabam se depositando posteriormente no leito dos rios, colaborando para ocorrência de assoreamento (ESTEVES, 2006).

Ainda, de acordo com Esteves (2006), isso também colabora para o aumento da temperatura das águas dos rios, uma vez que as águas pluviais entram em contato com as superfícies aquecidas pela radiação solar, enquanto escoam, chegando à jusante com temperaturas mais elevadas.

Outro problema normalmente advindo da urbanização e consequente impermeabilização dos solos naturais, principalmente em grandes centros urbanos, é a sobrecarga das redes de escoamento de águas pluviais, podendo gerar problemas de alagamento e enxurradas em certas regiões com sistemas de drenagem deficitários (HOLTZ, 2011).

Tentativas de amenizar esses problemas em grandes regiões urbanizadas, a partir dos métodos convencionais (permitir escoamento através de dispositivos de drenagem e dos pavimentos impermeáveis, até as galerias que conduzem as águas para cursos d'água), não têm sido muito eficientes do ponto de vista ambiental,

principalmente porque estes métodos acabam sobrecarregando a jusante da bacia (HOLTZ, 2011).

Por isso as técnicas de controle na fonte podem ser alternativas importantes para colaborar com a redução dos problemas, desencadeados pelo escoamento superficial das águas de chuva.

SUDERHSA (2002) descreve dois principais tipos de medidas de controle na fonte: por dispositivos de armazenamento e de infiltração. Os de armazenamento são aqueles que buscam retardar o escoamento pluvial para sua liberação lenta, amortecendo o pico de escoamento. Os de infiltração destinam as águas pluviais para o solo, com o objetivo de promover a infiltração. Exemplos de dispositivos de armazenamento são reservatórios residenciais em lotes, bacias de retenção e retenção; como exemplos de dispositivos de infiltração podemos citar os pavimentos porosos, trincheiras de infiltração, faixas e valas gramadas. Há ainda os mistos, que atendem a estas duas características simultaneamente.

Com a utilização de pavimentos permeáveis nas áreas urbanas, vários problemas causados pelo escoamento superficial das águas de chuva, podem ser amenizados ou evitados. Tal solução colabora para uma menor alteração do ciclo hidrológico, permitindo parcelas consideráveis de infiltração, como ocorre nos solos naturais.

Dos vários tipos de pavimentos permeáveis aplicados comumente, que serão descritos posteriormente, o concreto permeável pode ser uma boa escolha pelos vários aspectos positivos que este material apresenta, principalmente se tratando das questões ambientais inerentes ao processo de urbanização.

De acordo com Holtz (2011), os pavimentos construídos em concreto permeável são muito eficientes como elementos drenantes, colaborando bastante com a infiltração das águas. Estes também possuem a capacidade de funcionar como reservatórios temporários devido ao volume de vazios, presente em sua estrutura interna. Isto permite o armazenamento de água quando se têm elevadas incidências pluviométricas.

Normalmente, com o escoamento das águas pluviais, os resíduos e substâncias presentes nas superfícies impermeáveis tais como óleos, fluidos anti-congelamento e outros tipos de fluidos provenientes de veículos podem ser carregados para os cursos d'água. Com a redução ou eliminação deste escoamento é possível tal redução dos índices de poluição. Outro aspecto relevante é que

permitindo a infiltração dessas águas no solo, conduzindo-as para os lençóis freáticos, há um tratamento natural destas águas, reduzindo ou até eliminando poluentes, através da percolação pela estrutura interna do concreto permeável e do solo (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Com a utilização dos pavimentos permeáveis que permitem a infiltração, também há ajuda nas recargas de lençóis freáticos e aquíferos subterrâneos, colaborando para o aumento do volume das águas subterrâneas (IBRAHIM *et al.*, 2014).

O concreto permeável é de grande valia para manter e colaborar no desenvolvimento e proteção de árvores e outros tipos de plantas nos ambientes pavimentados. De acordo com Tennis, Leming e Akers (2004) os pavimentos impermeáveis trazem dificuldades no crescimento das plantas, pois dificultam a chegada de ar e água até as raízes. Como o concreto permeável tem grande quantidade de poros interligados, o ar e a água chegam facilmente nas raízes das plantas, permitindo o aumento e manutenção de diversos tipos de plantas, como arbustos e árvores, nos locais de aplicação do concreto permeável em substituição aos pavimentos impermeáveis.

2.2 TIPOS DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Por definição, pavimentos permeáveis são aqueles que permitem a percolação de água através de estruturas internas porosas, para ser encaminhada para infiltração pelo solo, ou direcionada a algum lugar através de elementos condutivos de escoamento. O principal objetivo em utilizar-se esse tipo de pavimento é reduzir ou eliminar os escoamentos de águas pluviais, que ocorrem nas superfícies de pavimentos (FERGUSON, 2005).

Basicamente, a maioria dos pavimentos permeáveis são constituídos de uma camada de agregados graúdos (pode ser chamada de base), localizada acima do subleito ou solo, que serve como reservatório temporário da água. Esta é essencial também para o suporte das cargas exercidas pelo tráfego no pavimento e da camada de revestimento permeável, que fica acima desta base, também responsável por distribuir as cargas do tráfego, assim como promover a percolação das águas de chuva em sua estrutura interna (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Ainda pode conter, em alguns casos, uma camada de agregados finos e membranas geotêxteis, como meios para conter possíveis materiais sólidos poluentes nesses pavimentos (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000).

Suzuki, Azevedo e Kabbach Júnior (2013) classificam os pavimentos permeáveis em três tipos básicos que se fundamentam pela sua capacidade de infiltração:

- a) sistema de infiltração total: as águas de chuvas são totalmente encaminhadas para infiltração no solo, ou seja, o solo deve ter uma boa capacidade de infiltração e o pavimento uma razoável capacidade de armazenamento temporário das precipitações, para permitir a total descarga das águas por infiltração, para uma determinada incidência pluviométrica projetada para o local;
- b) sistema de infiltração parcial: este sistema é normalmente utilizado quando o solo não suporta promover a total infiltração das águas de chuva devido à baixa permeabilidade ou o lençol freático encontra-se muito elevado no solo. Desse modo deve ser projetado um sistema de coleta das águas que não podem ser infiltradas, localizado na parte superior do reservatório do pavimento. Esse sistema de coleta normalmente é composto por dutos perfurados que servem para captar essa água em excesso;
- c) sistema de infiltração para controle da qualidade de água: para o controle da qualidade da água, este sistema faz a coleta do fluxo inicial, que são as primeiras águas que entram em contato com o pavimento, caracterizadas por conter a maior concentração de poluentes. Após a captação deste fluxo inicial, o restante é coletado por drenos e transportado para um coletor de água pluvial.

Essa classificação de pavimentos permeáveis depende da quantidade de água infiltrada pelo solo. Esses pavimentos são usados em determinadas localidades dependendo de vários fatores, como tipo de solo, intensidades pluviométricas, viabilidade de aplicação, dentre outros.

Existem ainda os pavimentos impermeáveis em que se realiza a impermeabilização, para evitar a infiltração pelo solo. Neste caso, as águas de chuva captadas pelos pavimentos impermeáveis são totalmente retiradas dos reservatórios do pavimento através de dutos e estas águas podem ser

encaminhadas para os cursos d'água, como ocorre nos sistemas de drenagem convencional ou podem também ser reservadas para reutilização. Para a impermeabilização, pode ser utilizada uma membrana impermeável entre o reservatório e o solo existente (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000).

De acordo com Tennis, Leming e Akers (2004) os pavimentos permeáveis podem ser construídos também para captar água de chuva somente do local em que ocorre a precipitação (mitigação passiva), ou também para receber cargas pluviais de outros locais como edifícios e áreas impermeáveis, que serão conduzidas e destinadas à captação do pavimento permeável (mitigação ativa).

Nesse segundo caso há a necessidade de serem contabilizadas todas as contribuições que serão encaminhadas ao pavimento permeável e analisá-las de acordo com a capacidade do pavimento permeável para que não seja perdida sua eficiência por excesso de cargas hidráulicas ou erros de cálculo. Também, se deve atentar para a possibilidade de pequenas partículas ou detritos serem carreados pelo escoamento até o pavimento permeável, causando perda da permeabilidade, ou seja, colmatação e promovendo desta maneira a ineficiência do pavimento. O concreto permeável é muito susceptível a este problema, sendo uma de suas principais desvantagens.

Dos materiais utilizados para a construção de pavimentos permeáveis, podemos citar vários, que serão utilizados também de acordo com alguns fatores como a carga e intensidade de tráfego incidente no pavimento, intensidade pluviométrica, disponibilidade local de materiais, dentre outros.

Os principais tipos de revestimento utilizados em pavimentos permeáveis são os blocos vazados, o asfalto poroso e o concreto poroso ou permeável.

Os pavimentos em blocos vazados são aqueles que utilizam blocos com aberturas e são assentados como ocorre em pavimentos intertravados convencionais. Os vazios dos blocos podem ser preenchidos com materiais permeáveis, como areia, cascalho ou grama (ACIOLI, 2005; UDFCD, 2010). Neste pavimento normalmente assenta-se os blocos vazados sobre uma superfície de agregados finos como a areia (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000). Ainda podem ser utilizados blocos de concreto maciços articulados, que são feitos com objetivo de trabalharem em conjunto. São interconectados e seu assentamento ocorre por meio de articulações unidirecionais de cada peça sobrepostas umas às outras, sem necessidade de material rejuntante. O espaçamento adequado das

juntas, ligado à ausência de finos no sentido não articulado, garantem boa permeabilidade (ONO, 2018).

O asfalto poroso é uma solução utilizada em pavimentos rodoviários em todo o mundo e pode ser utilizado tanto em pavimentos de base impermeável, como em pavimentos totalmente porosos. Este tipo de pavimento além dos benefícios da infiltração instantânea das águas pluviais, também colabora para redução das temperaturas nos centros urbanos e redução dos níveis de ruído dos pneus dos veículos em contato com o pavimento (AFONSO; DINIS-ALMEIDA; FAEL, 2017).

O concreto poroso tem o mesmo princípio do asfalto poroso. É usado como pavimento para permitir a infiltração das águas de chuva e também colabora com vários outros aspectos positivos. Tanto o concreto como o asfalto poroso são caracterizados por conter agregados de graduação uniforme, conectados por um tipo de ligante, o que fornece a resistência (relativamente baixa em ambos os materiais) e garantem a porosidade interconectada (AFONSO; DINIS-ALMEIDA; FAEL, 2017; FERGUSON, 2005).

O concreto poroso ou concreto permeável destaca-se quando utilizado como revestimento em pavimentos permeáveis, por alcançar boas relações de resistência, considerando a elevada porosidade interconectada que este precisa dispor. Também por ele apresentar uma coloração mais clara, é garantida uma melhor visibilidade, principalmente durante a noite nos pavimentos e, de maneira semelhante, colabora para um menor aquecimento do ambiente urbano (FERGUSON, 2005).

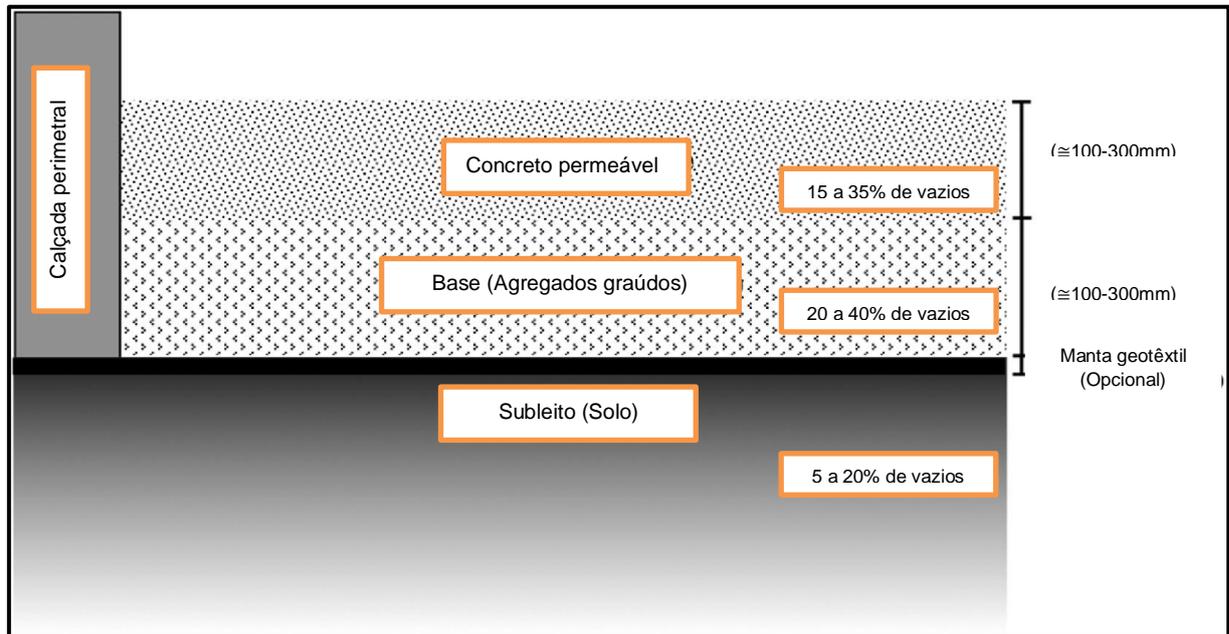
2.3 ESTRUTURA DO PAVIMENTO REVESTIDO EM CONCRETO PERMEÁVEL

Normalmente, os pavimentos permeáveis são compostos do solo (ou subleito), da base, que geralmente é constituída de agregados graúdos e o revestimento em concreto permeável. A Figura 1 mostra a estrutura comumente utilizada neste tipo de pavimento.

Na Figura 1 as espessuras mostradas são as comumente utilizadas na prática, porém, a espessura de cada camada pode variar dependendo de vários fatores. Por exemplo, a camada de revestimento varia dependendo da resistência do concreto, das cargas que serão exercidas no pavimento e dos aspectos hidrológicos do local. Já a base, que funciona como um reservatório temporário, deve ter uma

espessura suficiente para armazenar um volume satisfatório de água, levando em consideração as precipitações esperadas para o local e a permeabilidade do solo (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; FERGUSON, 2005).

FIGURA 1 - Seção transversal esquemática de um sistema típico de drenagem urbana sustentável incorporando uma camada de concreto permeável



Fonte: Modificado (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017).

De acordo com Ferguson (2005), a base, constituída geralmente de agregados, serve para dar suporte ao concreto permeável. Ela também auxilia durante a cura do concreto permeável, por isolar o concreto do contato direto com o solo, evitando a perda de parte da água de amassamento do concreto por absorção do solo. Ainda, realiza a distribuição do carregamento no subleito com eficiência e diminui a incidência de fissuração do concreto em operação. Por esse motivo, a espessura da base pode variar bastante, pois deve atender tanto às questões estruturais para o suporte e distribuição das cargas, como também ter uma capacidade de armazenamento suficiente, prevalecendo sempre a maior das espessuras necessárias.

Em muitos casos podem ser adotadas camadas filtrantes, que servem para manter a porosidade adequada e a integridade das camadas do pavimento, sendo que normalmente essas camadas filtrantes podem ser constituídas de agregados de tamanho intermediário ou mantas geotêxteis permeáveis (FERGUSON, 2005).

Esta camada filtrante é principalmente muito útil para que não se misture a camada de base com o subleito ou solo natural, podendo comprometer a capacidade hidráulica da base ou até alterar a espessura da camada devido a essa mistura indesejada. As mantas geotêxteis são muito interessantes nesse sentido por serem permeáveis à água e impedirem a passagem de pequenas partículas (FERGUSON, 2005).

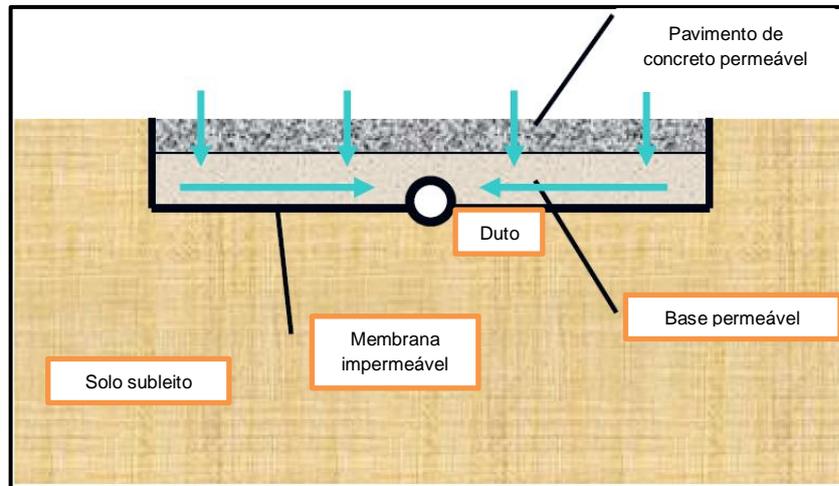
O subleito é a última camada do pavimento permeável. É onde se encontra o solo natural ou, em alguns casos, um solo modificado dependendo das características deste e do pavimento permeável. O subleito deve atender as exigências hidráulicas e de resistência para o bom funcionamento do pavimento.

Quanto às exigências hidráulicas, o ACI (2010) afirma que, como regra geral, um solo com taxa de percolação de 13mm/h já está apto para funcionar como subleito de pavimentos permeáveis, realizando a infiltração das águas de chuva e encaminhando-as para os lençóis freáticos. De acordo com Tennis, Leming e Akers (2004), solos argilosos podem apresentar baixos índices de infiltração e, conseqüentemente, ser necessário realizar substituição desse subleito por um material mais permeável, no caso de haver a necessidade de promoção da infiltração das águas.

Outra opção viável para ser aplicada em solos com baixa permeabilidade é a construção de canais de afastamento das águas, normalmente alocados na base (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; FERGUSON, 2005). Esses canais podem direcionar as águas para cursos d'água ou para reservatórios específicos com o objetivo de utilização dessas águas. Nesse caso, quando o objetivo é utilizar a água, ou opta-se por não permitir que a água infiltre no solo, é realizada uma impermeabilização do subleito com uma manta impermeável, para garantir que seja realizada toda a captação dessa água. Se o objetivo for somente afastar as águas em excesso, que o solo não consegue promover a infiltração, não há a necessidade da utilização de mantas impermeáveis. A Figura 2 mostra um corte de um pavimento em concreto permeável, exemplificando como pode ser construído um canal de afastamento.

Tennis, Leming e Akers (2004) afirmam que é interessante a utilização de subleitos naturais quando estes são predominantemente constituídos de areia com moderada quantidade de silte, argilas e solos mal graduados.

FIGURA 2 - Canal de afastamento em pavimento permeável com manta de impermeabilização



Fonte: Modificado (DELATTE; MILLER; MRKAJIC, 2007).

O suporte que cada material que pode compor o subleito oferece, é medido de acordo com o módulo de Westergaard de reação do subleito (k). Os valores deste módulo (k) são compostos através de ensaios, ou estimados a partir do módulo de elasticidade dos solos. O valor de k é dado em MPa/m e algumas relações empíricas entre este módulo (k) e outros indicadores, como o CBR (*California Bearing Ratio* ou Índice de Suporte Califórnia) e o Valor - R (Valor de resistência) são apresentados na Tabela 1 por Tennis, Leming e Akers (2004). Pela Tabela se nota que os melhores solos para subleito são os solos predominantemente arenosos, com cascalho e pequena ou nula quantidade de finos plásticos como argila.

TABELA 1 - Tipos de solo de subleito e variações aproximadas de valores de k

Tipo de Solo	Suporte	Valores de k (MPa/m)	CBR	Valor - R
Solos graduação fina em que predominam partículas de silte e argila	Baixo	20 a 34	2,5 a 3,5	10 a 22
Areias e misturas areia-cascalho com quantidades moderadas de areia e argila	Médio	35 a 49	4,5 a 7,5	29 a 41
Areias e misturas areia-cascalho relativamente livres de finos plásticos	Alto	50 a 60	8,5 a 12	45 a 52

Fonte: Modificado (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

2.4 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS PAVIMENTOS EM CONCRETO PERMEÁVEL

O concreto permeável é um material amplamente utilizado, por possuir várias características positivas quanto à sua utilização e materiais empregados em sua fabricação. Tem como constituição básica uma mistura de concreto, porém com pouca ou nenhuma quantidade de agregados miúdos, o que conseqüentemente gera um concreto com grandes poros em sua estrutura (HASELBACH; VALAVALA; MONTES, 2006).

2.4.1 Composição e características dos materiais utilizados no concreto permeável

Os materiais que compõe o concreto permeável são basicamente os seguintes: um ligante hidráulico; materiais agregados (normalmente com graduação uniforme) e aditivos e adições para melhoria de algumas propriedades como resistência, trabalhabilidade, durabilidade, dentre outras, no caso de haver necessidade (BATEZINI, 2013; DELATTE; MRKAJIC; MILLER, 2009). Os agregados são interligados com resistência satisfatória através da colagem, que ocorre pela pasta de cimento e promove ao mesmo tempo uma estrutura porosa, com porcentagens significativas de vazios (MCCAIN; DEWOOLKAR, 2009).

O ligante hidráulico ou aglomerante mais utilizado em concreto permeável é o cimento Portland. Segundo Ferguson (2005) o cimento Portland é o componente mais caro e que mais prejudica o meio ambiente, de todos utilizados no concreto permeável. Isto ocorre, de acordo com este autor, devido ao grande consumo energético e também liberação de gases responsáveis pelo efeito estufa para a fabricação do cimento.

Também é possível utilizar, juntamente com o cimento Portland, materiais suplementares, como é o caso das pozolanas. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015), pozolanas são materiais que contenham silício ou silício-alumínio que, por si só, apresentam baixa ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes, quando finamente divididos e na presença de água.

Os materiais pozolânicos, quando utilizados como suplemento nos concretos permeáveis, auxiliam no melhoramento de algumas características como aumento da resistência mecânica, maior durabilidade e resistência às condições agressivas, como ocorrências de congelamento e descongelamento, substâncias químicas em contato com o concreto, solos com altos teores de sulfato e água salgada (FERGUSON, 2005).

Embora seja pouco comum, também pode haver um tipo de reforço que auxilia no melhoramento da resistência e suporte de cargas no concreto permeável. Ferguson (2005) afirma que podem ser utilizados para esse fim barras ou mechas de metal ou fibras poliméricas, e elas vão auxiliar mantendo fechadas as pequenas fissuras que se formam, garantindo um bom alinhamento e transferência de carga por toda a estrutura. No caso das barras e mechas metálicas, Ferguson (2005) afirma que pode haver problemas de ligação e aderência com a estrutura porosa do concreto permeável e baixa durabilidade devido a esta exposição. Para minimizar esses problemas, é indicado revestir os materiais metálicos com uma pasta de cimento antes de sua colocação no concreto. Já as fibras poliméricas não apresentam problemas de durabilidade, sendo inseridas facilmente no concreto.

No concreto permeável também é comum a presença de aditivos. Assim como em concretos convencionais, os aditivos podem melhorar algumas propriedades particulares do concreto permeável, em estado fresco ou endurecido, como diminuir a retração, retardar o tempo de pega e melhorar a trabalhabilidade e/ou reduzir a quantidade de água de amassamento.

De acordo com Ferguson (2005) pode ser utilizado aditivo redutor de água ou superplastificante, que aumentam a trabalhabilidade do concreto, ou reduzem a quantidade de água necessária para manter uma mesma trabalhabilidade. Este, normalmente é muito utilizado em concretos permeáveis para melhorar a fluidez e facilidade de lançamento, sem causar escorrimento da pasta pelos agregados (ou precipitação da pasta). Os retardadores de pega servem para manter o concreto com boa trabalhabilidade, durante concretagens mais demoradas, considerando que o concreto permeável tem pega rápida, devido a grande quantidade de vazios em contato com o ar. Os aditivos incorporadores de ar são muito utilizados em países de clima frio, pois são eficientes para os efeitos de congelamento e descongelamento que ocorre com a água no concreto. Os microporos de ar

incorporados através do auxílio do aditivo aliviam a pressão dos cristais congelados de água, não ocasionando problemas no concreto.

Os agregados graúdos, de maneira geral, influenciam bastante nas características do concreto permeável. Ćosić *et al.* (2015) usaram dois tipos de agregados em sua pesquisa, dolomita e escória de aço, com granulometrias diferentes e concluíram que a interconectividade dos poros é mais afetada pelo tipo do agregado do que pelo tamanho, e que maiores porcentagens de agregados de menor granulometria resultaram em maiores resistências à flexão. Outro estudo que levou em consideração a granulometria do agregado utilizado foi o de Zhong e Wille (2016), que afirmam que a diminuição no tamanho do agregado graúdo melhora a resistência do concreto, pela maior área de ligação entre os agregados.

Outro fator que afeta o concreto permeável é a angularidade dos agregados graúdos, que de acordo com Magesvari e Narasimha (2013) é definida pelo formato pontudo dos agregados, sendo que quanto maior a angularidade, mais pontudo será o agregado. Agar-ozbek *et al.* (2013) em sua pesquisa concluíram que, além de notar-se aumento de resistência com a diminuição do tamanho dos agregados, é também notado tal aumento de resistência quando se eleva a texturização e angularidade dos agregados. Isso ocorre devido ao melhor intertravamento mecânico e maior área superficial disponível dos agregados, para a aderência da pasta de cimento, culminando naturalmente no aumento dos pontos de contato. Considerando a variabilidade dos agregados graúdos em diferentes regiões, há a necessidade de um estudo preliminar do concreto permeável com os agregados que serão utilizados na fabricação deste, sempre que não se conhece essa interação.

Os agregados miúdos também podem ser incorporados no concreto permeável. De acordo com o estudo de Bonicelli, Giustozzi e Crispino (2015) a adição de pequena quantidade de agregados miúdos pode melhorar propriedades mecânicas e de superfície do concreto permeável, embora possa causar redução na permeabilidade deste, devido à redução da porosidade.

2.4.2 Características em estado fresco

O concreto permeável em estado fresco difere-se em alguns aspectos ao concreto convencional. O primeiro aspecto que pode ser citado é a baixa quantidade de água quando comparado ao concreto convencional. Na literatura vários autores trabalham com diferentes teores de água nos concretos permeáveis, alguns exemplos podem ser vistos na Tabela 2.

TABELA 2 - Diferentes teores de água utilizados em concretos permeáveis por diferentes autores

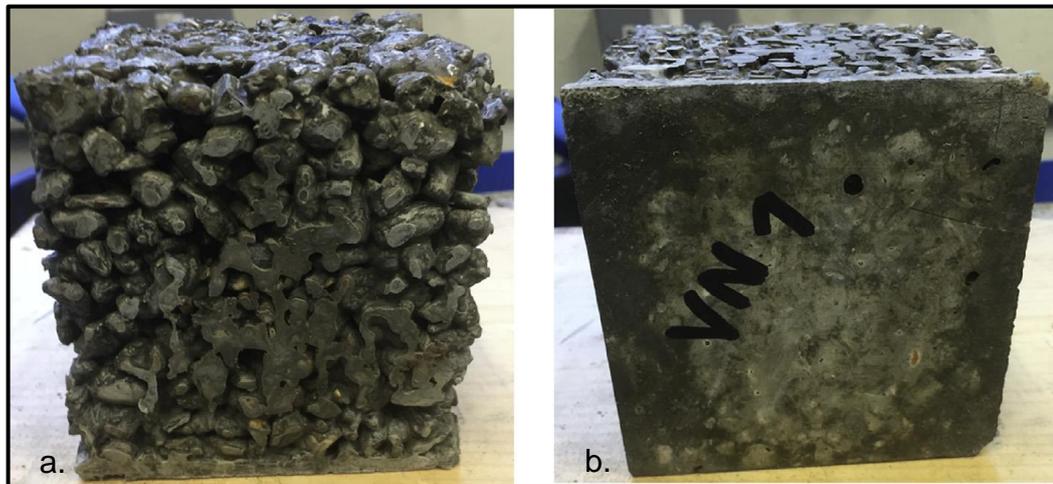
Autor	água/ cimento utilizado	Estudo realizado
Chen <i>et al.</i> (2013)	De 0,28 a 0,34	Análises mecânicas de dois tipos de concretos permeáveis com materiais suplementares e poliméricos, com uso de aditivo superplastificante em alguns casos.
McCain e Dewoolkar (2009)	0,25	Análises mecânicas e de permeabilidade em concreto permeável limpo, e com introdução de areia e sal, para simular situações de neve na superfície do concreto.
Suleiman <i>et al.</i> (2006)	De 0,22 a 0,27	Análise do efeito de compactação em concretos permeáveis com diferentes traços, variando tipos e tamanhos de agregados e também a utilização de aditivos superplastificantes e incorporadores de ar.
Batezini (2013)	0,30	Análises mecânicas e de permeabilidade de concretos permeáveis para pavimentação de áreas destinadas a veículos leves, e análise de placas para pavimento destes concretos com ajuda de software.
Torres, Hu e Ramos (2015)	0,33	Análise das propriedades chave do concreto permeável como: permeabilidade, resistência à compressão e à tração, em função da espessura da pasta de cimento que cobre os agregados.

FONTE: Modificado (CHEN *et al.*, 2013; MCCAIN; DEWOOLKAR, 2009; SULEIMAN *et al.*, 2006; BATEZINI, 2013; TORRES; HU; RAMOS, 2015).

Kia, Wong e Cheeseman (2017) indicam que o teor ideal de água/cimento (a/c) geralmente varia de 0,26 a 0,45. Porém com a utilização de aditivos, é possível encontrar teores de a/c ainda menores que 0,26 na literatura, conforme visto na Tabela 2. Entretanto, a trabalhabilidade da mistura em estado fresco é bem mais

reduzida, tornando inviável o controle de qualidade da mistura por alguns métodos convencionais, aplicáveis em concretos convencionais, tal como o abatimento de tronco de cone (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Elevadas quantidades de água no concreto permeável podem gerar segregação da pasta de cimento, que escorre entre os agregados e se deposita no fundo, podendo ocasionar a obstrução dos poros na parte inferior do concreto permeável, conforme retrata a Figura 3 extraída de Kia, Wong e Cheeseman (2017). A amostra desta Figura é um cubo de 100 mm de lado e mostra que o fundo está completamente bloqueado pela precipitação da pasta, devido ao conteúdo excessivo de: pasta de cimento, relação a/c e/ou compactação. Todos estes fatores podem causar tal problema no concreto permeável.

FIGURA 3 - Concreto permeável: (a) na posição original de moldagem e (b) girado



Fonte: (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017).

Normalmente, para os concretos permeáveis, a melhor maneira de verificação de consistência da mistura é através da verificação visual e tátil do concreto e pela verificação da massa unitária, que é de aproximadamente 70% a massa unitária do concreto convencional (PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT, 2018; BATEZINI, 2013). Para a análise visual, segundo Tennis, Leming e Akers (2004), deve ser tomada uma porção do concreto nas mãos e, com um leve aperto, observar o comportamento da mistura. A melhor consistência será observada com a formação de um aglomerado. Se não formar aglomerado significa que falta água (nota-se um aspecto seco), e se escorrer pasta significa que há excesso de água. A Figura 4

apresenta claramente os diferentes aspectos da mistura com teores baixo, ideal e alto de água.

FIGURA 4 - Amostras de concreto permeável com diferentes teores de água: (a) pouca água, (b) quantidade adequada de água e (c) muita água



Fonte: (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Devido ao elevado índice de vazios, característico de misturas de concreto permeável, normalmente o tempo útil para concretagem é bastante curto depois da mistura pronta (ACI, 2010). Para estender este tempo, é necessário o uso de aditivos retardadores de pega. Este tipo de aditivo mantém o concreto com boa trabalhabilidade durante a concretagem.

2.4.3 Características em estado endurecido

Em estado endurecido, o concreto permeável apresenta alguns aspectos particulares que o difere bastante de concretos convencionais. Essas diferenças se dão principalmente pela ausência de finos, que o torna altamente poroso, mais rugoso e, normalmente menos resistente.

2.4.3.1 Resistência e demais aspectos mecânicos

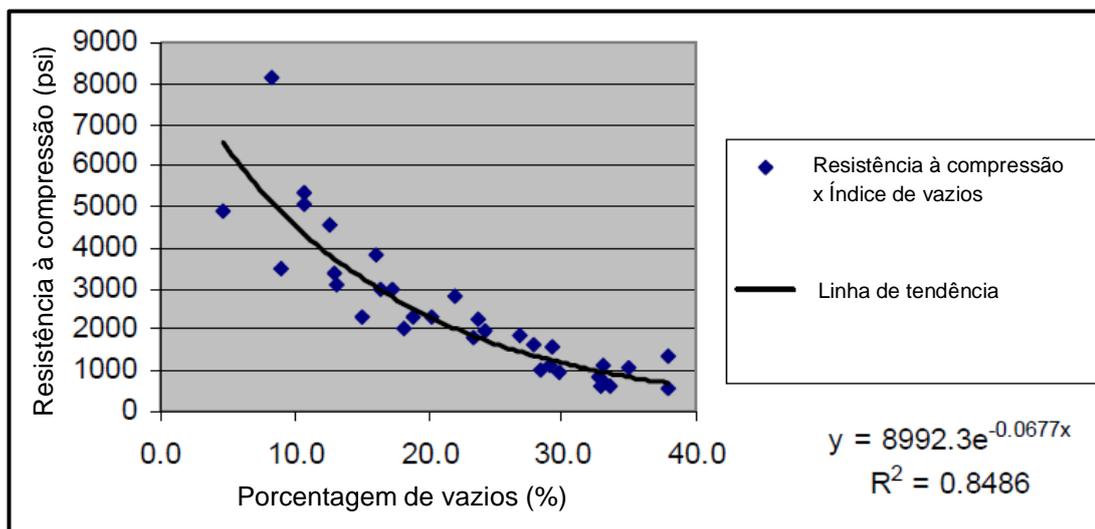
Devido à elevada porosidade, as resistências à compressão e à tração são menores que as observadas nos concretos convencionais, atingindo faixas de 3,5 a 28 MPa para compressão e 1 a 3,8 MPa para a tração na flexão (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

A resistência e os demais aspectos mecânicos dos concretos permeáveis dependem de vários fatores, como os tipos de materiais utilizados, principalmente agregados (materiais de diferentes regiões podem apresentar comportamentos

diferentes na mistura), sua forma e tamanho, o traço utilizado, a intensidade de adensamento ou compactação aplicada na mistura, dentre outros fatores. De maneira geral a resistência está intimamente ligada à porosidade do concreto, pois maiores resistências são alcançadas em concretos menos porosos, então deve haver sempre um equilíbrio entre essas duas propriedades. A porosidade ideal também deve ser mantida para possibilitar a percolação de água através de sua estrutura interna (BATEZINI, 2013; FERGUSON, 2005; SCHAEFER *et al.*, 2006; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; WERNER; HASELBACH, 2017).

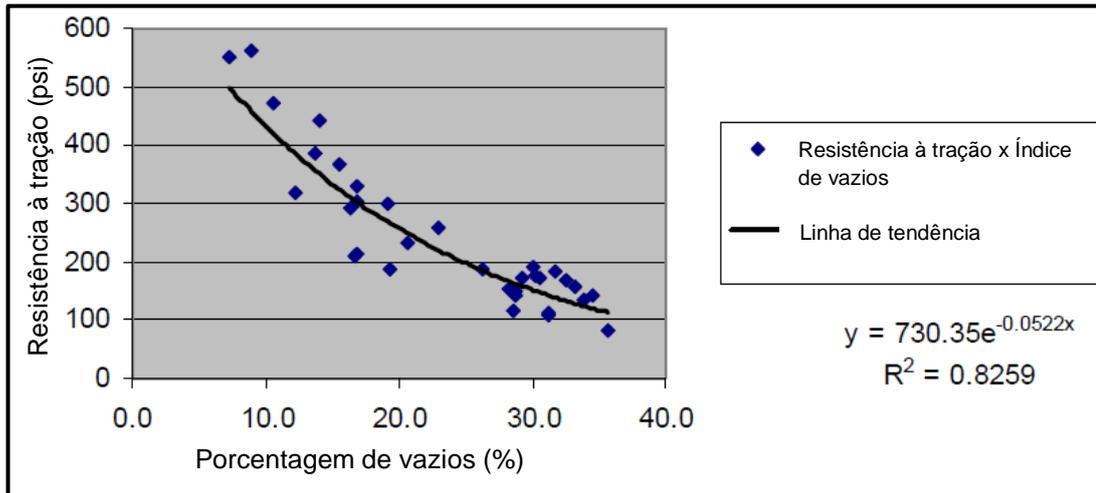
Delatte, Miller e Mrkajic (2007) realizaram alguns estudos em concretos permeáveis, nos estados de Ohio, Kentucky, Indiana, Colorado e Pensilvânia, todos nos EUA. Foram feitas observações em campo, alguns ensaios não destrutivos e ensaios laboratoriais de amostras colhidas em alguns pavimentos, principalmente em estacionamentos, nestes estados americanos. De maneira geral, os aspectos mecânicos apresentados por estes concretos instalados nos pavimentos, são de bastante amplitude, variando de em média 5 a 40 MPa de resistência à compressão e de 1 a 4 MPa de resistência à tração. Como visto neste estudo, é notável que maiores resistências também possam ser alcançadas por este tipo de concreto, embora seja pouco frequente e comumente dependente da porosidade. Nas Figuras 5 e 6 abaixo os autores relacionam a resistência à compressão e à tração com a porcentagem de vazios dos pavimentos avaliados, observando-se as tendências de maiores resistências quando se têm menores porosidades.

FIGURA 5 - Relação entre resistência à compressão e índice de vazios



Fonte: Modificado (DELATTE, MILLER E MRKAJIC, 2007).

FIGURA 6 - Relação entre a resistência à tração e o Índice de vazios

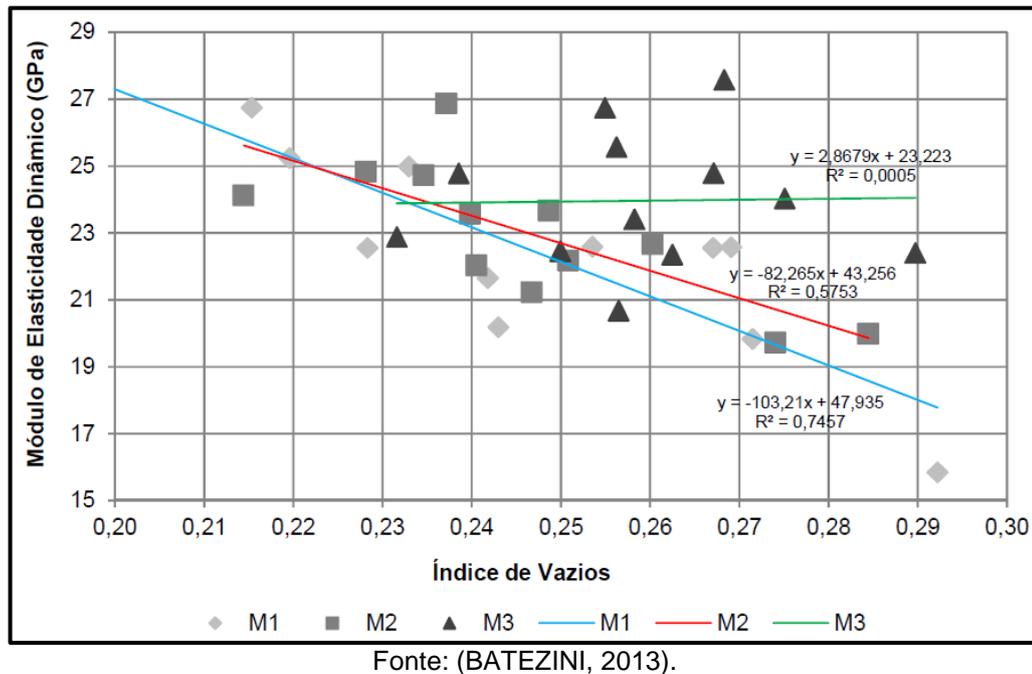


Fonte: Modificado (DELATTE; MILLER; MRKAJIC, 2007).

Batezini (2013) estudou vários aspectos mecânicos de três misturas de concreto permeável em laboratório, variando a granulometria do agregado. As resistências médias à compressão variaram de 7,51 a 8,68 MPa, enquanto que à tração na flexão os resultados variaram de 2,03 a 2,22 MPa. Foram calculados também o módulo de elasticidade estático e dinâmico das misturas, estes variaram de 15,52 a 16,49 GPa e 22,7 a 23,97 GPa, respectivamente. Isso mostra que concretos permeáveis tendem a possuir menores módulos de elasticidade que concretos convencionais, que estão próximos aos 28 GPa.

A Figura 7 apresenta o módulo de elasticidade dinâmico em função do índice de vazios, que permitiu ao autor concluir que o módulo de elasticidade tende a diminuir com o aumento do índice de vazios para todas as misturas, com exceção da mistura M3. O índice de vazios traz a relação de vazios tomando-se por base o volume total igual a uma unidade.

FIGURA 7 - Módulo de elasticidade dinâmico em função do índice de vazios



A substituição de agregados naturais por reciclados é uma alternativa ambientalmente interessante, pois se diminui a extração e transporte de agregados naturais, que tem considerável consumo energético e pode agredir ao meio ambiente e, promove a reutilização de material que seria descartado (TORGAL; JALALI, 2010).

Zaetang *et al.* (2016) substituíram o agregado natural, em concreto permeável, por agregados reciclados selecionados em várias proporções. Eles utilizaram agregados de bloco de concreto reciclado (RBA) e agregados de concreto reciclado (RCA), em várias porcentagens de substituição pelo agregado natural. Ambos superaram o controle (com 100% de agregados naturais, denominado NA100) na resistência à compressão e à abrasão, em determinadas quantidades de substituição. O concreto permeável, com agregados de bloco de concreto reciclado, igualou o controle na resistência à tração na flexão, em praticamente todas as quantidades de substituição. A Tabela 3 traz de maneira resumida os melhores resultados de alguns teores de substituição.

TABELA 3 - Resistência à compressão e flexão, perda de massa à abrasão e índice de vazios de algumas amostras de acordo com Zaetang *et al.* (2016)

ID	Ensaio			Características das misturas		
	Resistência à compressão (MPa)*	Resistência à flexão (MPa)*	Perda de massa de concreto à abrasão (g)	Porosidade total (%)	% de RBA	% de RCA
NA100	13,4	4,1	8,2	25	-	-
RBA40	17,0	4,0*	8,6*	20	40	-
RCA60	15,0	3,9*	5,7	24	-	60
RBA20	15,5*	4,1*	7,5*	23	20	-
RCA40	13,5*	4,1*	5,3	24	-	40

* Valores estimados por pontos obtidos graficamente

Fonte: Modificado (ZAETANG *et al.*, 2016).

A melhoria em algumas propriedades mecânicas, mantendo aceitáveis índices de vazios para determinadas quantidades de substituição de agregados reciclados, se dá, de acordo com os autores, pela melhor ligação entre a pasta de cimento e o agregado reciclado. Os autores sugerem que isso ocorre, pois este apresenta maior porosidade superficial e rugosidade, mesmo que seja mais fraco, quando comparado com agregados naturais. A perda de massa à abrasão apresentada pelos autores foi realizada conforme sugere a ASTM C944 (ASTM, 2012).

Gaedicke, Marines e Miankodila (2014) também obtiveram melhores resultados de resistência à abrasão, em misturas de concreto permeável, com utilização de agregados reciclados de concreto, quando comparado com outros agregados. Os autores também relacionam os bons resultados com este tipo de agregado à rugosidade superficial e ao melhor intertravamento. Estes autores ainda compararam métodos de ensaio à abrasão indicados pela ASTM C944 (ASTM, 2012) e pela ASTM C1747 (ASTM, 2013) e afirmam que este segundo apresenta menor variabilidade e maior confiabilidade para diferentes tipos de agregado e conteúdo de pasta.

Kevern, Schaefer e Wang (2009) estudaram a influência do tipo de cura em misturas de concreto permeável, contendo cinza volante, a partir da realização de ensaios de resistência à flexão e à abrasão. Os autores testaram cobertura com lonas plásticas e componentes de cura pulverizados no concreto, dentre os quais: um composto de óleo de soja, um composto de pigmento branco e um retardador de

evaporação. O controle teve cura realizada ao ar. As resistências à flexão encontradas variaram na faixa de 1,70 MPa, para o concreto curado com o composto de pigmento branco, até 2,40 MPa, para o concreto curado com lona de plástico aos 28 dias. Este apresentou também melhores resultados de abrasão com perda de massa de apenas 4,05 g pelo método indicado pela ASTM C944 (ASTM, 2012). O pior resultado de abrasão foi analisado no concreto de controle (com cura ao ar), que teve perda de massa de 7,37 g.

Como já comentado, a escolha do traço também influencia nas características mecânicas dos concretos permeáveis. Em um estudo sobre fratura em vigas de concreto permeável, Brake, Allahdadi e Adam (2016) determinam as propriedades de dois traços elaborados para o estudo: um de baixa resistência (N), com baixa massa específica, traço 1:6,92 (cimento:agregado) e consumo de cimento de 260 kg/m³, e outro com alta resistência (H), com elevada massa específica, traço 1:3,78 e consumo de cimento de 370 kg/m³. A Tabela 4 resume as principais características físicas e mecânicas destes concretos. Nota-se claramente que a mistura de alta resistência apresenta características mecânicas muito superiores, porém uma menor relação de vazios, refletindo na baixa permeabilidade.

TABELA 4 – Resumo de algumas características físicas e mecânicas de dois traços de concreto permeável

MISTURA	N	H
Resistência à compressão (MPa)	9,00 ± 26%	34,9 ± 9%
Resistência à tração (MPa)	0,98 ± 20%	3,04 ± 32%
Abrasão superficial (perda de massa, g)*	2,40 ± 83%	1,3 ± 54%
Relação de índice de vazios	0,27 ± 3,4%	0,09 ± 16,9%
Permeabilidade (cm/s)	0,86 ± 15%	0,24 ± 37%
massa específica (kg/m ³)	1855 ± 1,0%	2228 ± 1,3%

*Ensaio realizado de acordo com a ASTM C944 (ASTM, 2012).

Fonte: Modificado (BRAKE; ALLAHDADI; ADAM, 2016).

Estudos de fadiga na flexão foram realizados por Chandrappa e Biligiri (2017), os quais descobriram que, no concreto permeável, a relação de tensão atuante pela tensão de ruptura tem bastante influência na resistência à fadiga. Quanto maior esta

relação de tensão, menos ciclos de carregamento são suportados (os autores trabalham com relações de tensão de 0,70, 0,75 e 0,80).

A frequência de aplicação das tensões também foi estudada por Chandrappa e Biligiri (2017). A análise foi realizada aplicando-se frequências de 2 a 10 Hz para as relações de tensão estudadas. Porém, estas não aparentaram influenciar significativamente na resistência à fadiga. Em seus estudos os autores construíram prismas de concreto permeável convencional, em duas misturas, variando somente a granulometria dos agregados britados, sendo que um foi com granulometria única, passante na peneira 9,5 mm e retido na peneira de 6,3 mm (P2) e outro foi uma mistura em igual proporção de quatro faixas granulométricas de 19 mm a 4,75 mm (P6). A Tabela 5 caracteriza as misturas e traz a média de resistência à flexão alcançada por ambas. Nota-se que a utilização de várias granulometrias alcançou menores porcentagens de vazios e maior resistência média à flexão.

TABELA 5 - Caracterização das misturas de Chandrappa e Biligiri (2017)

Mistura	Caracterização dos concretos					
	Água/cimento	Cimento: Agregado	Consumo de cimento (kg/m ³)	Massa específica média (kg/m ³)	Porcentagem de vazios média (%)	Resistência à flexão média (MPa)
P2	0,35	1:4	376,53	1997,84	27,82	2,22
P6	0,35	1:4	380,02	2167,56	20,19	2,89

Fonte: Modificado (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2017).

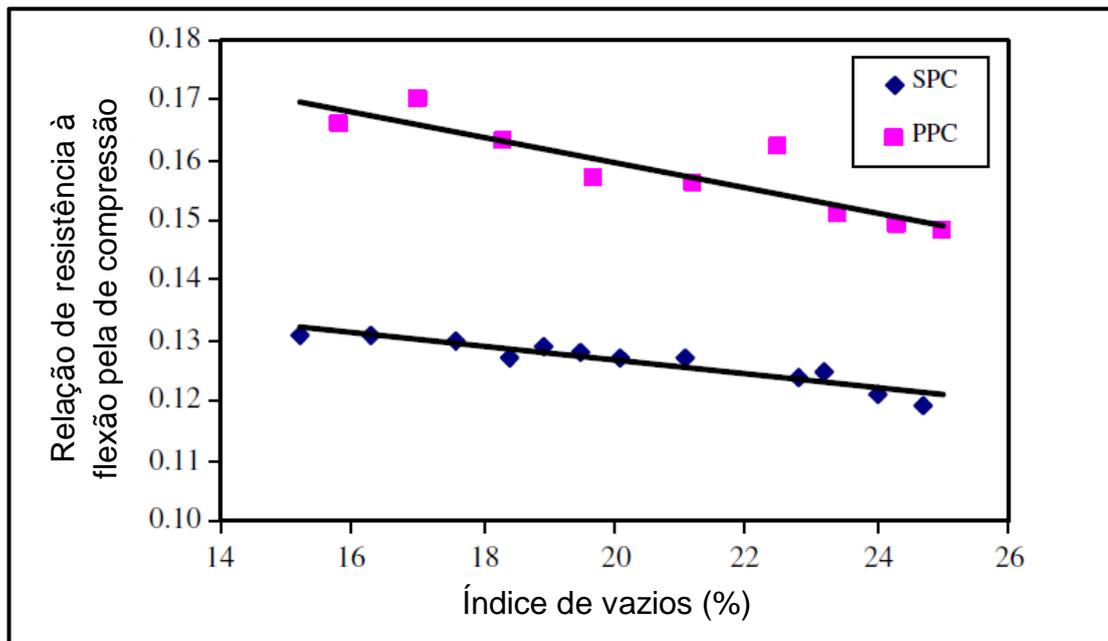
Estudos com a incorporação de materiais cimentícios suplementares, como o de Zhong e Wille (2015) que adicionaram sílica ativa em suas misturas, mostraram muito potencial do ponto de vista mecânico. Estes autores variaram a granulometria do agregado e a proporção de aglomerante:agregado, juntamente com a utilização da sílica ativa e obtiveram resistências à compressão de 14,6 a 65,8 MPa em concretos permeáveis com porosidade entre 19,8 a 30,2%.

Chen *et al.* (2013) também mostram que altas resistências podem ser alcançadas em concretos permeáveis com aceitáveis índices de vazios através da incorporação de materiais cimentícios suplementares e polímeros. Os autores trabalharam com dois tipos de concretos permeáveis, um incorporando sílica ativa e cinza volante ao traço e outro incorporando um material polimérico à mistura. Foi

possível obter resistências à compressão de 32 a 46 MPa de concretos permeáveis com 15 a 25% de porosidade aos 28 dias de idade.

Os autores também obtiveram resultados satisfatórios em relação à resistência à flexão, fratura e fadiga destes dois tipos de concretos, com destaque especial aos concretos com a incorporação do material polimérico, que apresentaram desempenho superior em relação aos concretos com os materiais cimentícios suplementares, evidenciando menores índices de fissurações e propagação de fissuras e maior suporte em relação à fadiga, para quaisquer níveis de tensão aplicados aos concretos. Além dos bons resultados observados à compressão, as resistências à flexão destes concretos variaram de 4,2 a 7,3 MPa. Nota-se, a partir da Figura 8, que é superior a relação de resistência à flexão pela de compressão, aos 28 dias, das misturas com incorporação de material polimérico (PPC), quando comparadas à incorporação de materiais cimentícios suplementares (SPC), e que maiores porosidades das misturas diminuem essa relação (CHEN *et al.*, 2013).

FIGURA 8 - Relação de resistência à flexão pela de compressão em concretos permeáveis



Fonte: Modificado (CHEN *et al.*, 2013).

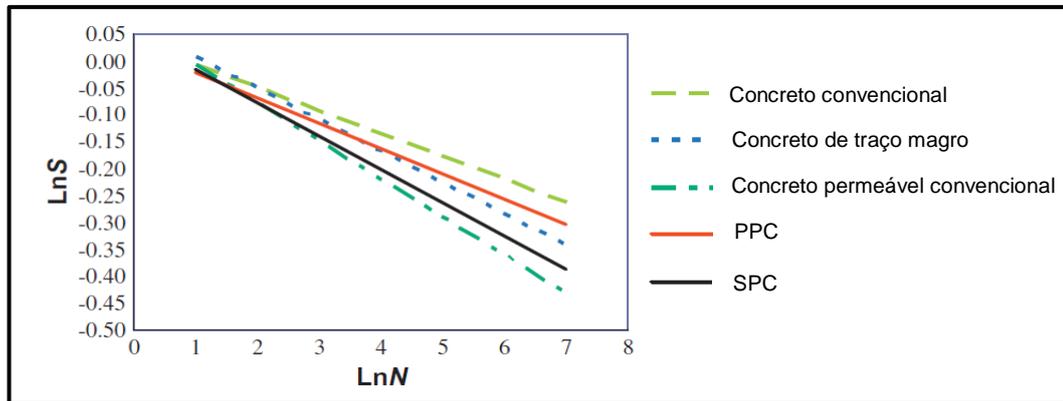
Os autores associam a melhor resistência das misturas com material polimérico a possível hipótese de que este material fortalece a zona de transição

entre agregado e pasta de cimento e também a microestrutura da matriz, tornando-o menos frágil e mais resistente à flexão.

Essa hipótese também é assumida pela maior resistência à fratura dos concretos com material polimérico, devido a melhor colagem da pasta com os agregados. Pois, de acordo com os autores, nos concretos permeáveis convencionais a ruptura ocorre na zona de transição, enquanto que nestes, com o material polimérico, a ruptura ocorreu no agregado. Conforme indicado por Chen *et al.* (2013) em sua pesquisa, foram avaliadas três misturas na resistência à fratura, sendo uma com a incorporação de materiais cimentícios suplementares (SPC) e duas com incorporação de material polimérico (PPC). Observou-se que os aumentos de resistência das misturas com material polimérico foram de 45,3% e 56,9% em comparação com a mistura com incorporação de materiais cimentícios suplementares.

Chen *et al.* (2013) fazem uma comparação de seus dados com os de Zheng, Wang e Hu (2004), que apresentam dados de probabilidade de ruptura de concreto convencional, concreto magro e concreto permeável convencional em situações de carregamentos cíclicos (Figura 9). Esta análise conjunta, proposta por Chen *et al.* (2013), leva em consideração a probabilidade de ruptura abaixo de 50% para todos os concretos, observando seus respectivos comportamentos à fadiga através das linhas de distribuição de probabilidade Weibull, onde $\ln S$ está relacionado à relação de tensões atuantes pelas resistentes e $\ln N$ está relacionado ao número de ciclos. Ao observar a Figura 9, pode se notar que ambas as misturas de Chen *et al.* (2013) têm desempenho superior ao concreto permeável convencional. A mistura (PPC) apresenta-se superior à mistura SPC, sendo a primeira muito próxima do concreto magro.

FIGURA 9 - LnS–LnN de diferentes concretos abaixo de 50% de probabilidade de ruptura



Fonte: Modificado (CHEN *et al.*, 2013).

É notável que a incorporação de adições pode melhorar bastante o desempenho do concreto permeável. Essa alternativa torna-se interessante, quando se almeja a viabilização deste tipo de pavimento para situações de maiores volumes de tráfego, por onde trafegam veículos pesados.

Nesse sentido, como apresentado pela literatura, o concreto permeável para pavimentação, além de resistência à compressão, deve apresentar também comportamento satisfatório em relação aos esforços de tração na flexão, abrasão e fadiga. Todos esses fatores são importantes, pois estão intimamente ligados aos tipos de veículos que transitarão no pavimento e seu respectivo volume de tráfego.

Uma análise de desempenho estrutural de concreto permeável, realizada em campo por Goede e Haselbach (2012), levou em consideração o “*pavement condition index*” (PCI), que a partir de procedimentos descritos pela D6433 (ASTM, 2007; substituída pela equivalente em ASTM, 2018) quantificaram e classificaram tal desempenho. Concluíram que, pavimentos de concreto permeável com espessura adequada podem alcançar desempenhos estruturais satisfatórios para vida útil de projeto elevada, quando equiparado com pavimentos convencionais..

Em outra publicação, Delatte, Mrkajic e Miller (2009), a fim de investigar mais propriedades de concretos permeáveis já instalados em campo nos estados de Ohio, Kentucky, Indiana e Colorado, observaram que:

- a) a fragmentação ou descolagem dos agregados da pasta (*Raveling*, em inglês), aparece mais frequentemente nos pavimentos logo após sua construção. Esta diminui à medida que o tempo passa e os agregados

superficiais soltos vão sendo removidos. Isto acontece normalmente devido a baixas relações água/cimento, pouca compactação, ou clima muito seco durante a concretagem, causando secagem;

- b) nesses pavimentos, as principais causas de rachaduras e trincamentos estão associadas ao tráfego de veículos pesados e a falta ou espaçamento insuficiente de juntas de retração;
- c) a principal causa da obstrução dos poros é o entupimento por sedimento e detritos carregados até estes. Em alguns locais foi notado o entupimento, pela aglomeração de pasta, excesso de compactação ou teores excessivos de água na mistura, sendo que estes foram causados na fase de construção do pavimento.

A lavagem com pressão (método de limpeza e remoção de partículas que entopem o concreto permeável) foi realizada em um pavimento em Kentucky e mostrou eficiência, pois houve a restauração da aparência e permeabilidade do pavimento. Porém, técnica semelhante não foi bem sucedida em outro pavimento devido a este conter detritos de telha.

2.4.3.2 Permeabilidade de concretos permeáveis

A permeabilidade é a propriedade mais importante para os pavimentos de concreto permeável, que tem por principal função escoar águas pluviais. Esta está intimamente ligada à porosidade do concreto, pois quanto maior a porosidade, maior a permeabilidade. Porém, vale ressaltar que a distribuição dos poros interfere na permeabilidade e é possível que ocorra a obstrução dos mesmos na camada inferior pela precipitação da pasta (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017). Com isto, mesmo com altos índices de vazios, devido à obstrução o concreto não apresenta permeabilidade satisfatória.

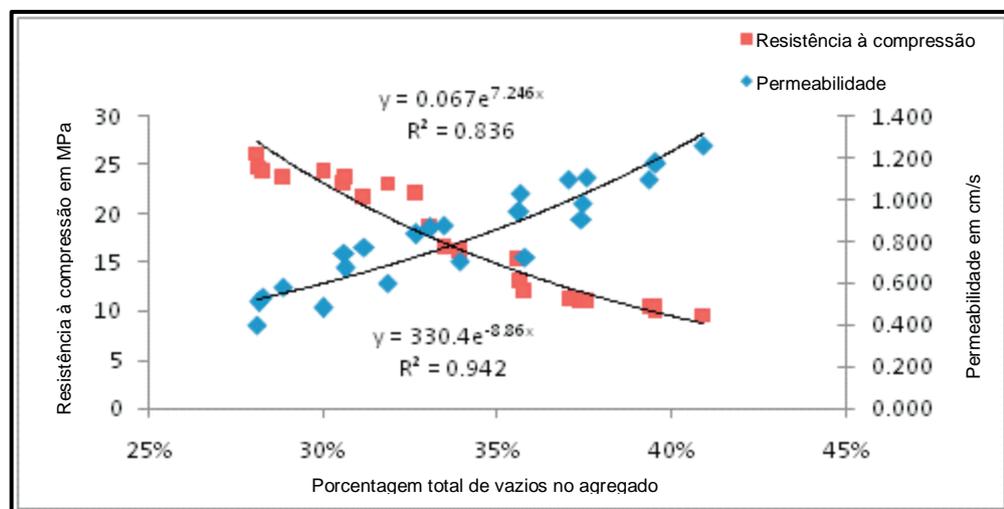
De maneira geral, a permeabilidade e as demais propriedades do concreto permeável apresenta grande variabilidade. Tennis, Leming e Akers (2004) afirmam que a faixa de variação do coeficiente de permeabilidade costuma ser de 0,2 cm/s podendo ser até maior que 1,2 cm/s, embora na literatura sejam comuns valores ainda fora dessa faixa.

Batezini (2013) trabalhou em laboratório com três misturas de concreto permeável, variando a granulometria do agregado. O autor obteve porcentagem de

vazios média na faixa de 24 a 25% nas três misturas e permeabilidades médias de 0,13 a 0,14 cm/s.

Maguesvari e Narasimha (2013) estudaram a influência das quantidades de agregados graúdos e miúdos em concretos permeáveis. Trabalharam com várias dimensões de agregados graúdos e obtiveram coeficientes de permeabilidade variando de 0,4 cm/s a 1,26 cm/s. Este crescimento se deu de forma exponencial com o aumento do índice de vazios presentes nos agregados. Na Figura 10, obtida pelos autores, se observa a variação da resistência e da permeabilidade com o índice de vazios presente nos agregados.

FIGURA 10 - Efeito da porosidade total do agregado no coeficiente de permeabilidade e na resistência à compressão

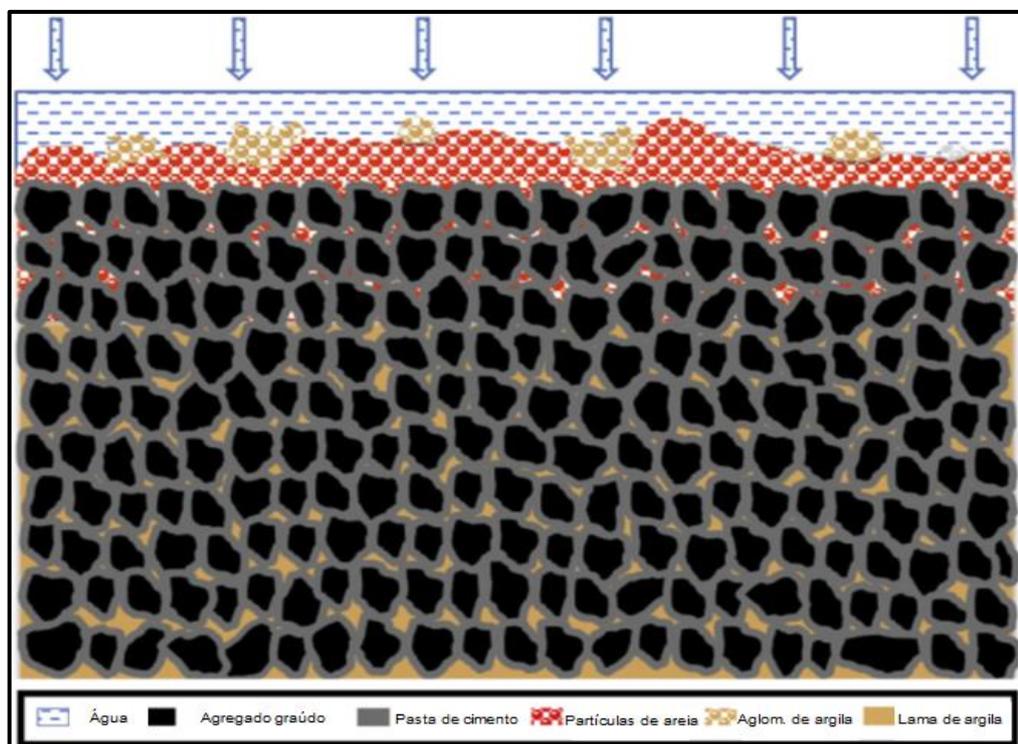


Fonte: Modificado (MAGUESVARI; NARASIMHA, 2013).

Kia, Wong e Cheeseman (2018) também concluíram que a permeabilidade aumenta exponencialmente à medida que se aumenta a porosidade em concretos permeáveis e, para as misturas por eles estudadas, as taxas de permeabilidade variaram de 0,1 a 1,7 cm/s com índices de vazios de 8% a 32%. Os autores trabalharam com concretos permeáveis feitos em laboratório e comercialmente disponíveis por empresas do ramo. Os autores estudaram processos de colmatação de concretos permeáveis e outros materiais, para comparação, aplicando ciclos de água corrente com areia e argila separadas e simultaneamente. Observaram que reduções drásticas de permeabilidade podem ocorrer principalmente com areia e argila aplicadas na corrente d'água simultaneamente, sendo que a colmatação total

ocorreu entre 2 a 13 ciclos para todas as amostras, dependendo da porosidade e tipo de amostra. O concreto permeável, que apresentou melhor desempenho, colmatou totalmente em 8 ciclos. As tendências de deposição das partículas na estrutura da camada de concreto permeável são ilustradas na Figura 11. Nesta figura pode-se perceber que após os ciclos as partículas maiores, normalmente de areia e aglomerados de argila, tenderam a permanecer na superfície superior do concreto permeável, enquanto que uma lama de argila vai sendo transportada através dos poros e pode ir formando pequenos aglomerados nos poros inferiores, entupindo estes também.

FIGURA 11 - Esquema mostrando como partículas de tamanhos diferentes podem entupir o concreto permeável



Fonte: Modificado (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2018).

Foram estudados em laboratório alguns modelos de quantificação de redução de permeabilidade por colmatagem (CUI, *et al.*, 2016; DEO; SUMANASOORIYA; NEITHALATH, 2010). Porém, na literatura são observados poucos autores que trabalham com modelos em campo sobre o tempo de serviço de pavimentos permeáveis quanto à colmatagem, visto que este depende de muitos fatores externos específicos de cada situação.

Saaly, Hedayat, Golroo (2018) fizeram acompanhamento das taxas de permeabilidade de placas de concreto permeável com simulação de eventos pluviométricos sem qualquer tipo de manutenção, durante aproximadamente quatro meses. As placas ficaram expostas ao ambiente externo. De acordo com os autores, houve redução drástica das taxas de permeabilidade no decorrer dos quatro meses de mais de 12 cm/s inicialmente, para menos de 2 cm/s nas últimas semanas. De acordo com o modelo desenvolvido pelos autores, tal redução se deu de forma exponencial. Winston *et al.* (2016) também perceberam redução da taxa de infiltração em pavimentos construídos no norte da Suécia com o passar dos anos.

Devido à colmatação tornam-se necessários cuidados preventivos na construção do pavimento permeável, certificando-se que os arredores do pavimento não facilitem o carreamento de detritos ou partículas de solo ou vegetais, que acelerem o processo de colmatação. A manutenção periódica, ou processos de reabilitação, costumam ser utilizados para manter ou recuperar a permeabilidade destes pavimentos e, normalmente, baseiam-se em processos de limpeza dos detritos alocados ou incrustados nos poros. Os métodos mais comuns para realização desta recuperação são a aspiração, expiração ou lavagem pressurizada com lavadoras de alta pressão (CURVO, 2017; GOEDE, 2009; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

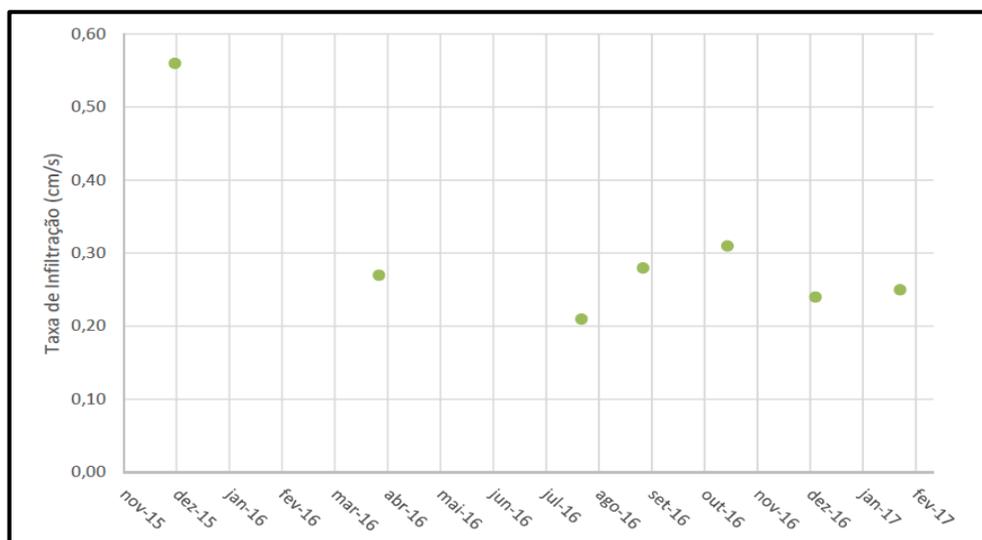
Delatte, Miller e Mrkajic (2007) concluíram que a realização de manutenção com lavagem por alta pressão em um pavimento bastante colmatado trouxe melhoras na capacidade de infiltração em aproximadamente 35%. Winston *et al.* (2016) estudaram alguns tipos de tratamentos como a limpeza por aspiração, lavagem por alta pressão e fresagem em diferentes pavimentos de asfalto poroso e perceberam que todos os métodos mostraram melhoras nas taxas de permeabilidade. A lavagem por alta pressão mostrou maior eficiência que a limpeza por aspiração, recuperando boa parte da permeabilidade. Entretanto, a fresagem foi a técnica que mostrou mais eficiência na recuperação da permeabilidade, caracterizada pela remoção e reinstalação de uma parte da camada superficial do asfalto poroso, o que a torna a mais cara.

A manutenção de pavimentos permeáveis quando sua capacidade de infiltração se torna parcialmente ou totalmente comprometida é comum, porém é pouco comentada na literatura a realização de manutenção preventiva. Em alguns pavimentos permeáveis são realizadas varrições periódicas, porém sem estudos

com profundidade de detalhes sobre o comportamento à permeabilidade com o passar do tempo (WINSTON *et al.*, 2016).

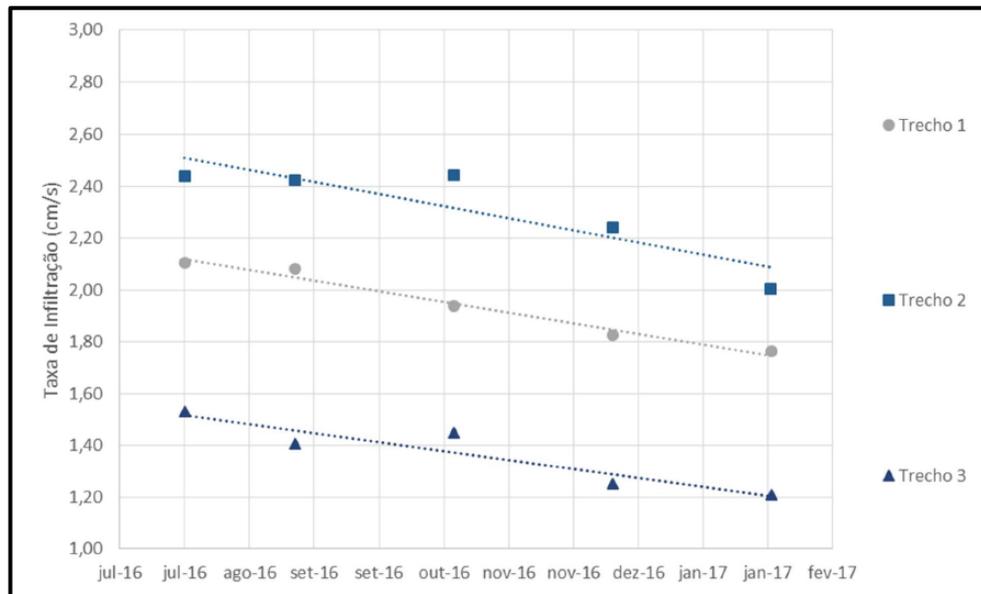
Curvo (2017) trata, em sua dissertação, da aplicação em campo de um traço de concreto permeável. Em sua pesquisa analisa criticamente todas as etapas construtivas, com o objetivo de aferir a drenabilidade dos concretos permeáveis *in loco*, ao longo de alguns meses após a concretagem. O autor trabalhou com a aplicação *in loco* de uma calçada preliminar em um local gramado e com muitas árvores no entorno. Posteriormente construiu uma calçada definitiva para sua pesquisa, em um local com influência mínima de árvores ou outros detritos, dividida em três trechos: o primeiro permitia a infiltração de água no solo, o segundo contou com a impermeabilização do subleito com lona plástica, construindo-se um sistema de drenagem e coleta da água e o terceiro teve a mistura desenvolvida por uma empresa parceira. O autor observou que a calçada preliminar, construída próxima a árvores e em região gramada, teve uma queda brusca nas taxas de infiltração devido à colmatação por detritos orgânicos. Nos três trechos da calçada definitiva, a diminuição das taxas de infiltração ocorreu de maneira mais linear e menor, pois inevitavelmente sempre perde-se parte da permeabilidade em ambientes externos. As Figuras 12 e 13 mostram as médias ao decorrer do tempo dos ensaios de infiltração e sua tendência, para o calçamento preliminar e para os três trechos definitivos respectivamente.

FIGURA 12 - Médias - Taxas de Infiltração - Calçada Preliminar



Fonte: (CURVO, 2017).

FIGURA 13 - Médias das taxas de infiltração - Trechos 1, 2 e 3 - calçada definitiva



Fonte: (CURVO, 2017).

Oliveira (2017), que substituiu parcialmente agregados naturais por agregados de concreto reciclado em 15 e 20%, encontrou taxas de permeabilidade muito próximas em todas as situações, mesmo com 100% de agregados naturais, na ordem de 0,14 cm/s em ensaios de carga constante, e 0,44 cm/s em ensaios de carga variável, aproximadamente. A autora ainda conclui que o procedimento empregado influencia nos resultados de permeabilidade dos vários métodos disponíveis, tanto em laboratório quanto em campo. Quanto à colmatação também estudada pela autora, concluiu-se que o tipo de material influencia significativamente na aderência deste com os poros de concreto permeável, principalmente observando o comportamento de argila junto com areia.

Werner e Haselbach (2017) realizaram um estudo em campo sobre o desempenho hidráulico de superfícies de concreto permeável, em relação a mudanças de temperatura ambiente, colmatação e recuperação de porosidade. Os autores observaram taxas baixas de infiltração, variando de 0,0043 cm/s a 0,1674 cm/s. No trabalho em questão, notou-se uma leve tendência a se obter taxas de infiltração menores em temperaturas ambientes menores. Isso se deve, de acordo com os autores, à variação significativa da viscosidade dinâmica da com a temperatura (de 0°C a 38°C a viscosidade varia em torno de 163% de acordo com Emerson e Traver, 2008), com viscosidade dinâmica mais elevada em temperaturas

mais baixas. Os autores afirmam ainda que o resultado obtido pelo método prescrito pela ASTM C1701 (ASTM, 2017), utilizada para determinação da taxa de infiltração de superfícies de concreto permeável em campo, pode variar após um teste inicial, devido ao carreamento de pequenas partículas desagregadas ou de sujeira na estrutura porosa interna, por este motivo é indicado realizar um segundo teste.

Kayhanian *et al.* (2012) estudaram 20 pavimentos de estacionamentos em concreto permeável em diferentes locais no estado da Califórnia (EUA), quanto à permeabilidade e algumas características físicas e hidrológicas. Realizando ensaios *in situ*, as permeabilidades variaram muito, de praticamente zero em alguns locais até 1,986 cm/s. Vários são os fatores que influenciam nesta ampla variabilidade, de acordo com os autores um dos principais aparenta ser a idade dos pavimentos. Pavimentos mais velhos têm tendência a menores permeabilidades, devido colmatação natural com o passar do tempo. Outros fatores indicados pelos autores incluem a presença de partículas finas sedimentadas nos pavimentos e, com menor influência fatores como temperaturas ambientes superiores aos 30 °C, que influenciam na deposição da borracha dos pneus no pavimento e presença de vegetação ao redor dos pavimentos que também aceleram o processo de colmatação.

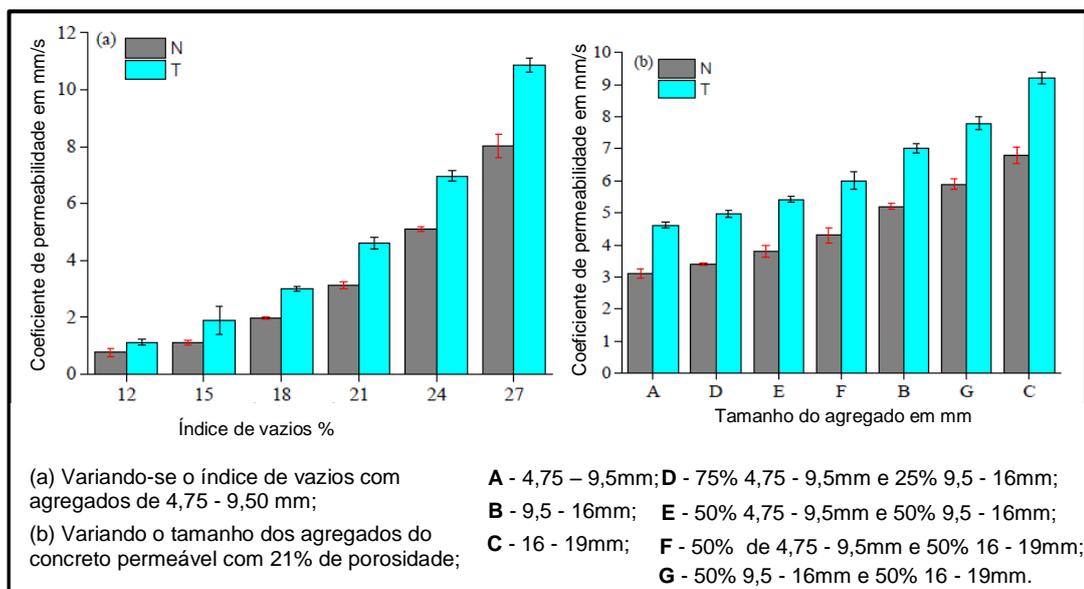
Ao observar análises de imagem de amostras, Kayhanian *et al.* (2012) verificaram que a parte superficial da camada do pavimento em concreto permeável, equivalente aos 25 mm superiores, apresentam menores taxas de permeabilidade. Isto levou os autores à indicação de que a colmatação mostra-se mais frequente nessa região superficial do pavimento.

2.4.3.3 Ensaio de permeabilidade e taxa de infiltração

O coeficiente de permeabilidade ou taxa de infiltração (ou ainda condutividade hidráulica) em concretos permeáveis podem ser aferidos através de vários métodos diferentes. Em laboratório normalmente utilizam-se permeômetros de carga constante ou variável para determinação do coeficiente de permeabilidade. *In loco*, existem procedimentos experimentados por pesquisadores e recomendações técnicas para obtenção da taxa de infiltração em determinados pontos de um pavimento.

Em seu trabalho, Liu *et al.* (2018) estudaram porosidade, distribuição dos poros, coeficiente de permeabilidade e propriedades mecânicas de concretos permeáveis através de testes em laboratório. Os autores avaliaram a permeabilidade com permeâmetro de carga constante, de duas maneiras distintas, calculando o coeficiente de permeabilidade a partir da lei de Darcy. A primeira consistiu no ensaio feito de maneira tradicional (T). A segunda realizou-se vedação das laterais do corpo de prova com vaselina e papel filme (N). Isto elimina a percolação de água entre as laterais do corpo de prova (CP) e a parede do permeâmetro, que pode afetar a veracidade dos resultados devido ao maior fluxo de água passante durante o ensaio por essas laterais em face com a parede. A Figura 14 mostra resultados médios e desvio padrão de alguns ensaios realizados pelos autores através dos dois métodos para o coeficiente de permeabilidade. Os autores compararam os dois métodos e mostraram a partir da Figura 14, como se comporta o coeficiente de permeabilidade em (a) com a influência da porosidade dentro de uma mesma granulometria de agregado e em (b) com a influência do tamanho do agregado mantendo o índice de vazios constante.

FIGURA 14 - Coeficiente de permeabilidade do concreto permeável em dois diferentes métodos



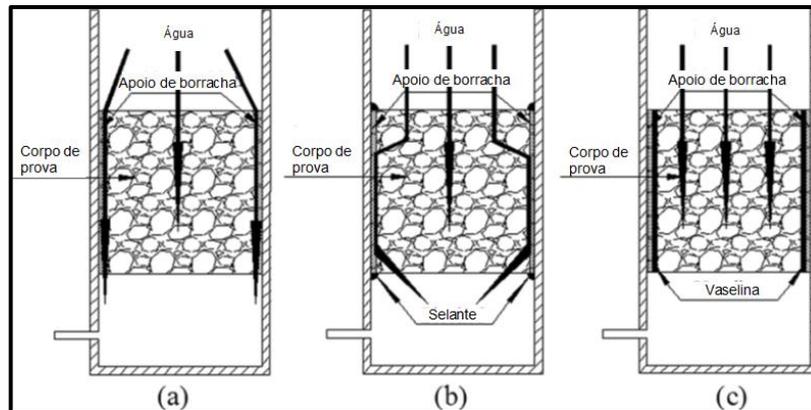
Fonte: Modificado (LIU *et al.*, 2018).

É notável que com a vedação da lateral dos corpos de prova, menores coeficientes de permeabilidade foram observados, o que confirma a hipótese sobre

considerável quantidade de água percolar pelas laterais dos corpos de prova. A tendência de aumento de permeabilidade em concretos com maiores índices de vazios é observada, como já esperado. Também se percebeu que, para um mesmo índice de vazios, o coeficiente de permeabilidade aumenta à medida que o tamanho do agregado aumenta. De acordo com Liu *et al.* (2018) isso acontece devido ao maior tamanho dos poros para agregados maiores, mesmo mantendo o mesmo índice de vazios. Em ambos os casos, a diferença do coeficiente de permeabilidade entre os dois métodos de ensaio (com e sem a vedação da lateral do corpo de prova e a parede) aumenta na medida em que se aumentam ambos: a porosidade (devido ao maior volume de poros também nas laterais) e o tamanho dos agregados para uma mesma porosidade (devido ao maior tamanho dos poros das laterais do corpo de prova).

Esse novo método de ensaio, com vedação entre toda lateral do corpo de prova e permeâmetro, já havia sido recomendado de forma semelhante por Cui *et al.* (2014), que estudaram ensaios de permeabilidade por carga constante usando a lei de Darcy. Foram experimentadas três situações diferentes. A primeira, de maneira convencional, sem nenhuma vedação lateral nas paredes dos corpos de prova. A segunda, da maneira conforme recomendada por Yang (2008), que consiste em selar lateralmente somente o topo e a base dos corpos de prova, permitindo que toda a extensão lateral do corpo de prova fique diretamente em contato com a parede do permeâmetro. E, o terceiro método, selando toda a lateral do corpo de prova com vaselina. Em amostras extraídas mecanicamente de placas prontas de concreto permeável, todos os métodos apresentaram permeabilidades semelhantes, porém em corpos de prova moldados, este terceiro método se mostrou muito mais próximo com os resultados obtidos para os corpos de prova extraídos mecanicamente. A Figura 15 esquematiza os três métodos de vedação entre os corpos de prova, e o permeâmetro e o caminho da água, sendo: a) maneira convencional; b) conforme recomendada por Yang (2008) e c) novo método proposto por Cui *et al.* (2014).

FIGURA 15 - Esquemas de vedação lateral e comportamento de percolação da água através do corpo de prova



Fonte: Modificado (CUI *et al.*, 2014).

Haselbach (2010) realizou ensaios de infiltração de uma forma diferente. O ensaio consiste basicamente em verter água manualmente nos corpos de prova, vedados lateralmente com material plástico que envolva eficientemente as amostras nas laterais, de maneira que na superfície superior haja uma sobra no plástico suficiente para manter uma pequena coluna de água. A taxa de infiltração é dada pela divisão do volume que passou pelo sistema dividido pela área da seção transversal da amostra e o tempo para a percolação do volume total.

Haselbach *et al.* (2017) também realizaram ensaio bastante semelhante, com algumas modificações e afirmam que tal ensaio visa estabelecer a realização do ensaio sugerido pela ASTM C1701 (ASTM, 2017) de uma maneira modificada e aplicável para amostras cilíndricas e núcleos extraídos de pavimentos. Nesta publicação, os autores trabalharam com duas situações: a primeira como já citado, envolvendo todo o corpo de prova cilíndrico com material plástico, vedando-o lateralmente impedindo o fluxo horizontal. Na segunda situação houve o envolvimento com o material plástico somente em 15 mm do topo para baixo, deixando novamente uma sobra do topo para cima para permitir uma pequena coluna de água nos ensaios, toda lateral do corpo de prova ficou livre de modo a permitir também o fluxo horizontal de água. A Figura 16 exemplifica os corpos de prova, à esquerda sem envolvimento total e à direita com envolvimento por material plástico.

FIGURA 16 - Corpos de prova para ensaio de infiltração: à esquerda sem envolvimento total e à direita com envolvimento por material plástico



Fonte: (HASELBACH *et al.*, 2017).

Os autores concluíram que a condição sem envolvimento lateral pelo filme plástico apresentou permeabilidade 20% maior que o com envolvimento, sendo um valor relativamente baixo. Para este ensaio, foi recentemente desenvolvida uma normatização, a ISO 17785-1 (ISO, 2016), que altera pequenos detalhes no procedimento.

Para os ensaios de condutividade hidráulica dos concretos permeáveis da presente dissertação, foram utilizados os métodos descritos por Haselbach (2010) e pela ISO 17785-1 (ISO, 2016) nos corpos de prova moldados em laboratório, tendo em vista que estes ensaios buscam reproduzir de maneira modificada o método da ASTM C1701 (ASTM, 2017) conforme explicam Haselbach *et al.* (2017) e ainda foi utilizado o método da ASTM C1701 (ASTM, 2017) para aferição da taxa de infiltração em campo.

Li, Kayhanian e Harvey (2013) realizaram uma pesquisa na qual se comparou métodos de aferição de permeabilidade em campo ASTM C1701 (ASTM, 2017) com método do *National Center for Asphalt Technology* (NCAT). Os estudos foram conduzidos em seções de teste experimentais com concreto permeável, asfalto poroso e *pavers* de concreto permeável intertravados. Para o método ASTM C1701 (ASTM, 2017) as taxas de infiltração variaram de 0,02 cm/s para o asfalto poroso até 0,82 cm/s para os *pavers* de concreto permeável intertravados. Para o método NCAT as taxas de permeabilidade variaram de 0,21 cm/s para os *pavers* de concreto permeável intertravados até 2,02 cm/s para o concreto permeável. Quanto à variabilidade destes, em ensaios repetidos em um mesmo ponto, foi observado

desvio padrão máximo de 0,11 cm/s para o método ASTM C1701 (ASTM, 2017) e 0,40 cm/s para o método NCAT. Embora o método NCAT tenha apresentado maior desvio, seu coeficiente de variação (CV) foi menor, em torno de 10% devido às maiores taxas de permeabilidade observadas, contra 30% do método ASTM C1701 (ASTM, 2017).

Considerando também a variabilidade dos dados coletados de taxa de infiltração para o método ASTM C1701 (ASTM, 2017), agora entre diferentes pontos de um mesmo trecho, Curvo (2017) em sua calçada definitiva que foi construída em um local de baixa incidência de detritos orgânicos, percebeu maior desvio padrão no trecho 1, logo no ensaio de infiltração inicial. A taxa de infiltração média observada foi de 2,10 cm/s, enquanto que o desvio entre os 12 diferentes pontos ensaiados foi de 0,72 cm/s com coeficiente de variação de 34,14%.

2.4.4 Projeto do pavimento

O pavimento permeável deve ser projetado para atender tanto as características hidráulicas, apresentando eficiência como estrutura drenante para as chuvas previstas no local, quanto suportar as ações impostas a este pavimento pelo tráfego previsto também anteriormente.

O primeiro passo, antes mesmo desses dimensionamentos, é saber se o pavimento em concreto permeável é a solução mais adequada para o local pretendido. Estudos e levantamentos devem ser realizados, buscando informações básicas que são essenciais para o bom funcionamento deste tipo de pavimento, como as condições do solo e sua permeabilidade, existência de lençol freático abaixo do pavimento e susceptibilidade ao carreamento de finos, cargas poluentes ou detritos em sua superfície (SUZUKI; AZEVEDO; KABBACH JÚNIOR, 2013).

A partir disso, o projeto deve ser concebido considerando tais características juntamente com o clima local e o tráfego. As precipitações esperadas e seu tempo de retorno devem ser considerados para o dimensionamento hidráulico, baseado na capacidade de armazenamento da água pela estrutura até que esta seja infiltrada ou direcionada para a rede de drenagem caso exista. Para o dimensionamento mecânico, as cargas a serem consideradas devem ser do veículo tipo mais pesado que transitará no pavimento. Realizados ambos os dimensionamentos, utiliza-se a

maior espessura de pavimento necessária (CURVO, 2017; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Cuidados especiais devem ser tomados com solos expansivos ou argilosos, principalmente pela baixa permeabilidade e suporte de cargas que podem apresentar. Caso opte-se pela construção de pavimentos permeáveis nestes tipos de solo, recomenda-se a remoção e substituição por solos de granulometria maior, como areia e pedras, por exemplo (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

2.4.5 Fabricação e lançamento de concretos permeáveis

Para a construção de pavimentos permeáveis o primeiro passo é a preparação do subleito e base. Essa preparação deve ser realizada de acordo com os pré-requisitos idealizados no projeto do pavimento, que leva em consideração o tipo de subleito, grau de compactação, tipo e espessura da base. A preparação deve incluir a regularização tanto do subleito como da base. No caso de haver tubos de drenagem, direcionamento e afastamento ou coleta do escoamento, este deve ser previamente alocado e instalado juntamente com a base. Outra recomendação muito importante é o pré-umedecimento da base regularizada antes da concretagem com o concreto permeável, visto que este contém pouca água e uma estrutura altamente porosa, estando sujeito à perda de água de amassamento para a camada inferior, se esta estiver seca, e conseqüente perda de resistência pela má hidratação do aglomerante da mistura (CURVO, 2017; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Após preparada a base, pode-se iniciar a concretagem, tomando os devidos cuidados quanto à preparação, transporte, lançamento, adensamento e cura do concreto.

Para que sejam garantidas resistência e porosidade satisfatórias, o responsável pela execução deve se atentar para que a dosagem dos materiais seja realizada corretamente e observar o tempo de lançamento do material após início da mistura, respeitando o limite deste tipo de concreto que dependerá da presença ou não de aditivos. O aspecto da mistura em estado fresco deve ser inspecionado visualmente antes da concretagem de forma a garantir que a concretagem seja eficiente (ACI, 2010).

O processo de concretagem deve ser procedido do adensamento e tratamento superficial, que podem ser realizados por régua vibratória ou rolo

compactador. No caso da régua vibratória, deve-se atentar para o tempo de vibração, pois seu excesso pode causar a precipitação de pasta e entupimento dos poros, como já abordado anteriormente. O adensamento realizado com rolo, além de adensar também propicia um acabamento superficial eficiente e este rolo deve seguir o recomendado pelo ACI (2010), que prescreve aproximadamente 61 kg por metro linear deste rolo, valor próximo ao recomendado pelo *Concretenetwork* (2018). O acabamento superficial não pode ser realizado como ocorre nos concretos convencionais por prejudicar a estrutura porosa do concreto. As Figuras 17 e 18 ilustram o adensamento com a régua vibratória e com rolo respectivamente. O acabamento superficial ainda pode ser realizado com uma máquina acabadora de piso que fornece um acabamento refinado à superfície do pavimento deixando-o uniforme. A Figura 19 mostra a realização do acabamento realizado por este equipamento (CURVO, 2017; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

FIGURA 17 - Adensamento de concreto permeável com utilização de régua vibratória



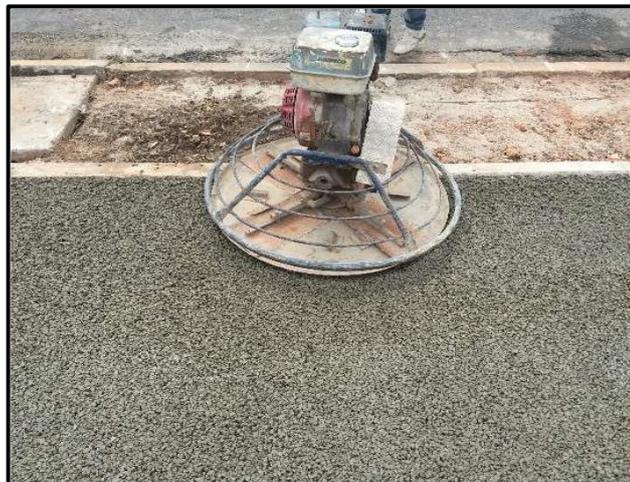
Fonte: (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

FIGURA 18 - Adensamento de concreto permeável com utilização de rolo



Fonte: (CURVO, 2017).

FIGURA 19 - Acabamento superficial com máquina Acabadora de piso



Fonte: (CURVO, 2017).

Nos concretos permeáveis assim como nos convencionais recomenda-se a aplicação de juntas de retração. Devido à elevada porosidade, as juntas normalmente podem ser aplicadas com distâncias maiores do que as aplicadas comumente em concretos convencionais. As fissuras por retração normalmente ocorrem quando as deformações alcançam a capacidade de deformação adquirida pelo concreto (BALBO, 2009). Dependendo da situação pode-se adotar a aplicação de juntas a cada 13 metros sem causar danos ao pavimento. As juntas podem ser feitas como em concretos convencionais, com profundidade de um quarto da espessura da camada e aconselha-se a realizá-las juntamente com o procedimento de compactação em estado fresco, com rolos que promovem a abertura de tais

juntas, conhecidos como *pizza cutter*, que significa “cortador de pizza”, exemplificados na Figura 20.

FIGURA 20 - Execução de juntas através da utilização do *pizza cutter*



Fonte: (CONCRETENETWORK, 2018).

De acordo com Tennis, Leming e Akers (2004), devido à elevada porosidade, este tipo de concreto é bem mais propenso à secagem prematura, o que pode ocasionar a má hidratação dos componentes cimentícios que garantem a resistência do concreto, não alcançando com isto as propriedades mecânicas almejadas. Por este motivo, instantes após a finalização do acabamento superficial (sendo indicado no máximo 20 minutos) já deve ter início os cuidados para prevenção de perda de água do concreto e maiores cuidados devem ser tomados em dias extremamente quentes e secos. Os procedimentos de cura podem incluir aplicação de alguns produtos que retardam a perda de água ou mesmo cobertura com lonas plásticas, que mostrou ser muito eficiente de acordo com Kevern, Schaefer e Wang (2009) em sua pesquisa, já comentada anteriormente.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Na presente pesquisa, foram realizados procedimentos experimentais laboratoriais e em campo, sendo que para os procedimentos laboratoriais foi utilizado o laboratório de engenharia civil da FEIS/UNESP e, os procedimentos em campo ocorreram nas dependências do campus 1 da FEIS/UNESP.

Primeiramente foram realizadas análises preliminares em laboratório sobre o traço a ser empregado e dimensões de agregados utilizados, para posteriormente realizar os experimentos em campo, através da construção e posterior estudo de condutividade hidráulica de uma calçada.

3.1 MATERIAIS

Para confecção dos concretos permeáveis foram utilizados materiais comumente encontrados no comércio local, basicamente constituídos de um aglomerante, neste caso o cimento Portland, agregados naturais e aditivo superplastificante.

3.1.1 Aglomerante

O aglomerante utilizado na pesquisa foi o cimento Portland composto ITAÚ CPII-F-40, indicado como adequado em suas especificações técnicas para pavimentos de concreto. Este cimento possui massa específica média de $3,08 \text{ g/cm}^3$ de acordo com as informações do fornecedor, e é caracterizado por conter adição de 6 a 10% de fíler calcário de acordo com a NBR 11578 (ABNT, 1997), atualmente substituída pela NBR 16697 (ABNT, 2018). As Tabelas 6 e 7 apresentam as principais características físicas e químicas do cimento, respectivamente, de acordo com ensaios feitos pelo próprio fabricante em lotes durante o mês de Outubro de 2017.

TABELA 6 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP II F- 40

Ensaio	Físicos e Mecânicos							
	Finura (%)		Blaine	Tempo de Pega		Resistência à compressão (MPa)		
	#200	#325	(cm ² /g)	Início (min)	Fim (min)	3 Dias	7 Dias	28 Dias
Limites de Norma	≤10,0	N/A	≥2800	≥60	≤600	≥15,0	≥25,0	≥40,0
Média	0,01	0,31	4680,00	190	264,38	34,51	40,86	49,67
Des. Pad.	0,03	0,28	115,82	7,75	16,01	1,91	2,37	1,57
Mínimo	0,00	0,00	4520,00	175,00	240,00	31,70	37,60	47,90
Máximo	0,10	0,90	4880,00	200,00	290,00	36,90	45,30	50,90

Fonte: Modificado (VOTORANTIM CIMENTOS, 2017).

TABELA 7 - Propriedades químicas do cimento CP II F- 40

Ensaio	Químicos			
	Teores (%)			
	PF	MgO	SO ₃	RI
Limites de Norma	≤6,5	≤6,5	≤4,0	≤2,5
Média	5,74	4,70	3,35	0,72
Des. Pad.	0,33	0,28	0,17	0,22
Mínimo	4,92	4,29	3,09	0,42
Máximo	6,29	5,13	3,82	1,20

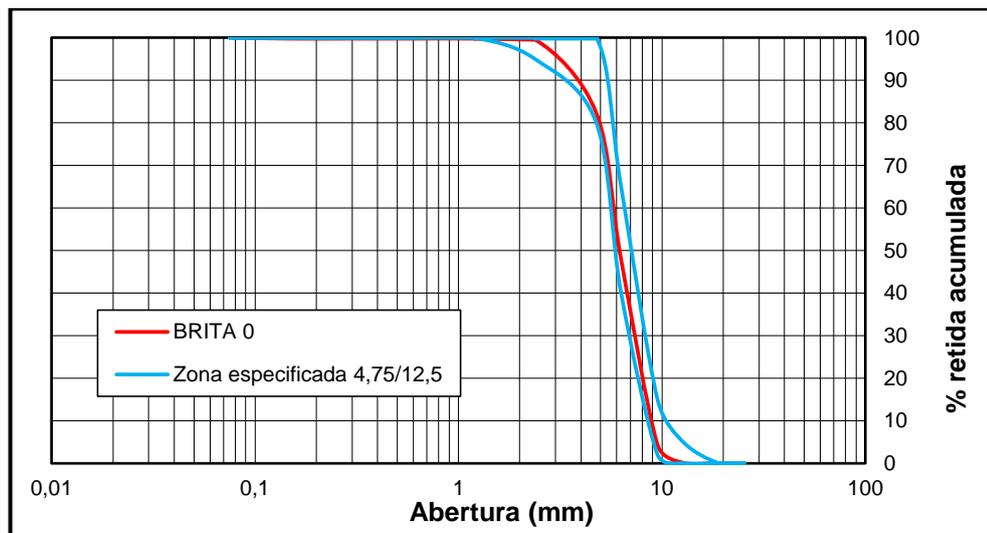
Fonte: Modificado (VOTORANTIM CIMENTOS, 2017).

3.1.2 Agregados

Para elaboração dos traços de concreto permeável foram utilizados agregados graúdos de origem basáltica em dimensões encontradas comercialmente. Foram utilizadas neste trabalho as britas classificadas de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009) como 9,5/25,0 (comercialmente conhecida como brita 1) e 4,75/12,5 (comercialmente conhecida como brita 0), extraídas da pedreira localizada no município de Itapura – SP. No presente trabalho serão utilizados os nomes comerciais brita 1 e brita 0. Embora a adição de pequena quantidade de agregados miúdos pode melhorar propriedades mecânicas e de superfície do concreto permeável, no presente estudo optou-se por não utilizar agregados miúdos adicionados ao concreto, com o intuito de analisar apenas o uso das britas como agregado.

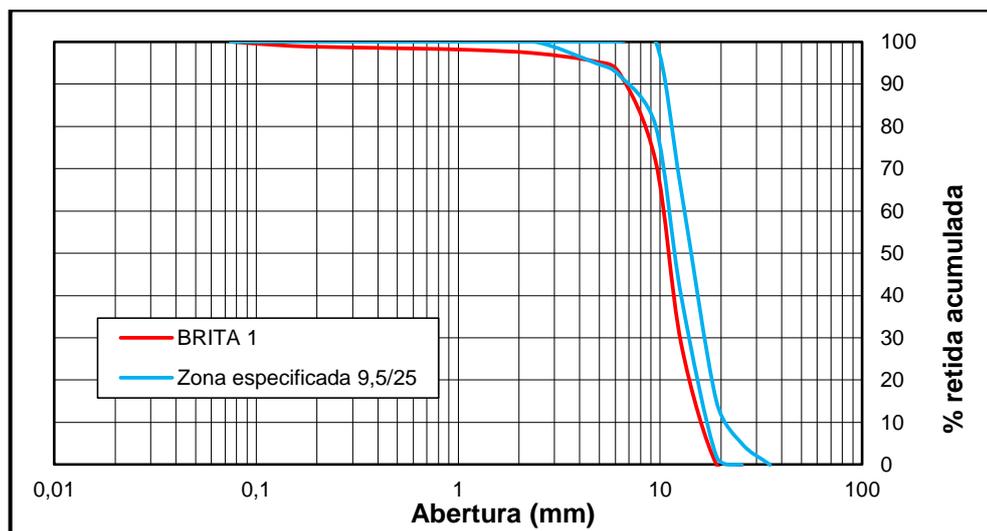
Analisou-se três possibilidades com as britas 0 e 1, que foi utilizá-las separadamente e misturadas, de forma a encontrar o melhor preenchimento de vazios, que para estes dois tipos de brita foi em proporção 10% de brita 0 e 90% de brita 1. As Figuras 21 e 22 e a Tabela 8 retratam respectivamente as curvas granulométricas e as principais características dos dois tipos de agregados utilizados. A brita 1 comercializada na região da pesquisa, tem granulometria levemente abaixo da classificação por norma, conforme nota-se em sua respectiva curva granulométrica.

FIGURA 21 - Faixa granulométrica da brita 0



Fonte: Próprio Autor.

FIGURA 22 - Faixa granulométrica da brita 1



Fonte: Próprio Autor.

TABELA 8 - Propriedades dos agregados graúdos

Propriedades	Brita 0	Brita 1
Massa unitária (g/cm ³)	1,52	1,60
Massa específica real (g/cm ³)	2,93	3,00
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,84	2,89
Massa específica SSS (g/cm ³)	2,91	2,93
Módulo de finura	5,90	6,91
Dimensão máx. do agregado (mm)	9,5	19
Material pulverulento (%)	0,65	1,25

Fonte: Próprio Autor.

3.1.3 Aditivo

Foi utilizado também nos concretos permeáveis o aditivo superplastificante Tec-Flow 7000. Este aditivo tem densidade média de 1,1 g/cm³ e atende a NBR 11768 (ABNT, 2011). A dosagem usada foi mantida padrão para todos os traços em 0,5% da massa de cimento para uma melhor condição de trabalhabilidade da mistura, mantendo a baixa relação água/aglomerante já comum em concretos permeáveis.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO TRAÇO

Como não existem procedimentos de dosagem normatizados para o concreto permeável, decidiu-se realizar uma análise preliminar de forma empírica para encontrar um traço aceitável de trabalho com este tipo de concreto para construção de uma calçada em campo. A Tabela 9 mostra as Fases de moldagem e ensaios realizados em laboratório conforme se observava funcionalidade das misturas em cada Fase, onde, na identificação, M é referente à mistura, o número seguinte ao traço, o que vem após o hífen se refere ao tamanho da brita, 1/0 é referente às misturas das britas 1 e 0 e, o último número, após o segundo hífen se refere ao número do lote.

TABELA 9 - Ensaio realizados em laboratório

Especificação	Identificação	Ensaio	Norma/ procedimento	Tamanho/ quantidade de CPs por traço
Fase 1: Determinação da dosagem da mistura, com fabricação de três traços distintos	M3,5-1-1	Resistência à compressão axial	NBR 5739 (ABNT, 2018)	Ø 10x20 cm / 3 CPs
	M5-1-1	Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 (ABNT, 2011)	Ø 10x20 cm / 3 CPs
	M6,5-1-1	Porcentagem de vazios e Massa específica aparente	ASTM C1688 (ASTM, 2014)	Ø 10x20 cm / 3 CPs
Fase 2: Determinação do agregado ideal para a dosagem escolhida a partir do lote 1 (traço 1:5), com utilização de três faixas granulométricas	M5-1-2	Resistência à compressão axial	NBR 5739 (ABNT, 2018)	Ø 10x20 cm / 4 CPs
		Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 (ABNT, 2011)	Ø 10x20 cm / 4 CPs
	M5-0-1	Porcentagem de vazios e Massa específica aparente	ASTM C1688 (ASTM, 2014)	Ø 10x20 cm / 3 CPs
	M5-1/0-1	Taxa de infiltração	Haselbach (2010) e ISO 17785-1	Ø 10x12,7 cm / 4 CPs
Fase 3: Confirmação da dosagem final escolhida	M5-0-2	Resistência à compressão axial	NBR 5739 (ABNT, 2018)	Ø 10x20 cm / 4 CPs
		Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 (ABNT, 2011)	Ø 10x20 cm / 4 CPs
		Porcentagem de vazios e Massa específica aparente	ASTM C1688 (ASTM, 2014)	Ø 10x20 cm / 4 CPs
		Taxa de infiltração	Haselbach (2010) e ISO 17785-1	Ø 10x12,7 cm / 4 CPs
	M5-0-3	Resistência à tração na flexão	NBR 12142 (ABNT, 2010)	15 x 15 x 50 cm / 6 CPs

Fonte: Próprio Autor.

Inicialmente, nessa análise preliminar, decidiu-se realizar as moldagens dos corpos de prova cilíndricos (diâmetro 10 cm e altura 20 cm) com adensamento padrão como indica a NBR 5738 (ABNT, 2016), porém notou-se que seria necessário aumentar a compactação dos corpos de prova. Nesta análise prévia foram avaliadas somente as resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral, sendo que não foram realizados quaisquer outros ensaios nestes primeiros corpos de prova. Devido a deficiências de resistência houve o descarte destes, por isso a Tabela 9 não traz as informações deste primeiro ensaio preliminar.

Posteriormente foram realizadas mais moldagens, porém com maior intensidade de adensamento, obtendo-se valores de resistência mecânica aceitáveis. Estes corpos de prova, além dos ensaios mecânicos de resistência à

compressão axial e à tração por compressão diametral, foram também avaliados quanto à massa específica aparente e índice de vazios. Nesta análise de escolha de traço (Fase 1) foi utilizado somente o agregado de maior granulometria, a brita 1 devido a maior disponibilidade.

Levando em consideração os aspectos mecânicos básicos (resistência média à compressão axial e à tração por compressão diametral) e econômicos (considerando o alto custo do cimento) escolheu-se trabalhar com o traço 1:5 (cimento:agregado graúdo). A mistura 1:3,5 foi a que apresentou maior resistência, porém o alto consumo de cimento, a identificação de colmatação na parte inferior do corpo de prova e a elevada massa específica aparente descartaram a possibilidade de utilização deste traço. Na literatura é possível identificar alguns autores que trabalharam próximos da relação escolhida para a presente pesquisa. Por exemplo Rangelov *et al.* (2017) utilizaram em sua pesquisa traços com proporções da ordem de 1:5,7 em relação de cimento:agregado, enquanto que McCain e Dewoolkar (2009) trabalharam com relação de 1:4,4, assim como Batezini (2013).

Após a escolha do traço, decidiu-se comparar o desempenho de dois tipos de brita comercialmente disponíveis na região do estudo, neste caso a brita 1 e a brita 0 (Fase 2). Trabalhou-se com estas separadamente e misturadas de maneira que houvesse a menor quantidade de vazios possível na mistura de ambas. Para isso, foram experimentadas várias proporções de mistura. A proporção que mostrou maior preenchimento de vazios foi com a mistura de 10% de brita 0 e 90% de brita 1. Nesta Fase, comparando-se o desempenho das diferentes graduações dos agregados disponíveis comercialmente, foram também realizados ensaios de condutividade hidráulica com os corpos de prova de concreto permeável além das verificações de resistência à compressão e tração, massa específica aparente e índice de vazios. As Tabelas 10 e 11 abaixo mostram as dosagens dos concretos ensaiados. Os nomes das misturas nestas tabelas não trazem o número do lote, visto que a dosagem é a mesma para os diferentes lotes.

TABELA 10 - Proporções dos materiais utilizados nas misturas desenvolvidas para a escolha do traço

Mistura		Aglomerante	Agregados	Água	Aditivo Superplastificante
Identificação	Aglomerante/agregado	Cimento CP II F - 40	Brita 1	Água/cimento	% da massa de cimento
M3,5-1	1:3,5	1	3,5	0,25	0,5
M5-1	1:5	1	5	0,26	0,5
M6,5-1	1:6,5	1	6,5	0,28	0,5

Fonte: Próprio Autor.

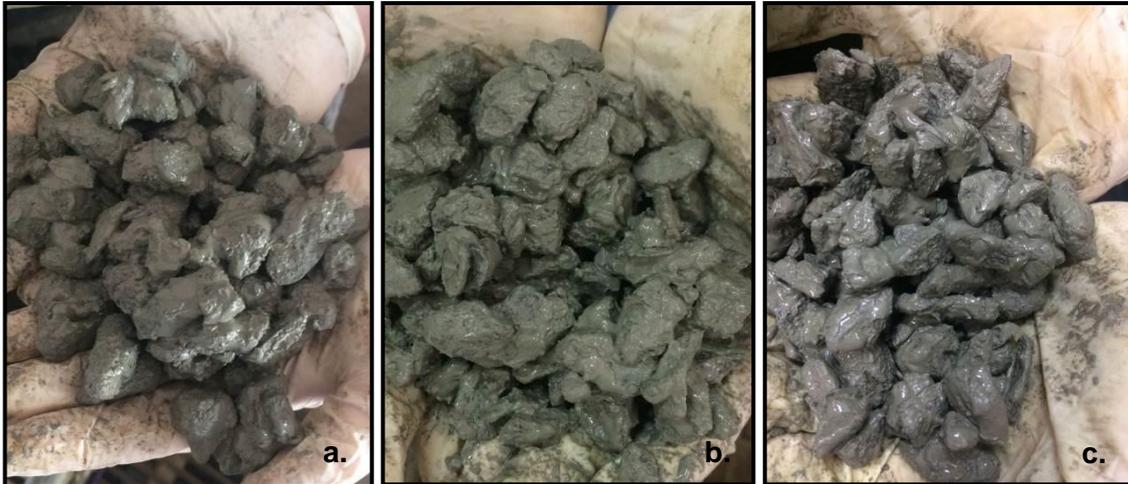
TABELA 11 - Proporções das misturas variando-se a granulometria do agregado

Mistura		Aglomerante	Agregados		Água	Aditivo Superplastificante
Identificação	Cimento/agregado	Cimento	Brita 1	Brita 0	Água/cimento	% da massa de cimento
M5-1	1:5	1	5	0	0,26	0,5
M5-0	1:5	1	0	5	0,29	0,5
M5-1/0	1:5	1	4,5	0,5	0,27	0,5

Fonte: Próprio Autor.

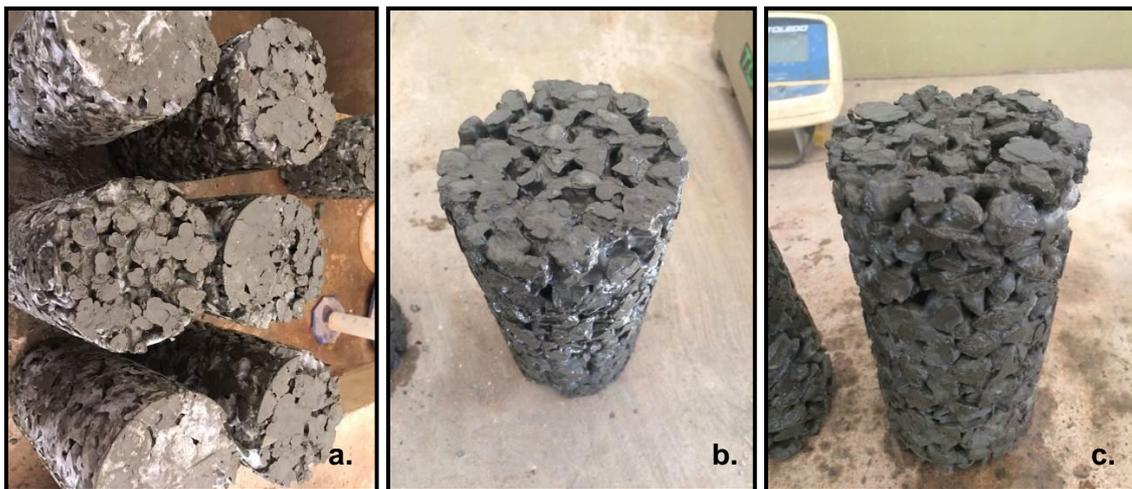
Em se tratando das misturas desenvolvidas para a escolha do traço, na Fase 1, a Figura 23 mostra o aspecto fresco de cada uma das três proporções enquanto que a Figura 24 apresenta os corpos de prova depois de curados. Nota-se que o traço mais rico em cimento (mistura M3,5-1-1) apresentou precipitação da pasta vista na face inferior dos corpos de prova, diferentemente das demais misturas, conforme observado na Figura 24.

FIGURA 23 - Aparência das misturas em estado fresco: a) M3,5-1-1; b) M5-1-1; c) M6,5-1-1



Fonte: Próprio Autor.

FIGURA 24 - Vista da face inferior dos corpos de prova desmoldados: a) M3,5-1-1; b) M5-1-1; c) M6,5-1-1



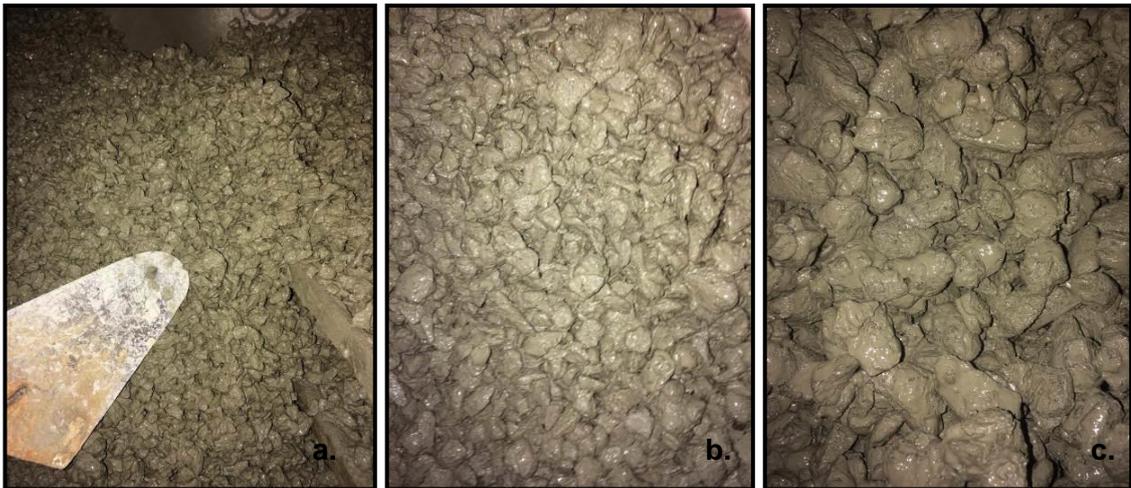
Fonte: Próprio Autor.

Ainda nota-se a partir da Figura 23 que em todas as situações a pasta cobriu os agregados de maneira efetiva e notou-se boa textura pela análise tátil, características essenciais para controle de qualidade das misturas em estado fresco conforme indicado pela literatura. A relação a/c foi ajustada para cada mistura de maneira que tais características em estado fresco fossem garantidas visualmente, por este motivo estas diferem entre si, de acordo com a necessidade para cada traço. Como já comentado, a escolha do traço 1:5 levou em consideração os

aspectos mecânicos e também econômicos, além da inviabilidade de utilização do traço mais rico pela presença da colmatação devido ao excesso de pasta.

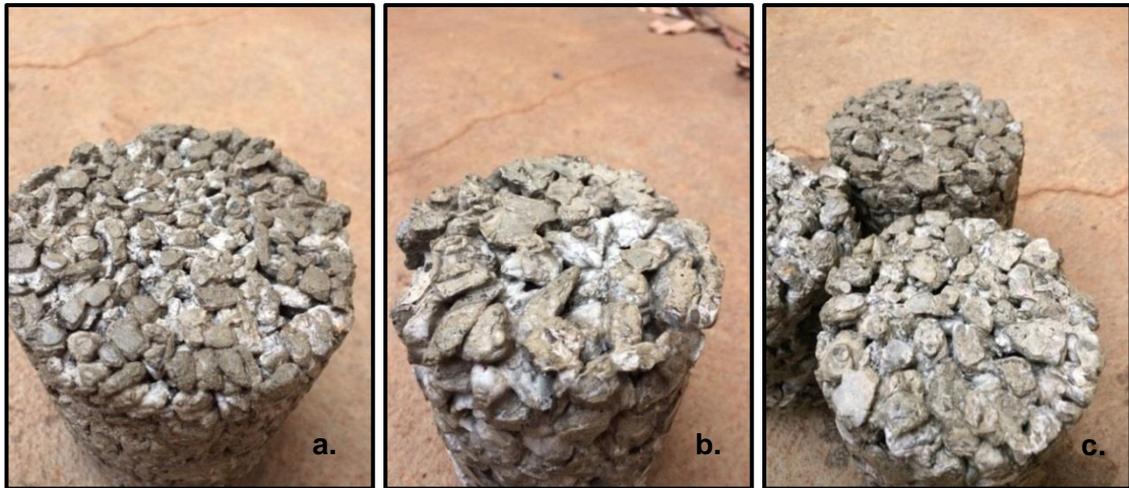
A Figura 25 mostra o aspecto fresco das misturas cujo objetivo foi a escolha do agregado ideal a partir do traço 1:5. A textura satisfatória ao toque e a boa cobertura dos agregados também foram notórias e controladas através do ajuste de a/c ideal para cada mistura. Não houve problemas de colmatação em nenhuma destas misturas, conforme observado na Figura 26, porém a utilização do agregado brita 0 proporcionou ao concreto maior facilidade de mistura, além de melhor acabamento dos corpos de prova, por isso, o agregado final escolhido para a construção da calçada foi a brita 0, conforme será apresentado e discutido em detalhes no item 4 (Resultados e discussões).

FIGURA 25 - Aspecto das misturas em estado fresco: a) M5-0-1; b) M5-1-2; c) M5-1/0-1



Fonte: Próprio Autor.

FIGURA 26 - Vista da face inferior dos corpos de prova desmoldados: a) M5-0-1; b) M5-1-2; c) M5-1/0-1



Fonte: Próprio Autor.

A Fase 3 foi realizada para confirmar realmente a eficiência da mistura final escolhida com utilização da brita 0, através da repetição dos ensaios já realizados na Fase 2, e também, pela execução de ensaios de resistência à tração na flexão.

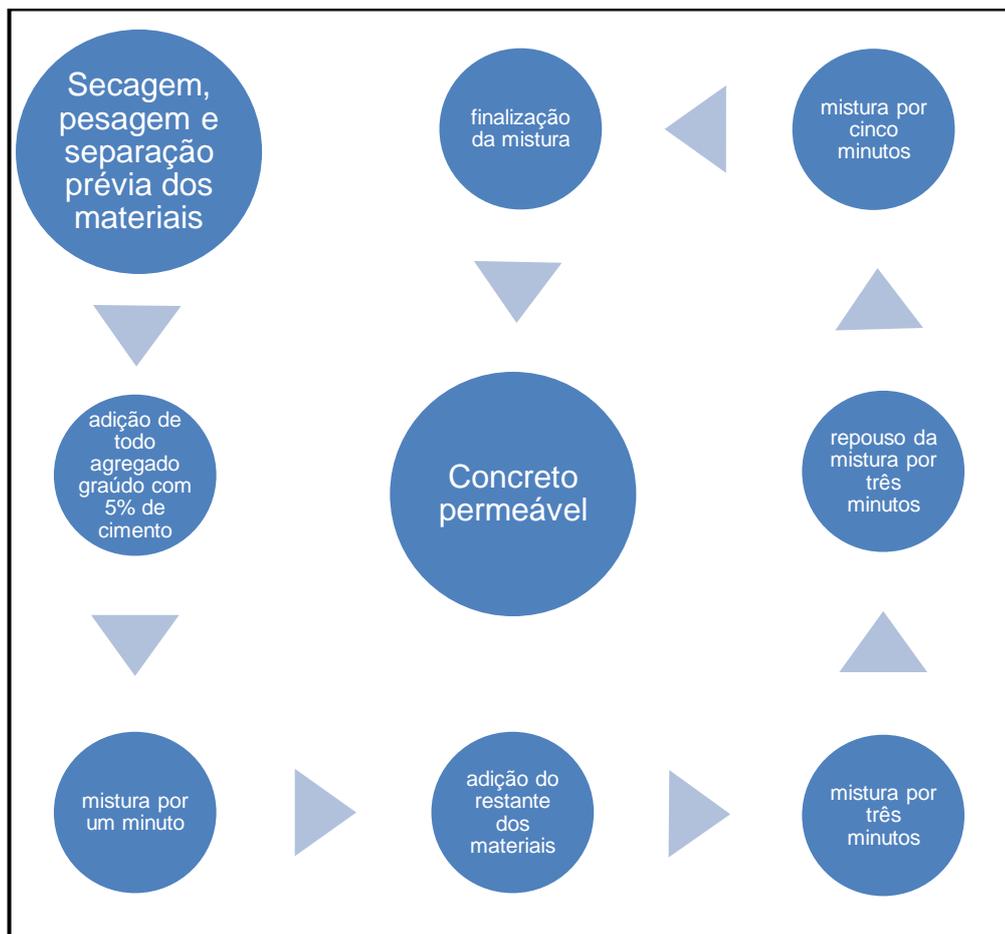
3.3 DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

3.3.1 Procedimentos de mistura

Os materiais foram previamente secos, pesados e separados para iniciar os experimentos. A mistura foi feita em uma betoneira comum, em que a ordem de colocação dos materiais foi realizada de forma semelhante ao estudo realizado por Schaefer *et al.* (2006), em que adicionou-se primeiramente na betoneira todo o agregado graúdo com aproximadamente 5% da quantidade total do cimento, realizando uma prévia mistura de 1 minuto. Posteriormente, adicionou-se o restante dos materiais, realizando a mistura destes por mais três minutos. O aditivo superplastificante foi misturado à água para serem lançados na betoneira juntos. Por fim, deixou-se três minutos a mistura em repouso, para que então fosse finalizado o processo batendo por mais cinco minutos, diferentemente de Schaefer *et al.* (2006) que misturaram por dois minutos nesta etapa final de mistura. Optou-se por aumentar o tempo nessa etapa final de mistura para que o aditivo superplastificante pudesse agir totalmente na mistura. Schaefer *et al.* (2006)

observaram que realizando esse procedimento, a ruptura ocorreu no agregado e não na ligação entre a pasta de cimento e o agregado (chamada de zona de transição), fortalecendo essa região, mostrando melhores resultados finais de resistência. A Figura 27 traz um organograma que resume as etapas de fabricação dos concretos em laboratório.

FIGURA 27 - Etapas de fabricação do concreto permeável



Fonte: Próprio Autor.

3.3.2 Moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos (diâmetro 10 cm e altura 20 cm), inicialmente decidiu-se realizar as moldagens da análise preliminar com o procedimento de adensamento padrão para o concreto convencional, conforme sugere a NBR 5738 (ABNT, 2016). Dessa maneira, os primeiros corpos de prova foram moldados em duas camadas e adensados com 12 golpes de haste de adensamento em cada camada.

Devido aos baixos valores obtidos de resistência à compressão e à tração em todos os corpos de prova ensaiados, independentemente do traço utilizado, optou-se por trabalhar com maiores índices de compactação. Batezini (2013) moldou seus corpos de prova cilíndricos em três camadas, com 15 golpes de haste metálica de adensamento por camada, seguida de vibração em mesa vibratória por 10 segundos. Ainda de acordo com Batezini (2013) o excesso de vibração pode causar segregação da pasta nesse tipo de concreto, por este motivo não se deve exagerar na vibração. Então a moldagem dos próximos corpos de prova (todas as misturas aqui apresentadas e discutidas) seguiu esse procedimento de moldagem: os 45 golpes divididos em 3 camadas, e vibração de 10 segundos na mesa vibratória.

Com este novo modo de adensamento foi possível obter boas resistências mantendo taxas de infiltração bastante altas (nos lotes de corpos de prova em que houve ensaios de infiltração) sendo este, portanto, o modelo de adensamento escolhido para o restante dos corpos de prova moldados na presente pesquisa. Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos com papel filme para minimizar a perda prematura de água nas primeiras horas até atingir o tempo de pega, e logo em seguida eles foram levados para o processo de cura. A desmoldagem foi realizada 3 dias após a moldagem, período a partir do qual não houve problemas para realizá-la, visto que esse tipo de concreto é mais frágil pela grande quantidade de vazios em sua estrutura interna. Os corpos de prova para ensaios de infiltração, por serem menores (diâmetro 10 cm e altura 13 cm), foram moldados em duas camadas com 15 golpes cada e os 10 segundos de mesa vibratória. A Figura 28 seguinte mostra alguns corpos de prova cilíndricos após moldados.

FIGURA 28 - Corpos de prova logo após moldados



Fonte: Próprio Autor.

Corpos de prova prismáticos também foram moldados para ensaios de tração na flexão a fim de confirmar a eficiência do traço escolhido para o trabalho em campo (Fase 3). Foram moldados prismas de 15x15x50 cm conforme estabelece a norma NBR 12142 (ABNT, 2010) seguindo-se novamente o método de adensamento realizado por Batezini (2013), que adensou em duas camadas iguais com 25 golpes de haste metálica de adensamento por camada e posteriormente submeteu o corpo de prova a mais 10 segundos de mesa vibratória. A Figura 29 mostra os corpos de prova prismáticos após moldagem.

FIGURA 29 - Corpos de prova prismáticos após moldagem



Fonte: Próprio Autor.

3.3.3 Cura dos corpos de prova

Os corpos de prova foram submetidos à cura em câmara úmida, durante 28 dias com umidade relativa do ar controlada em torno de 95%.

3.3.4 Ensaio mecânicos

Os ensaios de resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos e à tração na flexão em corpos de prova prismáticos foram realizados no laboratório de Engenharia civil da FEIS/UNESP, através de prensa universal de marca Emic com capacidade para 200 toneladas de acordo com as normas NBR 5739 (ABNT, 2018), NBR 7222 (ABNT, 2011) e NBR 12142 (ABNT, 2010) que prescrevem os procedimentos necessários para a realização dos ensaios e obtenção dos resultados. Para o ensaio de resistência à compressão axial a regularização do topo e base dos corpos de prova foi realizada através de chapas de madeirite como pode ser visto na Figura 30. A fim de comparação, todos os traços foram repetidos posteriormente para a resistência à compressão com regularização do topo e da base através da aplicação de pasta de cimento, conforme visto na Figura 31. As Figuras 32 e 33 mostram ainda os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e à tração na flexão, respectivamente.

FIGURA 30 - Corpo de prova em ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Próprio Autor.

FIGURA 31 - Corpo de prova em ensaio de resistência à compressão axial com capeamento em pasta de cimento



Fonte: Próprio Autor.

FIGURA 32 - Corpo de prova em ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Próprio Autor.

FIGURA 33 - Corpo de prova em ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Próprio Autor.

3.3.5 Procedimentos para encontrar a massa específica aparente

Para a determinação da massa específica aparente no estado fresco foram seguidas as prescrições feitas pela ASTM C1688/C1688M – 14^a (ASTM, 2014), com algumas pequenas modificações com relação ao recipiente cilíndrico, indicado nas recomendações para aferição de massa e volume e também na compactação. Como o laboratório não dispunha destes recipientes das recomendações utilizou-se corpos de prova cilíndricos e o adensamento foi realizado normalmente, da mesma maneira que os feitos para os corpos de prova ensaiados mecanicamente e à condutividade hidráulica. Optou-se por esta metodologia a fim de analisar também a massa específica do concreto adensado para os ensaios. Foram moldados corpos de prova e pesados no estado fresco, sendo que tal aferição de massa foi realizada com estes já adensados e rasados conforme já descrito na seção 3.3.2. A massa específica aparente no estado fresco foi determinada pela divisão da massa de concreto encontrada pelo volume do corpo de prova, conforme segue a Equação 1 abaixo:

$$D = \frac{M_t - M_r}{V_r} \quad (1)$$

Onde:

D – Massa específica aparente;

M_t – Massa total;
 M_r – Massa do recipiente;
 V_r – Volume do recipiente.

3.3.6 Procedimentos para encontrar a porcentagem de vazios

A porcentagem de vazios foi determinada também de acordo com a ASTM C1688/C1688M – 14^a (ASTM, 2014), a qual sugere que para a porcentagem de vazios seja determinada previamente a massa específica aparente (procedimento descrito na seção 3.3.5) e a densidade teórica. A seguir são descritas as Equações 2 e 3 utilizadas para encontrar a densidade teórica e a porcentagem de vazios (que é o índice de vazios vezes 100), respectivamente.

$$T = \frac{M_s}{V_s} \quad (2)$$

Onde:

T – Densidade teórica;

M_s – Massa total somada de todos os materiais adicionados na mistura;

V_s – Soma das massas de cada material componente na mistura divididas pelas suas respectivas massas específicas (que nos fornecerá o volume absoluto, sem contar vazios entre partículas). Para agregados, se utiliza a massa específica em condição do agregado saturado com superfície seca.

$$U = \frac{T-D}{T} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

U – Porcentagem de vazios.

3.3.7 Ensaios de condutividade hidráulica em laboratório

Como existem inúmeros métodos para se obter a taxa de infiltração, optou-se por realizar o ensaio indicado pela ISO 17785-1 (ISO, 2016) que é um método já descrito por Haselbach *et al.* (2017) como o ensaio sugerido pela ASTM C1701 (ASTM, 2017) de forma modificada e adaptada para amostras cilíndricas e núcleos extraídos de pavimentos para análise laboratorial.

Tal ensaio é de simples execução e consiste em envolver os corpos de prova cilíndricos com filme ou plástico transparente retrátil ao calor em toda sua extensão, acomodando-se a superfície lateral irregular do corpo de prova, para que transpasse o topo em pelo menos 5 centímetros, como se fosse uma aba. O ensaio consiste em verter dois litros de água no topo do corpo de prova mantendo uma pequena lâmina de água entre 1,5 a 2,5 cm, havendo desta forma o fluxo somente vertical. Indica-se verter um litro anteriormente para umedecer a estrutura porosa para posteriormente registrar o tempo que leva para dois litros passarem pelo sistema, sendo que se inicia a contagem logo que a água começa a ser vertida e finaliza assim que a água da superfície do topo desapareça. A Figura 34 apresenta o desenvolvimento deste ensaio.

FIGURA 34 - Ensaio para aferição de taxa de infiltração conforme indicado pela ISO 17785-1 (ISO, 2016)



Fonte: Próprio Autor.

Este ensaio foi adaptado de outro ensaio já realizado por Haselbach (2010) em laboratório, que mantém o mesmo princípio em manter o corpo de prova envolvido em plástico retrátil em toda extensão lateral e verter água manualmente em seu topo mantendo neste ensaio uma coluna de água de aproximadamente 13 mm, porém desta maneira, o tempo começa a ser registrado a partir do momento em que inicia-se o fluxo de água na parte inferior do corpo de prova, e o fluxo deve ser

direcionado à um recipiente precisamente graduado (visto na Figura 34) para que a contagem do tempo seja paralisada quando a quantidade de água atingir um determinado volume estabelecido.

Ambos os métodos foram aplicados nas amostras como uma maneira de avaliar as taxas de infiltração das amostras em laboratório, de uma maneira parecida com os ensaios em campo. Para ambos os ensaios, o cálculo da taxa de infiltração se dá de maneira simples, devido a baixíssima presença de coluna de água, despreza-se a correção do gradiente hidráulico, permitindo encontrar a taxa de infiltração pela relação a seguir exibida na Equação 5:

$$K = \frac{\text{Vol}}{t \times A} \quad (5)$$

Onde:

K – Taxa de infiltração (cm/s);

A – Área da seção transversal do CP (cm²);

Vol – Volume de água captado por teste (cm³);

t – Tempo necessário para captação do volume de água por teste (s).

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados para os concretos permeáveis de traço 1:5, em que variou o agregado utilizado: brita 0, brita 1 e as britas misturadas, no qual foram dosados conforme especificado no item 3.2.

3.4 DESENVOLVIMENTO DO PAVIMENTO TESTE EM CAMPO

3.4.1 Projeto da calçada

Optou-se por construir uma calçada para estudos em campo do concreto permeável, de 1 m de largura por 10 m de comprimento. O objetivo nesta etapa é avaliar a capacidade drenante do material em campo e seu comportamento quanto à drenabilidade com o passar do tempo, principalmente nas fases iniciais de serviço.

Para o desenvolvimento do projeto é necessário realizar o dimensionamento hidráulico e mecânico do pavimento permeável, visto que este deva apresentar esta dupla função. Para tanto foram considerados alguns parâmetros de projeto que serão comentados a seguir.

3.4.1.1 Dimensionamento hidráulico

Para dimensionamento hidráulico foi levado em consideração a intensidade pluviométrica na região do estudo e o tipo e permeabilidade média do solo encontrado em Ilha Solteira. O clima tropical chuvoso no município ocasiona altas incidências pluviométricas nos meses mais quentes com médias de temperaturas máximas diárias acima dos 32°C, e nos meses mais frescos é comum tempo mais seco, com temperaturas máximas diárias de, em média, até 28°C (WEATHER SPARK, 2019). De acordo com Ribeiro (2002) o solo mais comum na área urbana central do município e, portanto na região do estudo, é o Latossolo Vermelho escuro com textura tipicamente arenosa, ausência de argilominerais ativos, estrutura altamente porosa e valores de condutividade hidráulica, da ordem de 10^{-3} e 10^{-4} cm/s em condição natural. Como valor médio para se adotar em projeto, foi utilizado $5,2 \times 10^{-4}$ cm/s (18,72 mm/h), valor este obtido através de comunicação pessoal¹. Tal permeabilidade está acima do mínimo recomendado pelo ACI (2010), tornando o solo apto para receber o concreto permeável. Para determinação da intensidade pluviométrica utilizou-se dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) sobre precipitações intensas no estado de São Paulo referentes à cidade de Andradina – SP, localizada próxima ao município de estudo.

Inicialmente decidiu-se trabalhar com uma camada de concreto permeável, com base em brita e 15 cm de espessura cada uma das camadas, instaladas sob o solo sem compactação de modo a não causar prejuízo à permeabilidade. Foi admitido ainda que esta calçada não recebesse escoamentos de outras áreas, sendo necessário apenas mitigar totalmente a precipitação incidente sob o mesmo.

Calculando a capacidade de armazenamento de lâmina d'água em mm de chuva para este pavimento temos:

- a) camada de concreto permeável de 150 mm x 27% de vazios = 40,5 mm;
- b) camada de base em brita de 150 mm x 30% de vazios = 45 mm;
- c) total de armazenamento até a superfície do pavimento = 85,5 mm.

A intensidade pluviométrica máxima de projeto para um tempo de retorno de 100 anos é de 78,2 mm em uma hora e esta vai diminuindo conforme se aumenta o tempo do evento pluviométrico, de acordo com o DAEE (2018). Considerando a taxa de infiltração do solo e o acúmulo de lâmina com o passar do tempo, a Tabela 12

¹ De acordo com ensaios laboratoriais conduzidos e informados pelo Professor Doutor José Augusto de Lollo

mostra que o total de armazenamento de 85,5 mm é suficiente para atender as precipitações incidentes em um período de retorno de 100 anos. Estes são os principais fatores a se considerar no dimensionamento, para que a água acumulada não venha a transbordar na estrutura e formar lâminas de água. Para promover a infiltração da água para o reservatório o concreto precisa apresentar permeabilidade de no mínimo 0,0051 cm/s, que é o fluxo máximo incidente, considerando esta intensidade pluviométrica máxima.

TABELA 12 - Lâmina d'água acumulada no pavimento permeável em decorrência de incidências máximas de chuva para um período de retorno de 100 anos em Andradina, segundo o DAEE (2018), considerando a taxa de infiltração do solo

Duração (min)	10	20	30	60	120	180	360	720	1080	1440
Intensidade (mm/h)	183,3	141,2	116,2	78,2	49,5	37,2	22,4	13,4	9,8	7,9
Lâmina da precipitação (mm)	30,6	47,1	58,1	78,2	99,0	111,6	134,4	160,2	177,2	190,4
Infiltração no solo (mm)	3,12	6,24	9,36	18,72	37,44	56,16	112,32	224,64	336,96	449,28
Lâmina armazenada (mm)	27,48	40,86	48,74	59,48	61,56	55,44	22,08	0	0	0

Fonte: Próprio Autor.

3.4.1.2 Dimensionamento mecânico

Para o dimensionamento mecânico utilizou-se o programa EverFE versão 2.24 desenvolvido pela universidade norte-americana de Maine, que possibilita analisar mecanicamente, através de métodos de elementos finitos, a resposta de sistemas de pavimento de concreto quando solicitados por cargas de eixos (UNIVERSITY OF MAINE, 2018).

Foi considerado para este dimensionamento a camada de concreto permeável e a camada de base com 15 cm de espessura cada e a calçada de 10 metros de comprimento por 0,80 metros de largura (foi deixado 10 cm de largura de cada lado para implantação de blocos de concreto no contorno do calçamento). Para inserção no programa, como não se realizou ensaios para conhecer o módulo de reação da base (k) em brita, estimou-se, por segurança, este valor em 30 MPa/m que caracteriza uma base com baixa qualidade.

Para o dimensionamento foram utilizados os dados obtidos nos ensaios laboratoriais preliminares, referentes à mistura M5-0 (que serão apresentados no item 4.1) e estimado o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de acordo com valores encontrados na literatura. Para o módulo de elasticidade, Goede (2009) desenvolveu uma relação capaz de estimar aproximadamente tal valor, considerando a massa específica aparente do concreto e sua resistência à compressão. A Equação 6 ilustra tal relação e à partir desta, calculou-se o módulo de elasticidade para o concreto da presente pesquisa:

$$E = 39,1 \times \rho_c^{1,5} \times \sqrt{f_c} \quad (6)$$

Onde:

E – Módulo de elasticidade (lbf/in²)

ρ_c – Massa específica do concreto (lb/ft³)

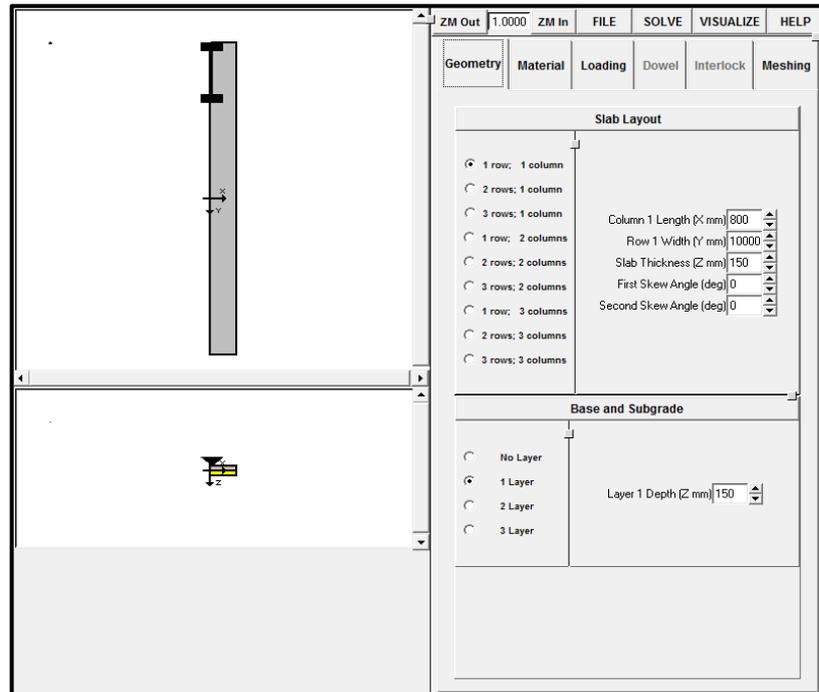
f_c – Resistência à compressão do concreto (lbf/in²)

Para o concreto da pesquisa a se construir a calçada, a partir da Equação 6, se obteve o módulo de elasticidade de aproximadamente 15.105 MPa valor próximo ao encontrado na literatura e estimado por alguns autores.

Quanto ao coeficiente de Poisson, Goede (2009) obteve experimentalmente valores entre 0,13 a 0,34, tendo como média 0,22. Portanto para os cálculos do presente calçamento adotou-se este valor médio.

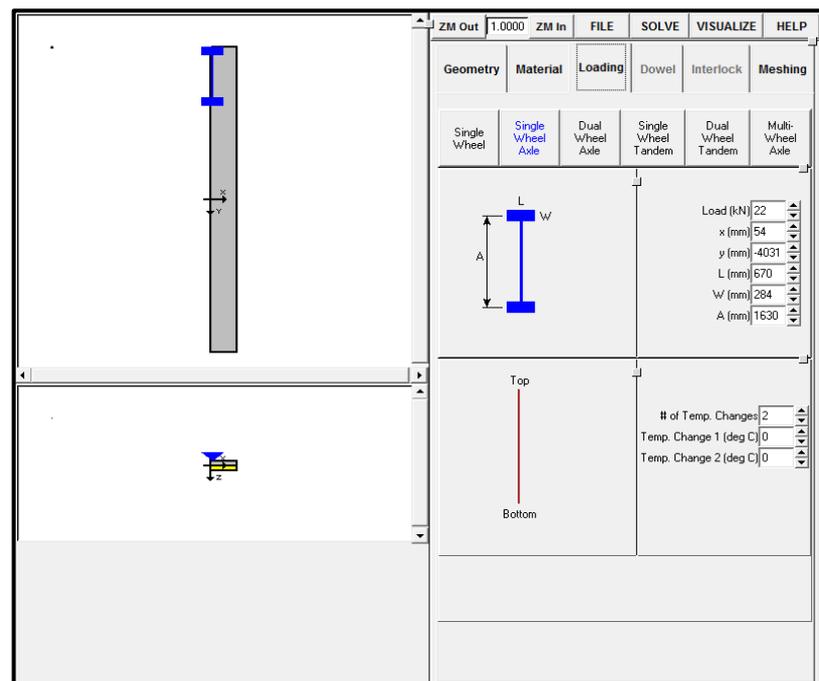
Embora em um calçamento não haja tráfego de veículos, o cálculo de verificação do presente estudo levou em consideração a ação de cargas provenientes de veículos automotores leves no pavimento, para estimar se a calçada tem condições de suportar tais ações. Portanto, foi considerado um eixo característico de um veículo leve padrão. Assumiu-se então a ação de um eixo de 22 kN, que caracteriza uma van como um veículo leve comum. Foi analisada a ação do carregamento em vários pontos da calçada e notou-se que o ponto mais crítico em que ocorreram maiores tensões foram os cantos do pavimento e, portanto considerados para o cálculo. As Figuras 35 e 36 abaixo mostram a interface do programa para modelar a geometria do pavimento e inserir os dados de carregamento do eixo.

FIGURA 35 - Interface do sistema para configuração da geometria



Fonte: Próprio Autor.

FIGURA 36 - Interface do sistema para aplicação do carregamento



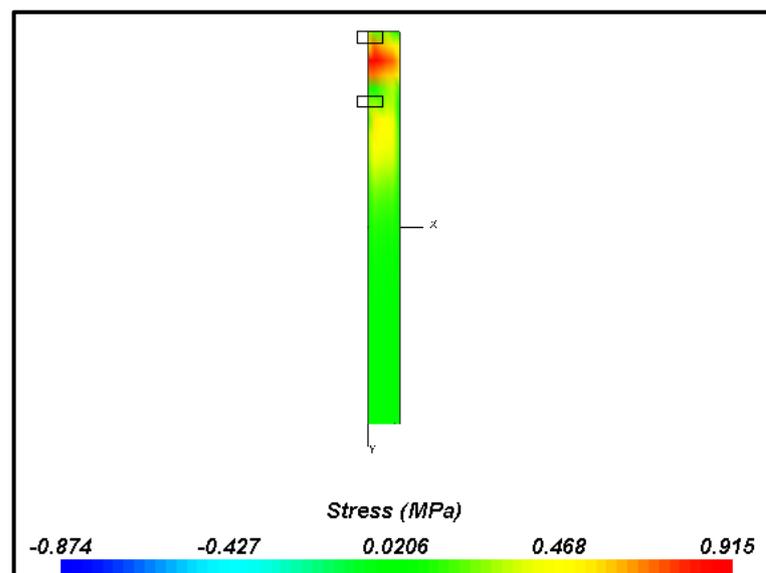
Fonte: Próprio Autor.

Batezini (2013), que também realizou tais análises, com veículos no padrão do estudado neste trabalho, indica que a relação entre tensões atuantes na placa e

tensão resistente do concreto à flexão deve ser inferior a 0,45, valor indicado pela *Portland Cement Association* - PCA (1984), para que o concreto não sofra com perdas pela ação da fadiga.

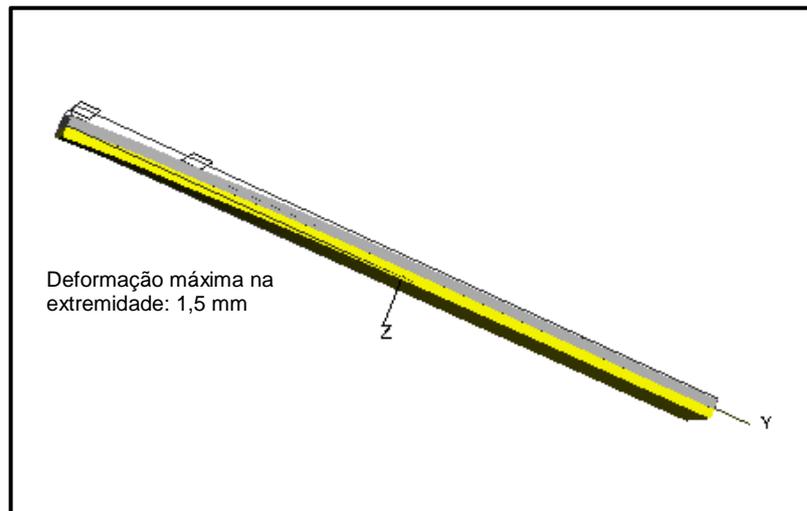
Partindo deste princípio, e com as verificações no programa já efetuadas, como o menor valor para resistência à tração na flexão ensaiado foi 3,29 MPa (de acordo com o que será mostrado no item 4.1.3) e a máxima tensão atuante foi de 0,915 MPa temos uma relação de tração atuante pela tração resistente de 0,27, bem menor que o máximo indicado de 0,45. Com isto comprova-se a eficiência mecânica da calçada. Quanto às deformações, o valor máximo ocorre na extremidade da calçada onde o carregamento é exercido com valor máximo de 1,5mm. O programa EverFe mostra também de maneira dinâmica os pontos mais solicitados quanto à tensões máximas e também deformações. A Figura 37 apresenta os pontos mais solicitados do pavimento quanto às tensões máximas, enquanto que a Figura 38 ilustra o ponto de deformação máxima.

FIGURA 37 - Face superior com maior solicitação de tensão



Ao observar a Figura 37, pode-se notar que a tensão máxima observada na superfície superior ocorre entre as rodas (cor vermelha) e diminui em pontos mais distantes do eixo (cor verde).

FIGURA 38 - Deformação na calçada com escala de aumento em 100 vezes



Fonte: Próprio Autor.

Ao observar a Figura 38, nota-se que a deformação máxima ocorre no vértice da placa em que é aplicado o carregamento, visto que a base (cor amarela) e a placa (cor cinza) ficam rebaixadas nesse ponto e, tal deformação é reduzida gradativamente na medida em que se afasta do vértice.

Adicionalmente optou-se por calcular, através de modelo criado por outros autores, a vida de fadiga em número de carregamentos que este pavimento pode suportar em serviço. Chandrappa e Biligiri (2017) desenvolveram um modelo que prevê a vida útil de placas de concreto permeável quanto à fadiga. Seu modelo foi obtido através de métodos de regressão, por isso de acordo com os autores, as previsões têm confiabilidade de 50%. Ainda segundo os mesmos, o ajuste do modelo foi satisfatório, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,65 a 0,85. A Equação 7 apresenta o modelo.

$$\text{Log}_{10} N_f = 9,557 - 10,028 \times SL + 4,396 \times 10^{-4} \times \text{Rigidez à flexão} - 0,735 \left(\frac{1}{\phi}\right) \quad (7)$$

Extensão das variáveis:

SL: 0,70 – 0,80;

Rigidez à flexão: 7.158 – 13.937 MPa;

Porosidade: 0,17 – 0,34 (ou seja: 17% a 34%).

Onde:

N_f – Vida de fadiga (ciclos);

SL – Tensão atuante/tensão resistente;

\emptyset – Porosidade.

O cálculo do suporte à fadiga pela Equação 7, fornece os resultados para SL entre 0,70 a 0,80, ou seja, para tensões bem maiores que as idealizadas como atuantes no pavimento. A porosidade do concreto considerado no dimensionamento atende ao requisito do modelo, sendo de 27% em média. Como não se dispunha de dados de rigidez à flexão para este concreto, o mesmo foi estimado através de outro modelo desenvolvido por Chandrappa e Biligiri (2018), apresentado na Equação 8.

$$F_{ff} = 17.389,347 - 303,0117 \times \emptyset + 1.052,077 \times R_f \quad (8)$$

Onde:

F_{ff} – Rigidez à flexão (MPa);

\emptyset – Porosidade (%);

R_f – Resistência à tração na flexão (MPa).

De acordo com os autores, a Equação 8 é válida para prever a rigidez à flexão de um concreto permeável com resistência à tração na flexão e porosidade variando de 1,46 MPa a 3,22 MPa e 18,20% a 33,24%, respectivamente. Como o concreto aqui estudado atende a variável da porosidade e está bastante próximo à variável da resistência à tração na flexão (3,29 MPa na presente pesquisa), foi calculado e obtido o valor de rigidez à flexão para o valor máximo prescrito na recomendação de 3,22 MPa, que é menor que o do presente estudo, indo a favor da segurança. A rigidez à flexão calculada foi de 12.595,72 MPa.

Como a rigidez à flexão calculada também atende a extensão das variáveis para vida de fadiga, foi realizado o cálculo considerando SL como 0,70 e 0,80 (variação indicada para modelagem na Equação 7) para o caso do concreto caracterizado no presente estudo. Levou-se em consideração sua resistência à tração na flexão de 3,22 MPa, à favor da segurança, utilizado na fórmula de rigidez à flexão, em que 70% desta tensão é 2,25 MPa. Para esta situação de tensões

atuando no pavimento, este suportaria aproximadamente 235.643 ciclos de carregamento antes da ruptura. Se for considerada 80% da resistência, a tensão atuante passaria a ser 2,58 MPa, e o pavimento suportaria apenas 23.412 ciclos, de acordo com a modelagem.

3.4.2 Procedimentos para a construção da calçada

3.4.2.1 Construção da placa preliminar

Com o objetivo de verificar a eficiência real do traço antes da construção efetiva do pavimento, optou-se por construir uma placa de 0,60 x 1,00 m com 15 cm de espessura para verificar sua real aplicabilidade e a ausência de colmatação pela precipitação de pasta na fase de construção, o que tornaria a calçada ineficiente quanto à sua capacidade de infiltração de água. Nesta placa foram realizados também ensaios de infiltração conforme sugerido pela ASTM C1701 (ASTM, 2017), para posteriormente promover a construção do calçamento.

Todo o procedimento de construção da placa foi realizado de acordo com os devidos cuidados e prescrições encontrados na literatura quanto ao lançamento e adensamento do concreto permeável. Para o adensamento e acabamento superficial, foi utilizado um rolo metálico com as características prescritas pelo ACI (2010). Após o término da concretagem, manteve-se a placa coberta durante 14 dias com lona plástica e aspergiu-se água na superfície da placa diariamente para manutenção da umidade neste período de cura. A Figura 39 resume as etapas de concretagem e finalização da placa.

FIGURA 39 - Placa preliminar: a) lançamento do concreto; b) Adensamento e acabamento superficial; c) superfície superior da placa finalizada; d) superfície inferior da placa finalizada



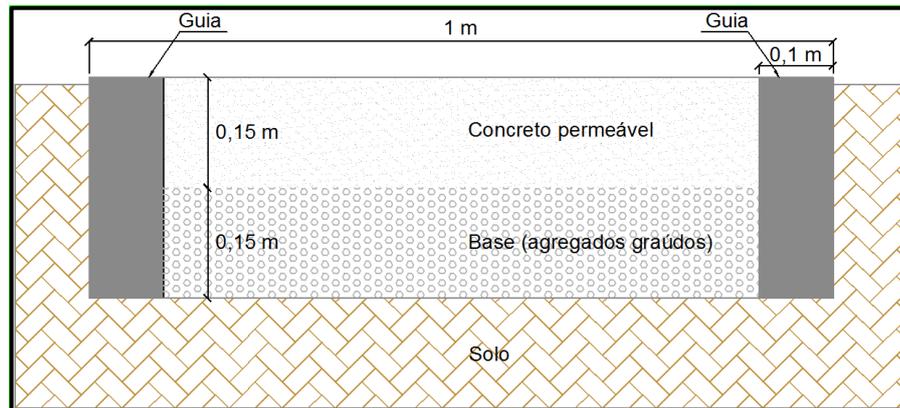
Fonte: Próprio Autor.

Pela análise da superfície inferior da placa (Figura 39-d) é perceptível que não houve colmatação pela precipitação de pasta. Ensaios mostraram taxas de infiltração médias da ordem de 1,81 cm/s, possibilitando dessa maneira a utilização deste traço para a construção da calçada.

3.4.2.2 Construção da calçada

Para a construção da calçada em concreto permeável, foi escolhida uma área ao lado do laboratório de Engenharia Civil da FEIS/UNESP, no Campus 1 da universidade. O terreno local é plano, sem ocorrência de enxurradas ou escoamentos provenientes de outras áreas em dias chuvosos. Optou-se por construir a calçada dois centímetros acima do nível do solo para evitar o carreamento de detritos do solo com a chuva. Embora existam muitas árvores em todo o campus da universidade, não havia árvores bem próximas ao pavimento. Isto significa que a incidência de detritos orgânicos na calçada seria baixa. Com o dimensionamento já realizado, a Figura 40 apresenta uma representação do perfil transversal da calçada a ser implantada.

FIGURA 40 - Perfil transversal da calçada



Fonte: Próprio Autor.

A construção se iniciou com a demarcação do local de sua construção. Após a demarcação, o local da construção foi escavado com auxílio de retroescavadeira e posteriormente regularizado manualmente. Após a regularização, teve início o assentamento dos blocos para a construção das guias no contorno do pavimento. Foram utilizados blocos canaleta e posteriormente concretados para dar rigidez à guia. A camada de base foi então lançada, regularizada e umedecida, para posteriormente ocorrer o lançamento do revestimento em concreto permeável. O umedecimento da base logo antes da concretagem é necessário para evitar que esta absorva água da mistura do concreto (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

A dosagem dos materiais na proporção escolhida foi realizada em central dosadora de concreto e para a mistura foi utilizado caminhão betoneira. Antes de iniciar a concretagem, foi tomada uma porção do concreto para aferição de suas características em estado fresco, conforme recomenda a literatura. Como o concreto apresentava características aceitáveis, iniciou-se então o processo de concretagem. O lançamento, espalhamento e adensamento foram procedidos e, imediatamente após a concretagem o pavimento foi coberto por lona plástica para evitar a perda prematura de água. A literatura recomenda que os cuidados de cura sejam realizados imediatamente após a concretagem por pelo menos sete dias com a cobertura por lona plástica (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). No presente trabalho, a cura foi realizada durante um período de 14 dias, através de cobertura com lona plástica, sendo que todos os dias aspergia-se água na superfície do concreto permeável para manter a umidade, assim como efetuado anteriormente na placa preliminar. A Figura 41 apresenta as etapas construtivas da calçada.

FIGURA 41 - Etapas construtivas da calçada: a) demarcação; b) escavação; c) regularização; d) assentamento da guia e concretagem da guia e regularização da base; e) concretagem da base; f) adensamento e acabamento; g) calçada finalizada





Fonte: Próprio Autor.

3.4.3 Ensaio de determinação das taxas de infiltração em campo

Os ensaios para determinação das taxas de infiltração em campo foram realizados de acordo com a ASTM C1701 (ASTM, 2017). Tal método, consiste na colocação de um anel de 30 centímetros de diâmetro na superfície do pavimento e vedação em sua base para posteriormente verter água em seu interior, mantendo uma pequena coluna d'água entre 1 a 1,5 cm constantemente até o derramamento de toda a água (Figura 42), no qual é cronometrado o tempo. A quantidade de água para a realização do ensaio vai depender do tempo gasto no pré-umedecimento, que é realizar o procedimento descrito inicialmente com 3,6 kg de água. Se o tempo gasto para o derramamento total for igual ou superior a 30 segundos, o teste é

realizado novamente com 3,6 kg, e caso seja inferior aos 30 segundos, realiza-se o teste com 18 kg. Para a vedação do anel, foi utilizada argila bentonita, ao invés da massa de encanador que é especificada em norma, pelo melhor desempenho da argila em condições de alta temperatura ambiente, comumente registrada na região de implantação da calçada (>25°C). Tal alteração no material vedante, em condições climáticas semelhantes, também foi comentada por Drake e Bradford (2013). A Equação 9 apresenta o cálculo da taxa de infiltração de água no pavimento, de acordo com a norma.

FIGURA 42 - a) Anel fixado na calçada; b) realização do ensaio de infiltração



Fonte: Próprio Autor.

$$I = \frac{K \times M}{(D^2 \times t)} \quad (9)$$

Onde:

I – Taxa de infiltração (mm/h);

M – Massa de água infiltrada (kg);

D – Diâmetro interno do anel de infiltração (mm);

t – Tempo necessário para a quantidade de água infiltrar no concreto (s);

K – 4.583.666.000 (mm³ x s)/(kg x h) no sistema internacional de unidades.

3.5 METODOLOGIA DO ESTUDO EM CAMPO

Após a finalização da cura e remoção da lona plástica que cobria a calçada, teve início o trabalho de manutenção periódica nesta com o passar do tempo e aferição da taxa de infiltração de acordo com a ASTM C1701 (ASTM, 2017).

Optou-se por realizar manutenção periódica com o uso de um equipamento denominado soprador. Conforme indicado pelo fabricante, tal equipamento pode ser utilizado para limpeza de jardins, terrenos, máquinas agrícolas, áreas industriais, grandes áreas públicas e manutenção de estádios e rodovias. A limpeza é realizada através de sopro nas superfícies. É comum a utilização deste equipamento, conforme indicação, em grandes áreas públicas e também em estacionamentos privados. Como o concreto permeável é normalmente utilizado em áreas de estacionamentos e também de circulação pública, optou-se pela utilização deste equipamento para realizar a limpeza periódica. A Figura 43 apresenta o equipamento utilizado no pavimento.

FIGURA 43 - a) Equipamento soprador; b) Realização da limpeza na calçada



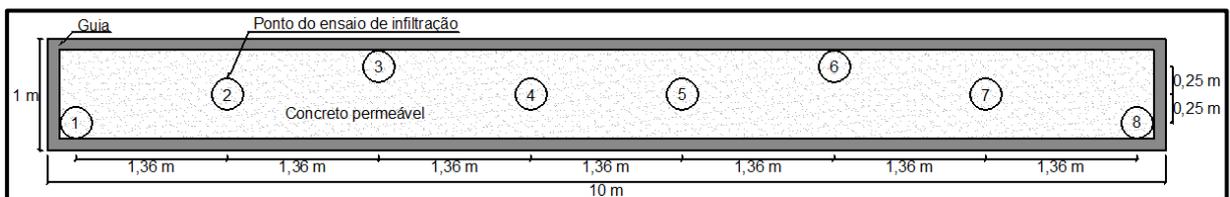
Fonte: Próprio Autor.

A limpeza foi realizada em todo o pavimento, porém em metade optou-se por fazê-la mensalmente, mais precisamente a cada 28 dias e na outra metade em fazê-la semanalmente, a cada 7 dias. Com isto, foi possível analisar se frequências diferentes de manutenção poderiam interferir significativamente, e ainda, se durante os quatro primeiros meses, era registrada queda nas taxas de infiltração em alguma das metades da calçada.

Para a realização dos ensaios de determinação das taxas de infiltração foram adotados oito pontos espaçados igualmente na superfície da calçada. Dos oito, foram adotados quatro para a metade do pavimento limpa mensalmente, nomeados

de 1 ao 4 e os outros quatro para a metade limpa semanalmente, nomeados de 5 ao 8. Nas duas metades, os pontos foram dispostos simetricamente, com pontos alocados nos cantos, próximos às extremidades da guia, e, outros alocados mais ao centro, longe das guias. Isto, para observar se houve variabilidade entre as taxas de infiltração em pontos próximos ou distantes dos cantos, além de proporcionar uma média geral para o pavimento, considerando todas as regiões. A Figura 44 apresenta a disposição dos pontos sobre a superfície da calçada.

FIGURA 44 - Vista superior da calçada e disposição dos pontos de ensaio de infiltração



Fonte: Próprio Autor.

O primeiro ensaio de infiltração foi realizado logo após a retirada da lona, no dia 19 de Dezembro de 2018, em todos os pontos, para o reconhecimento da permeabilidade inicial na calçada. Posteriormente, os ensaios de infiltração nos oito pontos foram realizados semanalmente, sempre às quartas-feiras. Na metade limpa semanalmente, tal manutenção foi realizada no mesmo dia, sempre antes dos ensaios de infiltração. Na metade limpa mensalmente, a manutenção também foi realizada sempre antes dos ensaios de infiltração, porém apenas uma vez a cada quatro semanas. Nas outras semanas, os ensaios de infiltração eram realizados sem nenhum tipo de limpeza, exceto se houvesse algum detrito grosseiro, que atrapalhasse a realização dos ensaios, este era retirado manualmente.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para confirmar os resultados laboratoriais, devido a sua variabilidade, optou-se por realizar uma análise estatística com testes do tipo “*t* de Student”, que permitiram comparar os resultados de resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral e à tração na flexão, com os de outros autores que trabalharam com concretos semelhantes. Existem várias situações em que pode ser

aplicado este tipo de inferência estatística e mais detalhes sobre esta análise podem ser obtidos em Moore, Notz e Fligner (2017).

Posteriormente, na análise das taxas de infiltração com o passar do tempo para a calçada nas duas metades com diferentes frequências de manutenção, foi realizado teste estatístico de análise de variância (ANOVA), que permite testar estatisticamente se médias de vários grupos de amostragem podem ser consideradas iguais ou diferentes entre si. Foi realizado um teste ANOVA de fator duplo com repetição, para analisar todos os dados dos quatro pontos de cada metade do pavimento a cada período de 28 dias transcorridos. A análise de dois fatores permitiu verificar se existe diferença estatística entre os trechos com manutenção mensal e semanal, e ainda, se existe diferença estatística entre os dados médios a cada mês. Mais detalhes sobre este tipo de análise estatística pode ser obtido em Moore, Notz e Fligner (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da etapa laboratorial são neste capítulo apresentados e discutidos para posteriormente ser mostrada a análise e discussão dos estudos de permeabilidade da calçada aplicada em campo.

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES LABORATORIAIS

Os ensaios laboratoriais serviram como guia até a escolha da mistura mais eficiente com os agregados disponíveis na região da pesquisa para construção de uma calçada em concreto permeável. A seguir serão mostrados e discutidos os resultados laboratoriais.

4.1.1 Resultados da Fase 1

Para a determinação da proporção ideal de materiais, na Fase 1 foram trabalhados três traços em que foram avaliados os desempenhos de: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios e massa específica aparente aos 14 dias de idade, inicialmente. O índice de vazios e o consumo de cimento por metro cúbico são calculados para cada lote moldado, considerando os valores médios da massa específica aparente da mistura. As Tabelas 13, 14 e 15 apresentam os resultados dos traços 1:3,5, 1:5 e 1:6,5, respectivamente.

TABELA 13 – Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios, consumo de cimento e massa específica aparente para o traço M3,5-1-1 aos 14 dias

Identificação	Porcentagem de vazios (%)	Consumo de cimento (kg/m³)	Resistência à compressão axial (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Massa específica aparente (kg/m³)
M3,5-1-1	16,70	471,37	20,78	2,46	2.222
			18,96	2,60	2.250
			15,66	2,40	2.235
	Média		18,47	2,49	2.236
	Desvio Padrão		2,60	0,10	14,12
	Coeficiente de Variação (%)		14,05	4,17	0,63

Fonte: Próprio Autor.

TABELA 14 – Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios, consumo de cimento e massa específica aparente para traço M5-1-1 aos 14 dias

Identificação	Porcentagem de vazios (%)	Consumo de cimento (kg/m³)	Resistência à compressão axial (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Massa específica aparente (kg/m³)
M5-1-1	24,14	331,39	8,97	2,05	2.099
			11,46	2,08	2.048
			9,24	1,84	2.069
	Média		9,89	1,99	2.072
	Desvio Padrão		1,37	0,13	25,54
	Coeficiente de Variação (%)		13,82	6,60	1,23

Fonte: Próprio Autor.

TABELA 15 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios, consumo de cimento e massa específica aparente para traço M6,5-1-1 aos 14 dias

Identificação	Porcentagem de vazios (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência à compressão axial (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Massa específica aparente (kg/m ³)
M6,5-1-1	28,31	254,11	7,16	1,19	1.982
			8,05	1,30	1.957
			7,13	0,84	1.986
	Média		7,45	1,11	1.975
	Desvio Padrão		0,52	0,24	15,61
	Coeficiente de Variação (%)		7,02	21,75	0,79

Fonte: Próprio Autor.

Os resultados de resistência à compressão das misturas mostram um desempenho relacionado com a quantidade de cimento, conforme já era esperado. Em média nota-se queda de resistência de 46,4% e 59,7% para as misturas M5-1-1 e M6,5-1-1 em relação à mistura M3,5-1-1, respectivamente.

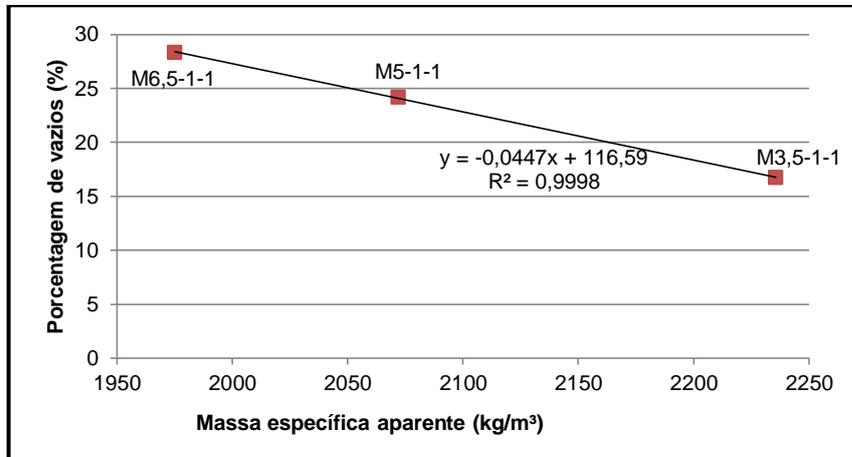
Quanto a resistência à tração por compressão diametral a mesma tendência foi observada, em média houve redução de 20% e 55,5% para as misturas M5-1-1 e M6,5-1-1 em relação à mistura M3,5-1-1, respectivamente. Observa-se queda mais acentuada quanto a esta propriedade para a mistura M6,5-1-1.

Também fica claro que a massa específica e o índice de vazios são dependentes da quantidade de cimento, uma vez que esta seja a responsável pelo teor de pasta que envolve os agregados, e mais pasta significa menos vazios, conseqüentemente maior massa específica aparente. Quando comparadas com a M3,5-1-1, há reduções de 7,3% e 11,7% na massa específica aparente e aumento de 44,5% e 69,5% no índice de vazios para as misturas M5-1-1 e M6,5-1-1, respectivamente. Por fim, é notória a redução na quantidade de cimento consumido pelos traços M5-1-1 e M6,5-1-1, sendo 29,7% e 46,1% menores em relação à mistura M3,5-1-1.

Relacionaram-se alguns parâmetros para observação de tendências entre as diferentes dosagens. A relação entre porcentagem de vazios e a massa específica aparente se comporta de maneira bem linear, como pode ser vista na Figura 45 e

justificada pelo valor do coeficiente de determinação (R^2), o qual ficou muito próximo de 1, indicando confiabilidade na relação linear entre esses dois parâmetros.

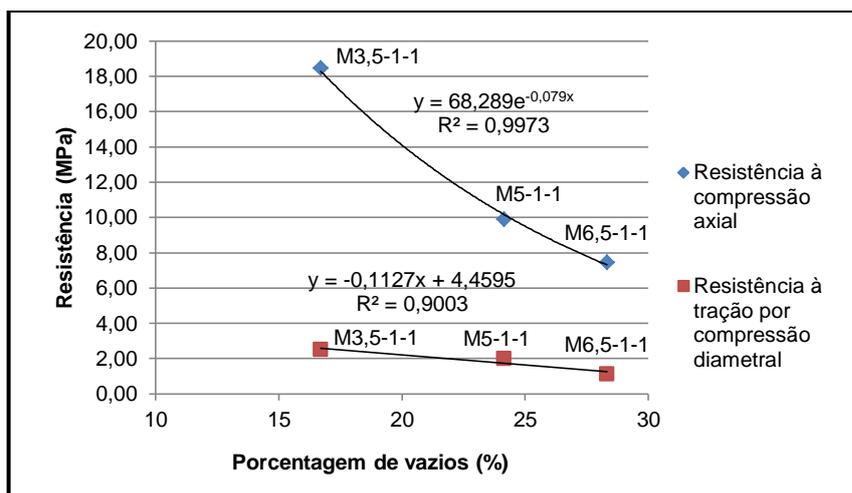
FIGURA 45 - Porcentagem de vazios em função da massa específica aparente



Fonte: Próprio Autor.

A relação entre os parâmetros mecânicos e a porcentagem de vazios também induz a uma tendência, porém observa-se um decréscimo exponencial para a resistência à compressão axial, enquanto que, na resistência à tração por compressão diametral, a queda de resistência assume um padrão mais linear, com menor intensidade e precisão, pois apresentou R^2 menor, embora também próximo de 1. A Figura 46 apresenta essas relações.

FIGURA 46 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral em função da porcentagem de vazios

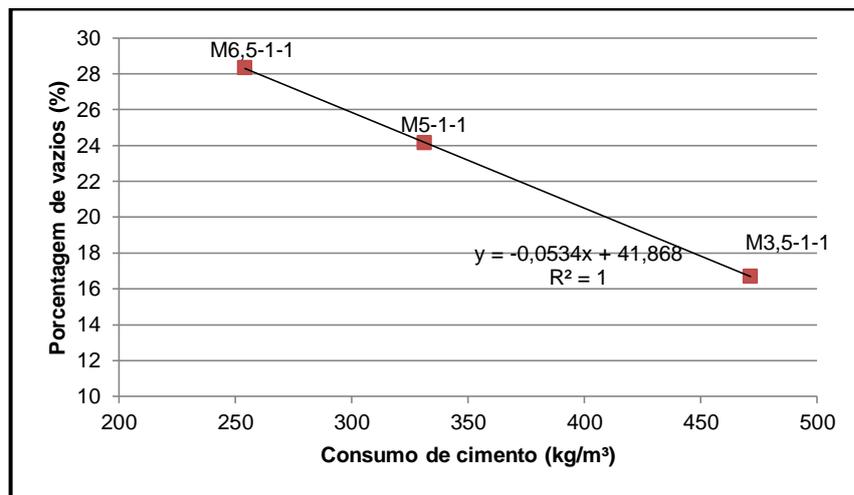


Fonte: Próprio Autor.

Considerando a linearidade entre a porcentagem de vazios e a massa específica aparente, a partir da Figura 45 é possível estabelecer que a relação de aumento das resistências com o aumento da massa específica aparente segue aproximadamente o mesmo padrão de tendência de redução com o aumento da quantidade de vazios visto na Figura 46.

O consumo de cimento também foi um parâmetro observado para os resultados, e foi notória a linearidade que este apresenta com a porcentagem de vazios do concreto conforme apresentado na Figura 47.

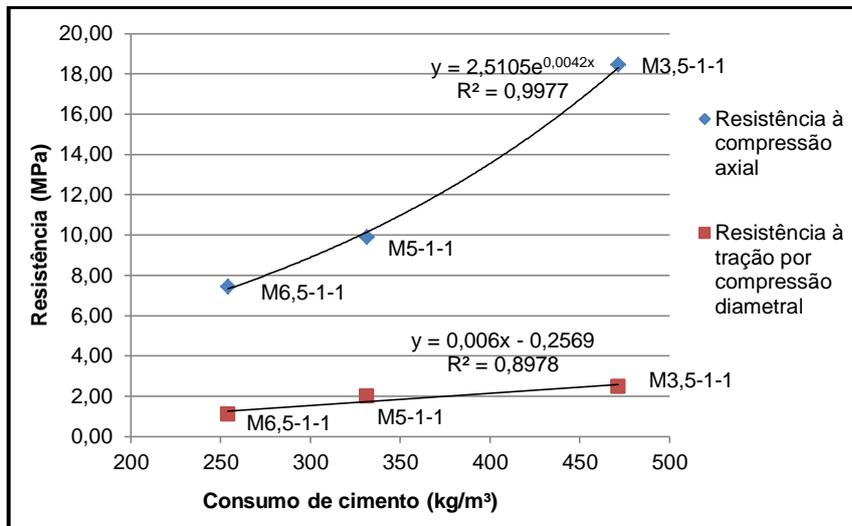
FIGURA 47 - Porcentagem de vazios em função do consumo de cimento



Fonte: Próprio Autor.

Novamente, devido à linearidade destes parâmetros, as tendências de crescimento de resistência à compressão e à tração com o aumento da quantidade de cimento são inversamente proporcionais às tendências de sua redução com o aumento do índice de vazios (mostrada anteriormente na figura 46). A Figura 48 apresenta esta tendência de crescimento de resistência à compressão e à tração com o aumento da quantidade de cimento e é notório que os coeficientes de determinação são bastante próximos dos vistos na Figura 46.

FIGURA 48 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral em função do consumo de cimento



Fonte: Próprio Autor.

A mistura M3,5-1-1 foi diretamente descartada pela colmatação visível, além de ser economicamente e ambientalmente desinteressante pelo alto consumo de cimento e massa específica elevada para um concreto permeável. Em relação aos aspectos mecânicos, a mistura M6,5-1-1 apresentou redução muito alta de resistência à tração por compressão diametral, fator esse muito importante para aplicação desse material como pavimento para tráfego de veículos. Portanto, considerando este aspecto mecânico e a boa condição dos demais parâmetros analisados, optou-se por trabalhar com o traço correspondente da mistura M5-1-1, que é 1:5 (cimento:agregado).

Vale ainda ressaltar, que foi escolhida uma mistura com boa resistência à tração porque o objetivo foi desenvolver uma mistura que atendesse às solicitações de carregamentos de veículos. Porém, em calçadas, ciclovias ou pavimentos por onde transitem apenas pedestres, a mistura M6,5-1-1 pode ser considerada uma boa opção, desde que sejam realizados os devidos estudos de viabilidade.

4.1.2 Resultados da Fase 2

Para a determinação do tamanho ideal de agregado a ser utilizado, nesta Fase foram usados dois agregados disponíveis comercialmente na região do estudo, separadamente e juntos, de maneira a se obter o melhor empacotamento. Avaliou-

se os desempenhos de resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios, massa específica aparente e taxa de infiltração (E1 representa o ensaio de infiltração segundo a ISO 17785-1 (ISO, 2016) e E2 o realizado por Haselbach (2010)), aos 28 dias de idade. As Tabelas 16, 17 e 18 mostram os resultados das misturas com brita 1 novamente (em um novo lote), com brita 0 e com a mistura de ambas (10% de brita 0 e 90% de brita 1), respectivamente.

TABELA 16 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios, consumo de cimento, massa específica aparente e taxa de infiltração para a mistura M5-1-2 aos 28 dias

Identificação	Porcentagem de vazios (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência à compressão axial (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Massa específica aparente (kg/m ³)	Taxa de infiltração (cm/s)	
						E1	E2
M5-1-2	29,73	306,97	8,29	1,16	1.908	1,74	1,98
			8,62	1,34	1.930	2,19	2,28
			8,45	1,05	1.920	1,88	2,08
			8,59	1,10	-	1,85	2,26
	Média		8,49	1,16	1.919	1,91	2,14
	Desvio Padrão		0,15	0,12	11,02	0,19	0,14
	Coeficiente de Variação (%)		1,78	10,62	0,57	10,05	6,78

Fonte: Próprio Autor.

TABELA 17 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios, consumo de cimento, massa específica aparente e taxa de infiltração para a mistura M5-0-1 aos 28 dias

Identificação	Porcentagem de vazios (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência à compressão axial (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Massa específica aparente (kg/m ³)	Taxa de infiltração (cm/s)	
						E1	E2
M5-0-1	28,70	305,92	10,49	1,25	1.935	1,42	1,62
			12,24	1,30	1.927	1,29	1,30
			8,95	0,93	1.904	1,18	1,23
			7,20	1,17	-	1,05	1,15
	Média		9,72	1,16	1.922	1,23	1,33
	Desvio Padrão		2,15	0,16	16,09	0,16	0,21
	Coeficiente de Variação (%)		22,13	13,91	0,84	12,62	15,61

Fonte: Próprio Autor.

TABELA 18 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, porcentagem de vazios, consumo de cimento, massa específica aparente e taxa de infiltração para a mistura M5-1/0-1 aos 28 dias

Identificação	Porcentagem de vazios (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência à compressão axial (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Massa específica aparente (kg/m ³)	Taxa de infiltração (cm/s)	
						E1	E2
M5-1/0-1	25,89	320,74	8,97	1,43	2.022	1,67	2,04
			8,29	1,42	2.014	1,75	1,84
			10,06	1,14	1.990	1,30	1,78
			10,96	0,98	-	1,75	2,09
	Média		9,57	1,24	2.008	1,62	1,94
	Desvio Padrão		1,18	0,22	16,65	0,22	0,15
	Coeficiente de Variação (%)		12,32	17,73	4,05	13,43	7,83

Fonte: Próprio Autor.

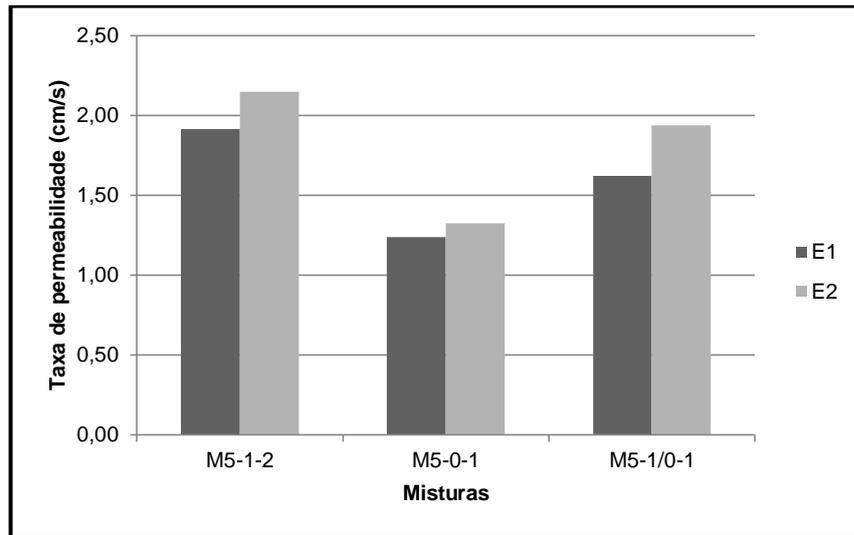
Nesta segunda Fase, comparando-se resultados de resistência à compressão axial, percebe-se uma leve melhora de 12,8% e 14,5%, em média, nas misturas M5-1/0-1 e M5-0-1, quando comparadas à mistura M5-1-2, porém deve-se considerar que o desvio padrão e o coeficiente de variação também foram maiores.

Quanto à resistência à tração por compressão diametral, não se pode afirmar que houve diferença significativa entre os resultados obtidos, visto que todos eles se apresentam muito próximos em todos os traços.

Em relação à massa específica aparente em estado fresco, as misturas M5-1-2 e M5-0-1 praticamente mantiveram a mesma, sendo apenas em média 0,14% maior a M5-0-1, a qual representa o uso do agregado de menor granulometria. Quando os dois agregados são misturados, nota-se um leve aumento da massa específica de 4,7%, em média, quando comparado com a mistura M5-1-2. Para a porcentagem de vazios, tendência similar ocorre, mantendo-se praticamente sem alteração a porcentagem de vazios das misturas M5-1-2 e M5-0-1. Enquanto que, em comparação à primeira, a mistura M5-1/0-1 apresenta queda de volume de vazios de 12,9%. O consumo de cimento também é cerca de 4,5% maior para a M5-1/0-1 em relação as outras duas misturas que apresentam valores bem próximos.

Os ensaios de infiltração foram realizados para as misturas nesta Fase, e de maneira geral quando comparado à literatura obteve-se bons resultados de permeabilidade para todas as amostras, superando os valores mínimos estipulados pela NBR 16416 (ABNT, 2015). Nota-se que o método E1 tende a apresentar taxas de infiltração ligeiramente menores que o método E2, porém ambos os métodos apresentam resultados coerentes como pode ser visto graficamente na Figura 49. Ao compararem-se as misturas, notou-se maior permeabilidade para a mistura M5-1-2, precedendo as misturas M5-1/0-1 e M5-0-1 que apresentaram redução de 15,3% e 35,3%, respectivamente, em relação a M5-1-2, pelo método E1, enquanto que pelo método E2 essa redução foi de 9,9% e 38,3%. Nota-se, desta maneira, que o agregado de maior faixa granulométrica tem uma leve tendência a gerar maior permeabilidade, conforme já comentado por Liu *et al.* (2018), devido a maiores poros internos no concreto permeável.

FIGURA 49 – Taxas de infiltração médias das misturas pelos métodos E1 e E2

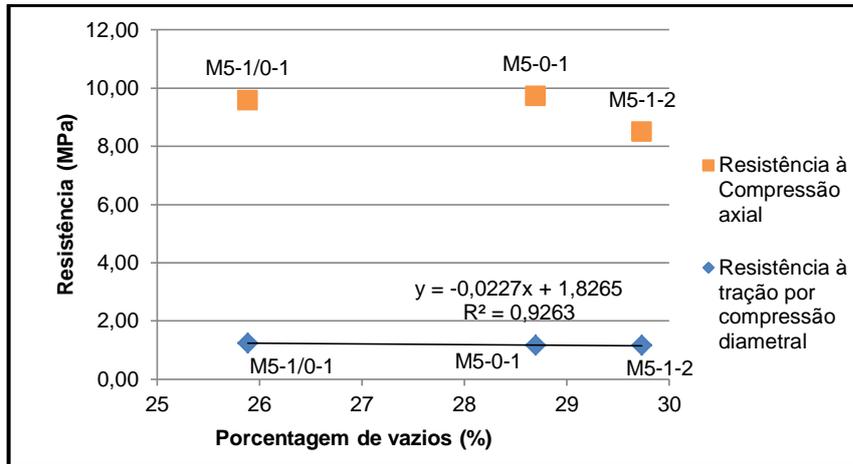


Fonte: Próprio Autor.

Relacionando alguns desses resultados graficamente, fica mais clara a percepção de algumas tendências. A Figura 50, que relaciona as médias de resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral com o índice de vazios da mistura, evidencia que para o mesmo traço e mesmo processo de adensamento, a mistura dos agregados que garante maior preenchimento de vazios, somente faz o percentual de vazios diminuir, sem proporcionar aumentos significativos de resistência. Por outro lado, observa-se também que o agregado de menor granulometria reduz sutilmente o percentual de vazios, enquanto proporciona leve melhoria na resistência à compressão, embora mantenha constante a resistência à tração.

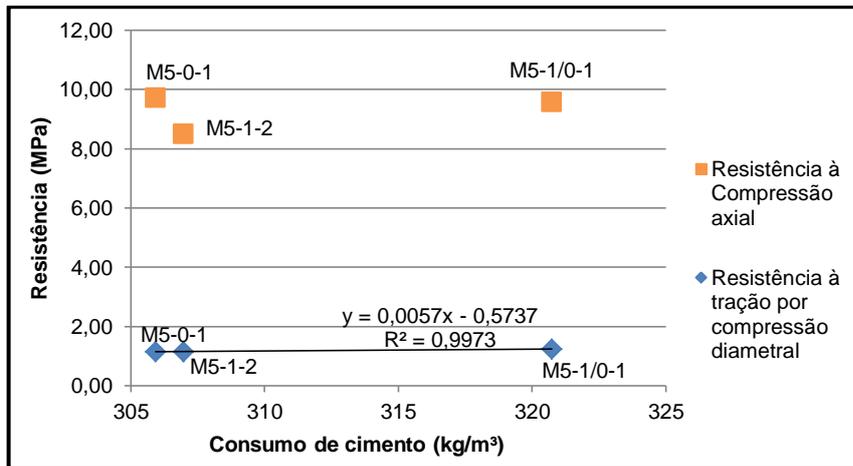
Outro fator importante é o maior consumo de cimento da mistura M5-1/0-1, em relação às outras duas, para manutenção do mesmo traço conforme pode ser observado na Figura 51, sem aumento significativo de resistência.

FIGURA 50 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral em função da percentagem de vazios



Fonte: Próprio Autor.

FIGURA 51 - Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral em função do consumo de cimento



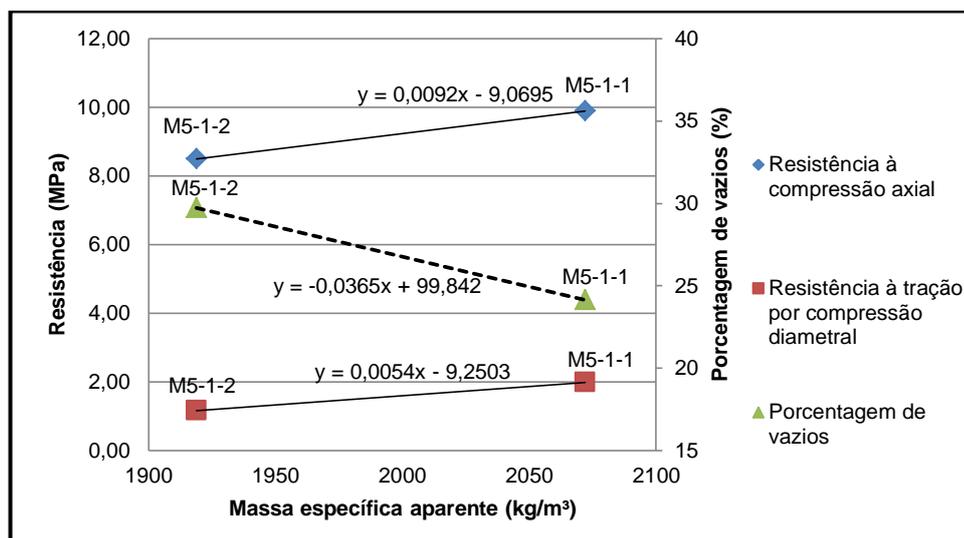
Fonte: Próprio Autor.

Para esta segunda Fase, notou-se que houve variação entre os parâmetros observados para o mesmo traço executado na Fase 1 e repetido agora na Fase 2, o M5-1-1 e M5-1-2 (Figura 52). Notou-se uma redução média das resistências em torno de 14,18% à compressão axial e 41,56% à tração por compressão diametral na Fase 2. Em consequência, notou-se redução média da massa específica aparente e aumento do índice de vazios, respectivamente em 7,4% e 23,2%, quando se comparou a mistura M5-1-2 com a M5-1-1. Tais alterações provavelmente se

deram por fatores como temperatura ambiente e adensamento ser feito de maneira manual, pois cada uma das Fases foi executada separadamente.

Atribui-se principalmente ao fator adensamento a variação de massa específica e índice de vazios (influenciada pela compactação), que gerou a consequente alteração nos demais fatores. Vale ressaltar ainda que o tempo de cura da Fase 2 foi maior do que o da Fase 1, mostrando que, hipoteticamente, a massa específica e o índice de vazios tem maior influência do que a diferença entre as idades de ensaio, sendo que 14 dias o concreto já adquiriu resistência. A Figura 52 indica o comportamento das resistências à compressão axial, à tração por compressão diametral e porcentagem de vazios em decorrência do aumento da massa específica aparente para o mesmo traço, em diferentes lotes.

FIGURA 52 - Comportamento das resistências à compressão axial, à tração por compressão diametral e porcentagem de vazios em decorrência do aumento da massa específica aparente para as misturas M5-1-1 e M5-1-2



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 52 evidencia, portanto, como o processo de compactação pode interferir nas resistências, porcentagem de vazios e massas específicas aferidas, neste caso para um mesmo traço, moldados em dias diferentes. Nota-se a partir do coeficiente angular das equações das retas de resistência à compressão e à tração, a pouca diferença de inclinação de ambas, o que prejudica muito a resistência à tração, visto seu baixo valor.

Através das comparações realizadas e principalmente pela observação de que o traço M5-0-1, constituído de brita de menor granulometria, apresentou melhor acabamento, maior facilidade de moldagem dos corpos de prova e nenhum sinal de colmatação, decidiu-se então continuar com este traço para os ensaios seguintes.

4.1.3 Resultados da Fase 3

Para a confirmação da eficiência da mistura M5-0-1, repetiu-se nesta Fase todos os ensaios novamente com a mistura M5-0-2 e, adicionalmente, com outro lote, M5-0-3, mais seis corpos de prova prismáticos para aferição da resistência à tração na flexão.

Avaliou-se novamente os desempenhos de resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral, percentagem de vazios, massa específica aparente e taxa de infiltração, aos 28 dias de idade. A repetição dos ensaios já realizados se torna necessária, visto a possível variação pela moldagem em diferentes lotes. Os resultados são apresentados nas Tabelas 19 e 20.

TABELA 19 – Resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral, percentagem de vazios, consumo de cimento, massa específica aparente e taxa de infiltração para o traço M5-0-2 aos 28 dias

Identificação	Porcentagem de vazios (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência à compressão axial (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Massa específica aparente (kg/m ³)	Taxa de infiltração (cm/s)	
						E1	E2
M5-0-2	27,27	313,36	12,82	1,67	1.954	1,40	1,73
			14,62	2,12	1.968	1,30	1,46
			10,64	2,01	1.976	1,47	1,31
			16,73	1,62	1.965	1,43	1,72
	Média		13,70	1,85	1.966	1,40	1,56
	Desvio Padrão		2,59	0,25	9,13	0,07	0,21
	Coeficiente de Variação (%)		18,92	13,37	0,46	5,23	13,28

Fonte: Próprio Autor.

TABELA 20 – Resistência à tração na flexão, massa específica aparente, consumo de cimento e porcentagem de vazios para os corpos de prova prismáticos do traço M5-0-3 aos 28 dias

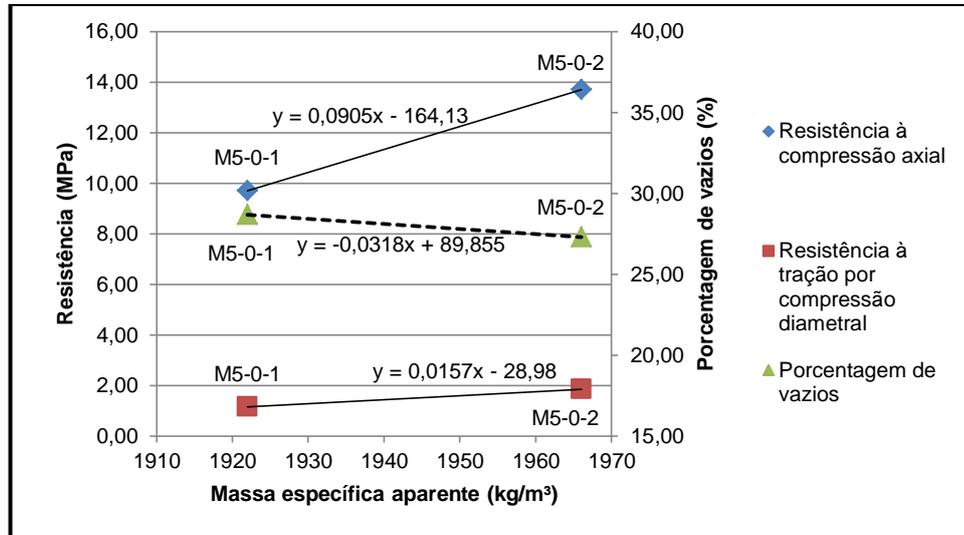
Identificação	Porcentagem de vazios (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Massa específica aparente (kg/m ³)
M5-0-3	26,68	315,93	3,29	1.990
			3,30	1.978
			3,30	1.976
			3,32	1.960
			3,41	1.960
			3,37	1.951
		Média	3,33	1.969
		Desvio Padrão	0,05	14,62
		Coefficiente de Variação (%)	1,39	0,74

Fonte: Próprio Autor.

Esta terceira Fase apresentou melhores resultados de resistência mecânica, em relação à mesma mistura na Fase 2. O adensamento, realizado da mesma maneira em todas as Fases, pode proporcionar essas variações entre os lotes, conforme esboçado na Figura 53, que apresenta o aumento de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral e diminuição do índice de vazios em função da maior massa específica aparente da mistura para um mesmo traço, de diferentes lotes.

Nota-se que para esta mistura, em que se utiliza a brita 0, os coeficientes angulares das equações das retas de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral, 0,0905 e 0,0157 respectivamente, são ainda maiores do que para as misturas com a brita 1, 0,0092 e 0,0054 respectivamente (Figura 52), para os diferentes lotes. Para o índice de vazios, o coeficiente angular de ambas as britas são muito próximos, -0,0318, para M5-0 e -0,0365, para M5-1. Vale ressaltar ainda que, como visto nos resultados, o concreto permeável é um material que apresenta muita discrepância entre os resultados amostrais devido a sua estrutura porosa. Portanto, variações nas tendências podem ocorrer entre lotes diferentes.

FIGURA 53 - Comportamento das resistências à compressão axial, à tração por compressão diametral e porcentagem de vazios em decorrência do aumento da massa específica aparente para as misturas M5-0-1 e M5-0-2



Fonte: Próprio Autor.

Para a infiltração, notou-se um leve aumento da mesma mistura nesta Fase 3, em relação a Fase 2, de 13% para o método de ensaio E1 e 17,4% para o E2. Porém ambos os valores são próximos e tal aumento provavelmente se deve como já comentado aos fatores externos de fabricação, lançamento e adensamento e a estrutura porosa do material.

Valores expressivos e com baixo coeficiente de variação foram obtidos para a resistência à tração na flexão (Tabela 20), que, segundo Balbo (2009) é um dos principais parâmetros mecânicos que deve ser considerado em concretos para pavimento sem armadura estrutural. Vale ressaltar ainda que, para eficiência em uma calçada por onde transitam apenas pedestres, não são necessárias resistências à tração na flexão tão elevadas quanto as observadas nesta mistura. Porém, como este estudo visa o projeto de um pavimento teste para a circulação de veículos, embora tenha sido feita uma calçada teste pequena, optou-se por trabalhar com esta mistura mais resistente.

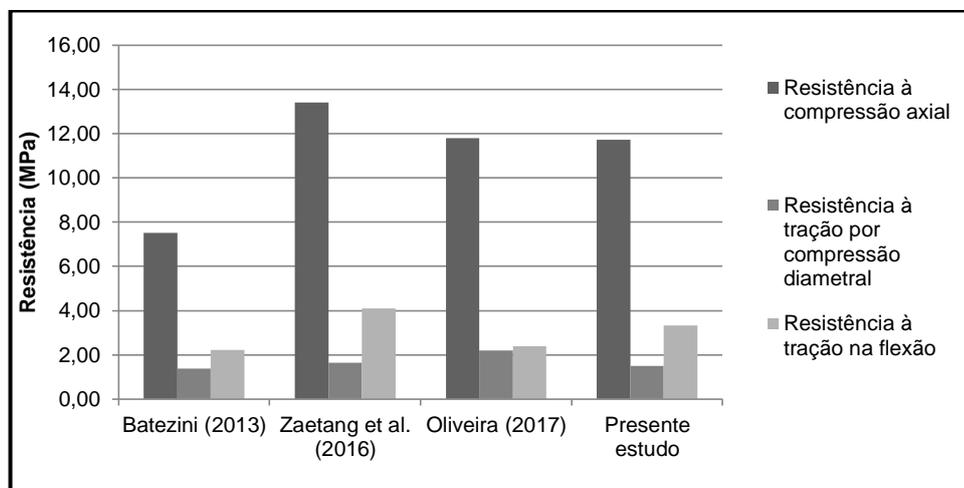
4.1.4 Comparação de Resultados com a Literatura

A Figura 54 compara os resultados médios de resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral e à tração na flexão de alguns trabalhos de

outros autores com os da presente pesquisa. Para a resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, considerou-se a média dos dois lotes produzidos da mistura escolhida (M5-0-1 e M5-0-2). O concreto do presente estudo contém em média 27% de vazios, massa específica de 1966 kg/m³, podendo haver pequenas variações entre diferentes lotes, e traço 1:5.

Os resultados de resistência estão dentro das faixas previstas na literatura e próximos a resultados obtidos por outros autores que experimentaram concretos semelhantes ao da presente pesquisa, como pode ser observado na Figura 54. O concreto estudado por Batezini (2013) tem 25% de vazios, massa específica média de 1841kg/m³ e traço 1:4,4. O de Zaetang *et al.* (2016) apresenta 25% de vazios, massa específica de 1920kg/m³ e traço 1:4,54. O de Oliveira (2017) possui 31,7% de vazios, massa específica de 1970kg/m³ e traço 1:4,4. Batezini (2013) estuda três diferentes misturas. Na Figura 54 está apresentada sua mistura que apresentou melhores resultados médios de resistência à tração na flexão, embora, de acordo com o autor, todas as suas misturas apresentaram resultados semelhantes em todos os parâmetros por ele analisados.

FIGURA 54 – Comparação da resistência média à compressão axial, à tração por compressão diametral e à tração na flexão da presente pesquisa e autores que trabalharam com concretos semelhantes



Fonte: Próprio Autor.

A análise estatística foi realizada com os valores obtidos pelos autores apresentados na Figura 54. O nível de significância utilizado foi de 5% o que reflete

em 95% de confiança. Na Tabela 21 está apresentado o resumo das análises estatísticas. Como somente Batezini (2013) disponibilizou em seu trabalho dados amostrais (usados para comparação no teste estatístico), a comparação com as demais pesquisas foi sob a média de cada um e, para a resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, considerou-se a média dos dois lotes produzidos da mistura final, escolhida na presente pesquisa.

TABELA 21 - Resumo das análises estatísticas

Dados analisados		Média	Variância	n	Stat t	t crítico
Resistência à compressão axial	Presente pesquisa	11,71	9,40	8	2,67	-1,86
	Batezini (2013)	8,68	0,34	3		
	Presente pesquisa	11,71	9,40	8	-0,08	-1,895
	Oliveira (2017)	11,8	-	-		
Presente pesquisa	11,71	9,40	8	-1,56	-1,895	
Zaetang <i>et al.</i> (2016)	13,4	-	-			
Resistência à tração por compressão diametral	Presente pesquisa	1,51	0,17	8	0,40	-1,81
	Batezini (2013)	1,44	0,04	9		
	Presente pesquisa	1,51	0,17	8	-4,68	-1,895
	Oliveira (2017)	2,2	-	-		
Presente pesquisa	1,51	0,17	8	-0,96	-1,895	
Zaetang <i>et al.</i> (2016)	1,65	-	-			
Resistência à tração na flexão	Presente pesquisa	3,33	0,002	6	11,42	-1,86
	Batezini (2013)	2,20	0,08	8		
	Presente pesquisa	3,33	0,002	6	49,23	-2,015
	Oliveira (2017)	2,4	-	-		
Presente pesquisa	3,33	0,002	6	-40,53	-2,015	
Zaetang <i>et al.</i> (2016)	4,1	-	-			

n = número de amostras; Stat t = t de Student calculado; t crítico = t crítico do limite inferior.

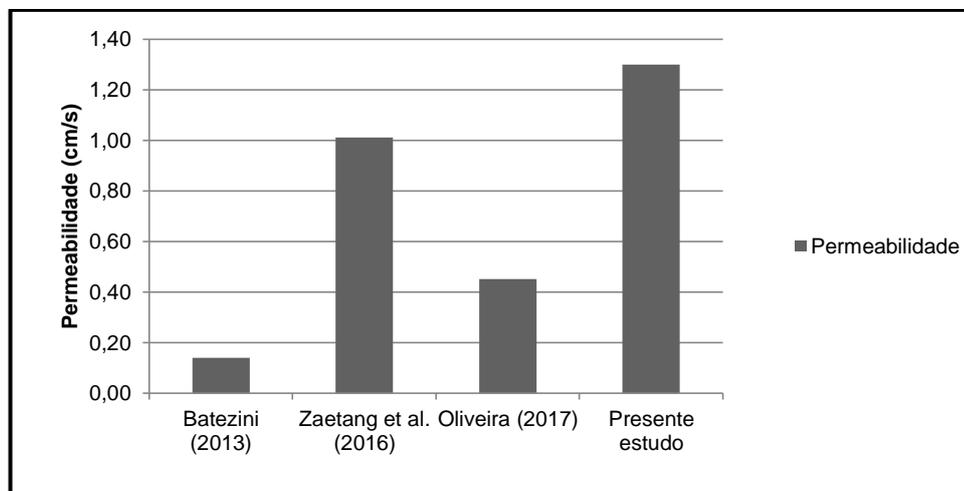
Fonte: Próprio Autor.

A partir das análises realizadas, os resultados da presente pesquisa são inferiores estatisticamente em resistência à tração por compressão diametral, quando se compara com os dados obtidos por Oliveira (2017). O mesmo ocorreu para a resistência à tração na flexão, quando se compara com os dados obtidos por Zaetang *et al.* (2016). As demais comparações mostram que com significância de

5% e, portanto, confiança de 95% a hipótese nula pode ser aceita, indicando que os resultados aqui apresentados tem potencial para serem considerados pelo menos iguais ou maiores que os resultados médios obtidos pelos outros trabalhos comparados.

Para a taxa de infiltração, os resultados encontrados também são aceitáveis quando comparados com estes autores. A Figura 55 mostra tal comparação das taxas de infiltração médias, considerando-se a média dos dois lotes produzidos da mistura final escolhida da presente pesquisa. Nota-se na Figura 55 que a permeabilidade do presente estudo é maior que os demais comparados.

FIGURA 55 - Comparação de permeabilidade da presente pesquisa e autores que trabalharam com concretos semelhantes



Fonte: Próprio Autor.

4.1.5 Comparação entre tipos de capeamento para a resistência à compressão axial

Como os coeficientes de variação se apresentaram maiores que os indicados pela NBR 5739 (ABNT, 2018) na resistência à compressão axial para o concreto convencional, optou-se por repetir para todas as misturas o ensaio de resistência à compressão, com regularização do topo e da base dos corpos de prova cilíndricos com pasta de cimento.

Também foram observados coeficientes de variação da resistência à compressão de outros autores que trabalham com concreto permeável, para

comparação. A Tabela 22 apresenta de maneira resumida as médias obtidas e os coeficientes de variação para a resistência à compressão com o capeamento em madeirite, já apresentados nas comparações anteriores nas fases 1, 2 e 3, e também com pasta de cimento, aos 28 dias, para todas as misturas realizadas novamente.

TABELA 22 - Média e coeficiente de variação para a resistência à compressão axial com capeamento em madeirite e em pasta de cimento

Identificação	Resistência à compressão axial			
	Madeirite		Pasta de cimento	
	Média (MPa)	Coeficiente de variação (%)	Média (MPa)	Coeficiente de variação (%)
Mistura M3,5-1-1	18,47	14,05	14,79	7,07
Mistura M5-1-1	9,89	13,82	11,47	13,81
Mistura M5-1-2	8,49	1,78		
Mistura M6,5-1-1	7,45	7,02	7,34	17,5
Mistura M5-1/0-1	9,57	12,32	11,6	6,59
Mistura M5-0-1	9,72	22,13	11,01	13,65
Mistura M5-0-2	13,7	18,92		

Fonte: Próprio Autor.

Pela análise da Tabela 22 é perceptível que o capeamento com pasta de cimento proporcionou menor variação para as misturas M3,5-1, M5-1/0 e M5-0. Para a mistura M5-1, a variação foi praticamente igual com os dois tipos de capeamento, considerando o lote 1 da mistura capeada com madeirite, e no lote 2 da mesma, o coeficiente de variação foi bem menor. Por fim, o madeirite também apresentou menor variabilidade para a mistura M6,5-1. Foram também observadas novamente pequenas diferenças nas médias de resistência para mesmas misturas, devido a serem de diferentes lotes e tais variações podem ocorrer como já visto e comentado anteriormente.

Através de uma análise da literatura, confirmou-se que é comum a elevada variabilidade amostral devido à elevada porosidade que este apresenta. A Tabela 23 apresenta a média e o coeficiente de variação de alguns autores que trabalharam com resistência à compressão axial de corpos de prova cilíndricos de concretos permeáveis. Os resultados apresentados mostram somente o grupo amostral com

maior variabilidade de dados para cada autor, sendo que todos eles trabalharam com mais de um grupo amostral.

TABELA 23 - Média e coeficiente de variação máximos para a resistência à compressão axial de diversos autores

Autores	Resistência à compressão axial		
	Espaço amostral	Média (MPa)	Coeficiente de variação (%)
Oliveira (2017) – CPs moldados	6	12,75*	16,00*
Batezini (2013) – CPs moldados	3	8,45	25,62
Brake, Allahdadi e Adam (2016) – CPs moldados	Não especificado	9,00	26,00
Sandoval (2014) – CPs moldados	7	9,96	32,51
Costa <i>et al.</i> (2018) – CPs extraídos de placas	3	3,31	10,87
Lamb (2014) – CPs extraídos de placas	6	14,18	29,00

* Valores estimados por pontos obtidos graficamente

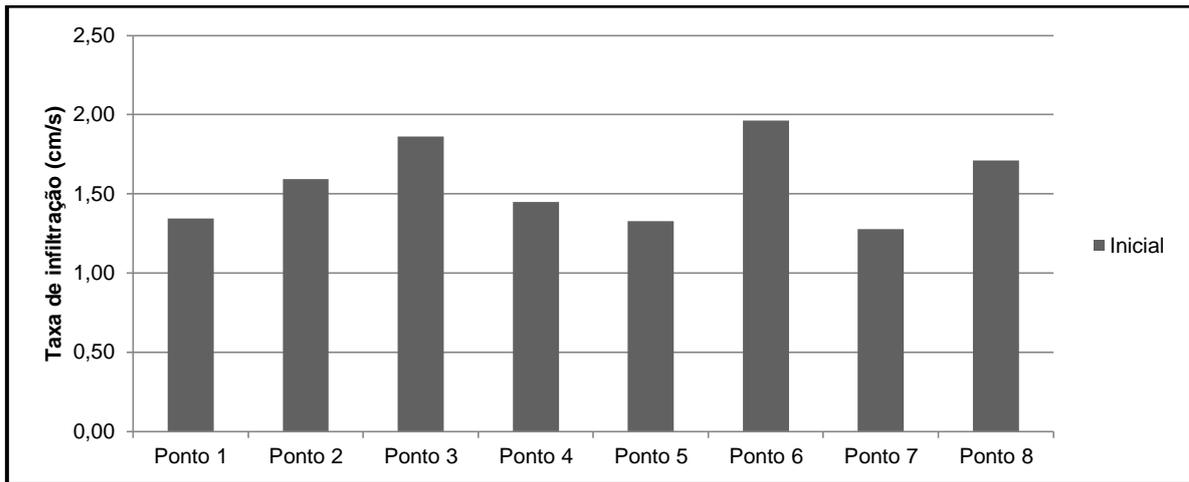
Fonte: Modificado (OLIVEIRA, 2017; BATEZINI, 2013; BRAKE; ALLAHDADI; ADAM, 2016; SANDOVAL, 2014; COSTA *et al.*, 2018; LAMB, 2014).

4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES DA ANÁLISE EM CAMPO

4.2.1 Taxa de infiltração inicial

A Figura 56 apresenta as taxas de infiltração inicial na calçada logo após a retirada da lona. É possível observar variabilidade entre os oito pontos, porém se percebeu comportamentos semelhantes em pontos aferidos na mesma posição. Por exemplo, os pontos 3 e 6 apresentaram as maiores taxas de infiltração, localizados ambos simetricamente próximos à guia, atingindo permeabilidade de 1,86 cm/s e 1,96 cm/s respectivamente. Já os pontos 2, 4, 5 e 7, todos localizados em regiões centrais da calçada, apresentaram taxas de infiltração iniciais variando de 1,28 cm/s a 1,59 cm/s, bastante próximas também. Os únicos pontos simétricos que não apresentaram similaridades entre si foram os dos cantos 1 e 8, com taxas de infiltração de 1,35 cm/s e 1,71 cm/s, respectivamente. Estes valores estão de acordo com as permeabilidades encontradas em pavimentos de concreto permeável estudados por Kayhanian *et al.* (2012).

FIGURA 56 – Taxas de infiltração iniciais na calçada



Fonte: Próprio Autor.

Foi perceptível que, com exceção do ponto 1, os pontos mais próximos à guia, 3, 6 e 8, apresentaram taxas de infiltração inicial maiores que os demais, todos centrais. A principal causa para este fenômeno aparenta ser a compactação desigual que, eventualmente, ocorre em diferentes regiões do pavimento. Pela Figura 57 ficou perceptível que nas extremidades o concreto tem um aspecto mais poroso e menos compacto que na região central. Tal redução de compactidade nestas regiões favorece a infiltração de água, deixando a calçada sutilmente mais permeável próximo às guias. Diferenças de porosidade entre regiões de um mesmo pavimento podem ocorrer quando o adensamento é feito com rolo, como comentado por Costa *et al.* (2018).

FIGURA 57 - Superfície da calçada

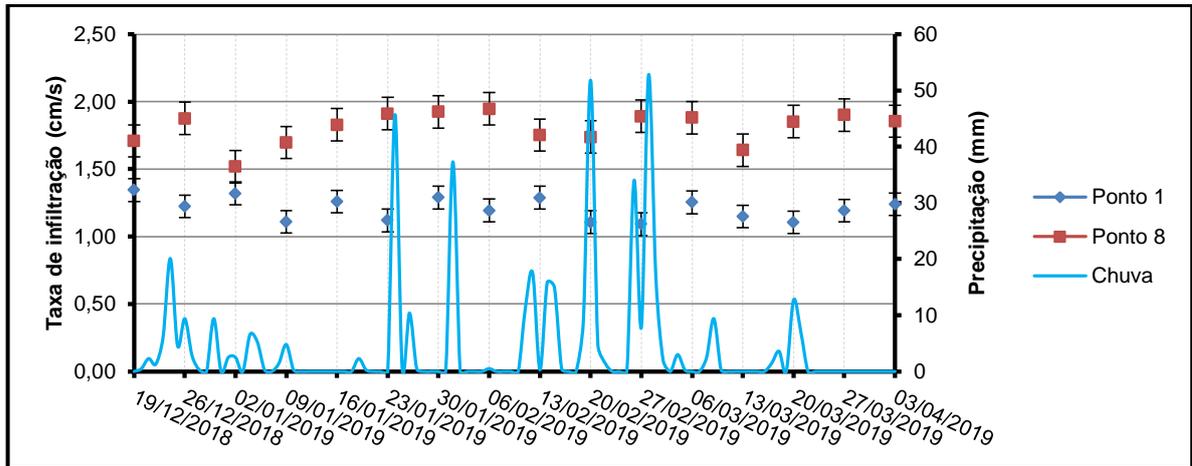


Fonte: Próprio Autor.

4.2.2 Comparação entre diferentes pontos

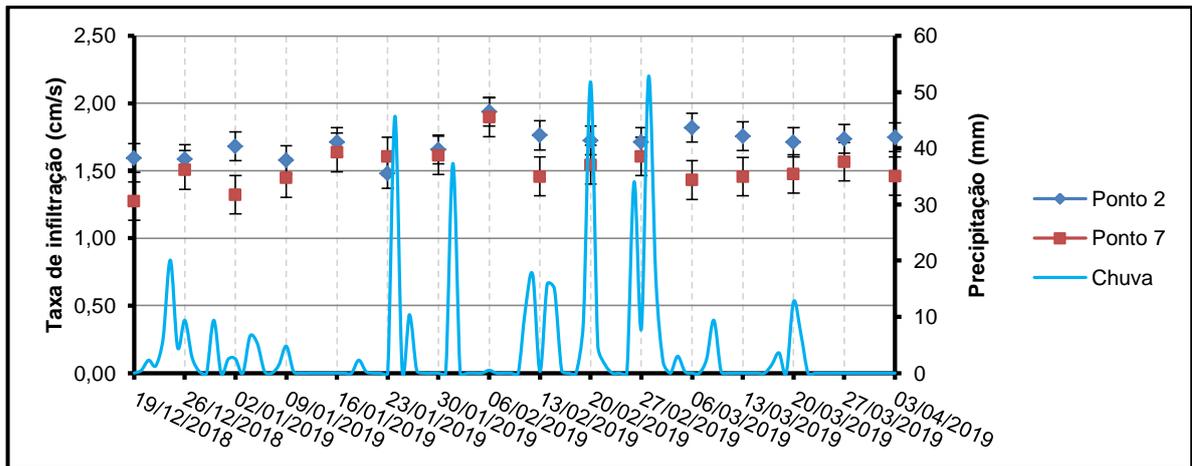
Para melhor compreensão da realização de manutenção mensal e semanal entre os pontos simétricos, as Figuras de 58 a 61 apresentam uma comparação destes com o passar do tempo. Foram também acrescentados dados da incidência pluviométrica diária na região do estudo no período das análises realizadas, com objetivo de aferir se a incidência de chuvas tinha potencial interferência nas taxas de infiltração. Tais dados foram obtidos pelo Canal Clima da UNESP de Ilha Solteira, que disponibiliza variáveis agrometeorológicas obtidas por estações automáticas instaladas em alguns municípios do Noroeste Paulista (UNESP, 2019). Os dados inseridos nas comparações foram provenientes da estação localizada no município de Ilha Solteira, a pouco mais de um quilômetro do local de construção da calçada. É importante ainda, salientar que a aferição da permeabilidade foi realizada sempre com ausência de chuva. Os ensaios foram realizados sempre na parte da manhã, e embora graficamente sejam perceptíveis dias com chuva no mesmo dia de realização do ensaio, esta ocorreu sempre depois dos ensaios.

FIGURA 58 - Comparação entre as taxas de infiltração dos pontos 1 e 8 com o passar do tempo



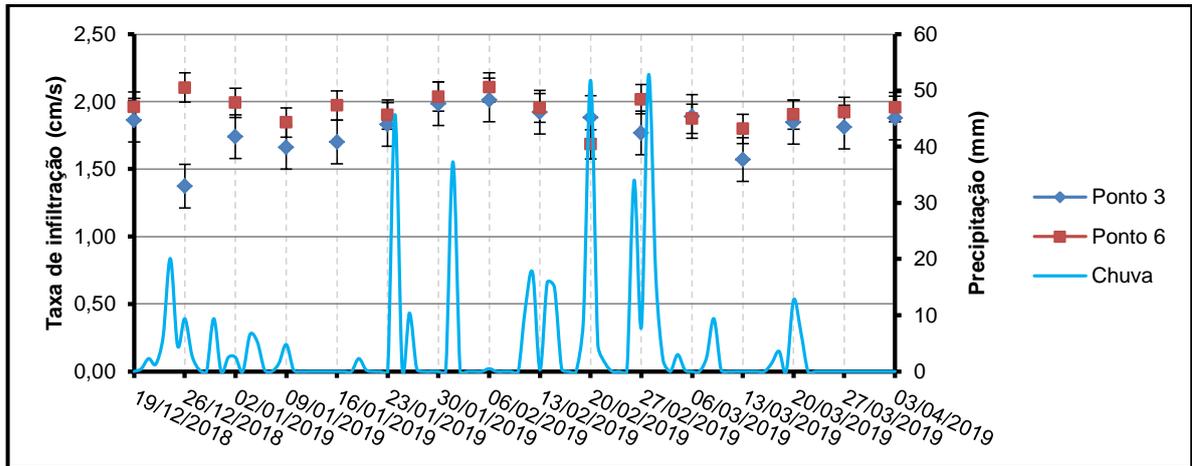
Fonte: Próprio Autor.

FIGURA 59 - Comparação entre as taxas de infiltração dos pontos 2 e 7 com o passar do tempo



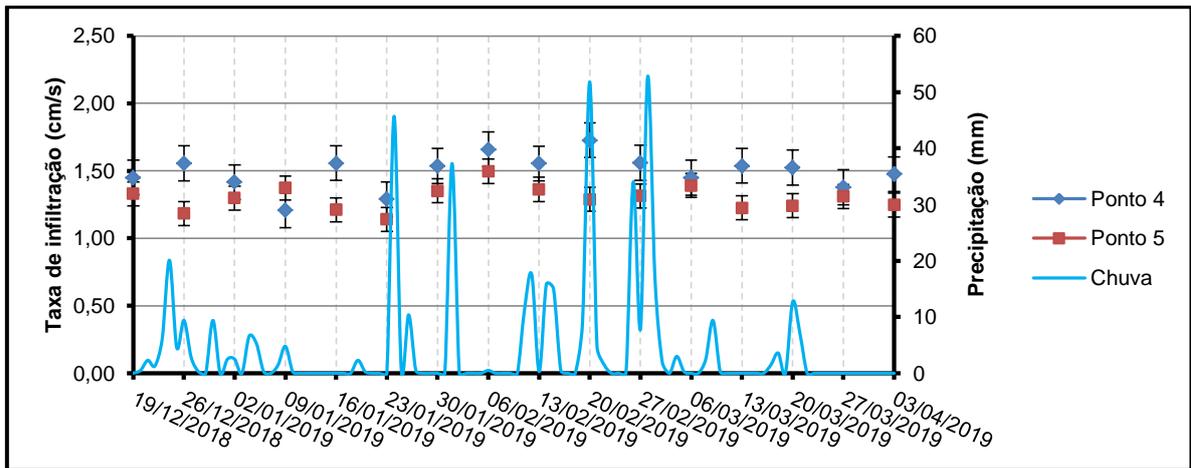
Fonte: Próprio Autor.

FIGURA 60 - Comparação entre as taxas de infiltração dos pontos 3 e 6 com o passar do tempo



Fonte: Próprio Autor.

FIGURA 61 - Comparação entre as taxas de infiltração dos pontos 4 e 5 com o passar do tempo



Fonte: Próprio Autor.

A comparação entre as permeabilidades dos pontos 1 e 8, limpos mensalmente e semanalmente respectivamente, é apresentada na Figura 58. Dentre os pontos simétricos, as taxas de infiltração foram as mais distantes entre si, para estes dois, comparados com os demais. Pela observação dos dois pontos durante todo o período, é perceptível que as permeabilidades se mantêm aproximadamente constantes. Para o ponto 1 as taxas de infiltração variaram de 1,09 cm/s até 1,35 cm/s, enquanto que no ponto 8 a variação foi de 1,52 cm/s até 1,95 cm/s. Os dados pluviométricos, mostram que durante o período de coleta dos dados, choveu em

quase todas as semanas, o que é uma característica comum para a época do ano. Porém, aparentemente a chuva não parece interferir significativamente nas taxas de infiltração. Tanto a ocorrência de chuvas próximas ou distantes dos dias de realização dos ensaios, mais ou menos intensas e com maiores ou menores pluviometrias não aparentam comprometer os resultados.

A comparação dos pontos 2 e 7 é apresentada na Figura 59, e percebe-se que, durante todo o período, a diferença entre os pontos é pequena, sendo o ponto 2, limpo mensalmente, levemente superior ao ponto 7, limpo semanalmente, desde o início. Aparentemente com o passar do tempo não há reduções significativas na taxa de infiltração com variação de 1,48 cm/s a 1,94 cm/s para o ponto 2 e, 1,28 cm/s a 1,90 cm/s para o ponto 7. A chuva também parece não interferir significativamente nos resultados.

Entre os pontos 3 e 6, a comparação apresentada na Figura 60 mostra taxas de infiltração bem próximas também entre estes, com o ponto 6 limpo semanalmente, levemente superior desde o início da coleta de dados, com taxas de infiltração de 1,68 cm/s a 2,11 cm/s, durante todo o período enquanto que o ponto 3 apresentou taxas de infiltração de 1,37 cm/s a 2,01 cm/s. O tempo e a incidência pluviométrica também não pareceram interferir significativamente.

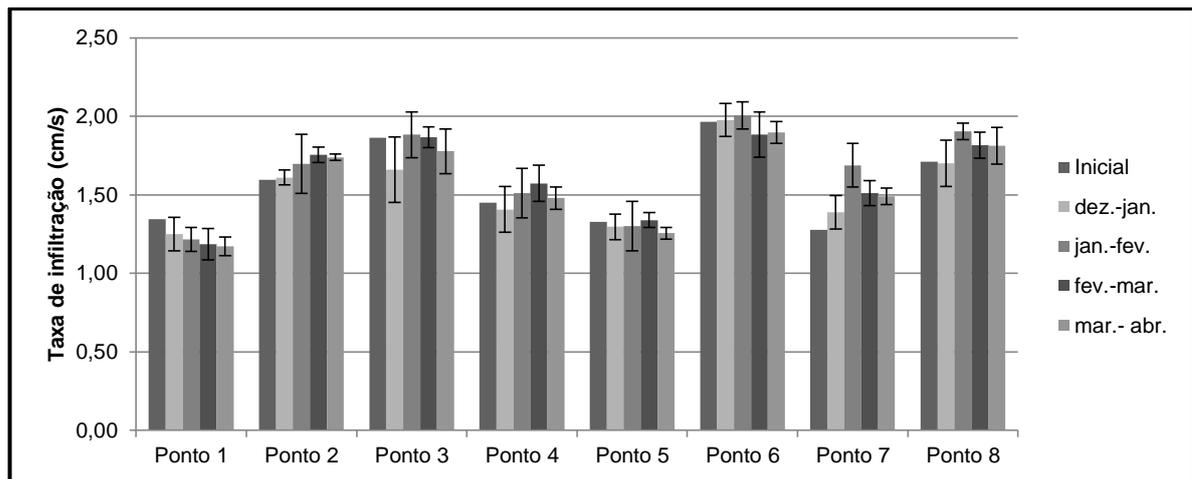
Por fim, a Figura 61 mostra a comparação entre os pontos 4 e 5, também com permeabilidades próximas, porém levemente superior desde o início no ponto 4, limpo mensalmente. Para os pontos 4 e 5 as taxas de infiltração variaram de 1,21 cm/s a 1,73 cm/s e 1,14 cm/s a 1,50 cm/s, respectivamente. Como visto já em todas as situações de comparações entre os pontos, nem chuva, nem o tempo pareceram influenciar significativamente em nenhum dos pontos.

Graficamente, nenhum dos pontos parece sofrer reduções nas taxas de infiltração, porém ocorrem pequenas variações em cada ensaio para um mesmo ponto. Pela observação do desvio padrão em cada ponto para todo o período de coleta dos dados, nota-se que o ponto 3 apresentou a maior variabilidade. O desvio padrão neste ponto foi de 0,16 cm/s, com coeficiente de variação de 9,00%. Outros autores que trabalharam com este método de ensaio de infiltração também observaram variabilidade entre ensaios no mesmo ponto. Em relação ao trabalho de Li, Kayhanian e Harvey (2013), cujo pavimento estudado apresentava permeabilidade inferior, este desvio pode ser considerado aceitável, visto que as taxas de infiltração do presente estudo são muito mais elevadas.

4.2.3 Médias mensais para os oito pontos

Para entender melhor o comportamento entre todos os pontos com o passar do tempo, é apresentada na Figura 62 a média mensal, a cada quatro semanas, dos oito pontos.

FIGURA 62 - Médias mensais de cada ponto durante todo o período de coleta de dados



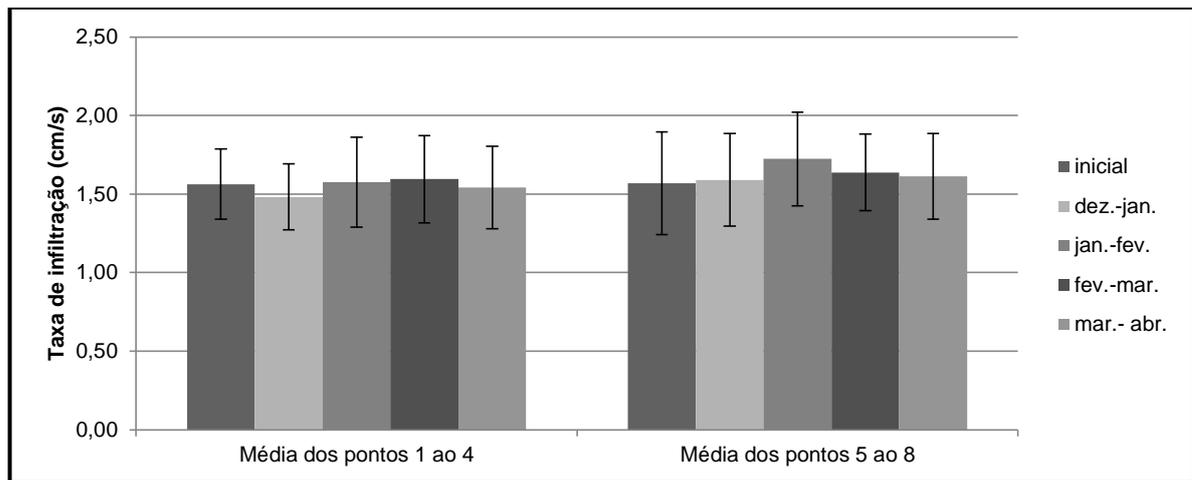
Fonte: Próprio Autor.

Com o passar dos meses, é possível perceber que o ponto 1 é o único que apresenta uma sutil e gradativa queda de condutividade hidráulica com o passar dos meses. Já o ponto 2, aparentemente demonstra crescimento leve de permeabilidade nos três primeiros meses, com posterior estabilização no quarto, sendo que, tanto o ponto 1 como o 2, são limpos mensalmente apenas. Não são percebidas tendências fixas de crescimento ou decréscimo das médias mensais com o decorrer do tempo para todos os demais pontos, porém é perceptível que os pontos 7 e 8 têm sutil aumento nas taxas de infiltração com o passar do tempo, em relação à infiltração inicial. Para os pontos 3, 4, 5 e 6 não houve alterações significativas para as taxas de infiltração, considerando as taxas iniciais e os desvios encontrados. O ponto que apresentou maior variabilidade foi o 3, no período de Dezembro a Janeiro, apresentando desvio padrão de 0,21 cm/s com coeficiente de variação de 12,53%, um pouco acima do observado para o mesmo ponto durante todo o período de coleta de dados.

4.2.4 Médias mensais das partes com limpeza mensal e semanal

A Figura 63 apresenta as médias mensais dos quatro pontos de cada metade da calçada juntamente com a média das taxas de infiltração iniciais.

FIGURA 63 - Médias mensais dos quatro pontos de cada metade limpa mensalmente e semanalmente



Fonte: Próprio Autor.

Através da análise gráfica das médias de cada metade, aparentemente não existe diferenças significativas nem entre as partes com manutenção mensal ou semanal, nem com o passar dos meses, considerando o desvio padrão. Neste caso, o maior desvio padrão encontrado foi para os pontos 5 ao 8 nas taxas de infiltração iniciais, com valor de 0,33 cm/s e 20,77% de CV. Os desvios foram maiores que os observados entre mesmos pontos, devido à variabilidade das taxas nos diferentes pontos da calçada. Ainda assim, foi observada menor variabilidade, em comparação com o trabalho de Curvo (2017).

Para confirmar que realmente não houve diferenças entre as médias das duas metades e também com o passar do tempo para cada uma, foi realizada uma análise estatística ANOVA. Tal análise foi realizada com nível de 95% de confiança e os resultados do teste são apresentados na Tabela 24.

TABELA 24 - Resumo estatístico

Fonte da variação	F	valor-P	F crítico
Entre pontos	3,7748	0,0544	3,9201
Entre meses	1,0660	0,3663	2,6802
Interações entre os dois fatores	0,2271	0,8774	2,6802

Fonte: Próprio Autor.

Para este tipo de análise, calcula-se um valor F e observa-se um valor F crítico para os grupos amostrais. Então são assumidas duas hipóteses: uma hipótese nula, para $F \text{ calculado} < F \text{ crítico}$ e $\text{valor-P} > 0,05$, indicando que as médias podem ser consideradas estatisticamente iguais e uma hipótese alternativa, para $F \text{ calculado} > F \text{ crítico}$ e $\text{valor-P} < 0,05$, indicando que as médias são consideradas estatisticamente diferentes, ou seja, há variação significativa entre os grupos de amostras testados.

Pela observação dos valores encontrados, tanto entre as metades quanto entre os meses e, inclusive a interação entre estes fatores, percebeu-se $F \text{ calculado} < F \text{ crítico}$ e $\text{valor-P} > 0,05$, podendo então ser assumida a hipótese nula como válida, mostrando não haver diferenças nas taxas de infiltração na calçada em todo o período de análise e com a aplicação de ambas frequências de manutenção.

Ao comparar os resultados de permeabilidade da presente pesquisa com os de Saaly, Hedayat, Golroo (2018), que apresentaram quedas significativas para o mesmo período de observação (quatro meses), percebe-se que o pavimento com limpeza periódica apresentou desempenho muito superior, pois não apresentou diferença com o tempo. Análise semelhante também pode ser realizada com o trabalho de Curvo (2017) que, para aproximadamente seis meses, em ambiente externo com condição de baixa incidência de detritos orgânicos, percebeu em todos os três trechos observados redução gradual nas taxas de infiltração.

Com isso, aparentemente o uso de soprador pode ser uma técnica de manutenção periódica útil para aumentar o tempo de vida útil quanto à permeabilidade em pavimentos de concreto permeável.

É importante ressaltar ainda, que o estudo foi realizado em um pavimento com pouca incidência de detritos orgânicos e sem risco de enxurradas e

escoamentos oriundos de outras áreas, e que outras situações com variáveis ambientais diferentes podem apresentar comportamentos diferentes.

5 CONCLUSÕES

Diante de todos os procedimentos realizados e resultados obtidos, algumas conclusões foram tomadas.

Na Fase 1, que resumiu-se em experimentar três traços para um mesmo agregado (1:3,5, 1:5 e 1:6,5, sendo as misturas M3,5-1-1, M5-1-1 e M6,5-1-1) concluiu-se que:

- a) misturas muito ricas em cimento embora apresentem bons resultados de resistência, principalmente à compressão, podem vir a colmatar, além de apresentarem massa específica muito elevada para este tipo de concreto conforme ocorreu com a mistura M3,5-1-1, tornando-se ineficiente como material drenante em pavimentos;
- b) a mistura M6,5-1-1, embora não tenha perdido muita resistência à compressão, decaiu mais acentuadamente à tração, que é o fator mais importante para resistir ao tráfego. Tal mistura é viável e pode ser uma boa alternativa em situações de pouca carga incidente no pavimento, como calçamentos ou passeios.
- c) no caso do presente trabalho, a mistura M5-1-1 apresentou um bom equilíbrio entre resistência e porosidade, e desta forma esta proporção foi a escolhida para o prosseguimento do trabalho.

Na Fase 2, foi mantida a proporção de cimento/agregado fixa e houve alteração do tipo de agregado e foi observado que:

- a) o traço com as britas misturadas M5-1/0-1, não proporcionou aumentos significativos de resistência e ocasionou maior consumo de cimento;
- b) ao utilizar somente brita 0 (mistura M5-0-1) foram notados: leves aumentos de resistência, muito melhor trabalhabilidade e facilidade de moldagem dos corpos de prova. A menor dimensão do agregado também proporcionou uma superfície melhor regularizada. A permeabilidade sofre redução, porém ainda assim os valores são bastante altos e, portanto aceitáveis para infiltração de água de chuva;
- c) notou-se também que lotes moldados separadamente, para uma mesma mistura, podem diferir um pouco entre si devido a vários fatores externos como: temperatura, umidade do ar e o adensamento manual. Tudo isso acaba ocasionando pequenas alterações na compactação, índice de

vazios e massa específica que proporcionam pequenas variações de resistência entre lotes, por isso é importante a repetição das misturas em laboratório, antes de utilizá-la em campo.

A Fase 3 foi uma repetição da mistura M5-0-1, como maneira de confirmar a eficiência devido a disparidade de resultados, que pode ocorrer em lotes diferentes. Foram então realizados todos os ensaios novamente e o ensaio de resistência à tração na flexão, muito importante para concretos a serem utilizados em pavimentos e concluiu-se que:

- a) novamente foram percebidas diferenças entre os diferentes lotes da mesma mistura, porém os resultados médios foram parecidos com os de outros autores que trabalharam com concretos semelhantes;
- b) a resistência à tração na flexão foi em média mais alta que a maioria dos trabalhos que estudam concretos permeáveis semelhantes e com baixa dispersão para todas as amostras.

Na análise de condutividade hidráulica da calçada instalada em campo, concluiu-se que:

- a) de maneira geral, pontos mais próximos à guia na calçada apresentaram maiores taxas de infiltração quando comparados com os pontos centrais, devido à maior porosidade destas regiões mais externas;
- b) a chuva parece não influenciar significativamente nas taxas de infiltração;
- c) estatisticamente, não houve diferença significativa entre as partes da calçada com manutenção mensal e semanal, bem como, o decorrer dos quatro meses pareceu não interferir nas taxas de infiltração médias de ambas, mantendo-se praticamente constantes;
- d) as manutenções com periodicidade mensal e semanal parecem ser eficientes, mantendo níveis de permeabilidade constantes, pelo menos no período inicial de serviço da calçada.

REFERÊNCIAS

- ACIOLE, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/5843/000521171.pdf?sequence=1>. Acesso em: 17 abr. 2018.
- AFONSO, M. L.; DINIS-ALMEIDA, M.; FAEL, C. S. Study of the porous asphalt performance with cellulosic fibres. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 135, p.104-111, mar. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.222>. Acesso em: 22 fev. 2018.
- AGAR-OZBEK, A. S.; WEERHEIJM, J.; SCHLANGEN, E.; BREUGEL, K. V. Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales. **Construction And Building Materials**, Amsterdam, v. 41, p. 480-490, abr. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.040>. Acesso em: 02 mar. 2018.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R**: Report on Pervious Concrete. Farmington Hills, 2010. 40 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1688/C1688M – 14A**: Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete. West Conshohocken: Astm International, 2014. 4 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1701/C1701M – 17a**: Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. West Conshohocken: Astm International, 2017. 3 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1747/C1747M – 13**: Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion. West Conshohocken: Astm International, 2013. 4 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C944/C944M – 12**: Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method. West Conshohocken: Astm International, 2012. 5 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D6433 – 18**: Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. West Conshohocken: Astm International, 2018. 47 p.
- ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 21-29, jul./set. 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2015. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7222:** Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11578:** Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1997. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11768:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011. 19 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12142:** Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16416:** Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015. 25 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 472 p.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BONICELLI, A.; GIUSTOZZI, F.; CRISPINO, M. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 91, p. 102-110, ago. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.012>. Acesso em: 25 mar. 2018.

BRAKE, N. A.; ALLAHADADI, H.; ADAM, F. Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 113, p. 536-543, jun. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.045>. Acesso em: 20 abr. 2018.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Flexural-fatigue characteristics of pervious concrete: statistical distributions and model development. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 153, p. 1-15, out. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.081>. Acesso em: 20 abr. 2018.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Investigation on flexural strength and stiffness of pervious concrete for pavement applications. **Advances In Civil Engineering Materials**, West Conshohocken, v. 7, n. 2, p. 223-242, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1520/acem20170015>. Acesso em: 01 abr. 2019.

CHEN, Y.; WANG, K.; WANG, X.; ZHOU, W.. Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 42, p. 97-104, maio 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.006>. Acesso em: 20 abr. 2018.

CONCRETE NETWORK. *Site*. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.concretenetwork.com>. Acesso em: 22 ago. 2018.

ĆOSIĆ, K.; KORAT, L.; DUCMAN, V.; NETINGER, I. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 78, p. 69-76, mar. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073>. Acesso em: 17 mai. 2018.

COSTA, F. B. P.; LORENZI, A.; HASELBACH, L.; SILVA FILHO, L.C.P.. Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 11, n. 5, p.1151-1159, out. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952018000500013>. Acesso em: 23 abr. 2019.

CUI, X.; ZHANG, J.; HUANG, D.; TANG, W.; WANG, L.; HOU, F.. Experimental simulation of rapid clogging process of pervious concrete pavement caused by storm water runoff. **International Journal of Pavement Engineering**, Abingdon, v. 20, n. 1, p.24-32, 21 out. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2016.1246889>. Acesso em: 08 abr. 2018.

CUI, X.; ZHANG, J.; ZHANG, N.; GAO, Z.; SUI, W.; WANG, C. Improvement of Permeability Measurement Precision of Pervious Concrete. **Journal of Testing and Evaluation**, West Conshohocken, v. 43, n. 4, p. 812-819, 10 out. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1520/jte20130176>. Acesso em: 08 abr. 2018.

CURVO, F. O. **Estudo da drenabilidade de calçadas experimentais em concreto permeável no campus Armando Salles de Oliveira da USP**. 2017. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

DELATTE, N.; MILLER, D.; MRKAJIC, A. **Portland cement pervious concrete pavement: field performance investigation on parking lot and roadway pavements**. Cleveland: Rmc Research & Education Foundation, 2007. 76 p.

DELATTE, N.; MRKAJIC, A.; MILLER, D. I.. Field and Laboratory Evaluation of Pervious Concrete Pavements. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, Thousand Oaks, v. 2113, n. 1, p.132-139, jan. 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3141/2113-16>. Acesso em: 12 abr. 2018.

DEO, O.; SUMANASOORIYA, M.; NEITHALATH, N. Permeability Reduction in Pervious Concretes due to Clogging: Experiments and Modeling. **Journal of Materials In Civil Engineering**, Reston v. 22, n. 7, p. 741-751, jul. 2010. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000079](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000079). Acesso em: 12 fev. 2019.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **DAEE**: precipitações intensas no estado de São Paulo. São Paulo, 2018. 270 p. Disponível em: http://www.daee.sp.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=743%3Apluviografia&catid=43%3Ahidrometeorologia&Itemid=30. Acesso em: 30 set. 2018.

DRAKE, J.; BRADFORD, A. Assessing the potential for restoration of surface permeability for permeable pavements through maintenance. **Water Science And Technology**, London, v. 68, n. 9, p.1950-1958, 19 out. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2013.450>. Acesso em: 12 set. 2018.

EMERSON, C. H.; TRAVER, R. G. Multiyear and Seasonal Variation of Infiltration from Storm-Water Best Management Practices. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 134, n. 5, p.598-605, out. 2008. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2008\)134:5\(598\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2008)134:5(598)). Acesso em: 12 set. 2018.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **National Menu of Best Management Practices (BMPs) for Stormwater**. Disponível em: <https://www.epa.gov/>. Acesso em: 12 jan. 2018.

ESTEVES, R. L. **Quantificação das superfícies impermeáveis em áreas urbanas por meio de sensoriamento remoto**. 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

FERGUSON, B. K. **Porous Pavements**: integrative studies in water management and land development. London: Taylor & Francis,, 2005. 577 p.

GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MIANKODILA, F.. Assessing the abrasion resistance of cores in virgin and recycled aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 68, p. 701-708, out. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.001>. Acesso em: 11 mar. 2018.

GOEDE, W. G. **Pervious concrete**: investigation into structural performance and evaluation of the applicability of existing thickness design methods. 2009. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Department Of Civil And Environmental Engineering, Washington State University, Washington, 2009.

GOEDE, W.; HASELBACH, L. Investigation into the Structural Performance of Pervious Concrete. **Journal of Transportation Engineering**, Reston, v. 138, n. 1, p. 98-104, jan. 2012. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)te.1943-5436.0000305](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)te.1943-5436.0000305). Acesso em: 18 abr. 2018.

HASELBACH, L. Pervious concrete testing methods. *In*: LOW IMPACT DEVELOPMENT CONFERENCE, 2010, San Francisco. **Proceedings [...]** Reston: American Society of Civil Engineers, 2010. , p.180-192. [http://dx.doi.org/10.1061/41099\(367\)17](http://dx.doi.org/10.1061/41099(367)17). Acesso em: 18 abr. 2018.

HASELBACH, L.; VALAVALA, S.; MONTES, F. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. **Journal of Environmental Management**, Reston, v. 81, n. 1, p. 42-49, out. 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.09.019>. Acesso em: 18 out. 2017.

HASELBACH, L.; WERNER, B.; DUTRA, V. P.; SCHWETZ, P.; PINTO DA SILVA FILHO, L. C.; BATEZINI, R.; CURVO, F.; BALBO, J. T. Estimating Porosity of In Situ Pervious Concrete Using Surface Infiltration Tests. **Journal of Testing and Evaluation**, Reston, v. 45, n. 5, p. 1726-1735, jan. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1520/jte20160116>. Acesso em: 18 set. 2018.

HOLTZ, F. C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise de viabilidade técnica e do impacto ambiental**. 2011. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/35615/000795199.pdf?sequence=1>. Acesso em: 18 dez. 2017.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V. C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 50, p. 524-529, jan. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022>. Acesso em: 18 dez. 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17785-1**: Testing methods for pervious concrete - Part 1: Infiltration rate. Vernier: ISO, 2016. 6 p.

KAYHANIAN, M.; ANDERSON, D.; HARVEY, J.; JONES, D.; MUHUNTHAN, B.. Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. **Journal of Environmental Management**, Reston, v. 95, n. 1, p.114-123, mar. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.021>. Acesso em: 18 mar. 2018.

KEVERN, J. T.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. The Effect of Curing Regime on Pervious Concrete Abrasion Resistance. **Journal of Testing and Evaluation**, Reston, v. 37, n. 4, p.337-342, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1520/jte101761>. Acesso em: 18 mar. 2018.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R.. Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, Reston, v. 193, p. 221-233, maio 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.018>. Acesso em: 18 mar. 2018.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R. Defining clogging potential for permeable concrete. **Journal of Environmental Management**, Reston, v. 220, p. 44-53, ago. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.016>. Acesso em: 21 ago. 2018.

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

LI, H.; KAYHANIAN, M.; HARVEY, J. T. Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. **Journal of Environmental Management**, Reston, v. 118, p. 144-152, mar. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.016>. Acesso em: 12 nov. 2018.

LIU, R.; LIU, H.; SHA, F.; YANG, H.; ZHANG, Q.; SHI, S.; ZHENG, Z. Investigation of the Porosity Distribution, Permeability, and Mechanical Performance of Pervious Concretes. **Processes**, Basel, v. 6, n. 7, p.78-91, jun. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/pr6070078>. Acesso em: 29 abr. 2018.

MAGUESVARI, M. U.; NARASIMHA, V. I. Studies on Characterization of Pervious Concrete for Pavement Applications. **Procedia - Social And Behavioral Sciences**, [s. l.], v. 104, p.198-207, dez. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.112>. Acesso em: 29 abr. 2018.

MCCAIN, G.N.; DEWOOLKAR M. M. Strength and permeability of porous concrete pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Thousand Oaks, 2009. p. 01-13.

MOORE, D. S.; NOTZ, W. I.; FLIGNER, M. A. **A estatística básica e sua prática**. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2017.

OLIVEIRA, L. C. B. **Análise da permeabilidade e da colmatação em concretos permeáveis com agregado reciclado de concreto**. 2017. 105 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

ONO, B. W. **Análise do desempenho estrutural e hidráulico de um pavimento permeável com revestimento de blocos de concreto unidirecionalmente articulados**. 2018. 245 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PERVIOUS PAVEMENT. Pervious Concrete Pavement: an overview. [S. l.], 2018. Disponível em: <http://www.perviouspavement.org>. Acesso em: 17 abr. 2018.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Thickness design for concrete highway and street pavements**. Ottawa: Canadian Edition, 1984.

RANGELOV, M.; NASSIRI, S.; CHEN, Z.; RUSSELL, M.; UHLMAYER, J. Quality evaluation tests for pervious concrete pavements' placement. **International Journal of Pavement Research And Technology**, Taiwan, v. 10, n. 3, p. 245-253, maio 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.01.007>. Acesso em: 29 abr. 2018.

RIBEIRO, R. A. V. **Avaliação do desempenho hidráulico de barreiras de proteção ambiental produzidas com solo laterítico arenoso compactado, estabilizado quimicamente**. 2002. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - , Universidade Estadual Paulista, , Ilha Solteira, 2002.

SAALY, M.; HEDAYAT, M. M.; GOLROO, A. Performance of pervious concrete pavement under various raining conditions. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], p.1-11, jun. 2018. Informa UK Limited. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2018.1474791>. Acesso em: 29 mar. 2019.

SANDOVAL, G. F. B. **Desempenho do concreto poroso com agregados sustentáveis**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado em Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

SCHAEFER, V. R.; WANG, K.; SULEIMAN, M. T.; KEVERN, J. T. **Mix design development for pervious concrete in cold weather climates**. Ames: Center For Transportation Research And Education, 2006. 67 p.

SULEIMAN, M. T.; KEVERN, J.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. Effect of compaction energy on pervious concrete properties. of *In: CONCRETE TECHNOLOGY FORUM: FOCUS ON PERVIOUS CONCRETE*, 2006, Nashville. **Proceedings** [...] Nashville: TN, 2006.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. **Manual de drenagem urbana**: região metropolitana de Curitiba. Curitiba: Suderhsa / Ch2m Hill, 2002. 150 p. Disponível em: http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/pddrenagem/volume6/mdu_versao01.pdf. Acesso em: 20 jan. 2018.

SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; KABBACH JÚNIOR, F. I. **Drenagem subsuperficial de pavimentos**: conceitos e dimensionamento. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 240 p.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious concrete pavements**. Maryland: Silver Spring, 2004. 36 p.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **A sustentabilidade dos materiais de construção**. 2. ed. Barbudo: Gráfica Vilaverdense, 2010. 460 p.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 95, p. 850-859, out. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.187>. Acesso em: 29 abr. 2018.

TUCCI; C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas: saneamento para todos**. 4. ed. Brasília, DF: Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2005.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP. **Canal Clima da UNESP**. Ilha Solteira, 2019. Disponível em: <http://clima.feis.unesp.br>. Acesso em: 04 abr. 2019.

UNIVERSITY OF MAINE. **EverFE**: software for the 3D Finite element analysis of jointed plain concrete pavements. Orono, 2018. Disponível em: <https://civil.umaine.edu/everfe-2/>. Acesso em: 16 out. 2018.

URBAN DRAINAGE AND FLOOD CONTROL DISTRICT - UDFCD (Org.). **Urban storm drainage criteria manual**. Denver, 2010. 565 p. v. 3. Disponível em: <https://udfcd.org/wp-content/uploads/uploads/vol3%20criteria%20manual/USDCM%20Volume%203.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2018.

WEATHER SPARK. **Condições meteorológicas médias de Ilha Solteira**. Minneapolis: Cedar Lake Ventures, 2019. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/>. Acesso em: 26 mar. 2019.

WERNER, B.; HASELBACH, L. Temperature and Testing Impacts on Surface Infiltration Rates of Pervious Concrete. **Journal of Cold Regions Engineering**, Reston, v. 31, n. 2, p. 040170021-0401700211, jun. 2017. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cr.1943-5495.0000121](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cr.1943-5495.0000121). Acesso em: 29 abr. 2018.

WINSTON, R.; AL-RUBAEI, A.; BLECKEN, G.; VIKLANDER, M.; HUNT, W. Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate – The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v. 169, p.132-144, mar. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.026>. Acesso em: 28 set. 2018.

YANG, Z. F. **Study on material design and road performances of porous concrete**. 2008. Tese (Doutorado), Wuhan University of Technology, Wuhan, 2008.

ZAETANG, Y.; SATA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P.. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 111, p.15-21, maio 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.060>. Acesso em: 22 abr. 2018.

ZHENG, M.; WANG, B.; HU, C. Study of fatigue property of porous concrete [J]. **China Journal of Highway and Transport**, [S. l.], v. 1, p. 002, 2004.

ZHONG, R.; WILLE, K.. Compression response of normal and high strength pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 109, p. 177-187, abr. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.051>. Acesso em: 29 abr. 2018.

ZHONG, R.; WILLE, K.. Material design and characterization of high performance pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 98, p. 51-60, nov. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027>. Acesso em: 28 abr. 2018.