

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS  
MESTRADO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA  
URBANA**

**LILIAN CORPAS BUCENE OLIVEIRA**

**ANÁLISE DA PERMEABILIDADE E DA  
COLMATAÇÃO EM CONCRETOS PERMEÁVEIS  
COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO**

**CAMPINAS**

**2017**

**LILIAN CORPAS BUCENE OLIVEIRA**

**ANÁLISE DA PERMEABILIDADE E DA  
COLMATAÇÃO EM CONCRETOS PERMEÁVEIS  
PRODUZIDOS COM AGREGADO RECICLADO DE  
CONCRETO**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do Título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana, ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e Tecnológicas, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas..

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lia Lorena Pimentel

**PUC-CAMPINAS**

**2017**

t631.432 Oliveira, Lilian Corpas Bucene.  
O48a Análise da permeabilidade e da colmatação em concretos permeáveis produzidos com agregado reciclado de concreto / Lilian Corpas Bucene Oliveira. - Campinas: PUC-Campinas, 2017.  
108f.

Orientadora: Lia Lorena Pimentel.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Inclui anexo e bibliografia.

1. Solos - Permeabilidade. 2. Indústria da construção civil - Aspectos ambientais. 3. Resíduos sólidos - Reaproveitamento. 4. Concreto - Mistura - Análise. 4. Infiltração. I. Pimentel, Lia Lorena. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. III. Título.

**LILIAN CORPAS BUCENE OLIVEIRA**

**ANÁLISE DA PERMEABILIDADE E DA COLMATAÇÃO  
EM CONCRETOS PERMEÁVEIS COM AGREGADO  
RECICLADO DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana. Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.  
Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Lia Lorena Pimentel.

Dissertação defendida e aprovada em 14 de dezembro de 2017 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



---

Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel  
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Prof. Dr. Evaldo Miranda Coiado  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Prof. Dr. José Tadeu Balbo  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP

As mulheres fortes que foram exemplos de força de vontade, determinação e amor durante minha trajetória, em especial à Fabiana Corpas Bucene, Magdalena Corpas Bucene, Lia Pimentel, Mônica Barbosa, Giovanna Rizzo, Elizabeth Souza e Sonia Russo Conti.

## AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial minha mãe Fabiana e minha sogra Sonia,  
Pela paciência e otimismo, contribuindo imensamente para que esse sonho se realize.

À professoras Lia Pimentel,  
Pela enorme contribuição na busca por soluções dos problemas ao longo do mestrado e pela confiança depositada em mim.

À professora Mônica Barbosa,  
Pela paciência e pelos imensos esforços em oferecer ajuda mesmo sem gratificação.  
Jamais conseguirei expressar a gratidão pela confiança e ajuda que me forneceu.

Ao Projeto FAPESP,  
Pela disposição de recursos financeiros de apoio à pesquisa.

Ao meu namorado, meu grande amor,  
Pela compreensão nos momentos difíceis e pela diversão dos momentos alegres.

Aos meus amigos, em especial Giovanna Rizzo,  
Que sempre me apoiou e ofereceu agradáveis conversas.

Ao Franchesco Valentino,  
Pela ótima companhia.

“A persistência é o menor caminho para o êxito”

Charles Chaplin

(1889-1977)

## RESUMO

OLIVEIRA, Lilian Corpas Bucene. Análise da Permeabilidade e da Colmatação em Concretos Permeáveis produzidos com Agregado Reciclado de Concreto. 2017. 107 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

O crescimento dos centros urbanos tem produzido novos desafios às atividades da construção civil. Não apenas do ponto de vista ambiental, mas também por questões logísticas e econômicas, dois aspectos vêm se destacando no âmbito do setor nas grandes metrópoles, que são o manejo de águas de chuvas e a destinação de resíduos sólidos de construção e demolição (RCD). Uma das ferramentas que pode ser utilizada para aliviar o sistema de drenagem é o emprego de pavimentos de concreto permeável (PCP), que permitem a infiltração de água na base ou no solo, diminuindo os picos de cheia, acúmulos de água nas vias públicas, melhorando o abastecimento dos aquíferos. O PCP é uma mistura que emprega na sua composição pouco ou nenhum agregado miúdo, proporcionando maior índice de vazios ao concreto, e conseqüentemente um elevado coeficiente de permeabilidade. A adição do RCD na composição do concreto permeável justifica-se tanto pela crescente dificuldade de descarte desses materiais quanto pela redução da extração de agregados naturais, propiciando uma redução dos impactos ambientais gerados pela construção civil. Portanto, a produção de pisos, usando o PCP elaborado com o agregado reciclado de concreto (ARC) proveniente do RCD, é uma das alternativas que vêm sendo pesquisada para reduzir o impacto ambiental da construção, protegendo os recursos hídricos e evitando áreas de inundação com um menor consumo de bens naturais. A eficácia da taxa de infiltração da água de chuva no concreto permeável pode ser parcialmente comprometida devido à ocorrência da colmatação, que é influenciada pelo tipo e tamanho do sedimento infiltrado junto à água e a intensidade da precipitação. Esta pesquisa estudou dois diferentes tipos de PCP, produzidos com e sem ARC, avaliando seu comportamento quanto às propriedades mecânicas, físicas e hidráulicas. Também foi realizada uma comparação entre diferentes tipos de sedimentos para simulação da colmatação do concreto permeável, para tal, foram realizados estudos em equipamentos desenvolvidos para simulação do processo de colmatação em um canteiro real. Observou-se a influência nas características do PCP, com o emprego do ARC, bem como a taxa de infiltração após colmatação com vários tipos de materiais. O emprego do ARC propiciou resultado satisfatório nas características do concreto permeável e verificou-se que os métodos de ensaio para obtenção do coeficiente de permeabilidade ou da taxa de infiltração influenciam na análise do concreto permeável. Também pode-se notar que a adaptação de ensaios para análise “*in loco*” reproduzidos em laboratório não se mostrou adequada à situação real devido a influência da base dos pavimentos.

Palavras-chave: Colmatação, Concreto Permeável, Permeabilidade, Resíduo de Construção e Demolição, Taxa de infiltração.

# ABSTRACT

OLIVEIRA, Lilian Corpas Bucene. Study of Permeability and Clogging in Pervious Concrete with Construction residues aggregate. 2017. 107p. Dissertação (Master's in Urban Infrastructure Systems) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

The growth of urban centers has created new challenges for construction activities. It's not only the environmental point of view, but also from logistical and economic reasons, two aspects that stand out, which are the management of rainwater and a destination of solid construction and demolition residues aggregate (RCD) . One of the alternatives to relieve the drainage system is the pervious concrete pavement (PCP), which allow infiltration of water into the base or soil, reducing floodings, water accumulations on roads and improving aquifers supply. The PCP employs in its composition, little or no fine aggregates, what providing a higher a volume of voids to the element, and consequently permeability. The addition of RCD in the pervious concrete's composition is justified both by the increasing difficulty of disposal of these materials and by the reduction of the extraction of natural aggregates, favoring a reduction of the environmental impacts generated by the civil construction. Therefore, the production of pavement using pervious concrete made with recycled concrete aggregate (ARC) is one of the alternatives that has been researched to reduce the environmental impact of construction, protecting water resources and being able to avoid flood areas of flood with a lower consumption of natural goods. The effectiveness of water infiltration capability can be partially compromised due to the occurrence of clogging, which is influenced by the type and size of the infiltrated sediment into to the water and the precipitation intensity. This research studied two different types of PCP, produced with and without ARC, evaluating their behavior regarding mechanical, physical and hydraulic properties. A comparison was also made between different types of sediments to simulate the permeation of the pervious concrete. For this, laboratory studies were carried out and also equipment was developed to simulate a real situation of application of this type of concrete. It was observed the influence on the characteristics of PCP, with the use of ARC, as well as the permeability index after filling with various types of materials. The PCP using recycled aggregates obtained a satisfactory result, it was also verified that the test method to obtain the permeability index or the infiltration rate influenced in the analysis. It may also be noted that the adaptation of "in situ" laboratory tests performed in the laboratory has not been shown to be adequate to the actual situation due to the influence of the floor base.

Key-Words: Clogging, Pervious Concrete, Permeability, Construction and Demolition Residues.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Composição do Resíduo de Construção e Demolição	21
<b>Figura 2.</b> Impermeabilização do Solo	26
<b>Figura 3.</b> Textura do concreto permeável e do concreto convencional	33
<b>Figura 4.</b> Permeâmetro de Carga Constante	39
<b>Figura 5.</b> Permêmetro de Carga Variável	40
<b>Figura 6.</b> Permeâmetro ASTM C1701 (2009)	43
<b>Figura 7.</b> Permeâmetro NCAT	44
<b>Figura 8.</b> Distribuição dos Sedimentos de Colmatação no PCP	46
<b>Figura 9.</b> Fluxograma de Delineamento da Pesquisa	50
<b>Figura 10.</b> Separação Visual do ARC	53
<b>Figura 11.</b> Curva Granulometria do Agregado Graúdo	53
<b>Figura 12.</b> Análise Táctil do Concreto Permeável	56
<b>Figura 13.</b> Moldagem das Placas de Concreto Permeável	58
<b>Figura 14.</b> Ensaio de Resistência à Compressão Axial	61
<b>Figura 15.</b> Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral	62
<b>Figura 16.</b> Ensaio de Permeabilidade – Carga Constante	64
<b>Figura 17.</b> Ensaio de Permeabilidade – Carga Variável	65
<b>Figura 18.</b> Ensaio de Drenabilidade – ASTM C1701 (2009)	66
<b>Figura 19.</b> Ensaio de Drenabilidade – NCAT	67
<b>Figura 20.</b> Croqui e Fotografia do Simulador de Chuvas	68
<b>Figura 21.</b> Curva Granulométrica dos Sedimentos de Colmatação	69
<b>Figura 22.</b> Colocação do Sedimento no Simulador de Chuvas	70
<b>Figura 23.</b> Simulador de Chuvas	71
<b>Figura 24.</b> Relação entre Massa Específica e Índice de Vazios	73
<b>Figura 25.</b> Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão Axial	74
<b>Figura 26.</b> Resultados dos Ensaios de Resistência à Tração Indireta	75
<b>Figura 27.</b> Resultados dos Ensaios de Resistência à Tração na Flexão	76
<b>Figura 28.</b> Relação entre Resistência à Compressão Axial e Índice de Vazios	78
<b>Figura 29.</b> Relação entre Resistência à Tração Indireta e Índice de Vazios	79
<b>Figura 30.</b> Relação entre Resistência à Tração na Flexão e Índice de Vazios	79
<b>Figura 31.</b> Relação entre Permeabilidade e Índice de Vazios	81
<b>Figura 32.</b> Resultados de Drenabilidade após colmatação com areia	83
<b>Figura 33.</b> Resultados de Drenabilidade após colmatação com solo	84
<b>Figura 34.</b> Movimentação das Partículas de Solo durante o ensaio ASTM	86
<b>Figura 35.</b> Resultados de Drenabilidade após colmatação com óleo	86
<b>Figura 36.</b> Comparação entre Coeficiente de Permeabilidade obtidos por Carga Constante e Variável	89
<b>Figura 37.</b> Comparação entre Ensaio ASTM e NCAT	90
<b>Figura 38.</b> Comparação entre Ensaio ASTM e NCAT após colmatação	91
<b>Figura 39.</b> Funcionamento do Simulador de Chuvas	102
<b>Figura 40.</b> Detalhes do Projeto 3D do Simulador de Chuvas	102
<b>Figura 41.</b> Etapas de Construção do Simulador de Chuvas	104
<b>Figura 42.</b> Montagem do Simulador de Chuvas em laboratório	105

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Classificação dos Resíduos Sólidos	18
<b>Tabela 2.</b> Requisitos para Utilização do Agregado Reciclado	22
<b>Tabela 3.</b> Estágios do Desenvolvimento Sustentável Urbano	24
<b>Tabela 4.</b> Dosagens Típicas do Concreto Permeável	30
<b>Tabela 5.</b> Caracterização do Agregado Natural Reciclado	52
<b>Tabela 6.</b> Caracterização do Cimento Portland CPV ARI	54
<b>Tabela 7.</b> Dosagens do Concreto Permeável	55
<b>Tabela 8.</b> Ensaio de Caracterização do Concreto Permeável	59
<b>Tabela 9.</b> Caracterização dos Sedimentos Empregados na Colmatação	69
<b>Tabela 10.</b> Tamanho e Quantidade dos Sedimentos Empregados	70
<b>Tabela 11.</b> Combinações Empregadas no Simulador de Chuvas	71
<b>Tabela 12.</b> Resultados das Propriedades Físicas do Concreto Permeável	72
<b>Tabela 13.</b> Coeficientes de Correlação da Massa Específica X Índice de Vazios	73
<b>Tabela 14.</b> Resultados dos Coeficientes de Permeabilidade	80

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT** Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ARC** Agregado Reciclado de Concreto
- ASTM** *American Society for Testing and Materials*
- BMPs** *Best Management Practices*
- C15** Concreto Permeável com 15% ARC
- C20** Concreto Permeável com 20% ARC
- PCP** Concreto Permeável de Cimento Portland
- CREF** Concreto Permeável Referência (0% de ARC)
- LID** *Low Impact Development*
- NBR** Norma Brasileira Regulamentadora
- NCAT** *National Center for Asphalt Technology*
- NM** Norma Técnica
- RCD** Resíduo de Construção e Demolição
- v** Índice de Vazios

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
2	DESENVOLVIMENTO URBANO .....	17
2.1.	Resíduos Sólidos .....	18
2.1.1.	Resíduos da Construção Civil .....	19
2.1.2.	Agregados Reciclados .....	21
2.2.	Drenagem Urbana.....	23
2.2.1.	Impermeabilização do Solo .....	25
3	CONCRETO PERMEÁVEL.....	28
3.1.	Definição e Características .....	28
3.2.	Incorporação de agregado reciclado ao concreto permeável .....	36
3.3.	Permeabilidade .....	38
3.3.1.	Métodos para determinação da permeabilidade em laboratório .....	39
3.3.2.	Métodos para determinação da permeabilidade “ <i>in loco</i> ” .....	41
3.4.	Colmatação .....	44
3.5.	Manutenção .....	47
4	METODOLOGIA DA PESQUISA .....	49
4.1	Características dos Materiais Empregados.....	51
4.2	Estudo da Dosagem do Concreto Permeável .....	55
4.2.1	Processo de Mistura .....	55
4.2.2	Processo de Moldagem .....	57
4.3	Ensaio de Caracterização do Concreto Permeável.....	58
4.3.1	Propriedades físicas do concreto .....	60
4.3.2	Resistências mecânicas.....	61
4.3.3	Propriedades hidráulicas.....	63
4.4	Avaliação da Drenabilidade de Placas – Etapa 2 .....	68
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	72
5.1.	Índices Físicos do Concreto Permeável.....	72
5.1.1.	Relações entre parâmetros .....	72
5.2.	Resistências Mecânicas do Concreto Permeável .....	74
5.2.1.	Resistência à compressão axial.....	74
5.2.2.	Resistência a Tração por compressão diametral .....	75

5.2.3. Resistencia a Tração na flexão .....	76
5.3. Propriedades Hidráulicas do Concreto Permeável.....	80
5.4. Análise do processo de colmatação do PCP .....	82
5.4.1. Ensaio de colmatação.....	83
5.5. Discussão dos Resultados.....	87
5.5.1. Agregados Reciclados .....	87
5.5.2. Métodos de Avaliação do coeficiente de Permeabilidade .....	88
5.5.3. Métodos de Avaliação da Drenabilidade.....	89
5.5.4. Colmatação do Concreto Permeável .....	91
6 CONCLUSÕES .....	93
6.1. Sugestões para novas pesquisas .....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	95
ANEXOS .....	101
Anexo A – Simulador de Chuvas .....	101

## 1 INTRODUÇÃO

A impermeabilização do solo se apresenta como um dos principais resultados do crescimento urbano, e têm contribuído para catástrofes hídricas através do aumento da velocidade de escoamento superficial e dos picos de cheia (CHOCAT, 1997).

É possível observar que, em áreas rurais as vias e os espaços não habitados, não apresentam qualquer revestimento, possuem solo exposto ou apenas empregam blocos de rochas, como os paralelepípedos, permitindo que a água proveniente das chuvas, infiltre parte de seu montante no solo e diminua sua velocidade de escoamento superficial, resultando na alimentação dos aquíferos e diminuição dos picos de cheia da região.

A transformação das áreas rurais em áreas urbanas e o desenvolvimento das áreas já urbanizadas anteriormente geram a necessidade de construir e ampliar a infraestrutura para suprir as demandas da população que habita as mesmas. Dentre os diversos impactos que essas transformações geram se destacam: a impermeabilização do solo e a geração de resíduos sólidos.

O revestimento das vias públicas e dos grandes centros comerciais é realizado com camadas impermeabilizantes, como o concreto ou asfalto, com a finalidade de aumentar sua durabilidade, não permitindo a infiltração da água proveniente das chuvas no solo. Essa tendência resulta na necessidade da implantação de sistemas de micro e macro drenagem projetados adequadamente para coletas do escoamento superficial, evitando assim catástrofes hídricas.

Desde 1990 a sociedade vem buscando práticas sustentáveis que possuem baixo impacto de implantação e auxiliam no gerenciamento das águas pluviais do meio urbano. (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2005).

Para auxiliar o sistema de drenagem de uma cidade, aliviando a demanda do mesmo, é necessário o desenvolvimento de materiais e métodos que possuam papéis multidisciplinares na solução dos problemas encontrados nos grandes centros urbanos, sendo que o pavimento de concreto permeável (PCP) se apresenta como uma possibilidade a ser empregada.

O concreto permeável emprega uma porcentagem muito baixa, podendo ser nula, de agregado miúdo em sua composição, o que confere à mistura um elevado índice de vazios e conseqüentemente, uma alta

permeabilidade, possibilitando a percolação de água através de sua estrutura. Tal característica confere também ao concreto permeável a diminuição da resistência à compressão, quando comparado ao concreto convencional (BATEZINI, 2013).

As características mecânicas do PCP, assim como a taxa de permeabilidade são determinadas pela dosagem e método empregado para o adensamento do concreto no momento de sua execução, a capacidade de infiltração do concreto permeável varia de 0,21 a 0,54 cm/s (TENNIS *et al.*, 2004).

A capacidade de infiltração do concreto permeável pode ser determinada através de diversas normativas e procedimentos. Li (2003) avaliou que a diferença entre o método especificado pela ASTM C1701 e o método desenvolvido pelo Instituto Nacional de Tecnologia em Asfalto (NCAT), e verificou que as taxas podem variar em até 25% dependendo do procedimento empregado.

Parra *et al.* (2015) verificou que as empresas que comercializam o concreto permeável não seguem um procedimento comum para obter a capacidade de infiltração. Essa divergência demonstra que é importante verificar tal parâmetro através de mais de um método para possuir um comparativo entre os mesmos.

Pode-se dizer que a capacidade de infiltração de água em sua estrutura é um fator importante e correlacionado com todas as outras características do PCP. Ao longo de sua vida útil o mesmo apresenta uma diminuição da capacidade de infiltração devido ao tamponamento dos vazios existentes por sedimentos presentes nas precipitações urbanas.

A colmatação do PCP pode ser influenciada pelo tipo e granulometria dos sedimentos presentes nos corpos hídricos infiltrados e também pela intensidade e duração da precipitação. Partículas grandes (>1,18 mm) ocasionam maior colmatação em chuvas de longa duração e menor intensidade, enquanto partículas menores (<200  $\mu\text{m}$ ) influenciam mais em chuvas de pequena duração (NICHOLS *et al.*, 2015).

Além das questões hídricas, o desenvolvimento de um centro urbano aumenta significativamente a produção de resíduos e o descarte desordenado dos mesmos pode impactar tanto no sistema de drenagem quando em outras rotinas da cidade, alterando a qualidade de vida da população.

Os resíduos sólidos descartados podem ser classificados e reciclados, como é o caso do resíduo de construção e demolição (RCD) que apresenta

materiais nobres em sua composição como concreto, cerâmica, rocha, entre outros. Após serem transformados em agregados reciclados, estes costumam apresentar maior porosidade quando comparado ao agregado natural, o que auxilia na resistência à compressão quando empregado no PCP (ZAETANG *et al.*, 2016).

Este trabalho tem como objetivo analisar o impacto da substituição parcial do agregado natural pelo reciclado na produção do concreto permeável, avaliando a permeabilidade do mesmo e a influência da colmatação de diferentes tipos de sedimentos.

Tal análise engloba a verificação da permeabilidade (através do método descrito pelo NCAT, ASTM C1701, e da adaptação da NBR 14.545 e NBR 13.292). Avaliação das propriedades físicas e mecânicas e comparação, em laboratório, de seu comportamento frente a colmatação com diferentes tipos de materiais, aos quais o PCP pode estar exposto ao longo de sua vida útil.

Para tal, esse trabalho está estruturado nos seguintes capítulos:

No Capítulo 1, são apresentadas a introdução, objetivos e justificativa do tema a ser estudado;

No Capítulo 2, o estado da arte sobre o impacto do desenvolvimento urbano nas grandes cidades, com enfoque na produção de resíduos de construção e demolição e na drenagem urbana são apresentados;

O Capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica sobre o concreto permeável, desmitificando a permeabilidade, principal propriedade do mesmo, e o processo de colmatação;

No Capítulo 4 são apresentados os materiais e a metodologia que foram empregados para a realização deste estudo;

O Capítulo 5 descreve e discute os resultados da pesquisa;

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas e sugeridos novos trabalhos para continuação ao tema, seguidos das referências bibliográficas e dos anexos.

## 2 DESENVOLVIMENTO URBANO

Atualmente, em diversos locais no mundo, nota-se a transformação das áreas rurais em áreas urbanas e o crescimento, muitas vezes desenfreados, das áreas já urbanizadas.

No Brasil, por exemplo, no ano 2000 a população era de 173.448.346 pessoas e a projeção para 2030 representa um aumento de 28,64%, resultando em um total de habitantes de 223.126.917 pessoas (IBGE, 2012).

Somado a este aumento populacional, em 2010, o Censo demonstrou que 84,35% da população brasileira habitava áreas urbanas e a tendência para os próximos anos é que este número cresça ainda mais (IBGE, 2012).

Além do crescimento da população, de acordo com Lobo (2016) existe uma tendência desta se concentrar nas cidades próximas à capital, tornando a região habitada muito densa, formando megalópoles, compostas pela capital do estado e diversas cidades periféricas à mesma.

Com o desenvolvimento de uma região, aumentam-se consideravelmente, a demanda por infraestrutura, a construção de novas moradias, o transporte, manejo de águas pluviais, redes de esgoto, dentre outros e conseqüentemente existe um consumo dos recursos naturais maior, combinada com o crescimento da impermeabilização do solo.

As obras necessárias para criação da infraestrutura de uma cidade, no Brasil, geralmente são realizadas após o adensamento populacional gerar a necessidade da mesma. Portanto, o projeto empregado para sua execução, precisa prever todas as interferências instaladas, o que acaba tornando o investimento mais complexo e com um valor financeiro elevado.

A qualidade de vida no meio urbano é uma resposta da região às condições impostas pelas modificações antrópicas. Dentre alguns impactos que interferem no cotidiano das pessoas e são consequência de um grande adensamento sem planejamento, pode-se destacar o aumento na geração dos resíduos sólidos.

Os resíduos gerados podem apresentar diferentes composições e são produzidos em maior volume durante o crescimento das cidades, porém mesmo após a estabilização do crescimento da população, a produção e o descarte dos resíduos continua sendo algo recorrente.

## 2.1. Resíduos Sólidos

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), resíduos sólidos são todos os materiais que se encontram nos estados sólidos ou semi-sólidos oriundos das atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

O Ministério do Meio Ambiente afirma que as preocupações com os resíduos sólidos vêm sendo discutida há algum tempo devido à ampliação da consciência coletiva da população em relação ao meio ambiente, tendo um grande avanço em 2010 com a publicação da Lei n.º 12.305 (BRASIL, 2010) que instituiu a política nacional dos resíduos sólidos e classificou os mesmos da maneira apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Classificação dos Resíduos Sólidos

<b>Classificação</b>	<b>Tipo de Resíduo</b>
Quanto à Origem	Domiciliares
	Limpeza Urbana
	Sólidos Urbanos
	Estabelecimentos Comerciais e Prestadores de Serviços
	Serviços Públicos e Saneamento Básico
	Resíduos Industriais
	Resíduos de Serviço e Saúde
	Resíduos da Construção Civil
	Resíduos Agrossilvopastoris
	Resíduos de Serviços e Transportes
Resíduos de Mineração	
Quanto à Periculosidade	Perigosos
	Não Perigosos

Fonte: (BRASIL, 2010)

Segundo o Ministério do Meio Ambiente, a conscientização ocorreu devido ao novo conceito de responsabilidade compartilhada entre cidadãos, governo, setor privado e sociedade civil organizada para a produção de uma

gestão ambiental adequada para os resíduos sólidos proposta pela Lei nº 12.305, (BRASIL, 2010).

Para o governo, as buscas por soluções para redução da geração ou para aproveitamento de resíduos sólidos se mantêm ao longo dos anos e é exigido pela sociedade e pelo setor privado, pois reflete a necessidade de empregar uma matéria-prima com um custo menor que possibilite a execução de um determinado produto com a qualidade similar reduzindo os gastos com o descarte dos resíduos gerados na produção (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2016).

O mercado do resíduo se intensificou também em meados de 2010 quando as empresas se tornaram responsáveis pelo recolhimento e tratamento dos resíduos gerados (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2016).

De acordo com a ABRELPE (2015) o Brasil produziu cerca de 220.000 toneladas por dia de resíduos sólidos, havendo a previsão que este número cresça ao longo dos anos. Isto demonstra a necessidade de se cumprir a Lei 12.305 (BRASIL, 2010) implantando o plano de gestão de resíduos sólidos em todos os municípios com mais de 20.000 habitantes.

Atualmente, segundo o Ministério do Meio Ambiente (2016), o governo disponibiliza ferramentas e incentivos para as prefeituras efetuarem os planos de gestão dos resíduos sólidos, como o fornecimento de cartilhas com orientações e diretrizes para produção de um plano simples, no caso das cidades com até 20.000 habitantes e, o plano completo para cidades com população maior.

### **2.1.1. Resíduos da Construção Civil**

Os resíduos da Construção Civil (RCD) englobam todos os materiais que são gerados na construção, reforma, reparos e demolições de obras de construção civil, incluindo os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis.

Em 2015 a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2015) contabilizou um descarte de 123.721 toneladas por dia de resíduos de construção e demolição no Brasil. Quando comparado com o quantitativo de resíduos sólidos urbanos, esta parcela representa 56% do montante.

A ABRELPE (2015) aponta que a geração de RCD aumentou 4,1% entre os anos de 2013 e 2014, o crescimento foi menor no ano seguinte (1,2%), provavelmente resultado da desaceleração da economia no país. A tendência com a retomada do aquecimento econômico é que a geração de resíduos continue crescendo.

Os resíduos de construção e demolição podem ser classificados de acordo com a resolução CONAMA 307 (BRASIL, 2002) da seguinte maneira:

Classe A: Resíduos reutilizáveis ou reciclados como agregados;

Classe B: Resíduos recicláveis para outras destinações, como plásticos, papéis, metais, vidros, entre outros;

Classe C: Resíduos aos quais não se desenvolveu tecnologia ou aplicações economicamente viáveis, permitindo assim sua reciclagem e/ou recuperação;

Classe D: Resíduos perigosos provenientes do processo de construção, como tintas, solventes, óleos, contaminados ou prejudiciais à saúde, provenientes de demolições, reparos e reformas em clínicas radiológicas;

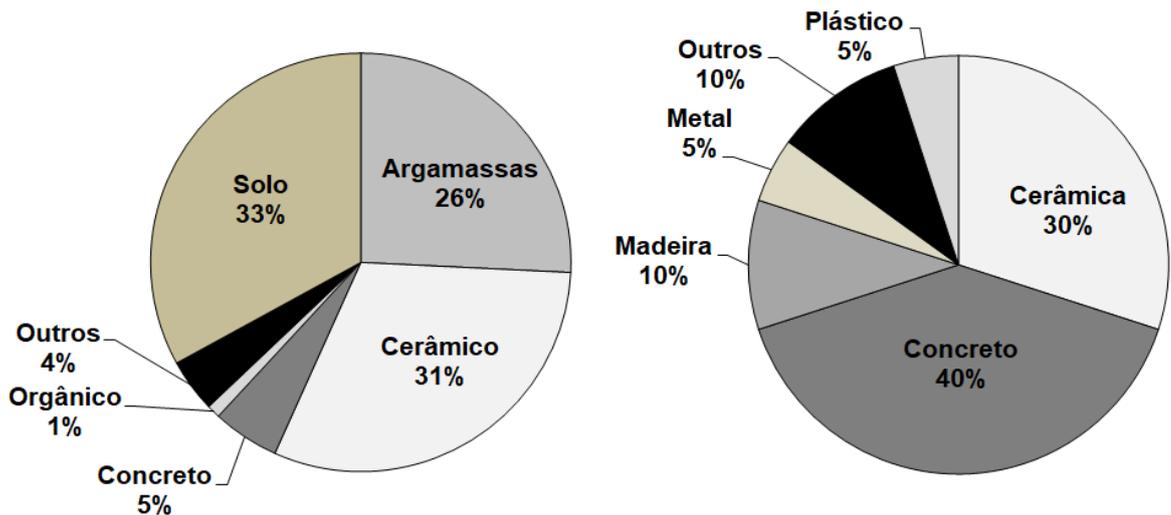
Já a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) foi desenvolvida para determinar a periculosidade dos resíduos sólidos, podendo os mesmos serem classificados como inertes ou não de acordo com sua composição.

É comum observar na composição do RCD materiais como rochas naturais, materiais cimentícios, cerâmicos, asfáltico, entre outros.

O quantitativo desses elementos nobres no RCD pode variar de acordo com a região de origem, a época de análise da amostra ou até mesmo do tipo de triagem utilizada para execução do mesmo.

Lima e Cabral (2013) observaram que em Fortaleza (CE) o RCD apresentava maior quantitativo de componentes da classe A, como argamassas, concreto, areia, entre outros. A composição do RCD foi caracterizada por Brito Filho (1999) apud Gonçalves (2016) e também por Oikonomou (2005), suas composições estão apresentadas na Figura 01.

**Figura 01.** Composição do Resíduo de Construção e Demolição



Fonte: Brito Filho (1999) apud Gonçalves (2016) à esquerda e Oikonomou (2005) à direita

Observa-se que em 1999, o RCD apresentava uma quantidade de solo mais significativa e não continha metal em sua composição. Já em 2005, o RCD apresentava mais madeira, metal e concreto, também se tornou um material mais variável, com a parcela de “outros materiais” maior.

### 2.1.2. Agregados Reciclados

Nas usinas recicladoras os resíduos de construção classe A são britados e classificados gerando vários tipos de agregados. A NBR 15.116 (ABNT, 2004) classifica os agregados reciclados em dois tipos:

- Agregado de Resíduo de Concreto (ARC): são os agregados de resíduo de concreto sendo estes os que apresentam no mínimo 90% de sua massa composta por fragmentos à base de cimento Portland e rochas.
- Agregado de Resíduo Misto (ARM): são os agregados com menos de 90% de sua massa composta por fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

Ainda na NBR 15.116 (ABNT, 2004) os agregados reciclados possuem padrões mínimos solicitados para uso em pavimentação e para uso na produção de concreto sem fins estruturais, conforme demonstrado na Tabela 2.

**Tabela 2.** Requisitos para agregado reciclado.

Propriedades		Agregados Reciclado Classe A				Normas de Ensaios	
		ARC		ARM		Agregado Graúdo	Agregado Miúdo
Teor de fragmentos à base de cimento e rocha (%)		≥90	-	≤90	-	Anexo A	-
Absorção de Água (%)		≤7	≤12	≤12	≤17	ABNT NRB NM 53	ABNT NBR NM 30
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos	1				ABNT NBR 9917	
	Sulfatos	1				ABNT NBR 9917	
	Materiais não minerais	2				Anexo A	Anexo B
	Torrões de Argila	2				ABNT NBR 7218	
	Teor total máximo de materiais contaminantes	3				-	
Teor de Material Passante na malha 75 µm (%)		≤10	≤15	≤10	≤20	ABNT NBR NM 46	

Fonte: NBR 15116 (ABNT, 2004)

A composição dos agregados reciclados graúdos deve ser determinada através do ensaio de Determinação da Composição dos Agregados Reciclados Graúdos por Análise Visual, descrito no Anexo A da NBR 15.116 (ABNT, 2004). Este ensaio consiste na análise e separação visual da amostra determinando a sua composição e conseqüente classificação em agregado reciclado de concreto (ARC) ou agregado reciclado misto (ARM).

A composição do agregado reciclado interfere nas propriedades do concreto. Estudos vêm sendo feitos ao longo dos anos no Brasil e no mundo para viabilizar maior consumo deste agregado na produção de concreto. Em alguns países, como na Holanda, Bélgica e Dinamarca, a reutilização deste material já é

corriqueira. No Brasil a norma NBR 15.116 (2004) orienta a reutilização dos agregados reciclados de RCD para pavimentação e para concreto sem função estrutural.

Apesar das restrições normativas diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos com o emprego dos agregados reciclados, dentre elas podem-se destacar Neville (1997), Ferreira (2014), Silva e Brito (2015), dentre outros. Tais estudos buscam a destinação dos agregados reciclados na produção de concretos, estruturais ou não, se aprofundando em questões como durabilidade, permeabilidade, propriedades mecânicas, entre outras características de sua utilização.

## **2.2. Drenagem Urbana**

A drenagem urbana é segundo Vaz (2004), um conjunto de equipamentos cujo objetivo é minimizar os riscos aos quais a população está sujeita por conta das inundações, possibilitando assim o desenvolvimento de forma harmônica, articulada e sustentável. Ou seja, é o gerenciamento da água da chuva que escoar pelo meio urbano.

Com o aumento da população nos polos regionais de crescimento e a expansão irregular das periferias, a infraestrutura dos recursos hídricos é altamente impactada (VAZ, 2004).

Segundo Forgiarini *et al.* (2007), a população sofre uma queda na qualidade de vida proporcionada especialmente pelas inundações e contaminações dos mananciais superficiais e subterrâneos pelo efluentes urbanos.

De acordo com Hirata *et al.* (2015), as redes de drenagem existentes no meio urbano passam a conduzir maiores vazões quando comparadas à períodos pré-ocupação. Tucci (2003) cita as principais consequências que surgem em um sistema de drenagem existente decorrentes do desenvolvimento urbano:

- Aumento das vazões máximas, dos volumes escoados e a antecipação dos picos de cheia devido à impermeabilização das superfícies e a maior capacidade de escoamento através dos condutos e dos canais;
- Redução da evapotranspiração, rebaixamento do lençol freático e redução do escoamento subterrâneo;

- Aumento do quantitativo de sedimentos devido à produção de resíduos sólidos e desproteção natural das superfícies;
- Deterioração da Qualidade da água, devido a ligações clandestinas de esgoto em canalizações pluviais, lavagem de ruas e transporte de material sólido feito pela chuva.

Alguns fatores decorrentes do crescimento urbano, como a impermeabilização da bacia, a falta de cobertura vegetal, ocorrência de precipitações críticas com maior frequência e intensidade, e a ocorrência do pico da poluição no início da chuva podem influenciar a vazão máxima, resultando em picos de vazão até seis vezes mais altos (VAZ, 2004).

Forgiarini *et al.* (2007) afirma que quando não planejada de forma sustentável, a urbanização proporciona impactos negativos no ciclo hidrológico. De acordo com Baptista e Barraud (2005), no Brasil e em outros países, vêm se discutindo alternativas para minimizar tais impactos, tendo como referência a drenagem das águas pluviais.

O desenvolvimento sustentável urbano em países desenvolvidos, segundo o Ministério das Cidades (2005) teve três estágios; os quais são descritos na Tabela 3.

**Tabela 3.** Estágios do Desenvolvimento Sustentável Urbano nos Países Desenvolvidos

<b>Anos</b>	<b>Período</b>	<b>Característica</b>
Até 1970	Higienista (Clássicas ou Tradicionais)	Transferência do escoamento superficial para jusante por canalização
1970-1990	Corretivo	Amortecimento quantitativo da drenagem, e controle de impacto existente da qualidade da água pluvial.
1990 - ?	Sustentável	Planejamento da ocupação do espaço urbano (priorizando mecanismos naturais de escoamento); controle do micro poluentes e da poluição difusa, e o desenvolvimento sustentável do escoamento pluvial por meio da recuperação da infiltração

Fonte: Ministério das Cidades (2005) - Adaptado

Baptista e Barraud (2005) definem as técnicas adotadas até 1970 como transferência das inundações para pontos jusantes, resultando na necessidade de construções de novas obras, geralmente mais onerosas, que resultavam em problemas de qualidade ao criar situações irreversíveis ao uso do solo urbano.

A partir de 1970, com o objetivo de corrigir os problemas presentes de drenagem, outras técnicas foram adotadas com base nas BMPs (*Best Management Practices*) priorizando o controle do escoamento através da retenção (USEPA, 1999 apud FORGIARINI *et al.*, 2007).

Nas últimas décadas, as técnicas que se baseiam no Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto conhecido popularmente por LID (Low Impact Development), têm se destacado por uma proximidade maior com a sustentabilidade. Tratam-se de práticas compensatórias baseadas nas ações corretivas, porém priorizando a infiltração e o planejamento do uso e ocupação do solo urbano (SOUZA *et al.*, 2012).

Para Baptista e Barraud (2005) as técnicas compensatórias resultam na redução das vazões e volumes de escoamento através do armazenamento ou infiltração das águas pluviais. Buscam a diminuição dos picos de cheia, velocidade de escoamento por consequência do tempo de concentração sendo abrangentes ao incluir a análise de layouts alternativos de estradas e prédios.

Nessa abordagem sobre o LID, considera-se no planejamento diversos itens, como topografia, solo, hidrologia, vegetação e habitat, zoneamento e uso do solo, as vias de acesso à área e proximidade dos serviços tratando o meio urbano como um organismo (SOUZA, 2012).

### **2.2.1. Impermeabilização do Solo**

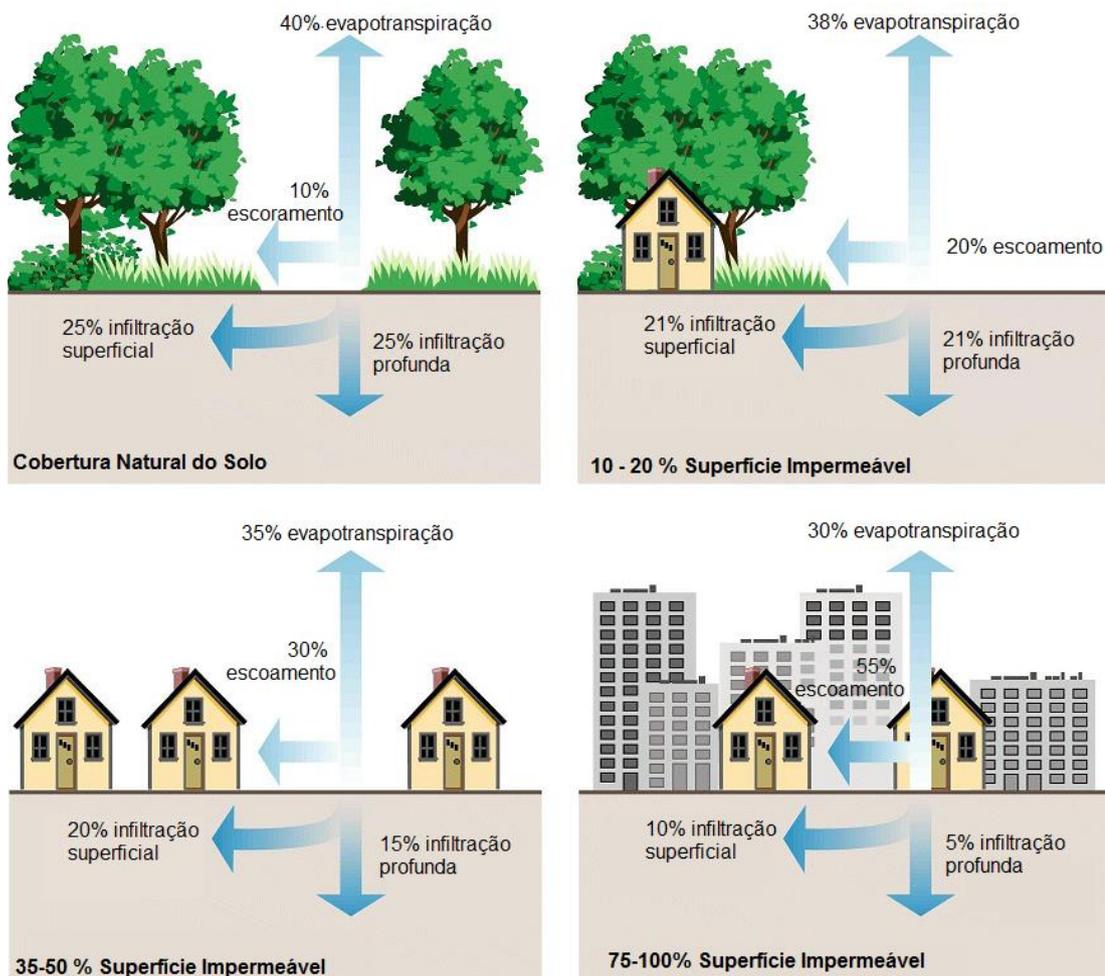
Dentre os principais impactos na infraestrutura hídrica ocasionados pelo desenvolvimento urbano, pode-se destacar como principal característica a impermeabilização do solo que resulta no aumento do escoamento superficial, diminuição da infiltração e da evapotranspiração (AQUAFLUXUS, 2012).

Segundo Lamb (2014), os acúmulos das águas provenientes das chuvas nas superfícies impermeáveis resultam em catástrofes hídricas e impactam diretamente na infraestrutura urbana com o aumento dos picos de cheia e diminuição do abastecimento dos reservatórios subterrâneos.

A impermeabilização do solo pode contribuir também para a erosão e assoreamento dos rios, uma vez que a mesma produz volumes e velocidades de escoamento superficial maiores, aumentando a capacidade de carregamento de partículas pelo corpo hídrico (ESTEVES, 2006 apud BATEZINI, 2013).

Segundo Mota (1984) a impermeabilização retira a camada superficial fértil do solo, o que ocasiona no empobrecimento do mesmo e assoreamento dos rios. A relação entre o escoamento superficial em diferentes perfis de uso e ocupação do solo podem ser observados na Figura 2.

**Figura 2:** Impermeabilização do Solo



Fonte: Adaptado de AQUAFLUXOS, 2012

Segundo Tucci (2003), além dos impactos no escoamento, a impermeabilização do solo apresenta relação direta com a qualidade da água, pois:

- A poluição existente no ar, se precipita junto com a água fundindo-se ao corpo hídrico;

- O escoamento proporciona a lavagem de superfícies urbanas dispostas com diferentes componentes orgânicos e metais;
- Resíduos sólidos por sedimentos erodidos e lixo urbano depositado são transportados com o aumento da velocidade de escoamento;
- Esgoto cloacal que não é coletado escoar através da drenagem urbana.

O transporte dos sedimentos ocorre principalmente após o período de estiagem, nos primeiros 25 mm de chuva e possui uma taxa de dispersão de 1,5 g/l. Em alguns casos a contaminação presente pode ser equivalente ao esgoto sem tratamento (TUCCI, 2003).

Com a canalização dos cursos de água, destacados no período de 1970-1990, a bacia hidrográfica sofre alteração no tempo de concentração devido ao aumento na vazão de escoamento (PEREIRA, 2015).

Para amenizar o problema é necessário investir em materiais e métodos que se apliquem na área montante, impedindo que a precipitação chegue até o sistema de drenagem com a velocidade, o volume e poluentes ampliados. Tucci (2003) verificou que essa aplicação pode reduzir os custos em até dez vezes nos sistemas de drenagem urbana.

Uma das maneiras de auxiliar a redução do escoamento superficial é empregar pavimentos permeáveis, que podem ser de diversos materiais como asfalto, concreto, blocos, entre outros.

### **3 CONCRETO PERMEÁVEL**

Neste capítulo serão descritos os principais estudos encontrados até o momento sobre o concreto permeável (PCP).

#### **3.1. Definição e Características**

O concreto permeável apresenta em sua composição uma redução significativa ou ausência total de agregados miúdos, o que garante um índice de vazios maior quando comparado ao concreto convencional. Existem registros de sua utilização desde o pós-guerra (ACI 522, 2006), entretanto seus estudos só se aprofundaram nos últimos anos.

Batezini (2013) observa que o emprego do PCP em vias de tráfego pesado é comprometido devido à baixa tenacidade e resistência à fadiga, que afetam sua eficácia. Portanto, o PCP possui sua utilização é mais difundida em vias de tráfego leve, como: passarelas de pedestres, ciclovias e estacionamentos.

De acordo com Holtz (2011), além de ser reconhecido como uma melhor prática de gestão, sua utilização auxilia na obtenção do certificado de Liderança em Energia e Design Ambiental (LEED), pois sua sustentabilidade advém de três características básicas:

- Auxilia na redução do aquecimento terrestre, pois permite a troca de calor entre subsolo e superfície;
- É um material reciclável, podendo ser reaproveitado após seu ciclo de vida;
- Pode ser confeccionado com materiais locais.

Outro atributo positivo do PCP que pode ser citado é a capacidade de diminuir as ilhas de calor do meio urbano ao substituir uma superfície asfáltica escura por um material mais claro que absorve menor quantidade de calor e se resfria mais rapidamente devido à exposição de seus poros (HOLTZ, 2011).

Dentre as características do PCP, a principal é sua permeabilidade, pois ela permite a infiltração da água pluvial no solo além de sua textura rugosa reduzir a velocidade de escoamento da água de chuva, tais propriedades são importantes para mitigar problemas de drenagem urbana, como o sobre carregamento da rede.

Segundo Scholz *et al.* (2007), o emprego de pavimentos permeáveis também é uma das alternativas para minimizar o escoamento superficial das águas de chuva e potencializar seu reuso, visto que é possível armazenar a água coletada pelos PCP.

Essas características quando incorporadas ao sistema de drenagem, torna-o mais sustentável. Com o decorrer dos anos, as técnicas para elaboração de pisos permeáveis foram se difundindo e criando várias maneiras de se produzir pavimentos permeáveis. Dentre os pisos permeáveis, os mais comuns são:

- Blocos Intertravados: Possuem juntas que interligam o elemento maciço, possibilitando a passagem de água através das mesmas;
- Concretos permeáveis, que são dosados com o mínimo ou sem adição de agregados miúdos para obtenção de vazios ao longo de sua estrutura;
- Asfalto permeável, que também utiliza uma granulometria de agregados maior, potencializando o volume de vazios.

Todos apresentam vantagens, principalmente em relação à diminuição da quantidade de água de escoamento superficial e a facilidade de remanejamento da água coletada para reutilização (SCHOLZ *et al.*, 2007).

A água que escoar superficialmente pelo pavimento permeável, infiltra na base onde ocupa um local entre os agregados graúdos, formando um verdadeiro reservatório. Após a infiltração através da base, a água pode ser direcionada para um sistema de captação em uma caixa coletora ou apenas ser absorvida pelo solo, quando o mesmo possui tal capacidade.

O concreto permeável, assim como os demais pavimentos permeáveis, assume o papel de medida mitigadora do escoamento superficial, com principal atuação na diminuição dos picos de cheia.

Pode ser empregado como alternativa sustentável no conceito do desenvolvimento de ferramentas de baixo impacto ambiental, que vêm se destacando desde 1990, como gerenciamento das águas pluviais.

Sua dosagem varia de acordo com a finalidade para qual foi desenvolvido, porém deve ter como objetivo alcançar o equilíbrio entre índice de vazios, resistência, quantidade de pasta e capacidade de trabalho.

O quantitativo de materiais empregados pode ser determinado através de diversos métodos, os comumente empregados, de acordo com Kia *et al.*

(2016) são o modelo de volume absoluto, teor de pasta em excesso e a proporção volumétrica da pasta ou teste de erros repetidos.

Basicamente, a dosagem escolhida deve fornecer o cimento necessário para efetuar uma camada em volta dos agregados, fazendo com que os mesmos criem aderência entre si. (KIA *et al.*, 2016). Na Tabela 4 pode-se observar a dosagem comumente empregada para a produção do PCP.

**Tabela 4.** Dosagens Típicas do Concreto Permeável

Materiais	Consumo / Proporção	
	Batezini (2013)	Kia <i>et al.</i> (2016)
Ligante Hidráulico (kg/m <sup>3</sup> )	270 a 415	150 a 700
Agregado Graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	1.190 a 1.700	1.100 a 2.800
Agregado Miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	-	0 a 7% em relação ao agregado graúdo
Relação água / cimento em massa	0,27 a 0,34	0,20 a 0,50
Relação cimento/agregado em massa	1:4 a 1:4,5	1:2 a 1:12
Relação Agregado miúdo/gráudo em massa	0 a 0,01	0 a 0,07

Fonte: Batezini (2013) e Kia *et al.* (2017)

Pode-se observar na Tabela 4 a enorme variação entre as dosagens que podem ser empregadas. Este fato é decorrente do fato do PCP poder ter requisitos específicos, para a finalidade e local para o qual foi projetado, além da inexistência de um método universal aceito (KIA *et al.*, 2016).

No estado fresco, o concreto permeável apresenta baixa consistência quando comparado com o concreto convencional. O ensaio de abatimento do tronco de cone normalmente apresenta resultados menores que 20 mm, o que pode prejudicar a execução de elementos com geometrias sofisticadas e torna o ensaio dispensável (ACI 522, 2006).

Para a análise da consistência no estado fresco do concreto permeável emprega-se a análise táctil e visual, que pode ser verificada ao se comprimir uma

quantidade pequena de concreto com a mão, observando a formação de pequenos aglomerados.

O tempo de aplicação do concreto permeável é bastante reduzido, pois sua mistura apresenta pouco excesso de água e seus vazios potencializam a evaporação.

Segundo a ACI 522 (2006), sua aplicação deve ocorrer em até 60 minutos, podendo ser prolongada a 90 minutos com o emprego de aditivos retardadores de pega para que não ocorra a baixa da resistência da mistura.

De acordo com a BASF (2016), o emprego de aditivos ao concreto permeável pode facilitar o descarregamento do material do caminhão betoneira, eliminar a necessidade de adição de água em campo, aumentar o tempo de aplicação do concreto, facilitar a aplicação, aumentar a resistência à compressão e impedir que a pasta migre para o fundo do elemento.

O emprego de aditivos no concreto permeável pode ser realizado para a melhoria das características no estado fresco e endurecido, assim como no concreto convencional.

Os aditivos que reduzem a quantidade de água da mistura são empregados para aumentar a capacidade de trabalho sem a necessidade de ampliar a relação água / cimento.

Aditivos retardadores de pega são empregados no concreto permeável para facilitar a retirada do concreto da betoneira, aumentar a trabalhabilidade e o tempo de aplicação de concretos moldados *in loco*, além de melhorar a coesão da mistura evitando que a pasta de cimento se acumule na parte inferior do elemento recém-concretado (KIA *et al.* 2016).

O concreto permeável apresenta menor peso específico quando comparado ao concreto convencional devido à dosagem que dispensa o uso de agregados miúdos e ao tipo de compactação. Segundo Holtz (2011) e Tennis *et al.* (2004) o peso específico pode variar de 1.600 a 2.000 kg/m<sup>3</sup> e de 1.300 a 2.000 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

A compactação afeta muitas propriedades do concreto permeável, a insuficiência da mesma pode provocar a baixa da resistência, bem como tornar a superfície do mesmo desalinhada com heterogeneidade de rugosidade, entre outros.

Já o excesso de compactação pode diminuir a permeabilidade do concreto, diminuindo o índice de vazios do mesmo e ocasionando o corrimento da pasta de cimento para o fundo do elemento, resultando na desagregação dos materiais (SCHAEFER *et al.*, 2006).

Geralmente são empregados rolos compactadores que garantem uma interligação mais forte entre os materiais, porém sua utilização diminui a permeabilidade superficial e a pressão do rolamento, quando excessiva, pode ocasionar no arraste do material superior, diminuindo assim os vazios presentes no topo da amostra (KIA *et al.*, 2016). Para evitar tais problemas, a ACI 522 (2006) recomenda que o rolo compactador possua 90 kg/m.

De acordo com a literatura, não existe um método normatizado para a execução do concreto permeável, porém a sequência dos procedimentos e o tempo podem alterar significativamente no resultado final. A utilização de diferente energia de compactação resultará na discrepância de resultados e o emprego de máquinas desempenadeiras ou seladoras podem tornar a superfície do PCP impermeável (SCHAEFER *et al.*, 2006).

Suleiman *et al.* (2006) verificou a influência da energia de compactação nas principais características do concreto permeável através da variação da energia de compactação da mesa vibratória após o adensamento com bastão metálico. Pôde observar que o adensamento com maior intensidade também ocasiona a diminuição dos índices de vazios e aumento das resistências do PCP. Já o adensamento mal realizado pode precipitar a degradação do pavimento.

Portanto, para obter condições de resistência melhores sem prejudicar a condutividade hidráulica, o ideal é adotar 45 e 75 golpes de bastão metálico divididos em três etapas para corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos, respectivamente, com emprego de mesa vibratória em baixa potência por 10 segundos após o adensamento com bastão.

De acordo com Kia *et al.* (2016), os pavimentos de concreto permeável são mais suscetíveis a danos causados pela cura inadequada, devido sua alta área de superfície em contato com o ambiente.

É tipicamente empregada a cura do concreto através do cobrimento com plástico após 20 min de sua moldagem. Os elementos também devem permanecer na fôrma no mínimo 07 dias e, quando possível, devem ser moldados em temperaturas mais baixas.

O concreto permeável com uma cura insuficiente pode apresentar a secagem da pasta de cimento antes do ganho de resistência adequado (TENNIS *et al.*, 2004).

O método de construção *in loco* é mais trabalhoso e requer mais atenção quando comparado com o concreto convencional. Os impactos dos procedimentos adotados para sua execução podem apresentar muitas variações na durabilidade e eficácia à longo prazo, porém os estudos destes fatores não são aprofundados atualmente (KIA *et al.*, 2016).

A vida útil do mesmo varia entre 6 a 20 anos, e tem o fim da vida útil geralmente ocasionada devido à colmatação, excesso de trincas ou degradação ocasionada pelo gelo e degelo da estrutura (HASELBACH *et al.*, 2006).

A textura da superfície do concreto permeável também é diferenciada quando comparada a do concreto convencional, pois apresenta superfície muito rugosa com elevado coeficiente de atrito, o que aumenta a segurança dos pavimentos, diminuindo o risco de escorregamentos e aquaplanagem. Na Figura 3, pode-se observar a textura dos concretos convencional e permeável.

**Figura 3:** Textura do concreto permeável (a esquerda) e do concreto convencional (a direita)



Devido a sua estrutura porosa, existe uma diferença entre os tempos de chegada e reflexão das ondas sonoras relativas a movimentação dos veículos sob o pavimento. Essa diferença resulta na diminuição da intensidade do ruído gerado pelo tráfego (OLEK *et al.*, 2003 apud Batezini, 2013).

O PCP pode apresentar índice de vazios entre 15 a 25% segundo Holtz (2011). O parâmetro é classificado como de baixa porosidade, quando apresenta valores abaixo de 15% e como de alta, quando os resultados estão acima de

30%. Este resultado influencia diretamente na capacidade de resistência à compressão que pode assumir valores maiores e menores de acordo com o peso específico do elemento (BATEZINI, 2013).

Recomenda-se, portanto, segundo Tennis *et al.* (2004) a adoção em torno de 20% de índice de vazios para garantir valores aceitáveis nas duas propriedades, resistência à compressão e permeabilidade.

De acordo com Kevern *et al.* (2009), a resistência à compressão do concreto permeável apresenta valores médios entre 6,7 e 17,5 MPa. Já o ACI 522 (2006) menciona a faixa média entre 3,5 e 28 MPa.

Esta variação ocorre por causa do aumento no índice de vazios, que geralmente permite maior permeabilidade, porém torna a estrutura porosa, conseqüentemente diminuindo a resistência.

A relação entre permeabilidade, porosidade e resistência é complexa, pois existe uma dispersão muito grande nos resultados encontrados na literatura técnica. Porém a tendência geral é aumentar a permeabilidade com o aumento da porosidade e conseqüentemente ocorre a diminuição da resistência.

Esta discrepância ocorre, pois a permeabilidade não depende unicamente da porosidade, variando também com a disposição, tamanho, forma, grau de conectividade e alinhamento dos poros existentes no concreto permeável. Por exemplo, concretos que apresentam o corrimento da pasta de cimento para a parte inferior do elemento, apresentam permeabilidade nula apesar de porosidade muito alta (maior que 15%) (VIDAL, 2014).

Outro aspecto que pode influenciar também nos resultados é o método de análise da permeabilidade (KIA *et al.* 2016).

A resistência do concreto permeável é inferior quando comparada com o concreto convencional. Seus valores são principalmente determinados pela porosidade total, que por sua vez é influenciada por uma gama de variáveis, como o consumo de cimento, a relação água / cimento, as características dos agregados e a energia de compactação empregada.

Em média pode-se observar que a força de compressão diminui cerca de 3% a cada aumento de 1% no índice de vazios (KIA *et al.*, 2016).

De acordo com Dellate apud Batezini (2013) a resistência à tração na flexão, assim como a resistência à compressão, podem variar de 1,0 a 7,5 MPa, sendo inversamente proporcionais ao índice de vazios.

Portanto, sua empregabilidade torna-se mais eficaz em pavimentos de passagem de veículos leves ou calçadas e parques, tendo seu emprego para rodovias com carga solicitantes altas comprometidos (BATEZINI, 2013).

Schaefer *et al.* (2011) observaram que o emprego de diferentes tamanhos de agregados reduz a taxa de porosidade e infiltração do concreto permeável. A norma específica, ACI 522 (2006) recomenda também o emprego de agregados em um único tamanho ou estritamente classificados entre 9,5 e 19 mm.

Agregados com formatos arredondados também produzem índices de vazios inferiores, porém aumentam a resistência à compressão. Enquanto agregados angulares tendem a ser orientados em um plano durante a compactação, afetando a área de contato e o contorno dos elementos. Já os agregados com escamas ou alongados prejudicam as propriedades do concreto permeável (KEVERN *et al.*, 2009).

Segundo Mariano (2014), agregados com granulometria descontínua podem diminuir a resistência à tração na flexão, enquanto a utilização de agregados com granulometrias contínuas e acima de 9,5 mm podem favorecer a resistência à compressão.

Geralmente não são empregados agregados miúdos no concreto permeável, porém sua adição em até 7 % em relação à quantidade de agregados totais pode aumentar a resistência à compressão e peso específico sem afetar significativamente a permeabilidade (SCHAEFER *et al.*, 2006).

O teor de umidade do agregado é importante no momento da mistura, pois agregados secos podem reduzir a trabalhabilidade e a compactação, enquanto agregados úmidos podem contribuir para a drenagem da pasta de cimento para o inferior da estrutura. Assim sendo, é necessário efetuar a correção da relação água / cimento ajustando a absorção de água do agregado (KIA *et al.*, 2016).

O PCP requer manutenção mais frequente quando comparado ao concreto convencional, pois ao longo de sua vida útil sofre o acúmulo de partículas em seu interior, ocasionando em sua colmatação. A manutenção pode melhorar a taxa de infiltração através da recuperação dos vazios, porém o problema é cíclico (KEYHANIAN *et al.*, 2012).

Também devido à passagem de água em seu interior, o emprego de armaduras ou até mesmo fibras de aço podem ser restritos devido à corrosão dos materiais.

Quando disposto sob o solo diretamente, sem um sistema de drenagem, pode contribuir para o aumento de meios agressores, o que resultaria na alteração química da superfície natural.

Em comparação ao concreto convencional empregado para pisos, o concreto permeável também requer uma produção mais sofisticada, em especial no que tange ao adensamento (KERTIS *et al.*, 2016).

### **3.2. Incorporação de agregado reciclado ao concreto permeável**

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) as propriedades mais importantes à serem determinadas para os agregados reciclados para sua incorporação ao concreto são a granulometria, capacidade de absorção de água, forma, textura, resistência à compressão, módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes no material.

Quebaud e Buyle-Bodim (1999) apud Leite (2001) demonstram que os agregados reciclados apresentam características muito peculiares que variam de acordo com a composição, métodos de britagem e composição do resíduo de construção processado para produção do agregado reciclado. Todas essas características influenciam nos resultados do concreto final.

De acordo com Leite (2001) é necessário efetuar uma caracterização sistêmica do agregado reciclado para verificar a influência do mesmo na incorporação ao concreto, pois suas propriedades e composição interferem diretamente nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto.

Geralmente os concretos produzidos com agregados reciclados (AR) necessitam de 5% de água livre a mais que os concretos convencionais para garantir a mesma consistência, pois geralmente o AR possui uma capacidade de absorção de água superior ao agregado natural (LEITE, 2001).

Estudos feitos por Rizvi *et al.* (2009) testaram algumas porcentagens de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto (0%, 15%, 30%, 50% e 100%) e verificou-se que a resistência à compressão do concreto permeável produzido com 15% de substituição manteve-se com a

mesma característica do concreto produzido com 100% de agregado natural, enquanto os demais obtiveram resultados de até 56% menores em comparação à amostra referência.

Zaetang *et al.* (2016) verificou a influência do tipo de agregado reciclado (proveniente de blocos de concreto e de concreto reciclado) e também a diferentes porcentagens de substituição (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%) e pode observar que exceto na substituição de 100%, todas as amostras obtiveram resistência à compressão maior que o concreto referência (produzido somente com agregado natural).

Observou-se que o agregado reciclado proveniente de blocos de concreto aumentou o quantitativo de pasta na mistura, o que diminuiu o índice de vazios e, conseqüentemente, a permeabilidade do concreto permeável.

Em relação à resistência à abrasão o concreto permeável produzido com 20% de substituição por agregado reciclado de concreto apresentou valores mais elevados.

Zaetang *et al.* (2016) observou que o ganho de resistência à compressão ocorre principalmente quando o resíduo é proveniente de elementos de concreto reciclados.

Esse aumento da resistência ocorre, pois o resíduo apresenta a estrutura mais porosa quando comparado ao agregado natural, melhorando o envolvimento do agregado pela pasta de cimento e conseqüentemente aumentando a aderência entre os materiais.

Tavares e Kazmierczak (2016) avaliaram a influência da substituição total dos agregados naturais por agregados reciclados em concretos permeáveis e notaram que a modificação prejudicou a resistência à compressão devido à ocorrência de microfissuras na região da interface agregado-matriz. Porém sua permeabilidade se manteve constante, o que validou a utilização de agregados reciclados no concreto permeável em menores taxas de substituição.

Vidal (2014) optou em sua pesquisa por não empregar a compactação do concreto permeável com RCD em mesa vibratória após o adensamento com bastão metálico, para que a pasta do concreto não escoasse para a base da forma dos corpos de prova, resultando no tamponamento dos vazios inferiores da amostra.

### 3.3. Permeabilidade

A permeabilidade do concreto está correlacionada, segundo Virgillis (2009), com o índice de vazios que o mesmo apresenta, sendo que, quanto maior o índice de vazios, maior a sua permeabilidade. Tais vazios são dispostos de maneira heterogênea na massa de concreto e através de sua interligação é possível escoar a água.

O coeficiente de permeabilidade para o concreto ou taxa de infiltração para os pavimentos permeáveis é o parâmetro mais observado no concreto permeável por representar a capacidade de infiltração de água através de seu corpo hídrico e se correlacionar com as demais características.

Esse coeficiente varia de acordo com a dosagem e método de adensamento utilizado. Tennis *et al.* (2004) e Holtz (2011) apresentaram em suas pesquisas valores entre 0,20 cm/s até 0,54 cm/s. Haselback *et al.* (2006) apresenta em seu estudo variações entre 0,20 cm/s até 1,0 cm/s.

Parra *et al.* (2015) analisou diversos catálogos técnicos e normas para observar padrões adotados por diferentes tipos de pavimentos permeáveis e constatou que o índice de vazios possui correlação com todas as características do concreto, como a resistência à compressão, à tração, o índice de vazios, dentre outros.

Por ser a característica mais procurada no concreto permeável, o coeficiente de permeabilidade tem a necessidade de ser obtido de forma precisa. Porém a escolha do ensaio empregado influencia no resultado, pois os métodos são discrepantes entre si (LI *et al.* 2013)

Existem diversas formas para obtenção do coeficiente de permeabilidade do PCP, algumas desenvolvidas para aplicação em pavimentos instalados ou placas, onde o coeficiente encontrado é chamado de taxa de infiltração e, outras em laboratório, onde o resultado é denominado como coeficiente de permeabilidade.

Em laboratório, são adotados dois tipos de ensaios, um com análise através da carga constante de água e outro com carga variável. Tais procedimentos são adaptados das normas NBR 13292 (ABNT, 2016) e NBR 14545 (ABNT, 2000) respectivamente, usadas em laboratório para ensaio de permeabilidade dos solos.

Os métodos de ensaios para determinação da permeabilidade “*in loco*” são aqueles definidos em normas internacionais como a ASTM C1701 (2009) e o método não normatizado desenvolvido pelo National Center for Asphalt Technology (NCAT), dos Estados Unidos.

### 3.3.1. Métodos para determinação da permeabilidade em laboratório

O ensaio de permeabilidade de carga constante trata-se de um procedimento adaptado da NBR 13.292 (ABNT, 2016) utilizada para medição da permeabilidade de solos com alto taxa de permeabilidade.

A adaptação do procedimento emprega no lugar de uma amostra indeformável de solo, um corpo de prova cilíndrico, onde o mesmo é impermeabilizado em suas faces laterais.

O equipamento emprega em sua execução um permeâmetro que direciona o fluxo de água ao longo do comprimento do corpo de prova, como esquematizado na Figura 4.

**Figura 4.** Permeâmetro de Carga Constante



Para garantir o sucesso na realização do mesmo, é necessário saturar o corpo de prova, verificando a presença de água através dos extravasores e empregar um direcionador de fluxo, bem como vedar a lateral do corpo de prova para que não ocorram vazamentos.

A água é infiltrada por meio da força da gravidade e o tempo que a água leva para percorrer a estrutura é determinado e empregado na Equação 1 Lei de Darcy (ABNT,2016), determinando assim o coeficiente de permeabilidade.

$$k = \frac{V.l}{h.A.t} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

k: Coeficiente de Permeabilidade [cm/s]

V: Volume de água coletada [cm<sup>3</sup>]

l: Comprimento da Amostra [cm]

h: Carga hidráulica [cm]

A: Área da seção transversal da amostra [cm<sup>2</sup>]

t: Tempo dispenso na infiltração [s]

Outra maneira de obter o coeficiente de permeabilidade é a realização do ensaio através do permeômetro de carga variável, que se diferencia do método acima, pois não emprega o reabastecimento de água durante a medição, causando perda de carga na coluna de água durante sua execução.

O método também é uma adaptação da NBR 14.545 (ABNT, 2000) e emprega um permeômetro que pode ser construído em laboratório com tubos de PVC e acrílico e pode ser observado na Figura 5.

**Figura 5.** Permêmetro de Carga Variável



Neste ensaio, o corpo de prova com as laterais vedadas para a passagem de água é inserido no permeômetro. Também é colocada a água

através do abastecedor, como controle de vazão aberto, até a estabilização do nível.

Após a estabilização, o controle de vazão é fechado e a água é inserida novamente através do abastecedor até o ponto desejado de início de ensaio.

O controle é aberto novamente e a água infiltra através da força da gravidade. O tempo gasto para que ocorra a infiltração da água até o ponto final de leitura, é utilizado para obtenção do coeficiente de permeabilidade através da Equação 2 (ABNT, 2015)

$$k = \frac{a.L}{A.t} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

k: Coeficiente de Permeabilidade [cm/s]

a: Seção transversal do tubo de alimentação [cm<sup>2</sup>]

L: Comprimento da Amostra [cm]

A: Área da seção transversal da amostra [cm<sup>2</sup>]

t: Tempo dispenso na infiltração [s]

h1: Nível inicial da água [cm]

h2: Nível final da água [cm]

### 3.3.2. Métodos para determinação da permeabilidade “*in loco*”

A taxa de infiltração é o resultado de ensaio realizado *in loco* que determina o tempo necessário para a água infiltrar em uma estrutura permeável (CURVO, 2017).

Dentre alguns métodos empregados, destaca-se o desenvolvido pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e pelo Nacional Center for Asphalt Technology (NCAT) (LI *et al.*, 2013).

A norma ASTM C1701 (2009) denominada *Pervious Concrete Infiltration Test*, descreve um procedimento para a obtenção de uma taxa de infiltração de pavimentos permeáveis.

No Brasil, a NBR 16.416, (ABNT, 2015), indica a utilização do procedimento criado pela ASTM C1701 (2009) para determinação do coeficiente de permeabilidade “*in loco*”, porém existem outras normativas e procedimentos

para obtenção deste coeficiente como, por exemplo, o método desenvolvido pelo NCAT.

Apesar dos procedimentos de ensaio da ASTM e do NCAT serem semelhantes na maneira de execução, as diferenças entre os métodos podem ser observadas na forma de cálculo para a obtenção da taxa de infiltração. O NCAT considera em seu cálculo a espessura do pavimento e emprega diferentes diâmetros no permeâmetro, enquanto o ASTM prevê uma molhagem prévia e insere no cálculo a massa de água infiltrada e o tempo necessário.

Li *et al.* (2013) fizeram um comparativo entre a taxa de infiltração obtidos através da norma ASTM C1701 (2009) e o método desenvolvido pelo NCAT. O resultado obtido pelo método NCAT apresentou valores 50% a 90% mais altos comparados com os resultados obtidos com o ASTM. A diferença encontrada através dos métodos diferentes demonstra a necessidade da adoção de um procedimento mais preciso que retrate a realidade da permeabilidade do pavimento.

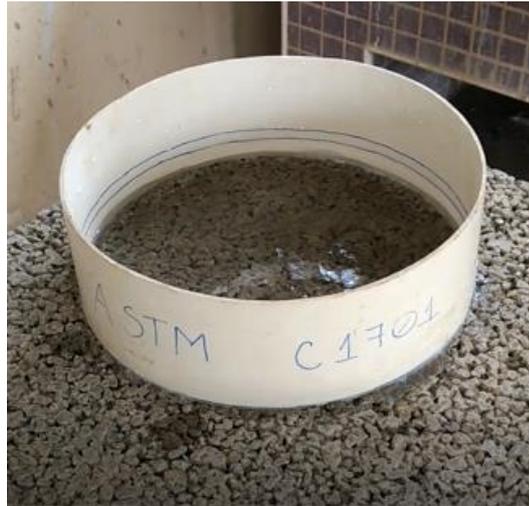
#### *Norma Americana ASTM C1709 (2009)*

Os ensaios “*in loco*”, iniciam-se com a colocação de um anel com diâmetro em torno de 20 a 30 cm no pavimento; É efetuada a vedação do mesmo no pavimento e a pré-molhagem; Posteriormente é inserida uma lamina d’água onde se mede o tempo que o pavimento demora em absorver a água ou, em um determinado período de tempo, qual foi a diferença de nível da altura da coluna de água.

Em todos os procedimentos é necessário atentar-se para que a água não escoe através da junção entre o permeâmetro e o concreto.

O roteiro estabelecido pela ASTM C1701 consiste na colocação de um tubo circular com diâmetro de 30 cm na superfície do pavimento, que deve ser vedado com silicone. Para a execução do ensaio é necessário efetuar a pré-molhagem indicada em norma e posteriormente abastecer o “reservatório criado” com o tubo, até uma altura de lâmina de água definida, observando o tempo necessário para a infiltração da água. Na Figura 6 pode-se observar o procedimento de ensaio.

**Figura 6:** Permeâmetro ASTM C1701 (2009)



Este método, por possuir uma altura de lâmina de água muito pequena, permite que se considere como constante a altura de coluna d'água. Sendo assim, emprega a mesma fórmula de cálculo do ensaio com o permeâmetro de carga constante usado em laboratório.

#### *Procedimento NCAT*

O NCAT é um procedimento não normatizado desenvolvido pelo *Nacional Center for Asphalt Technology* localizado nos Estados Unidos, em 2006. Apesar de ser desenvolvido para pavimentos de asfalto poroso, pode ser empregado para o concreto permeável permitindo a obtenção de um coeficiente mais apurado devido à estrutura física do permeâmetro e à fórmula de obtenção do coeficiente de permeabilidade que leva em consideração a espessura do pavimento permeável.

O permeâmetro pode ser montado com acrílico, apresentando tubos de diversos diâmetros ao longo de sua estrutura, para pavimentos de baixa permeabilidade utiliza-se os quatro diferentes diâmetros. Caso contrário é possível utilizar apenas dois. Na Figura 7 observa-se o permeâmetro NCAT.

**Figura 7:** Permeômetro NCAT

A fórmula utilizada para o cálculo do coeficiente de permeabilidade, neste caso, avalia a diferença de nível de água em relação ao tempo gasto para a infiltração da água e os diâmetros dos tubos. Portanto se assemelha ao ensaio executado com o permeômetro de carga variável realizado em laboratório.

Em pavimentos muito porosos o ensaio NCAT pode ser de difícil realização devido à altura da lâmina d'água formada entre os anéis ser muito alta, o que exige uma vazão de entrada maior.

### 3.4. Colmatação

Ao longo do tempo de utilização do concreto permeável, ocorre a obstrução de seus poros por sedimentos encontrados na água infiltrada.

Tal fenômeno é denominado como colmatação e, ao longo do tempo de utilização do pavimento, é responsável pela diminuição da permeabilidade, podendo assim comprometer a funcionalidade do PCP. (BENJAMIN *et al.*, 2003).

Após a infiltração com o pavimento seco, as partículas podem formar uma crosta endurecida, selando os vazios do concreto permeável e também diminuindo a permeabilidade do pavimento ao longo do tempo (PRATT *et al.*, 1995 apud KIA *et al.*, 2016).

Os sedimentos infiltrados no concreto permeável podem ter origem na corrosão de elementos próximos, detritos de estradas, material transportado por veículos, matéria orgânica (quando existe vegetação próxima), presença de fluídos de origem oleosa (quando empregados em estacionamentos de veículos),

ou até mesmo de pequenas partículas provenientes do desgaste natural do pavimento permeável por abrasão. Comumente tais sedimentos são compostos por areia, silte e argila (KIA *et al.* 2016).

Nichols *et al.* (2015) observaram que todos os tamanhos de partículas, bem como o tempo de duração da chuva provocam a diminuição da capacidade de infiltração do concreto permeável.

Em precipitações com tempo de duração maior que seis horas, as partículas com dimensões entre 200  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$  são escoadas naturalmente pelo PCP, enquanto partículas de 300  $\mu\text{m}$  a 1,18 mm são realojadas, mantendo o coeficiente de permeabilidade reduzido com pouca variação. Já os sedimentos com tamanhos superiores a 1,18 mm diminuem em até 57% a taxa de infiltração em simulações de chuva com duas horas de duração (NICHOLS *et al.*, 2015).

Em precipitações com duração de maior tempo e menor intensidade, observou-se maior ocorrência de colmatação. Acredita-se que o menor volume de água e velocidades de fluxo reduzido permite que as partículas sólidas se depositem nos espaços vazios com maior facilidade do que em fluxos intensos (NICHOLS *et al.*, 2015).

Keyhanian *et al.* (2012) observaram que ao empregar o PCP próximo de locais com vegetação, o mesmo apresentou maior colmatação, tendo o material responsável pela obstrução com granulometria maior que 3,8 mm.

Já Welker *et al.* (2013) encontraram partículas finas na colmatação do concreto permeável provenientes da própria degradação do pavimento ao analisar uma amostra retirada de um estacionamento de veículos leves.

Diversos estudos analisam a influência do tipo e tamanho das partículas na colmatação do concreto permeável. Guthrie *et al.* (2010) observaram que a areia grossa não influencia de maneira significativa na permeabilidade, uma vez que a mesma é impedida de infiltrar no interior de sua estrutura devido ao tamanho dos poros da superfície e pode ser facilmente retirada com varredura.

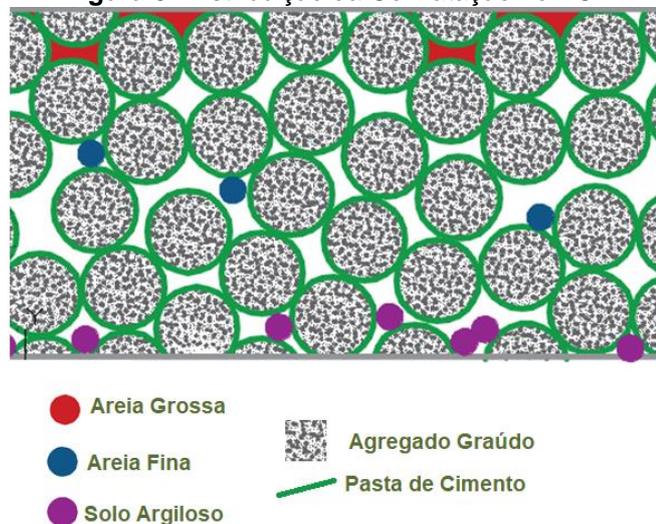
Schaefer *et al.* (2011) observaram que a argila misturada a areia fina causaram uma redução de 93% a 96% na permeabilidade ao longo de 20 ciclos de ensaio, enquanto a argila fina pura e os grãos finos de areia quando ensaiados separadamente não interfeririam em grande escala. Esse fato ocorreu, pois a combinação de diferentes diâmetros de materiais e a coesão natural da argila

causam o entupimento com poucos números de ciclos da água devido ao fácil alojamento na estrutura.

Coughlin *et al.* (2012) observaram que a argila ocasionou cerca de dez vezes mais colmatação quando comparada com a areia pois a origem do fragmento aumentou a coesão e aderência ao concreto permeável.

Kayhanian *et al.* (2012) verificaram que a obstrução dos poros com partículas maiores que 3,8 mm ocorre principalmente na parte superficial do concreto permeável (até 2,50 cm de profundidade) em pavimentos localizados próximos da vegetação. Já a parte média (até 10 cm de profundidade) do PCP apresenta colmatação criada por partículas menores, geralmente encontradas nas áreas urbanas. Na Figura 8 pode-se observar a distribuição esquemática das partículas na colmatação no PCP.

**Figura 8:** Distribuição da Colmatação no PCP



Outros estudos realizados por Chopra *et al.* (2010) e Mata e Leming (2012) encontraram sedimentos em toda camada de PCP, atingindo o solo de base em amostras que foram previamente colmatadas com sedimentos de degradação do próprio concreto permeável.

Sedimentos de origem de silte tendem a criar uma camada na ligação entre o PCP e a base. Mantas geotêxteis podem ser empregadas para evitar a transferência dos finos, funcionando como filtro, e apresentando melhora na qualidade da água. Porém com sua obstrução a taxa de infiltração do PCP pode ser comprometida (KAYHANIAN *et al.*, 2012).

Tais resultados demonstram que o alojamento das partículas de colmatação é influenciado pela relação de tamanho das partículas dos

sedimentos infiltrados em relação ao tamanho e disposição dos poros presentes no PCP.

Outro fator que pode influenciar na colmatção é a condição climática à qual o pavimento está exposto. Yong *et al.* (2013) observaram que pavimentos permeáveis expostos a fluxos contínuos sem interrupções de secagem tiveram a metade da vida útil em comparação a pavimentos que passaram pelo período de estiagem. Para tal análise considerou-se o término da vida útil com a formação de 30 mm de lâmina de água acima da superfície do pavimento permeável.

Acredita-se que o ciclo hidrológico interrupto acelera o crescimento biológico, ocasionando no entupimento mais rápido (MACKEY E KOERNER, 1999 *apud* KIA *et al.*, 2016).

Kumar *et al.* (2016) observaram que nas faixas de tráfego de veículos a taxa de infiltração é menor quando comparados com as laterais de acostamento, ou seja, a utilização constante pelos veículos acarreta na maior colmatção.

A idade do pavimento também influencia na variabilidade de taxas de infiltração encontradas, sendo que pavimentos mais antigos tendem a apresentar a perda da permeabilidade de maneira mais rápida (TONG, 2011).

Existe uma grande variabilidade de resultados obtidos para as taxas de infiltração dos concretos permeáveis, sejam pelo tipo de material empregado em sua composição, seja pela disposição e tamanho dos poros presentes na estrutura do PCP, ou também pela característica dos sedimentos infiltrados.

Portanto, há necessidade de verificar o quanto a colmatção prejudicou o pavimento ao longo do tempo de utilização, comprovando assim se a drenabilidade do mesmo ainda está presente exercendo a função de infiltrar a água através da determinação da taxa de infiltração (CURVO, 2017).

### **3.5. Manutenção**

A manutenção do PCP consiste na remoção das partículas que causam obstrução através da lavagem com pressão, varredura, jatos de ar e vácuo e a combinação de tais procedimentos.

Lin *et al.*(2016) constatou que os pavimentos permeáveis perdem em torno de 54% da capacidade de permeabilidade ao longo do tempo e geralmente necessitam manutenção após dois anos de instalação.

A frequência necessária de manutenção após os dois primeiros anos de vida útil varia de acordo com o local de implantação, disponibilidade de partículas, clima de exposição e origem dos sedimentos podendo ser de uma a quatro vezes por ano.

De acordo com Pellizzari (2013) os índices de infiltração podem aumentar de 0,0017 cm/s para 0,0053 cm/s após a manutenção através de jatos de água com pressão, porém o aumento é mais significativo quando as amostras são lavadas em laboratório onde possuem um dos lados sem apoio. Quando realizada tal manutenção *in loco*, a mesma pode obstruir ainda mais o PCP infiltrando os sedimentos em camadas mais profundas.

Coughlin *et al.* (2012) e Haselback (2010) relataram que em concretos permeáveis colmatados com argila, na ligação entre base e PCP, a manutenção com jatos de água de pressão e lavagem com escovação não resultaram na recuperação da permeabilidade.

Schaefer *et al.* (2011) observaram que concretos que apresentavam alta porosidade (> 15%) obtiveram recuperação melhor após a manutenção em comparação a concretos que apresentavam baixa porosidade.

A porosidade, distribuição, tamanho e conectividade dos poros são decisivos para o sucesso do método de recuperação da permeabilidade dos PCP.

A eficácia da manutenção também é influenciada pela localização da colmatação. Pavimentos entupidos com partículas grossas na superfície apresentaram boa recuperação após passarem por varredura à vácuo e lavagem sob pressão (até 30% da permeabilidade inicial). Porém a colmatação localizada na base do concreto apresenta recuperação de menos de 10% quando submetidos aos mesmos métodos (KIA *et al.* 2016).

## 4 METODOLOGIA DA PESQUISA

Este capítulo aborda os métodos e materiais empregados para o desenvolvimento desta pesquisa de caráter experimental realizada em laboratório.

A pesquisa foi realizada em duas etapas, detalhadas a seguir:

### *Etapa 1) Estudo da Composição do Concreto Permeável com RCD*

Numa primeira etapa foi avaliado o tipo e definido o percentual ideal de substituição do agregado natural (AN) pelo agregado reciclado (ARC) na composição do concreto permeável de maneira a não interferir significativamente nas características mecânicas e na permeabilidade desse tipo de concreto.

Inicialmente foram determinadas as características dos agregados reciclados e naturais utilizados, na sequência, elaborou-se três dosagens de concreto permeável: uma com agregado natural e baseada na dosagem desenvolvida por Batezine (2013) (dosagem referência) e outras duas onde foi variada a porcentagem de substituição do agregado natural pelo ARC. As porcentagens de substituição adotadas foram de 15 e 20%, baseados em resultados obtidos por Zaetang *et al.* (2016) e a escolha de 15% para elaboração das placas foi feita baseada nas características mecânicas e na permeabilidade.

### *Etapa 2) Estudo da Permeabilidade e da Colmatação das placas de Concreto Permeável*

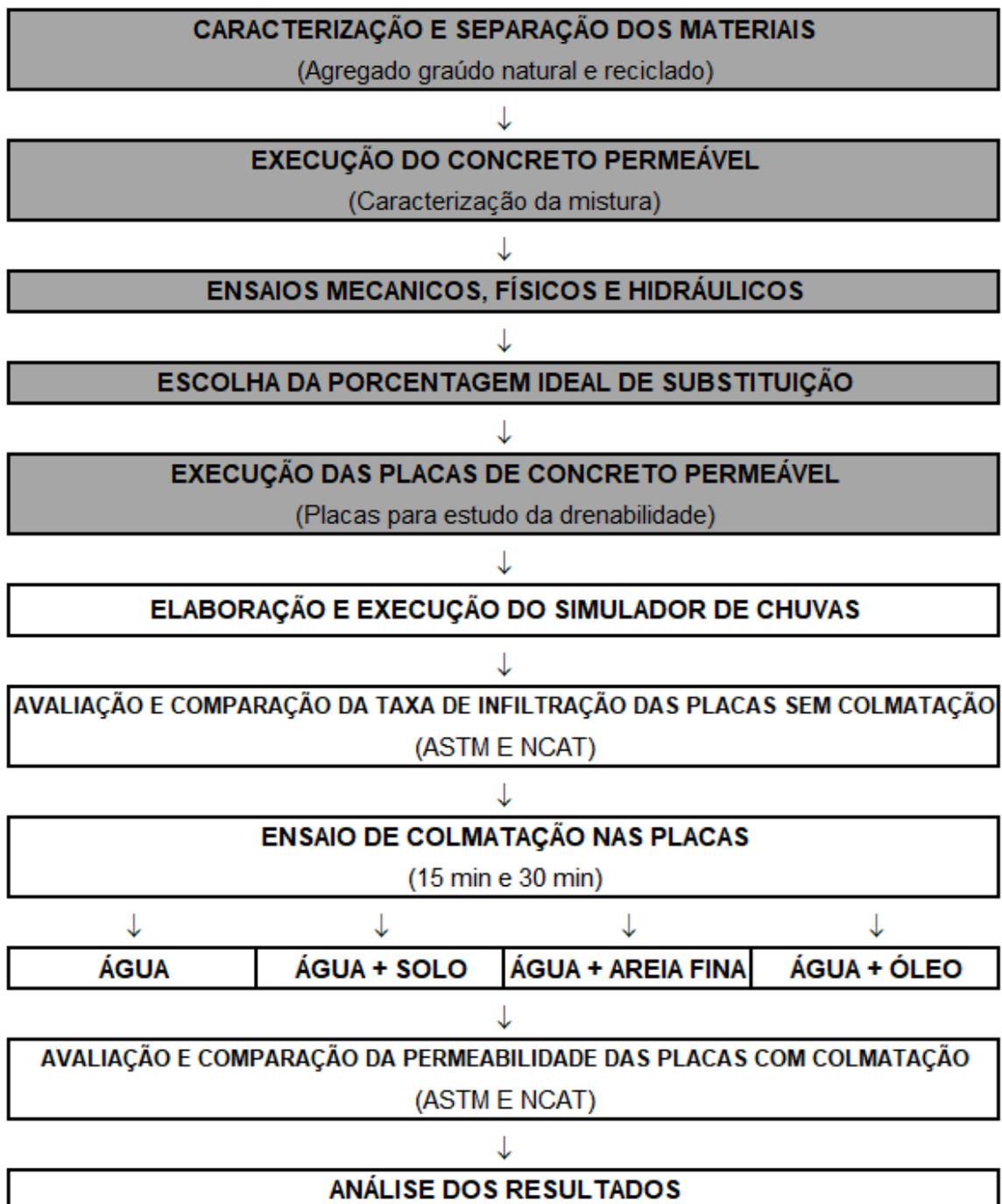
Após a escolha da melhor porcentagem de substituição do AN pelo ARC, deu-se início na Etapa 2 com a confecção de placas de piso para o estudo em laboratório sobre o processo de permeabilidade e colmatação do concreto permeável.

Para simular a colmatação em laboratório, construiu-se um simulador de chuva no qual foram inseridos materiais variados que normalmente estão presentes no meio ambiente, como diferentes tipos de solo e óleo proveniente do motor de carros. Estes materiais foram escolhidos, pois são normalmente encontrados em áreas de estacionamento ao ar livre e praças próximas de vegetação. Neste processo também foi avaliado a influência do tempo de duração da chuva entre 15 e 30 minutos.

A permeabilidade da placa foi determinada antes e após cada procedimento de colmatação, avaliando-se o desempenho do concreto permeável com agregado reciclado e com agregado natural, comparando dois métodos distintos: o ASTM C1701 e o NCAT.

Na Figura 9 pode-se observar um fluxograma do desenvolvimento do trabalho, onde em cinza está destacada a Etapa 1, e em branco na Etapa 2.

**Figura 9:** Fluxograma de delineamento da pesquisa



## 4.1 Características dos Materiais Empregados

A taxa ideal de substituição do agregado reciclado no concreto varia de acordo com o tipo de agregado reciclado e a dosagem empregada. Para obter o percentual ótimo com base nos materiais utilizados nesta pesquisa e aprofundar-se no estudo da colmatção, foi realizado um estudo detalhado sobre os materiais naturais e reciclados, o processo de mistura e moldagem dos corpos de prova e determinação das características do concreto.

### *Agregados Graúdos*

Foram empregados nesta pesquisa agregados graúdos naturais e reciclados, sendo os agregados naturais (AN) de origem basáltica e os agregados reciclados proveniente da britagem de resíduos de construção e demolição classe A e fornecidos por uma usina de reciclagem localizada no Município de Campinas (SP).

Todos agregados foram secos e posteriormente peneirados para obtenção de uma faixa granulométrica com diâmetro entre 4,8 mm e 19,0 mm. Este processo foi adotado para eliminar ao máximo a quantidade de finos presentes no agregado, prevenindo assim a diminuição da permeabilidade do concreto.

As características dos agregados são apresentadas na Tabela 5 bem como as normas dos ensaios empregados.

**Tabela 5:** Caracterização do agregado natural e reciclado.

<b>Características</b>	<b>Procedimento (Norma)</b>	<b>Unidade</b>	<b>AN</b>	<b>ARC</b>
Diâmetro Máximo	ABNT NM 248 (2003)	mm	12,50	9,50
Módulo de Finura	ABNT NM 248 (2003)	-	6,10	5,87
Classificação	ABNT NM 248 (2003)	-		Brita 0
Massa Específica Seca	ABNT NM 53 (2009)	g/cm <sup>3</sup>	3,06	2,73
Massa Específica Saturado Superfície Seca	ABNT NM 53 (2009)	g/cm <sup>3</sup>	2,98	2,47
Massa Específica Aparente	ABNT NM 53 (2009)	g/cm <sup>3</sup>	2,95	2,32
Absorção de Água	ABNT NM 53 (2009)	%	1,18	6,57
Massa unitária (compactada)	ABNT NM 45 (2006)	g/cm <sup>3</sup>	1,70	1,31
Massa unitária (solta)	ABNT NM 45 (2006)	g/cm <sup>3</sup>	1,53	1,17
Volume de Vazios	ABNT NM 45 (2006)	%	50,00	57,14

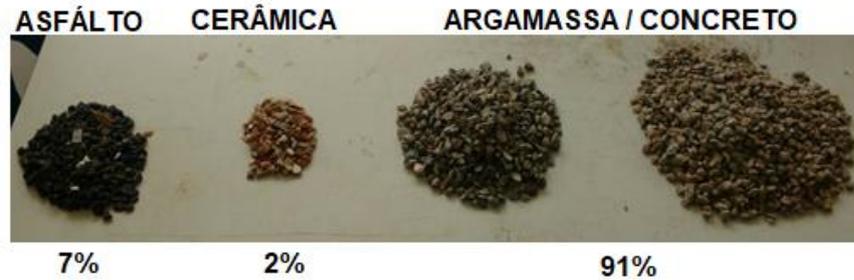
Pode-se observar que o agregado natural apresenta-se com as características próximas do agregado reciclado, com uma menor capacidade de absorção de água.

Visualmente o ARC, mesmo após a lavagem, apresenta mais poros que o agregado natural devido a presença de argamassa aderida às faces dos agregados, este material, quando do processo de moldagem pode se desagregar, aumentando o teor de finos da mistura o que, geralmente, resulta em uma redução do coeficiente de permeabilidade e no aumento da resistência à compressão.

Quando do processo de moldagem ocorre, essas partículas de argamassa se desagregam aumentando o teor de finos da mistura o que, geralmente, resulta em uma redução do coeficiente de permeabilidade e no aumento da resistência à compressão.

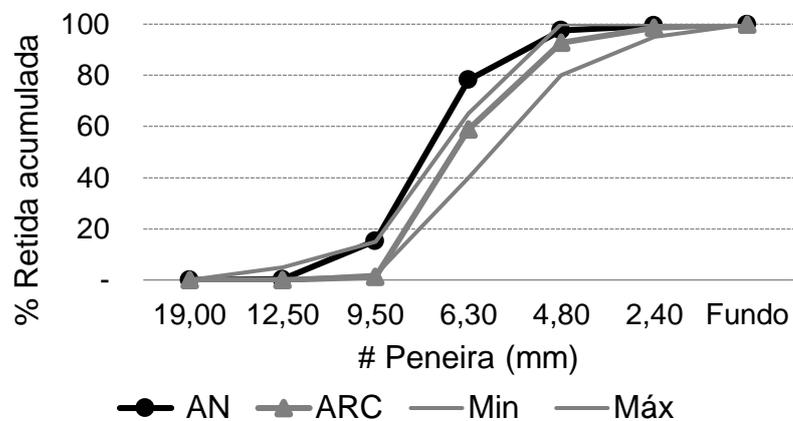
Também foi realizado o ensaio de separação visual, conforme a NBR 15.116 (2004), demonstrado na Figura 10, onde a amostra de agregado reciclado foi classificada como agregado reciclado de concreto, ou seja, apresenta mais de 90% de sua composição resíduos com base de cimento Portland e rochas.

**Figura 10:** Separação visual do ARC



Na Figura 11, pode-se observar as distribuições granulométricas dos agregados natural e reciclado, após peneiramento. Ambos foram classificados, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009) como Brita 0.

**Figura 11:** Curva Granulométrica dos Agregados Graúdos



### *Cimento*

O concreto permeável está sujeito à rápida perda de água devido a exposição dos poros ao ambiente, o que pode influenciar nas características do concreto. O cimento empregado nesta pesquisa foi o CP V ARI.

O cimento CPV ARI foi fornecido pela Holcim Brasil. Sua escolha se justifica por se tratar de um ligante hidráulico mais fino e puro, o que auxilia no ganho da resistência em um curto espaço de tempo (HOLTZ, 2011).

A Tabela 6 apresenta as principais características do cimento empregado.

Tabela 6. Características do cimento CP V ARI

Características	Procedimento (Norma)	Unidade	Valor
			29,10 (1 dia)
Resistência à Compressão	ABNT NBR 7215 (1997)	MPa	42,33 (3 dias)
			47,63 (7 dias)
			55,70 (28 dias)
Tempo de Pega	ABNT NM 65 (2003)	Min	(IP) 126 (FP) 175
Resíduo Solúvel	ABNT NM 15 (2004)	%	0,94
Perda ao Fogo 1.000° C	ABNT NM 18 (2004)	%	3,77

Fonte: Holcim (2016)

#### *Aditivos superplastificantes*

No concreto permeável é comum incorporar aditivos para aumentar o tempo de pega ou melhorar a trabalhabilidade sem comprometer a resistência, ou alterar a relação água / cimento. Com o intuito de fixar a relação água / cimento em 0,30, garantir a trabalhabilidade da mistura, e promover o máximo da resistência à compressão, foi empregada a adição do aditivo superplastificante ADVA CAST 325 na dosagem de 0,45% em relação à massa de cimento.

O aditivo escolhido classifica-se como superplastificante, com base de policarboxilatos, atende a NBR 11768 (2011) (Tipo SP II N/A/R) e confere à mistura, no estado fresco, maior facilidade na compactação evitando segregação dos materiais e no estado endurecido aumenta a resistência mecânica nas idades iniciais e finais.

#### *Água*

A água utilizada na mistura é proveniente do sistema de abastecimento de Campinas (SANASA) e encontrava-se em temperatura ambiente nos momentos de mistura e também de acordo com a norma NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

## 4.2 Estudo da Dosagem do Concreto Permeável

Optou-se por adotar como dosagem de referência, a mesma utilizada por Batezini (2013) e, nas outras duas dosagens com RCD variou-se a porcentagem de substituição do agregado natural pelo resíduo de construção e demolição. A Tabela 7 apresenta os consumos dos materiais do traço referência e indica a nomenclatura adotada para o traço referência e para os traços com 15% e 20% de substituição do AN pelo reciclado ARC.

**Tabela 7:** Dosagens do Concreto Permeável

Descrição	Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado Graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	a/c	% Aditivo	% Substituição AN por ARC
CREF					0
C 15	374	1.660	0,30	0,45	15
C 20					20

Com essas três misturas foram realizados os ensaios de caracterização física, mecânica e hidráulica, para escolha da melhor porcentagem de substituição e continuidade da pesquisa, com aprofundamento no estudo da colmatação.

### 4.2.1 Processo de Mistura

Após a preparação, separação e pesagem dos materiais nas frações necessárias, iniciou-se o processo de elaboração das misturas de PCP. Como o preparo do concreto permeável não é normatizado padronizou-se um procedimento, baseado em estudos anteriores como o de Lamb (2014) e Batezini (2013) o qual foi adotado para todas as misturas. A sequência descrita a seguir foi definida para o processo de mistura:

- 1) Pré molhagem do ARC por 30 minutos;
- 2) Imprimição da betoneira com água;
- 3) Adição de todo agregado graúdo (RCD e natural);
- 4) Mistura por 1 minuto para molhagem do agregado;
- 5) Adição de 50% do cimento e 30 % da água;
- 6) Mistura por 1:30 minutos;
- 7) Análise táctil da coesão do concreto;

- 8) Adição do restante do cimento e do restante da água;
- 9) Mistura por 1:30 minuto;
- 10) Análise táctil da coesão do concreto;
- 11) Adição do aditivo superplastificante durante o funcionamento da betoneira com auxílio de uma seringa.
- 12) Mistura por 2 minutos;
- 13) Retirada da betoneira para moldagem dos corpos-de-prova.

Quando foram empregados os agregados reciclados nas misturas, o mesmo foi previamente submetido à molhagem com 60% de água em relação a sua capacidade de absorção, obtido através da NBR NM 53 (ABNT, 2009).

A água foi inserida no agregado cerca de uma hora antes de seu emprego na mistura. Este procedimento foi adotado para evitar que o ARC tornasse a mistura mais seca, dificultando assim a moldagem dos elementos.

A análise táctil da coesão do concreto consiste em apertar uma porção da mistura com a mão e avaliar a formação de aglomeração dos componentes, verificando se existe segregação na mistura. Na Figura 12 pode-se observar o resultado do teste.

**Figura 12:** Análise táctil do Concreto Permeável



#### 4.2.2 Processo de Moldagem

Os corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm foram adensados com 25 golpes de bastão metálico em três camadas de concreto, não foi empregado adensamento com mesa vibratória após a compactação com bastão, evitando assim a segregação, conforme Vidal (2014).

Em seguida eles foram pesados, com a finalidade de padronizar o peso específico das amostras, evitando assim grandes variações provenientes da força de adensamento manual.

Após a pesagem, foram numerados e tiveram seu topo coberto por plástico para inserção na câmara úmida.

Os mesmos foram mantidos nas fôrmas durante sete dias, pois diferentemente do concreto convencional, o concreto permeável demora mais para apresentar coesão aparente suficiente para ser desmoldado.

Após a desforma, os corpos de prova foram colocados na posição horizontal e cobertos por plástico, retornando à câmara úmida até a data do ensaio, quando foram colocados para secar ao ar livre por cerca de três horas antes do ensaio.

Foram produzidas um total de dezoito placas de concreto permeável, sendo nove fabricadas com o concreto referência e outras nove com o concreto que possuía 15% de substituição do AN pelo ARC.

Todas as placas apresentavam dimensões de 50 cm x 50 cm x 5 cm e foram moldadas em fôrmas de compensado fabricadas para a pesquisa.

O adensamento ocorreu através de 40 golpes de bastão metálico em três camadas de concreto. Após o preenchimento da fôrma, utilizou-se um tubo metálico para efetuar o nivelamento da superfície da mesma. Na Figura 13 pode-se observar o processo de fabricação das mesmas.

**Figura 13: Moldagem das Placas**



Após moldadas, as placas foram inseridas na câmara úmida e permaneceram em nos moldes até completarem a idade de 28 dias para serem submetidas aos ensaios de estudo da colmatação.

### **4.3 Ensaios de Caracterização do Concreto Permeável**

Foram moldados corpos de prova para as três composições ora denominadas de CREF, C15 e C20 que representam respectivamente, 0%, 15% e 20% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto. Os ensaios realizados, as normas técnicas de referência, a quantidade de corpos de prova e as idades de ensaio são apresentados na Tabela 8.

Os resultados desta etapa foram analisados calculando-se a média e desvio padrão e efetuando a comparação com a literatura estudada.

**Tabela 8:** Ensaios de Caracterização do Concreto Permeável

Tipo	Ensaio	Norma	Idade (Quantidade / Tamanho)	
			7 Dias	28 Dias
Mecânicos	Resistência à Compressão	NBR 5739 (ABNT, 2007)	6 (Ø10x20)	6 (Ø10x20)
	Resistência à Tração (Compressão Diametral)	NBR 7222 (ABNT, 2011)	6 (Ø10X20)	6 (Ø10X20)
	Resistência à Tração na Flexão (*)	NBR 12142 (ABNT, 2010)	-	3 (10x10x40)
Hidráulicos		NBR 14545 (ABNT, 2000) (Variável)	-	6 (Ø10X20)
	Determinação do Coeficiente de Permeabilidade	NBR 13292 (ABNT, 2016) (Constante)	-	6 (Ø10X20)
		ASTM C1701 (ASTM, 2009)	-	2 (50X50X5)
		NCAT	-	2 (50X50X5)
Caracterização Física	Capacidade de Absorção de Água			
	Índice de Vazios	NBR 9778 (ABNT, 2009)	-	6 (Ø10X20)
	Massa Específica			

Para os ensaios de tração na flexão (\*) foram adotados corpos-de-prova com dimensões de 10x10x40 cm ao invés de 15x15x50 cm como demanda a norma NBR 7583 (1986) com a finalidade de economizar matéria prima e facilitar a desmoldagem. Tal alteração não modifica estatisticamente a tensão de ruptura (CERVO, 2004).

Os ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade de carga constante NBR 13292 (ABNT, 2016) e de carga variável NBR 14545 (ABNT, 2000) foram realizados com os mesmos corpos de prova, assim como os ensaios de caracterização física.

Os ensaios para obtenção da capacidade de infiltração de campo (ASTM C1701 e NCAT) foram adotados na segunda etapa da pesquisa, para o aprofundamento do estudo sobre colmatção. Na escolha da porcentagem ideal

de substituição do AN pelo ARC, a permeabilidade foi analisada através do ensaio com permeâmetro de carga constante.

#### 4.3.1 Propriedades físicas do concreto

Para a caracterização física do concreto, foram realizados ensaios para a determinação de massa específica e índice de vazios conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009).

A determinação da massa específica aparente no estado fresco, foi realizada após a moldagem dos corpos-de-prova com a pesagem dos mesmos em balança.

Para a obtenção do índice de vazios foi necessário colocar os corpos de prova em estufa por 24 horas, obtendo-se a massa seca da amostra. Após a pesagem, os mesmos corpos de prova foram submetidos à imersão em água na temperatura ambiente, onde também foram mantidos por 24 horas. Após a imersão, foi realizada a pesagem em balança hidrostática.

Para a obtenção do peso saturado com superfície seca, os corpos de prova foram retirados da balança hidrostática, e foram secos superficialmente, para então serem pesados com balança convencional com capacidade de tolerância de  $8000 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ .

O índice de vazios do concreto é uma característica importante, pois se relaciona com todas as propriedades do concreto permeável, dentre elas, a capacidade de permeabilidade dos mesmos. Quanto maior o índice de vazios, menor a resistência à compressão e maior a condutividade hidráulica. Para obtenção do índice de Vazios, empregou-se a Equação 3 (BATEZINI, 2013).:

$$V_r = \left( 1 - \frac{W_2 - W_1}{\rho_w Vol} \right) \quad \text{Equação 3}$$

Onde,

$V_r$ : Índice de Vazios;

$W_1$ : Peso Submerso [Kg];

$W_2$ : Peso Seco [Kg];

$Vol$ : Volume da Amostra [ $\text{m}^3$ ]

$\rho_w$ : Massa Específica da Água [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

### 4.3.2 Resistências mecânicas

Os ensaios mecânicos especificados na Tabela 8 foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Foi utilizada uma prensa universal, com capacidade de carga de 200 tf para os ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral, a velocidade de carregamento é estabelecida de acordo com o ensaio realizado, sendo  $0,45 \pm 0,02$  MPa/s para resistência à compressão e  $0,05 \pm 0,02$  MPa/s para resistência à tração por compressão diametral, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007) e NBR 7222 (ABNT, 2011) respectivamente.

Para a determinação da resistência a tração na flexão foi utilizada prensa universal EMIC modelo DL30000 com célula de carga de 30 tf, conforme a NBR 12.142 (ABNT, 2010).

#### *Ensaio de Resistência à compressão*

Foi realizado o ensaio de compressão axial de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007). A Figura 14 ilustra o ensaio realizado nos laboratórios da PUC-Campinas.

**Figura 14:** Ensaio de Resistência à Compressão Axial



### *Resistência à Tração por Compressão Diametral*

Foi realizado o ensaio de compressão diametral para determinação da resistência à tração, de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011). Para tal, utilizou-se um suporte de madeira garapeira que auxiliou no posicionamento do corpo de prova na prensa, garantindo a distribuição linear de carga ao longo do corpo de prova.

A tensão de ruptura à tração foi calculada através da Equação 4 (ABNT, 2011):

$$f_{ct,sp} = \frac{2.F}{\pi.d.l} \quad \text{Equação 4}$$

Onde

$f_{ct,sp}$ : Resistência à tração por compressão diâmetral [MPa]

F: Força máxima para a ruptura [N]

d: Diâmetro do corpo de prova [mm]

l: Comprimento do corpo de prova [mm]

Na Figura 15 pode-se observar o (a) o ensaio sendo realizado e (b) após a ruptura do corpo de prova.

**Figura 15:** Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral



### *Resistência à tração na flexão*

A resistência à tração na flexão foi determinada com corpos de prova de 10x10x40 cm de acordo com a NBR 12.142 (ABNT, 2010). Para tal, utilizaram-se dois suportes metálicos que auxiliaram no posicionamento do corpo de prova no equipamento de ensaio, garantindo o posicionamento de aplicação das cargas.

A resistência à tração na flexão foi calculada através da Equação 5 (ABNT, 2010):

$$f_{ct, f} = \frac{P.l}{b.d^2} \quad \text{Equação 5}$$

Onde

F<sub>ct,f</sub>: Resistência à flexão na tração [MPa]

P: É a força máxima de ruptura [N]

l: Distância entre apoios [mm]

b: Largura do corpo de prova [mm]

d: Diâmetro do corpo de prova [mm]

#### 4.3.3 Propriedades hidráulicas

A caracterização hidráulica do concreto permeável no estado endurecido foi baseada em dois parâmetros: o coeficiente de permeabilidade do concreto e a taxa de infiltração das placas.

O coeficiente de permeabilidade do concreto foi obtido através dos ensaios com Carga Constante e com Carga Variável e tem como objetivo analisar o material produzido, fazendo referência à matéria prima empregada e comparar com a bibliografia existente.

Já a obtenção da taxa de infiltração, tem como objetivo avaliar o PCP através do ensaio proposto pela norma Americana ASTM C1701 (ASTM, 2009) e o procedimento desenvolvido pela NCAT, com o objetivo de analisar a drenabilidade do material simulando o emprego real da placa em uma calçada existente.

##### *Método da Carga Constante*

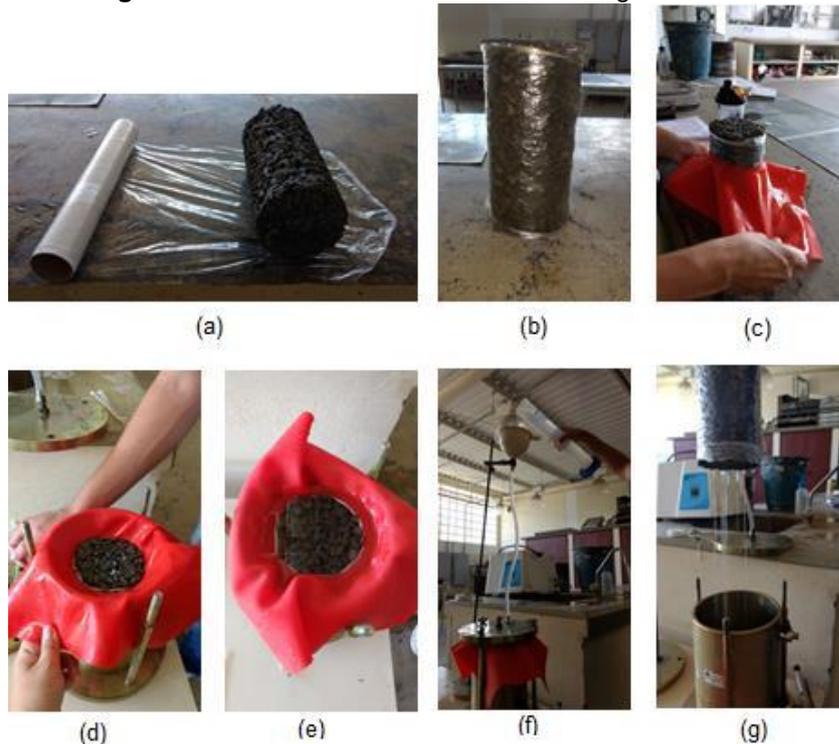
Este ensaio é comumente empregado e apesar da norma em que se baseia, a NBR 13.292 (ABNT, 2016) ter sido desenvolvida para determinação do coeficiente de permeabilidade em amostras de solo, pode ser adaptado para obtenção do coeficiente de permeabilidade do concreto permeável.

O ensaio utiliza uma base, que pode ser, metálica fechada que possibilita a inserção do corpo de prova em seu interior e direciona a água inserida a passar através do elemento.

No início do ensaio é necessário efetuar a saturação do aparelho e do corpo de prova para garantir que não existam vazios, ocasionando na diminuição do fluxo de água.

Também é necessário efetuar uma vedação das laterais do corpo de prova e do canal por onde o fluxo é direcionado, pois também irá direcionar o fluxo de água ao longo do comprimento do corpo de prova. Abaixo pode-se observar na Figuras 16 a preparação do corpo de prova e o procedimento de ensaio.

**Figura 16:** Ensaio de Permeabilidade – Carga Constante



- (a), (b) Corpos de prova vedados lateralmente com filme PVC
- (c) Vedação do corpo de prova na face superior com manta de silicone
- (d) Inserção do corpo de prova na base previamente saturada.
- (e) Teste de vedação
- (f) Permeâmetro fechado e abastecido durante o ensaio
- (g) Retirada do corpo de prova

Os resultados são obtidos através dos dados coletados de quantidade de água infiltrada e tempo necessário para a infiltração. O ensaio é realizado com a reposição da água no reservatório abastecedor, o que garante uma carga hidráulica constante e seu resultado é obtido através da Equação 1 (Lei de Darcy).

$$p = \frac{V.l}{h.A.t}$$

Equação 1

Onde:

p: Coeficiente de Permeabilidade [cm/s]

V: Volume de água coletada [cm<sup>3</sup>]

l: Comprimento da Amostra [cm]

h: Carga hidráulica [cm]

A: Área da seção transversal da amostra [cm<sup>2</sup>]

t: Tempo dispenso na infiltração [s]

#### *Método com carga variável*

Este ensaio é uma variação do ensaio de carga constante, baseado na norma NBR 14545 (ABNT, 2000), utilizada para solos, que emprega um equipamento construído para a pesquisa com tubos e conexões de hidráulica.

Durante a execução do ensaio, a modificação é a influência da carga hidráulica no tempo de infiltração, uma vez que o reservatório não é abastecido durante a realização do ensaio, mede-se a diferença de nível de água e tempo para infiltração do sistema. Na Figura 17 é possível observar o equipamento montado.

**Figura 17:** Ensaio de Permeabilidade – Carga Variável



O coeficiente de permeabilidade é obtido através da leitura da altura inicial e final do reservatório e do tempo utilizado para a infiltração. Para o cálculo do mesmo, utiliza-se a equação 2.

$$p = \frac{a.L}{A.t} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

p: Coeficiente de Permeabilidade [cm/s]

a: Seção transversal do tubo de alimentação [cm<sup>2</sup>]

L: Comprimento da Amostra [cm]

A: Área da seção transversal da amostra [cm<sup>2</sup>]

t: Tempo dispenso na infiltração [s]

h1: Nível inicial da água [cm]

h2: Nível final da água [cm]

### *Método ASTM C 1701*

O ensaio foi desenvolvido para obtenção da taxa de infiltração de pavimentos já instalados, porém, neste trabalho foi utilizado na simulação do pavimento, ou seja, foi verificada a possibilidade de adaptação para uso em laboratório. A Figura 18 apresenta o ensaio realizado.

**Figura 18:** Ensaio de Drenabilidade – ASTM C1701 (2009)



### *Método NCAT*

O método NCAT consiste na medição do tempo e na diferença de altura da carga hidráulica dispensado para a infiltração de água durante o ensaio.

A Equação 06 apresenta o procedimento de cálculo da taxa de infiltração, com algumas considerações diferentes do processo ASTM C1701 (ASTM, 2009).

$$k = \frac{a.L}{A.t} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad \text{Equação 06}$$

Onde:

k: Taxa de Infiltração [cm/s]

a: Área da seção transversal do tubo superior [cm<sup>2</sup>]

L: Espessura da placa [cm]

A: Área da seção transversal inferior (em contato com a placa) [cm<sup>2</sup>]

t: Tempo dispenso na infiltração [s]

h1: Nível inicial da água [cm]

h2: Nível final da água [cm]

A preparação do ensaio segue a norma ASTM C1701 (ASTM, 2009) com a necessidade de vedação eficiente entre o permeâmetro e a placa de concreto, porém o equipamento utilizado é um pouco mais sofisticado, possuindo até quatro diâmetros acoplados. Nessa pesquisa, devido ao pavimento apresentar alta drenabilidade, optou-se pela utilização de apenas dois diâmetros. Na Figura 19, pode-se observar o ensaio realizado.

**Figura 19.** Ensaio de Drenabilidade – NCAT



#### 4.4 Avaliação da Drenabilidade de Placas – Etapa 2

A Etapa 2 dessa pesquisa consistiu na avaliação da drenabilidade das placas de piso de concreto permeável colmatadas.

Para tal, foram produzidas 18 placas de concreto permeável com 50 cm x 50 cm x 5 cm, sendo nove para cada uma das misturas (CREF e C15), que foram submetidas às simulações de chuvas através do dispositivo desenvolvido com base em Lamb (2014), que simula a precipitação com controle de vazão e permite observar o fluxo de água através do concreto. Na Figura 20 pode-se observar o equipamento projetado e construído.

**Figura 20:** Croqui e Fotografia do Simulador de Chuvas



Os detalhes de construção e funcionamento dos dispositivos criados para esta pesquisa foram detalhados no Anexo A.

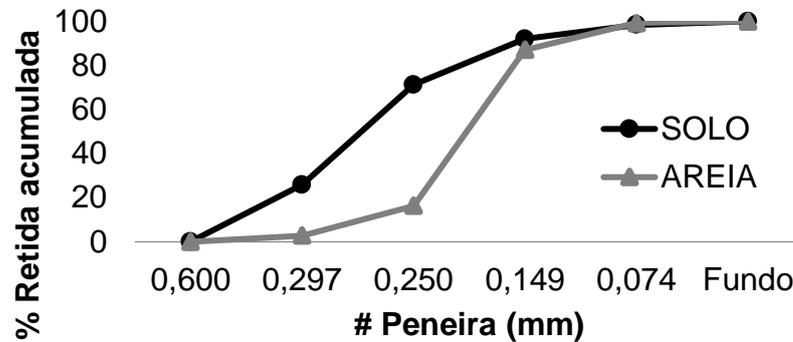
Na simulação de chuva foram adicionados diferentes tipos de sedimentos, com a finalidade de verificar a influência da origem dos mesmos na colmatação do concreto permeável através da variação da taxa de infiltração.

Os materiais empregados no estudo da colmatação foram preparados previamente para garantir a homogeneidade entre si. Os materiais secos, como a areia e o solo passaram por secagem e peneiramento em sua preparação. Já o óleo foi obtido através de doação e é proveniente da troca de óleo de motor.

A areia e o solo empregados no estudo da colmatação foram submetidos à secagem e peneiramento com peneira de 0,60 mm, garantindo

assim a padronização das partículas e também evitando possíveis falhas na bomba do simulador de chuva. A distribuição granulométrica da areia e do solo pode ser observadas na Figura 21.

**Figura 21:** Curva Granulométrica dos Sedimentos de Colmatação



O solo foi obtido através da combinação de areia e argila, na ordem de 10 para 1 partes respectivamente, após a mistura para homogeneização. O mesmo foi caracterizado por Arruda (2016) e suas características podem ser observadas na Tabela 9.

**Tabela 9:** Caracterização dos sedimentos empregados na colmatação.

Características	Procedimento (Norma)	Unidade	Solo	Areia
Massa Específica	ABNT NBR NM 52 (2003)	g/cm <sup>3</sup>	2,63	2,62
Limite de Liquidez	ABNT NBR 6459 (2016)	%	32,08	-
Limite de Plasticidade	ABNT NBR 7180 (2016)	%	36,09	-
Índice de Plasticidade	ABNT NBR 7180 (2016)	%	3,36	-
Umidade ótima	ABNT NBR 7182 (1988)	%	18,25	-
Peso Específico aparente Máximo	ABNT NBR 7182 (1988)	KN/m <sup>3</sup>	1,692	-

Já o óleo empregado nesta pesquisa é conhecido popularmente por óleo “queimado” de motor, ou seja, já foi utilizado anteriormente no motor de diversos carros.

A quantidade de material empregada para o ensaio de colmatação foi de 1,50 g/l baseada no estudo realizado por Lamb (2014). Na Tabela 10 é possível observar a quantidade de sedimentos empregados no simulador de chuvas.

**Tabela 10:** Tamanho e Quantidade dos Sedimentos utilizados no estudo da Colmatação

<b>Material</b>	<b>Tamanho de Partículas</b>	<b>Quantidade</b>
Solo	< 0,60 mm	
Areia	< 0,60 mm	1,5 g/l
Óleo de Motor	-	

Os três sedimentos analisados foram colocados sob superfície superior da placa antes do início da simulação de chuva, assim garantiu-se que todos os materiais que ficavam na água após o ensaio haviam passado ao menos uma vez pelos vazios da placa de concreto permeável. Cada tipo de sedimento foi ensaiado em três placas distintas, quer sejam, para o ensaio do NCAT como para o ensaio do ASTM C1701. Os detalhes do início do ensaio podem ser visualizados na Figura 22.

**Figura 22:** Colocação do Sedimento no Simulador de Chuvas

Após a caracterização dos materiais empregados no estudo da colmatação, as placas de concreto foram submetidas aos ensaios de taxa de infiltração (ASTM e NCAT) e ao simulador de chuvas. A análise da influência dos sedimentos na obstrução dos poros foi realizada com o emprego dos ensaios de taxa de infiltração novamente, que foram realizados depois da passagem pelo simulador de chuvas, e tiveram seus resultados comparados com os dados iniciais. As alternativas analisadas podem ser observadas na Tabela 11.

**Tabela 11:** Combinações empregadas no Simulador de Chuvas

<b>Tipo Colmatação / Tipo Concreto</b>	<b>Solo</b>	<b>Areia</b>	<b>Óleo</b>
CREF	15 e 30 min	15 e 30 min	15 min
C15	15 e 30 min	15 e 30 min	15 min

Após a análise dos primeiros resultados, optou-se por não realizar os ensaios de colmatação com 30 minutos utilizando óleo, pois o mesmo não apresentou alteração significativa nos ensaios de permeabilidade.

O tempo de duração da simulação foi escolhido baseado na vazão possibilitada pela bomba e o conjunto de conexões. Devido ao conjunto apresentar uma vazão alta, optou-se por empregar um tempo menor de 15 e 30 minutos, simulando uma chuva torrencial. Na Figura 23 é possível observar o simulador durante seu funcionamento.

**Figura 23:** Simulador de Chuvas

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresenta-se e discutem-se os resultados obtidos nas duas etapas desta pesquisa, comparando-os com a bibliografia estudada e abordando discussões sobre as conclusões obtidas.

### 5.1. Índices Físicos do Concreto Permeável

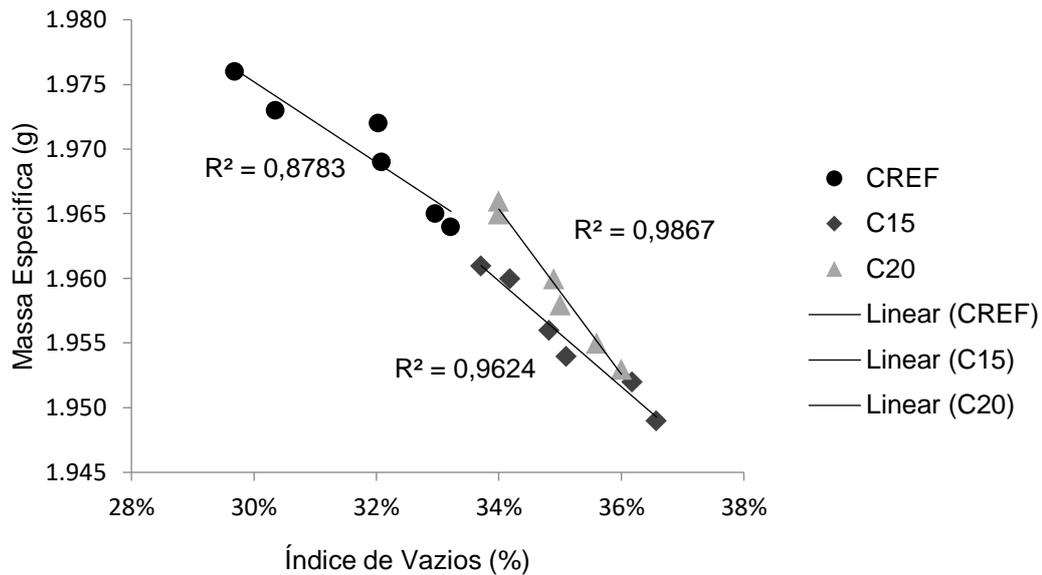
Foram realizados ensaios para determinação da massa específica aparente e índice de vazios, de acordo com a ABNT NBR 9778 (2009), os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 12.

**Tabela 12:** Resultados das Propriedades Físicas do PCP

<b>Propriedade / Tipo Concreto</b>	<b>Massa Específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>v (%)</b>
CREF	1.970	31,7
C15	1.955	35,1
C20	1.960	34,9

#### 5.1.1. Relações entre parâmetros

Na Figura 24 são apresentados os valores de índices de vazios em função da massa específica aparente seca para os resultados obtidos nesta pesquisa. Nota-se que existe uma relação entre tais parâmetros, onde a massa específica tende a aumentar inversamente proporcional ao índice de vazios.

**Figura 24:** Relação Massa Específica e Índice de Vazios

Comparou-se o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) obtido com pesquisas anteriores, tal análise pode ser observada na Tabela 13. Os resultados demonstram que os valores são satisfatórios.

**Tabela 13:** Coeficientes de Correlação Massa Específica X Índice de Vazios

Descrição	$R^2$	Autor
CREF	0,878	Pesquisa atual
C15	0,962	
C20	0,987	
Sem ARC	0,857	Batezini (2013)
Com ARC	0,917	Zaetang <i>et al.</i> (2016)

Nota-se que o emprego de agregados reciclados de concreto, torna a correlação linear mais ajustada ao modelo, ou seja, a variação de resultados é menor. Esse resultado também foi obtido por Zaetang *et al.* (2016) ao incorporar ARC em sua mistura.

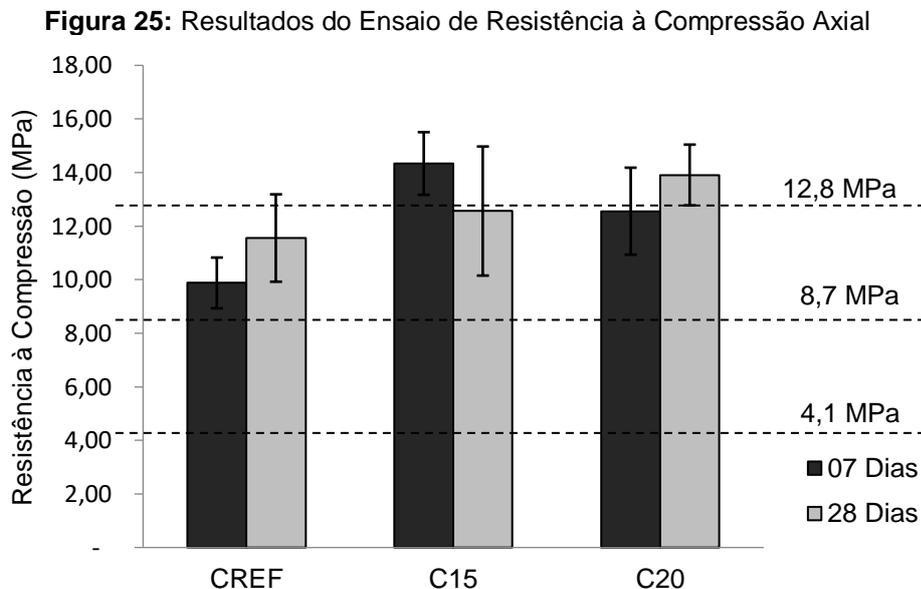
Apesar da correlação ser proporcional ao estudo bibliográfico realizado, as misturas apresentaram massa específica aparente muito próxima do limite máximo determinado por Holtz (2011) e Tennis *et al.* (2004) de  $2000 \text{ kg/m}^3$ , essa característica foi resultado de um adensamento maior no momento da moldagem, diminuindo assim o índice de vazios.

## 5.2. Resistências Mecânicas do Concreto Permeável

Para a análise das propriedades mecânicas foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração através de compressão diametral e resistência à tração na flexão. Os resultados estão apresentados abaixo.

### 5.2.1. Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial foi determinada aos 07 e 28 dias, de acordo com a norma ABNT NBR 5739 (2007), seus resultados podem ser observados no gráfico da Figura 25.



Os resultados apresentados encontram-se acima do limite mínimo estudado por Dellate *et al.* (2009) de 4,10 MPa, e mais próximos, dos valores encontrados por Batezini (2013) e Lamb (2014) de 8,68 MPa e 12,75 MPa respectivamente.

A média acima das referências bibliográficas é resultado da alta carga de compactação empregada no momento da mistura. A massa específica estudada no tópico anterior comprova tal análise.

Os valores obtidos aos 7 dias de idade apresentaram resultados que demonstram que o emprego de 15% e 20% de substituição do AN pelo ARC foi benéfico para o ganho de resistência à compressão do concreto permeável.

Aos 28 dias os dois teores de substituição, de 15% e 20%, propiciaram um ganho de resistência à compressão axial cerca de 9% e 20% maiores em relação à mistura referência, respectivamente.

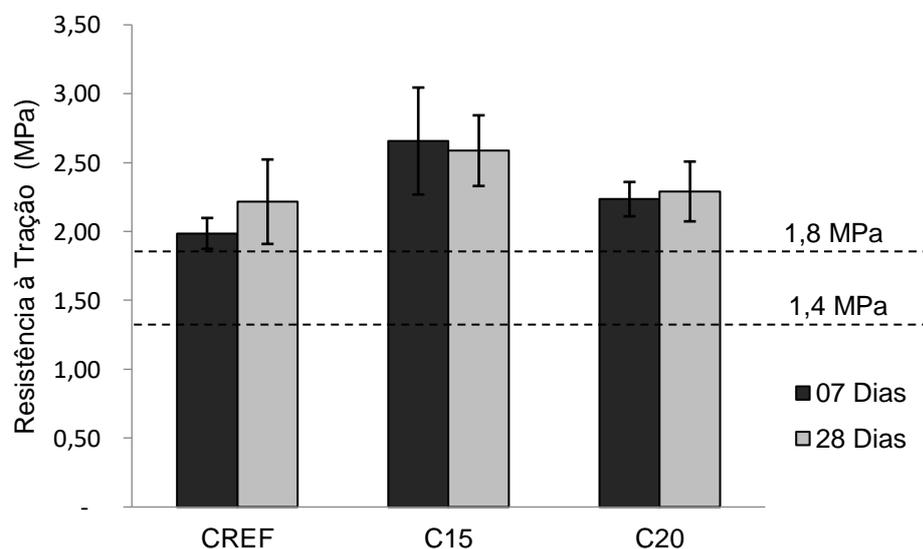
O aumento obtido nos resultados com o acréscimo do agregado reciclado se justifica pelo agregado reciclado apresentar maior porosidade e capacidade de absorção de água em relação do agregado natural, o que promove o aumento no teor de argamassa do concreto, resultando em uma maior aderência entre os elementos e, conseqüentemente aumentando a capacidade de resistência à compressão. Este fenômeno também foi notado nas pesquisas de Vidal (2014), Zaetang *et al.* (2016) e Rizvi *et al.* (2009).

Para a mistura C15 houve uma queda da resistência à compressão do concreto permeável, no ensaio com 28 dias quando comparado com o ensaio de 7 dias. Esse resultado pode ser fruto das condições laboratoriais, como a ocorrência de aspersão de água direta sobre o corpo de prova na câmara úmida durante o processo de cura. O desvio padrão obtido nestas amostras também se apresentou maior para este grupo de resultados, o que demonstra que estatisticamente, os resultados poderiam ser ainda maiores, superando os valores obtidos com 7 dias.

### 5.2.2. Resistência a Tração por compressão diametral

Os resultados obtidos para resistência à Tração, realizado através de compressão diametral podem ser observados no gráfico da Figura 26.

**Figura 26:** Resultados do Ensaio de Resistência à Tração Indireta



Todas as dosagens realizadas obtiveram resultados próximos do valor médio de 1,74 MPa obtido por Vidal (2014) ao empregar agregados reciclados nas misturas de concreto permeável, ficando também 47% acima do valor médio de 1,36 MPa encontrado por Batezini (2013) sem a incorporação do resíduo.

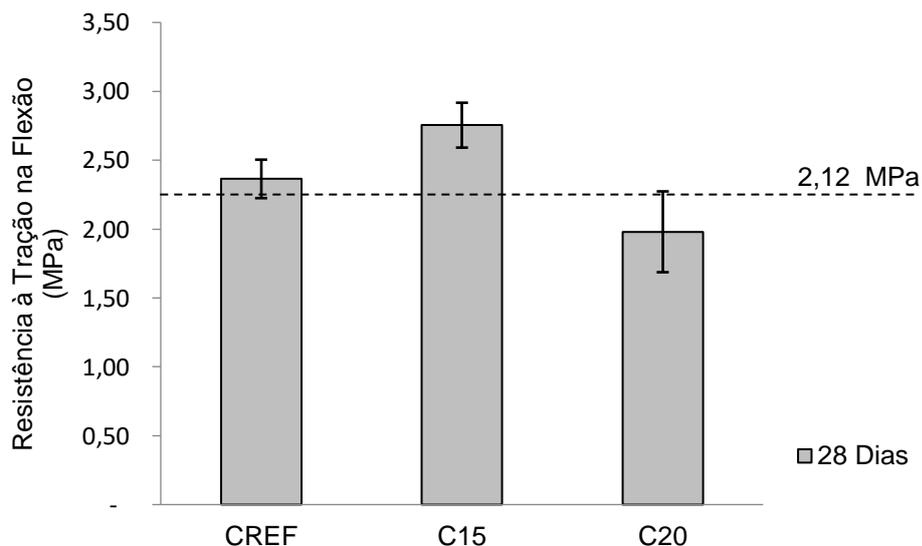
O concreto referência apresentou um aumento de resistência maior com o aumento da idade, quando comparado com os concretos produzidos com agregado reciclado. Porém tanto o C15 quanto o C20, aos 28 dias, se assemelham ou superam os resultados obtidos para o CREF.

O concreto com 15% de substituição do agregado reciclado, apresentou uma continuidade em sua resistência à tração, enquanto a mistura com 20% de ARC já demonstrou um pequeno aumento. Levando em consideração o desvio padrão das amostras, tanto o C15 quanto o C20 apresentam-se em faixas superiores quando comparados ao CREF.

### 5.2.3. Resistência a Tração na flexão

O ensaio de resistência de tração na flexão foi realizado com 28 dias de idade, na Figura 27 pode-se observar os resultados obtidos.

**Figura 27:** Resultados do Ensaio de Resistência à Tração na Flexão



Nos resultados obtidos, pode-se observar que todas as misturas obtiveram valores próximos de outras pesquisas, como de Vidal (2014), que empregou resíduos de demolição, e Batezini (2013), que utilizou apenas agregados naturais, onde os mesmos encontraram em média 2,12 MPa na resistência à tração por flexão.

Nota-se que o concreto com substituição de 15% de agregados naturais por RCD obteve resultados de resistência à tração na flexão maiores do que o CREF e o C20. O resultado de resistência a tração na flexão da mistura C20, apresentou valores 28% menores quando comparado com o C15.

Vidal (2014), ao empregar resíduos de construção e demolição em sua dosagem também obteve resultados 25% inferiores ao concreto produzido com agregado natural.

Já Zaetang *et al.* (2016) confirmam em sua pesquisa, que a influência do agregado reciclado nos ensaios de resistência à tração na flexão são mínimas, podendo variar de acordo com a origem do ARC. Eles compararam concretos produzidos com agregados reciclados mistos e produzidos com resíduos de concreto.

Considerando que os agregados reciclados empregados nesta pesquisa possuem características mais próximas dos empregados na pesquisa de Vidal (2014), pode-se concluir que a composição do ARC pode influenciar de maneira significativa na resistência à tração na flexão do concreto permeável.

#### *Relações entre parâmetros*

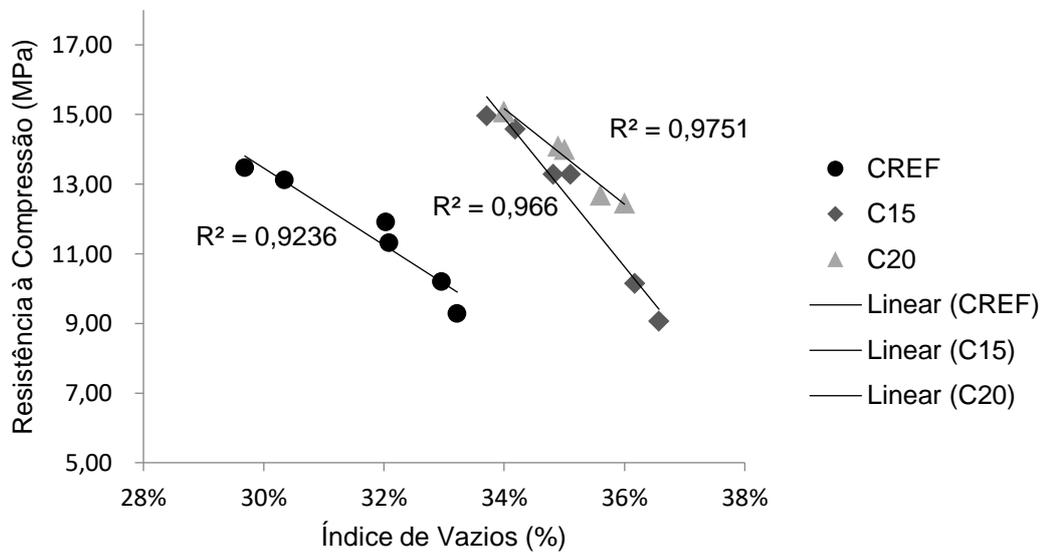
De acordo com Neville (1997), a resistência pode sofrer influência considerável devido ao tipo, formato e tamanho dos agregados empregados na mistura. No caso de agregados reciclados, o mesmo explica que estes tendem a possuir forma cúbica e textura superficial rugosa, além de apresentar maior porosidade, o que auxilia na união das partículas do concreto, tornando-o mais resistente.

Com o aumento demonstrado nos resultados de resistência mecânica, comprovam o estudo realizado por Bateznini (2013), Holtz (2011), Tennis *et al.* (2004), entre outros autores, que as propriedades mecânicas do concreto permeável estão proporcionalmente ligadas ao peso específico da amostra, sendo o tipo, força e tempo de compactação empregado durante a moldagem, grande influenciador dos resultados.

Dellate *et al.* (2009), Crouch *et al.* (2006), Batezini (2013), Kevern *et al.* (2009), Ibrahim *et al.* (2014), Wang *et al.* (2006), entre outros autores, estudaram em sua pesquisa uma relação direta entre as propriedades mecânicas e o índice

de vazios, chegando a conclusões que os mesmos, geralmente, são inversamente proporcionais. No gráfico da Figura 28 pode-se observar a relação entre a resistência à compressão axial e os índices de vazios obtidos na atual pesquisa.

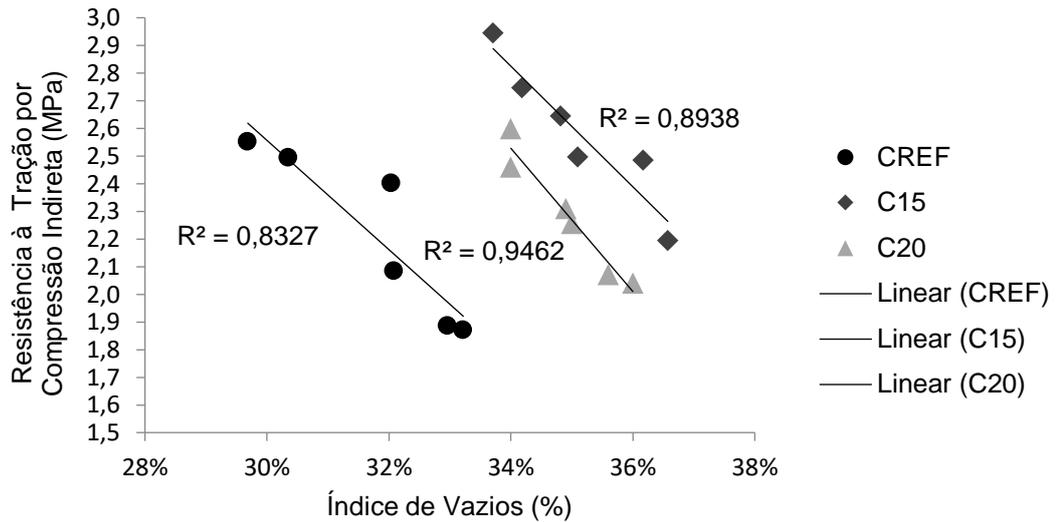
**Figura 28:** Relação entre Resistência à Compressão Axial e Índice de Vazios.



Nota-se que conforme o índice de vazios aumenta, ou seja, que existem mais poros na estrutura do concreto permeável, a resistência à compressão diminui. Apesar de sofrerem variações diferentes, todas as misturas obtiveram o mesmo comportamento.

Os resultados obtidos pela linha de tendência demonstram que a variação está de acordo com a pesquisa de outros autores, como de Crouch *et al.* (2006) e Dellate *et al.* (2009) que obtiveram em suas pesquisas  $R^2=0,99$  e  $R^2=0,80$  respectivamente.

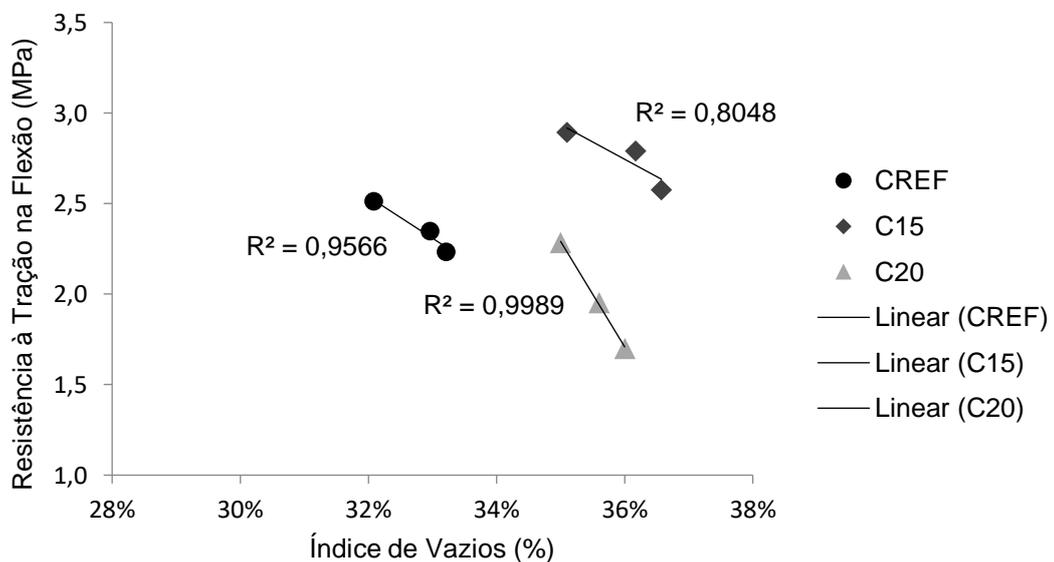
Também se relacionou o índice de vazios com a resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova, os resultados estão apresentados na Figura 29.

**Figura 29:** Relação entre Resistência à Tração Indireta e Índice de Vazios.

Observa-se que também existe uma relação entre o índice de vazios e a tração indireta, gerando tendências lineares de comportamento.

Dellate *et al.* (2009) obteve em sua pesquisa, sem agregados reciclados,  $R^2=0,83$ , o que demonstra que a mistura CREF do atual estudo também resultou no mesmo coeficiente de correlação. Já nas misturas com agregado reciclado, nota-se que a relação é alterada, tendo o C15 valores mais próximos do CREF.

Na Figura 30 pode-se observar a relação entre a resistência à tração na flexão com o índice de vazios.

**Figura 30:** Relação entre Resistência à tração na Flexão e Índice de Vazios.

Percebe-se que a relação de inversos se mantém na resistência à flexão na tração, ou seja, quanto maior o índice de vazios, menor a resistência obtida.

Neithalath *et al.* (2008) obteve resultados de índice de vazios variando de 0,13 a 0,32 com resistências à flexão de 2,5 a 4,0 MPa, Batezini (2013) obteve resultados mais baixos porém próximos do autor. Na atual pesquisa os índices de vazios encontrados estão acima da média dos outros autores com resistências próximas das encontradas por Batezini (2013).

Considerando que a composição do PCP empregada nas pesquisas acima é similar a do estudo presente, a alteração de resultados é atribuída à energia de compactação aplicada, que altera o peso específico do material.

### 5.3. Propriedades Hidráulicas do Concreto Permeável

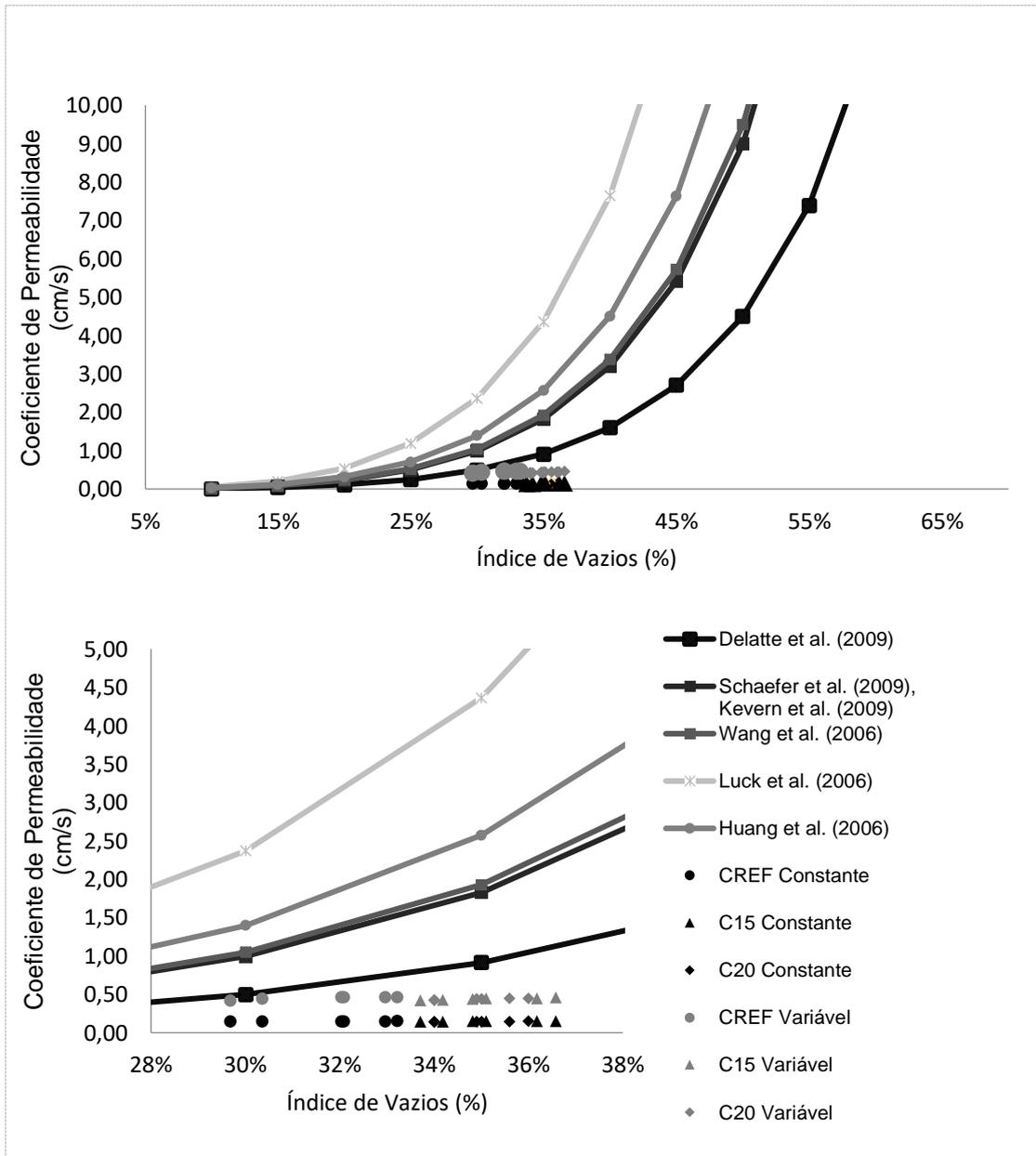
São dois os ensaios propostos para avaliar permeabilidade do concreto: ensaio de permeabilidade de carga constante e ensaio de permeabilidade de carga variável. Os resultados obtidos em ambos os ensaios são apresentados e comparados na Tabela 14.

**Tabela 14:** Resultados dos Coeficientes de Permeabilidade

<b>Método / Tipo Concreto</b>	<b>Carga Constante</b>	<b>Carga Variável</b>
CREF	0,146	0,451
C15	0,149	0,442
C20	0,144	0,437

Para as três misturas estudadas os resultados obtidos nos dois ensaios ficaram muito próximos, esse resultado ocorreu devido ao índice de vazios das amostras também apresentarem valores próximos. No gráfico da Figura 31 pode ser observada a relação entre índice de vazios e coeficiente de permeabilidade, comparando-os com outros autores, os resultados estão apresentados com menor escala na parte superior e com zoom para evidenciar os resultados desta pesquisa na parte inferior.

**Figura 31:** Relação entre índice de vazios e permeabilidade



Os coeficientes de permeabilidade obtidos nas amostras estão um pouco abaixo dos resultados encontrados pelos outros autores, principalmente na análise através do método de carga constante, isso demonstra que as amostras sofreram uma diminuição na permeabilidade devido às massas específicas estarem mais densas no presente estudo.

Rizvi (2009), ao empregar a análise de carga variável, observou em sua pesquisa que a incorporação 15% de RCD resultou em coeficientes de permeabilidade similares ao da amostra referência, e que o aumento da porcentagem de substituição, ocasionou também no aumento da permeabilidade.

Já Ribeiro (2014), Finocchiaro e Giraldi (2017) e Tavares e Kazmierczak (2016) observaram em seu estudo que o agregado reciclado aumentou o coeficiente de permeabilidade do PCP, quando avaliado através do método de carga variável.

Sandoval (2014) também obteve aumento da permeabilidade ao empregar o método de carga constante para análise.

Já Zaetang *et al.* (2016) observou em sua pesquisa uma diminuição da permeabilidade com o aumento do percentual de RCD, avaliando agregados mistos ou de concreto, empregados na mistura e utilizando o método de carga constante.

Analisando os resultados, pode-se perceber que todas as misturas apresentaram coeficiente de permeabilidade próximos, tendo a mistura C15 e C20 índices de vazios maiores, quando comparados com a CREF, dados esses que se assemelham aos encontrados por Rizvi (2009).

#### **5.4. Análise do processo de colmatação do PCP**

Diante dos resultados dos ensaios de índices físicos, resistências mecânicas e hidráulicas do concreto para as três composições estudadas, foi então definido qual seria a melhor taxa de substituição para a elaboração das placas de pisos e continuação da pesquisa e aprofundamento do estudo sobre permeabilidade e colmatação especificados na Etapa 2.

Todas as porcentagens de substituição ensaiadas apresentaram valores próximos ou superiores quando comparados com o CREF, o que permite a continuidade do estudo com grande potencial para a utilização destes materiais.

Os resultados obtidos pelo C15 e C20 foram próximos, quando observado o desvio padrão da amostra obtido, exceto no ensaio de resistência à tração na flexão, onde o C15 destacou-se com sua capacidade.

Sendo a permeabilidade e a resistência à tração na flexão propriedades muito importantes para o concreto permeável utilizado em pavimentos, optou-se pela mistura C15 para a elaboração das placas de piso e avaliação da drenabilidade especificados na etapa 2.

Após a escolha do percentual de mistura ideal, deu-se continuidade avaliando a drenabilidade de placas de piso de concreto permeável, as quais foram colmatadas por diferentes materiais. Os ensaios foram realizados em

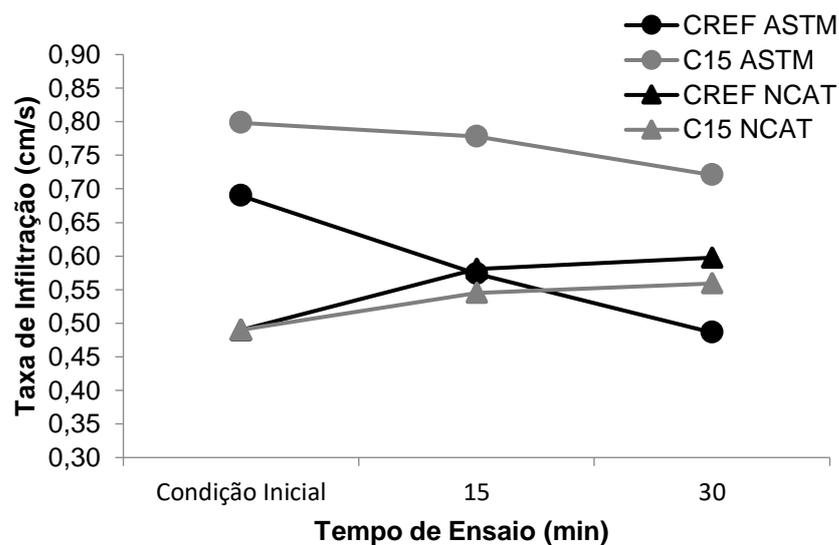
laboratório e as placas de concreto permeável foram fabricadas com as misturas CREF e C15 e, posteriormente, submetidas às simulações de chuva com sedimentos de solo, areia e óleo durante 15 e 30 minutos.

De acordo com Li *et al.* (2013) os coeficientes de permeabilidade obtidos através do método proposto pela NCAT resultaram em valores de 50% a 90% mais altos quando comparados aos coeficientes obtidos pelo método ASTM. Nesta pesquisa foram realizados ensaios de permeabilidade nas placas através dos dois procedimentos com a finalidade de verificar a variabilidade entre os mesmos.

#### 5.4.1. Ensaio de colmatação

A colmatação foi avaliada através das variações observadas nas taxas de infiltração obtidas através dos ensaios de ASTM e NCAT na condição inicial, sem colmatação, e após a colmatação simulada da areia, solo e óleo, nos tempos 15 e 30 minutos. Os gráficos das Figuras 32, 33 e 35 apresentam a variabilidade obtida na taxa de infiltração para cada um dos casos respectivamente.

**Figura 32:** Resultados do Ensaio de Drenabilidade após Colmatação com Areia



Ao observar o ensaio, nota-se que o concreto referência e o concreto produzido com 15% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, apresentaram o mesmo comportamento ao serem submetidos ao simulador de chuvas, com a perda parcial da drenabilidade.

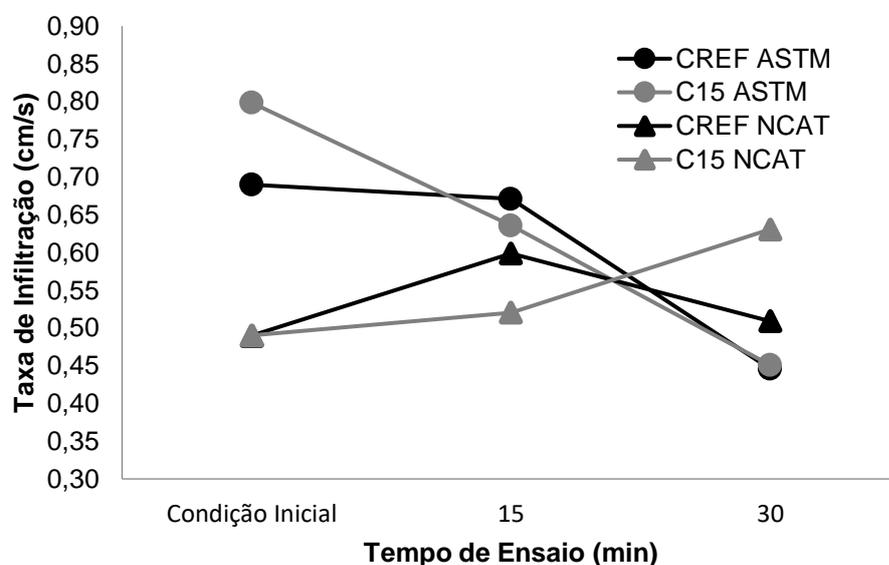
O concreto produzido com 15% de substituição do AN pelo ARC apresentou uma maior queda da taxa de infiltração ao ser submetido pelos ensaios, de acordo com o ensaio ASTM C1701, assim como também teve um ganho um pouco menor da drenabilidade quando avaliado de acordo com o ensaio NCAT.

Houve uma discrepância ao comparar o método de ensaio da NCAT ao modelo proposto pela ASTM C1701, enquanto o NCAT apresentou aumento da taxa de infiltração, o ASTM apresentou diminuição. Essa alteração pode ser atribuída devido ao ensaio do ASTM exercer uma carga hidráulica menor sobre a placa, movimentando as partículas de sedimentos, enquanto o NCAT, devido a maior carga hidráulica empregada no ensaio, elimina as mesmas da placa, efetuando uma limpeza (LI *et al.*, 2013).

Exceto o PCP produzido com agregados naturais e avaliado através do método ASTM, as demais amostras apresentaram uma variação pequena em suas taxas de infiltração. Nichols e Lucke (2015) também obtiveram pouca variação na taxa de infiltração ao empregar sedimentos com granulometria <1,18 mm.

Após serem submetidos aos ensaios com areia, outros corpos de prova foram inseridos no simulador de chuva para o ensaio de colmatação com partículas de solo. Os resultados estão apresentados no gráfico da Figura 33.

**Figura 33:** Resultados do Ensaio de Permeabilidade após Colmatação com Solo



Ao observar os resultados obtidos com a realização dos ensaios da ASTM C1701 (2009), nota-se que o comportamento de diminuição da

drenabilidade se mantém também com a colmatação ocasionada pelo solo, porém neste caso a queda foi mais acentuada, igualando a permeabilidade do CREF e do C15 após a simulação.

A diminuição da taxa de infiltração de maneira mais acentuada, para o C15, pode ser atribuída ao fato das partículas de solo possuir uma granulometria maior, conforme visto no gráfico da Figura 21, e ser composta por areia e argila, o que confere ao material maior facilidade de adesão aos poros abertos do PCP (COUGHLIN *et al.*, 2012).

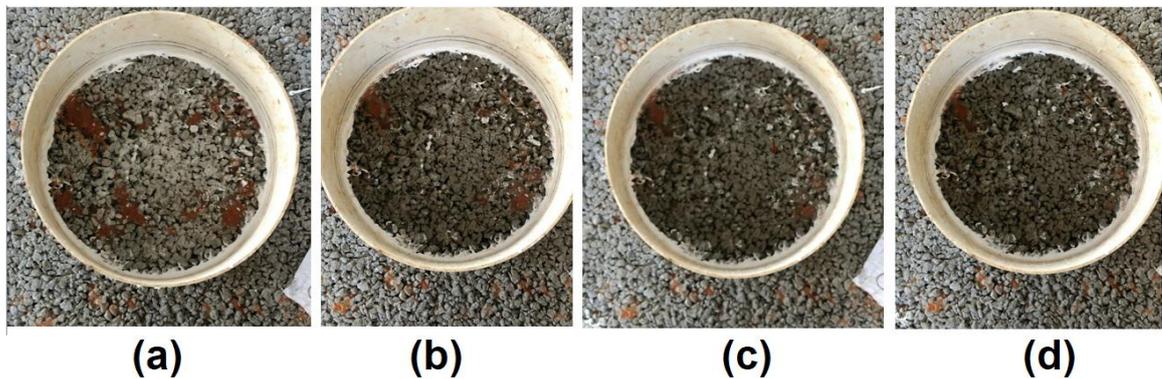
O resultado obtido de acordo com o ensaio ASTM C1701, também confirmam os estudos realizados por Nichols *et al.* (2015), que demonstram que partículas entre 200  $\mu\text{m}$  e 1,18 mm são realojadas em chuvas com grande tempo de duração, reduzindo ou mantendo a taxa de infiltração. No caso do estudo presente o tempo de precipitação não foi prolongado, porém a vazão disponibilizada pela bomba representa uma chuva torrencial, o que promove a passagem dos sedimentos através dos vazios do PCP.

O ensaio realizado através do método proposto pela NCAT obteve resultados opostos. Enquanto CREF obteve um aumento na taxa de infiltração na medição de 15 minutos e retornou ao coeficiente de permeabilidade na condição inicial de ensaio quando analisado aos 30 minutos, o C15 obteve um pequeno aumento no coeficiente de permeabilidade aos 15 minutos, que se potencializou na análise aos 30 minutos.

O método NCAT e ASTM C1701 são propostos para análise de pavimentos permeáveis ou pouco permeáveis já instalados. A aplicação dos mesmos em laboratório, sem base, permite que a água infiltre muito rapidamente através do pavimento, causando uma carga hidráulica sob a placa. Tal movimentação de água realoca as partículas de colmatação, o que influencia na obtenção da taxa de infiltração.

No presente estudo cada ensaio foi repetido três vezes para obtenção da média de resultados, na execução das repetições pode-se observar o realojamento das partículas, conforme apresentado na Figura 34.

**Figura 34:** Movimentação das Partículas de Solo durante o ensaio ASTM C1709

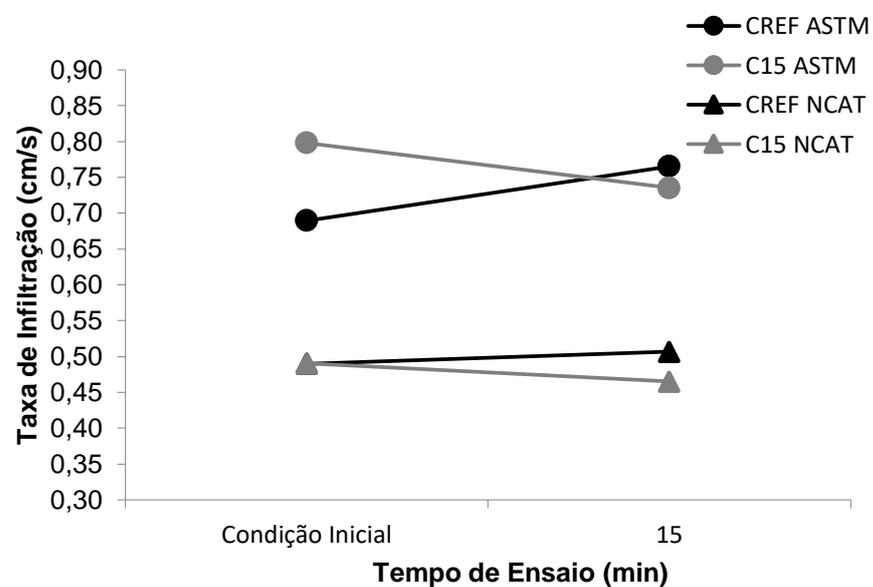


- a) Condição inicial pré ensaio, após passagem pelo simulador de chuvas;
- b) Após primeiro ensaio ASTM;
- c) Após segundo ensaio ASTM;
- d) Após terceiro ensaio ASTM;

Mesmo após a exposição à colmatação, todas as amostras, ao final obtiveram taxa de infiltração próximas ou acima de 0,40 cm/s, ou seja, todos acima do mínimo proposto por Tennis *et al.* (2004) de 0,21 cm/s.

Para a análise da colmatação, foram fabricadas placas para serem ensaiadas com óleo “queimado”. Os resultados podem ser observados no gráfico da Figura 35.

**Figura 35:** Resultados do Ensaio de Permeabilidade após Colmatação com Óleo



O ensaio que empregou óleo popularmente conhecido como “óleo queimado” em sua simulação e não apresentou grande alteração na taxa de infiltração analisada.

Nos ensaios realizados de acordo com a ASTM C1701, a inserção do óleo durante 15 minutos no simulador, ocasionou uma aproximação da drenabilidade apresentados na condição inicial com variação de aproximadamente 0,04 cm/s, tornando-os estatisticamente iguais. O CREF sofreu um pequeno aumento na taxa de infiltração, enquanto o C15 obteve uma pequena diminuição.

Já nos ensaios realizados com o método NCAT, os resultados da condição inicial, tais como os resultados ao final dos 15 minutos foram estatisticamente iguais, não possuindo variação simbólica nos mesmos.

Apesar do óleo, após a utilização em motores, apresentar pequenas partículas, resultado da queima do mesmo, o sedimento foi incorporado pela água que infiltrava na placa e se diluindo no reservatório do simulador.

Não houve alteração na água que fosse perceptível, exceto à cor da mesma após o tempo de ensaio. De acordo com os resultados obtidos, optou-se por não dar continuidade no estudo com a simulação de 30 minutos.

## **5.5. Discussão dos Resultados**

### **5.5.1. Agregados Reciclados**

Com a substituição parcial dos agregados reciclados pelos agregados naturais se observou que os índices físicos, as resistências mecânicas e as características hidráulicas foram satisfatórios.

Em alguns casos, como na Resistência à compressão Axial e de tração na flexão, os resultados obtidos pelo C15 superaram os resultados do CREF.

Pode-se atribuir tais aumentos obtidos pela composição do resíduo utilizado ser classificado como agregado reciclado de concreto, de acordo com a NBR 15.116 (ABNT, 2004), ou seja, possuir a maior parte de sua composição em materiais provenientes de matéria cimentícia, que podem se soltar durante a mistura, aumentando o teor de pasta de cimento, e conseqüentemente a aderência entre os agregados.

Portanto, o estudo realizado para a reutilização deste material como alternativa na destinação dos resíduos sólidos provenientes da construção e

demolição se torna favorável na execução do concreto permeável, potencializando ou igualando suas propriedades com o concreto produzido com 100% de agregados naturais. Estes resultados também foram observados nas pesquisas realizadas por Rizvi (2009), Vidal (2014) e Zaetang *et al.* (2016).

### **5.5.2. Métodos de Avaliação do coeficiente de Permeabilidade**

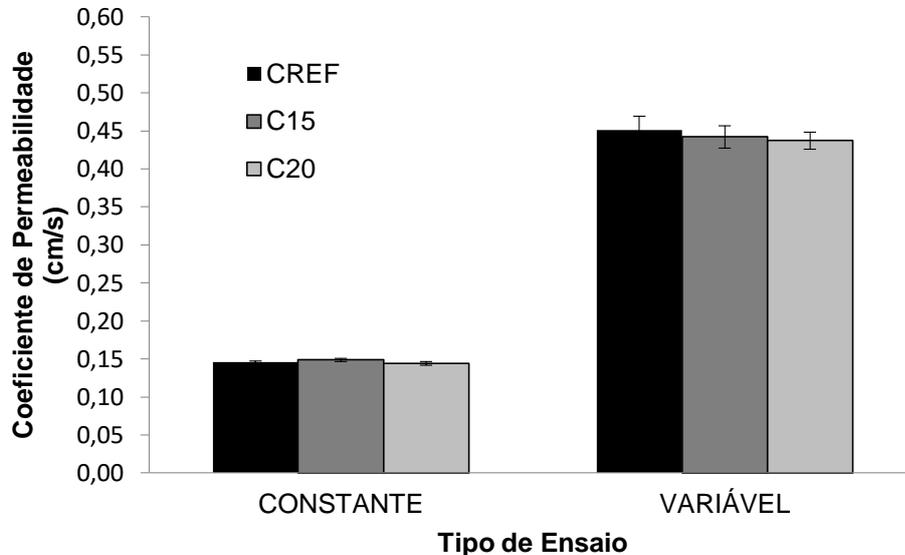
Segundo Batezini e Balbo (2015), recomenda-se para a obtenção da capacidade de infiltração de materiais com elevada permeabilidade ( $>10^{-3}$  cm/s) o emprego de ensaio de carga constante, porém em diversas pesquisas como Rizvi (2009), Lamb (2014), entre outros autores o ensaio de carga variável é comumente utilizado para análise do coeficiente de permeabilidade do concreto permeável.

A análise da permeabilidade através do ensaio de carga variável emprega um equipamento mais simples, o que o torna mais prático na montagem do permeâmetro e execução do ensaio, porém a validação de confinamento das laterais do corpo de prova são parcialmente comprometidas.

Já o ensaio de carga constante emprega um equipamento mais sofisticado, especialmente o permeâmetro onde se posiciona a amostra. Observou-se que os resultados obtidos nos ensaios de carga constante apresentaram menor variação e menor coeficiente de permeabilidade, quando comparados com os ensaios de carga variável.

A diferença entre o coeficiente de permeabilidade de acordo com o método empregado para obtenção do mesmo foi observada também por Batezini e Balbo (2015), sendo que o ensaio de carga variável apresentou valores 362 vezes maiores que os obtidos pelo permeâmetro de carga constante para a mesma mistura de concreto permeável. Nesta pesquisa, a diferença também resultou em valores maiores, sendo 208%, 197% e 202% nas misturas CREF, C15 e C20 respectivamente, como pode ser observado na Figura 36.

**Figura 36:** Comparação entre coeficiente de permeabilidade obtidos por carga constante e variável



Em diversas pesquisas realizadas, como por Tennis *et al.* (2004), Haselback *et al.* (2006), Holtz (2011), Batezini (2013), Vidal (2014), os resultados apresentados pelo ensaio de carga constante mostraram-se mais condizentes com os parâmetros de permeabilidade geralmente obtidos em concretos permeáveis. Portanto pode-se observar que para a realização do ensaio de carga variável é necessário o emprego de materiais e técnicas que possibilitem a total vedação das laterais do corpo de prova, tornando assim os resultados mais próximos da literatura pesquisada.

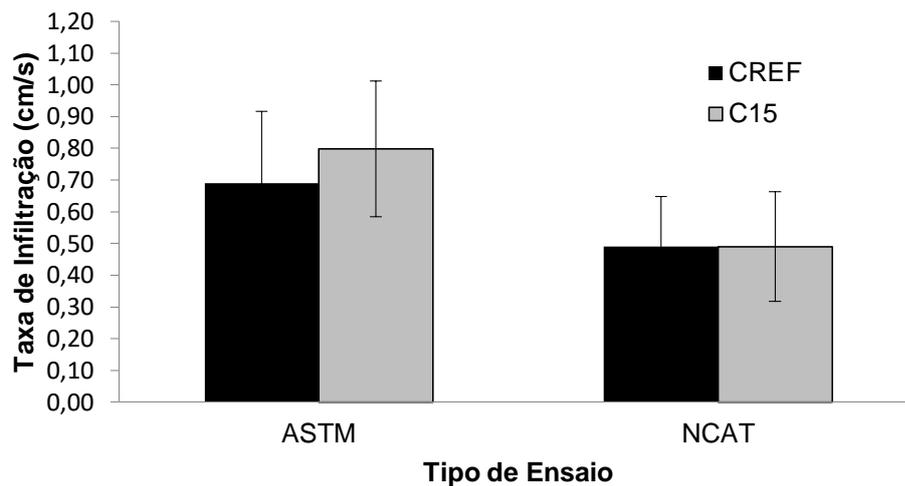
### 5.5.3. Métodos de Avaliação da Drenabilidade

Com o desenvolvimento da pesquisa, se notou que a adaptação dos ensaios de campo para realização em laboratório não ocorreu de maneira satisfatória, pois a falta da base do pavimento potencializou a capacidade de drenagem das placas, influenciando diretamente na taxa de infiltração. Recomenda-se que para estudos como este, sejam empregadas bases, tornando os resultados do meio laboratorial mais próximos dos encontrados “*in loco*”.

Nota-se que os métodos empregados para avaliação da taxa de infiltração influenciam no resultado e também interferem na colmatação das placas.

Li *et al.* (2013) avaliou a influência dos métodos de ensaio ASTM C1701 (2009) e NCAT para obtenção da taxa de infiltração e verificou que os resultados obtidos através do NCAT podem ser de 50 a 90% maiores que os obtidos através do ASTM. Na Figura 37 pode-se observar a comparação entre os métodos na obtenção da taxa de infiltração

**Figura 37:** Comparação entre ensaios ASTM e NCAT



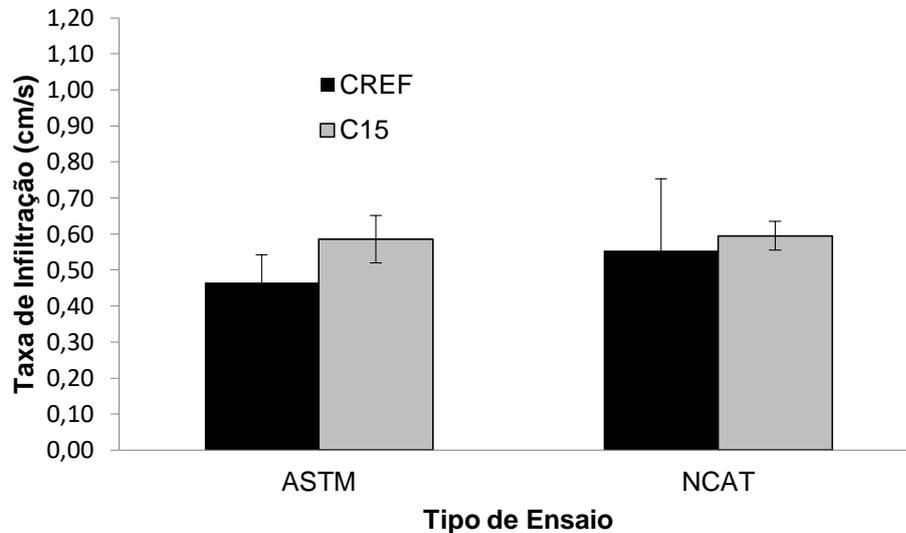
Na atual pesquisa os resultados obtidos pelo NCAT na condição inicial das placas (sem colmatação) apresentaram valores 21% e 11% menores que os obtidos pelo método ASTM, o desvio padrão obtido para as amostras foi também muito próximo, tendo resultados em torno de 20%.

Durante o ensaio realizado de acordo com o método NCAT, a placa de PCP sofre uma carga hidráulica alta, o que pode resultar na lavagem da mesma durante o processo. Em alguns casos, onde a placa se mostrou mais permeável, também se tornou necessário o emprego de um abastecedor de grande vazão para que fosse possível a criação de uma lamina d'água até o segundo diâmetro do permeâmetro para avaliação.

Já o ensaio regido pela ASTM C1701, mostra-se mais delicado em relação à carga hidráulica, porém a primeira colocação da água no anel para o início do ensaio cria um ponto de lavagem, o que promove a dispersão dos sedimentos alojados na superfície.

Após a simulação da colmatção, as taxas de infiltração apresentaram maior permeabilidade através do método NCAT, sendo 19% e 2% acima dos resultados obtidos pelo método ASTM, como pode ser observado na Figura 38.

**Figura 38:** Comparação ASTM e NCAT após colmatção



Ambos os ensaios criados para realização em campo necessitam de atenção na vedação entre a base do permeâmetro ou anel e a superfície do concreto permeável, o que pode se tornar de difícil execução quando a superfície do mesmo estiver desnivelada. Na atual pesquisa notou-se que o emprego de silicone, apesar de eficiente na vedação, pode ocasionar colmatção nos poros do entorno do diâmetro de inserção do permeâmetro. Sendo assim, a massa de calefação empregada nos ensaios mostrou-se mais adequada.

Durante o procedimento de ensaio atentou-se para realizar o ensaio ASTM C1701 antes do ensaio NCAT nas placas, pois se observou que o mesmo efetua uma lavagem na placa, aumentando o coeficiente de permeabilidade para a análise do ASTM.

#### **5.5.4. Colmatção do Concreto Permeável**

Na pesquisa foram estudados três tipos de sedimentos para a colmatção do PCP. Foi possível notar que os coeficientes de permeabilidade nas placas submetidas à colmatção com óleo não sofreram alterações, porém o líquido foi facilmente infiltrado através da placa, o que pode facilitar a contaminação de um solo ou base ao longo do tempo.

Já na avaliação da infiltração com areia e solo, se observou que partículas com granulometria menores são facilmente transportadas através do corpo do concreto permeável em chuvas com alta intensidade.

Com o aumento das partículas e inserção de 1/10 de argila na areia, compondo o solo utilizado, notou-se que houve uma diminuição da permeabilidade, mas ainda tolerável em relação ao coeficiente total de permeabilidade.

A alteração de composição no sedimento infiltrado pode ser considerada na influência da colmatação, partículas de argila quando misturadas a areia, tendem a se aderir com maior facilidade aos poros do concreto permeável, quando comparadas as partículas de areia. Este fenômeno foi observado no atual estudo e também por Schaefer *et al.* (2011) e Coughlin *et al.* (2012).

Mesmo com as variações observadas, analisando a taxa de infiltração final das amostras, se observa que partículas pequenas (com diâmetro máximo de até 1,18 mm) não influenciam de maneira significativa em tal índice, quando submetidos à chuvas de alta intensidade, mantendo o mesmo acima de 0,40 cm/s. Este resultado também foi observado por Nichols e Lucke (2015).

## 6 CONCLUSÕES

Observou-se no presente trabalho que o emprego de agregados reciclados no concreto permeável é uma boa alternativa para destinação dos resíduos sólidos, porém devem ser analisadas as composições e características dos mesmos para garantir o bom equilíbrio entre índice de vazios e resistência mecânica.

Também se pode notar que na análise das características hidráulicas, tanto na obtenção do coeficiente de permeabilidade do concreto, através dos ensaios de carga constante e variável, quanto na obtenção da taxa de infiltração das placas, nos ensaios ASTM C1701 (2009) e NCAT, o procedimento empregado influencia nos resultados.

Para os ensaios de taxa de infiltração, recomenda-se o emprego de base no simulador de chuva, de maneira a evitar o aumento da permeabilidade.

Quanto à colmatção, os estudos realizados por outros autores, estão de acordo com os resultados obtidos na atual pesquisa, sedimentos com granulometria menores que 1,18 mm, não impactam substancialmente a permeabilidade quando expostos em chuvas torrenciais de curta duração.

Notou-se também que os materiais influenciam na colmatção, sendo que a argila quando empregada junto a areia auxilia na aderência aos poros do PCP.

Ao manusear o concreto permeável notou-se que o mesmo apresenta degradação, principalmente dos vértices com cantos vivos, e que os pequenos agregados que se desprendem do objeto podem ocasionar colmatção na própria amostra, como observado pelo Welker *et al* (2013).

### 6.1. Sugestões para novas pesquisas

De acordo com as percepções obtidas no estudo, sugere-se para novas pesquisas:

- Avaliação da influência do tipo e granulometria da base na taxa de infiltração do concreto permeável;
- Ensaio de abrasão superficial para verificar a integridade da peça quando submetida a uso contínuo;

- Aprofundamento da influência da intensidade da chuva em função do tempo de precipitação na colmatação do concreto;
- Aprofundamento da influência do tipo e tamanho de sedimentos que ocasionam a colmatação no PCP;
- Estudo da composição dos sedimentos encontrados no meio real e verificação junto à bibliografia existente de possíveis variações;
- Elaboração de métodos para obtenção da taxa de infiltração mais refinados e adequados ao clima e regime de chuvas do Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE, *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: Relatório Técnico da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais*, p. 19, São Paulo, 2015.

ACI Committee 522, *Pervious Concrete*, 522R-06, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 25p., 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C1701/C1701M: Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete*. West Conshohocken, 2009.

AQUAFLUXUS, *Criando Cidades Sustentáveis*. 2012. Disponível em: <<http://www.aquafluxus.com.br/desenvolvimento-de-baixo-impacto-um-conceito/>>. Acesso em 01/02/2017

ARRUDA, G. *Avaliação Do Uso De Modelos Físicos Para Definição De Carga Máxima Suportada Por Solos Grampeados*, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15.116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos*. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_.*NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_.*NBR 11.768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos*. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_.*NBR 12.142: Concreto – Determinação da Resistência à Tração na Flexão em Corpos-de-Prova prismático*. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_.*NBR 13.292: Solo – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Granulares à Carga Constante*. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_.*NBR 13.818: Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificações e Métodos de Ensaio*. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_.*NBR 14.545: Solo – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos a Carga Variável*. Rio de Janeiro, 2000.

\_\_\_\_\_.*NBR 15.900-1: Água para Amassamento do Concreto – Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_.*NBR 16.416: Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e Procedimentos*. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_.*NBR 9778: Concreto – Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova cilíndricos ou Prismáticos de Concreto*. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_.*NBR 5738: Concreto – Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova cilíndricos ou Prismáticos de Concreto*. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_.*NBR 5739: Concreto – Ensaio de Corpos-de-Prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_.*NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_.*NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_.*NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro, 2016.

- \_\_\_\_. *NBR 7211: Agregados para Concreto - Especificação*. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_. *NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão*. Rio de Janeiro, 1997.
- \_\_\_\_. *NBR 7222: Concreto – Argamassa e Concreto: Determinação da Resistência à Tração por Compressão diametral de Corpos-de-Prova*. Rio de Janeiro, 2011.
- \_\_\_\_. *NBR 7583: Execução de Pavimentos de Concreto Simples por meio Mecânico*. Rio de Janeiro, 1986.
- \_\_\_\_. *NBR 9778: Argamassa e Concreto Endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_. *NM 15: Cimento Portland – Análise Química – Determinação do Resíduo Insolúvel*. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_. *NM 18: Cimento Portland – Determinação de Perda ao Fogo*. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_. *NM 248: Agregados – Determinação da Composição Granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_. *NM 45: Agregados – Determinação da Massa Unitária e Volume de Vazios*. Rio de Janeiro, 2006.
- \_\_\_\_. *NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_. *NM 53: Agregados – Determinação de Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de água*. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_. *NM 65: Cimento Portland – Determinação de Tempo de Pega*. Rio de Janeiro, 2003.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. 2005. *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. Porto Alegre: ABRH. 266p
- BASF, *Aditivos Master Builders Solutions*. Disponível em: <<https://www.master-builders-solutions.basf.com.br/pt-br/products>>. Acesso em: 25 mai. 2016.
- BATEZINI, R. *Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves*. 2013. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- BATEZINI, R.; BALBO, J. T.. Study on the hydraulic conductivity by constant and falling head methods for pervious concrete. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, São Paulo, v. 8, n. 3, p. 248-259, June 2015.
- BENJAMIN, Caroline; BOOTH, Katie; ELLIS, Ian. A prospective comparison study of different methods of gathering self-reported family history information for breast cancer risk assessment. *Journal of genetic counseling*, v. 12, n. 2, p. 151-170, 2003.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010. *Dispõe sobre a Política Nacional dos Resíduos Sólidos*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Seção 1.
- CERVO, T. C. *Estudo de Resistência à Fadiga de Concretos de Cimentos Portland para Pavimentação*. Tese de Doutorado em Engenharia – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- CHOCAT, B. 1997. *Encyclopédie de l'Hydrologie Urbaine et de l'Assainissement*. ed. Paris: , 1997. 1136p.

CHOPRA, Zulfiqar A. *et al.* Countdown to 2015 decade report (2000–10): taking stock of maternal, newborn, and child survival. *The Lancet*, v. 375, n. 9730, p. 2032-2044, 2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). *Ministério Do Meio Ambiente RESOLUÇÃO Nº 307* de 17 de julho de 2002 – Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos Resíduos da Construção Civil. Diário Oficial da União.

\_\_\_\_. *RESOLUÇÃO Nº 357 de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União.

COOLEY, A.J., 1999. Permeability of Superpave Mixtures: *Evaluation of Field Permeameters* NCAT. Report 99-1.

COUGHLIN, J.P., CAMPBELL, C.D., MAYS, D.C. Infiltration and clogging by sand and clay in a pervious concrete pavement system. *Journal of Hydrologic Engineering*., v17, p 68-73, 2012.

CROUCH, L.K., SMITH, N., WALKER, A.C., DUNN, T.R., SPARKMAN, A., 2006. Determining pervious PCC permeability with a simple triaxial flexible-wall constant head permeameter. In: *TRB 85th Annual Meeting Compendium of Papers*, 22-26 January 2006, Washington D. C. Transportation Research Board, Washington D.C, pp. 1 e 15.

CURVO, F. O. *Estudo da Drenabilidade de Calçadas Experimentais em Concreto Permável no Campus Armando Salles de Oliveira da USP*. 2017. 102f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

DELLATE, N.; MRKAJIC, A.; MILLER, D. I. Field and Laboratory Evaluation of Pervious Concrete pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. v. 2113, p. 132–139, 2009.

FERREIRA, T. N. S. *Propriedades Mecânicas e durabilidade do concreto branco com adições pozolânicas*. 2014. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Pará. Belém, 2014.

FINOCCHIARO, P.; GIRALDI, R. Concreto Permável Produzido com Agregado Reciclado, *Revista de Engenharia da Faculdade Salesiana*, n5, p. 19-26, 2017.

FORGIARINI, Francisco Rossarolla *et al.* Avaliação de Cenários de Cobrança pela Drenagem Urbana de Águas Pluviais. *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2007.

GONÇALVES, Daniel Bertoli. A gestão de Resíduos da Construção Civil no Município de Sorocaba - SP. *REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 11, n. 2, 2016.

GUTHRIE, W.S., CARSON, B.D., DENNIS, L.E. Effects of soil clogging and water saturation on freeze-thaw durability of pervious concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v.2164, p.89-97, 2010.

HASELBACH, L.M. Potential for clay clogging of pervious concrete under extreme conditions. *Journal of Hydrologic Engineering*, v15, p.67-69, 2010.

HASELBACH, L. M.; VALAVALA, S.; MONTES, F. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. *Journal of environmental management*, v. 81, n.1, p. 42-49, 2006.

HIRATA, A. L. *et al.* Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: o transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, p. 17-28, 2015.

- HOLTZ, F. C. *Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011.
- HUANG, B.; WU, H.; SHU, X.; BURDETTE, E. G. Laboratory Evaluation of Permeability and Strength of Polymer-Modified Pervious Concrete, *Construction and Building Materials*, v.24, Science Direct, p.818-823, 2010.
- IBRAHIM, A., MAHMOUD, E., YAMIN, M., PATIBANDLA, V.C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties, *Construction and Building Materials*. v.50, p.524-529, 2014.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE – Diretório de Pesquisas, Projeção da população do Brasil. 2012. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em: 09 dez. 2016.
- KAYHANIAN, M., ANDERSON, D., HARVEY, J.T., JONES, D., MUHUNTHAN, B. Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. *J. Environ. Manage*, v.95, p.114-123. 2012.
- KERTIS, T.; QUADRELLI, A.; OLIVEIRA, L.; BARBOSA, M.; JACINTHO, A. Concreto Permeável Elaborado com Resíduo de Fresado Asfáltico: Avaliação Experimental da Permeabilidade e da Qualidade da Água Infiltrada. *Segundo Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentável*, João Pessoa, Paraíba, 2016.
- KEVERN, J.; SCHAEFER, V.; WANG, K. Temperature behavior of pervious concrete systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n.2098, p. 94-101, 2009.
- KIA, A.; HONG, S.; CHEESEMAN, C. Clogging in Permeable Concrete: a Review. *Journal of Environmental Management*, Londres, v.193, p.221-233, 2016.
- KUMAR, K., KOZAK, J., HUNDAL, L., COX, A., ZHANG, H., GRANATO, T. In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot - a four-year study. *J. Environ. Manage*, v.167, p.8-14, 2016.
- LAMB G. S., *Desenvolvimento e Análise do Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto Permeável*. 152f Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2014.
- LEITE, M. B. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. 290f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, Porto Alegre, 2001.
- 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*, California, v. 2003, n. 118, p.144-152, 2013.
- LIMA, A. S.; CABRAL, A. B. Caracterização e classificação dos Resíduos de Construção Civil da Cidade Fortaleza (CE). *Eng Sanit Ambient*, Fortaleza, v.18, n.2, p169-176, 2013.
- LIN, W. *et al*. Development of permeability test method for porous concrete block pavement materials considering clogging. *Construction And Building Materials*, Shanghai, v.118, n.1, p.20-26, 2016.
- LOBO, C. Dispersão Espacial da População no Brasil. *Mercator (Fortaleza)*, v.15, n.3, p.19-36, 2016.
- LUCK, J. D., WORKMAN, S. R., HIGGINS, S. F., COYNE, M. Hydraulic properties of pervious concrete. *Transactions of the ASABE.*, v49, p.1807–1813, 2006.

MARIANO, H. R. *Influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e nas resistências à compressão e à abrasão de concretos permeáveis*. 163f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

MATA, L. A.; LEMING, M. L. Vertical Distribution of Sediments in Pervious Concrete Pavement Systems. *ACI materials Journal*, v.109, n.2, 2012.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Ibracon, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, *Resíduos Sólidos*. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos>>. Acessado em 09 dez. 2016

MINISTÉRIO DAS CIDADES - SNSA, *Gestão do território e manejo integrado das águas urbanas: Cooperação Brasil-Itália em Saneamento Ambiental. Programa de Modernização do Setor de saneamento* – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – Brasília: Ministério das Cidades, 270 p., 2005.

MOTA, J. C., TUCCI, C. E. M., Simulation of the urbanization effect in flow. *Hydrological Sciences Journal*, V.29, n.2, p.131-147, 1984.

NEITHALATH, N., LOW, K., HAZ, D. Statistical characterisation of the pore structure of enhanced porosity concretes. *National Ready Mixed Concrete Association*, Colorado, 2008.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 2. Ed São Paulo: Pini, 1997.

NICHOLS, P. W.; WHITE, R.; LUCKE, T. Do sediment type and test durations affect results of laboratory-based, accelerated testing studies of permeable pavement clogging?. *Science of the Total Environment*, v. 511, p. 786-791, 2015.

OIKONOMOU, N. D. *Recycled concrete aggregates. Cement & Concrete Composites*. Grécia, 2005.

PARRA, G. G.; NASCIMENTO T., ARANTES, B. Análise da Permeabilidade e dos Métodos de Instalação de Pavimentos Permeáveis Contidos em Artigos Científicos e em Catálogos Técnicos. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, v. 3, n. 15, 2015.

PELLIZZARI, Vinícius. *Avaliação da eficácia na restauração da capacidade de infiltração da camada superior de pavimentos porosos*. 53f Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

PEREIRA, T. M.; *Avaliação Preliminar da Capacidade de Escoamento do Trecho Canalizado no terço superior do Córrego do São Pedro com auxílio da Ferramenta HEC-RAS*. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária Ambiental) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.

RIBEIRO, A. *Concreto Permeável com Agregados Reciclados de Resíduos de Isoladores Elétricos de Porcelana*. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.

RIZVI, R. *et al*. Incorporating recycled concrete aggregate in pervious concrete pavements. *Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada-Transportation in a Climate of Change*, Canadá, 2009.

SANDOVAL, G. *Desempenho de Concreto Poroso com Agregados Sustentáveis*, 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

SCHAEFER, V.; WANG, K.; SULEIMAN, M.; KEVERN, J. Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates. *Final Report, Civil Engineering*, Iowa State University, 2006.

SCHAEFER, V.R., KEVERN, J.T., WANG, K. An Integrated Study of Pervious Concrete Mixture Design for Wearing Course Applications. *National Concrete Pavement Technology Centre.*, 2011.

SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, v.42, n.11, p.3830-3836, 2007.

SILVA, R. V., de BRITO J. Use of recycled aggregates from construction and demolition wastes in the production of structural concrete. *Conference Paper*, 2015.

SOUZA, C. F., CRUZ, M. A. S., TUCCI, C. E. M. Desenvolvimento urbano de baixo impacto: planejamento e tecnologias verdes para a sustentabilidade das águas urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.17, p9-18, 2012.

SULEIMAN, M. T.; KEVERN, J.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. Effect of Compaction Energy on Pervious Concrete Properties, *Proceedings of Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete*, Nashville, v.5, p24-25, 2006.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. The influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v.9, n.1, p.75-89, 2016.

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

TONG, B. *Clogging Effects of Portland Cement Pervious Concrete*. Tese (Doutorado em Ciências) - Iowa State University, Ames, 2011.

TUCCI, C. E. *Inundações urbanas na América do Sul*. Ed. dos Autores, 2003.

VAZ, B. V. Drenagem Urbana. *Boletim Informativo Nº05 / Ano VI, Santa Cruz do Sul – Rio Grande do Sul*, 2004.

VIDAL, A. S. *Caracterização do Concreto Permeável produzido com agregado reciclado de construção e demolição para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 132, Rio de Janeiro, 2014.

VIRGILIIS, A. L. C. *Procedimentos de Projeto e Execução de Pavimentos Permeáveis Visando Retenção e Amortecimento de Picos de Cheias*. 2009. 191p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

WANG, K., SCHAEFER, V.R., KEVERN, J.T., SULEIMAN, M.T. Development of mix proportion for functional and durable pervious concrete. *Proceedings of the 2006 NRMCA Concrete Technology Forum e Focus on Pervious Concrete*, p23-24, Nashville, 2006.

WELKER, A.L., GILBERT JENKINS, J.K., MCCARTHY, L., NEMIROVSKY, E. Examination of the material found in the pore spaces of two permeable pavements. *J. Irrig. Drain. Eng.*, v.139, p.278-284, 2013.

YONG, Y.; ZHONG, J.. Regulation of aromatics biodegradation by rhl quorum sensing system through induction of catechol meta-cleavage pathway. *Bioresource technology*, v.136, p.761-765, 2013.

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*, v. 111, p.15-21, 2016.

## **ANEXOS**

Para a realização desta pesquisa se tornou necessária a execução de alguns equipamentos não comercializados ou de difícil compra no Brasil.

Este anexo tem como objetivo direcionar e demonstrar a fabricação do Simulador de Chuvas.

### **Anexo A – Simulador de Chuvas**

Para executar a simulação de chuva e aprofundar o estudo da colmatção, foi projetado e construído um dispositivo que permitisse a análise da colmatção visual representando um piso de concreto permeável instalado.

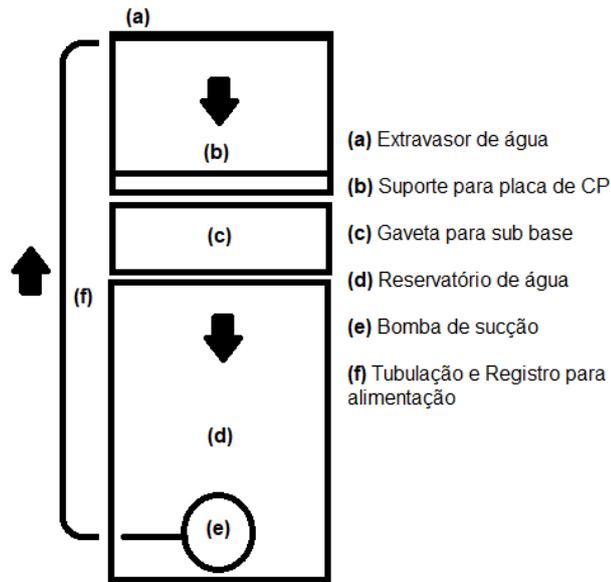
Este dispositivo é sugerido para utilizações onde o campus não oferece espaço suficiente para execução de um canteiro de estudos real, e possui como objetivo permitir a aproximação de resultados obtidos em laboratório com a realidade encontrada em áreas livres.

Os materiais empregados para sua execução foram:

- Tubos e conexões para água fria para fazer a conexão entre a bomba e o chuveiro;
- Registro do tipo Gaveta para controle da vazão;
- Tubos de água fria furados com diâmetros de 1 mm (para água limpa) e 3 mm (para água com sedimentos);
- Estrutura de vidro e metal para comportar reservatório inferior, suporte para placa de concreto e colocação de base opcional;
- Bomba do tipo 'sapo' que permita circulação de água no dispositivo.

O simulador possui um fluxo de água contínua alimentado por bomba com controle de vazão através de registro do tipo gaveta, a dispersão da água sobre a placa é feita através de direcionadores e a gaveta de base é de utilização opcional. Na Figura 39 pode-se observar o funcionamento do dispositivo.

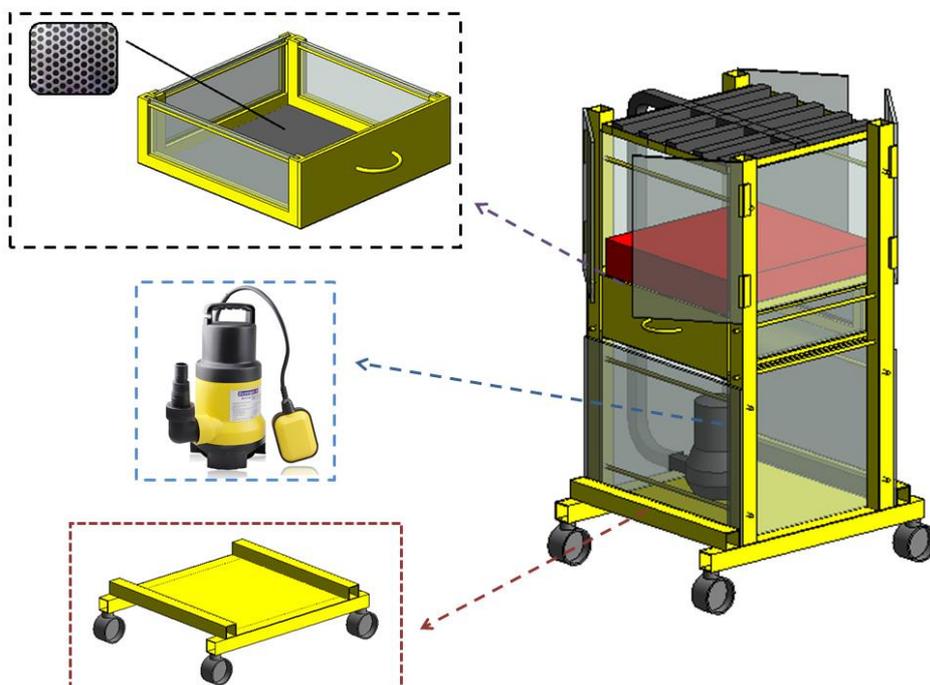
**Figura 39:** Funcionamento do Simulador de Chuvas



O dispositivo funciona com placas de concreto de 50 cm x 50 cm, podendo as mesmas possuir altura variável. A Base pode ter até 30 cm de altura e o reservatório tem capacidade para 375 litros e também pode ser facilmente adaptado para a inserção de outra base.

O modelo foi projetado baseado no dispositivo confeccionado por Lamb (2014) e adaptado para as necessidades do projeto. Na Figura 40 pode-se observar o modelo em 3D projetado para execução.

**Figura 40:** Detalhes Projeto 3D simulador de Chuvas



A base do dispositivo foi desenvolvida de maneira com que resistisse ao peso da água do reservatório e não apresentasse vazamentos. A mesma foi disposta sobre rodízios com trava que permitem a movimentação do simulador de maneira simples.

As laterais de fechamento foram fabricadas em vidro temperado para possibilitar a visualização da cor e textura da água conforme o andamento do ensaio, resistindo à pressão do reservatório e possibilitando a captura de fotos com visibilidade máxima.

O reservatório possui uma altura grande, pois para trabalho futuros é possível realizar o corte do mesmo e inserir de uma nova gaveta, o que possibilitaria o estudo da influencia de duas bases diferentes no concreto permeável.

Interno ao reservatório foi inserido uma bomba do tipo sapo imersa, que possibilita o direcionamento da água para o ciclo contínuo, a mesma possui aspersão através de sua base, o que facilita a circulação dos sedimentos junto à água.

Acima do reservatório, está localizado o direcionador de água, que trata-se de uma chapa metálica dobrada para direcionar a água vinda da base, pós infiltração, para um ponto central do reservatório, evitando assim que as partículas da colmatação se acumulem em um único local do reservatório.

A gaveta de base foi projetada com a base em tela metálica, que permite a percolação de água e laterais em vidro para possibilitar a visualização da acomodação do material de base. Pode ser trocada e permite a inserção de solo ou agregados graúdos.

A base para a placa de concreto permeável, funciona com cantoneiras direcionadoras, o que permite que a placa tenha sua área de contato máxima com a base e a água.

Também foram executadas duas janelas de inspeção, uma para a inserção da placa e outra para auxílio no manuseio da mesma.

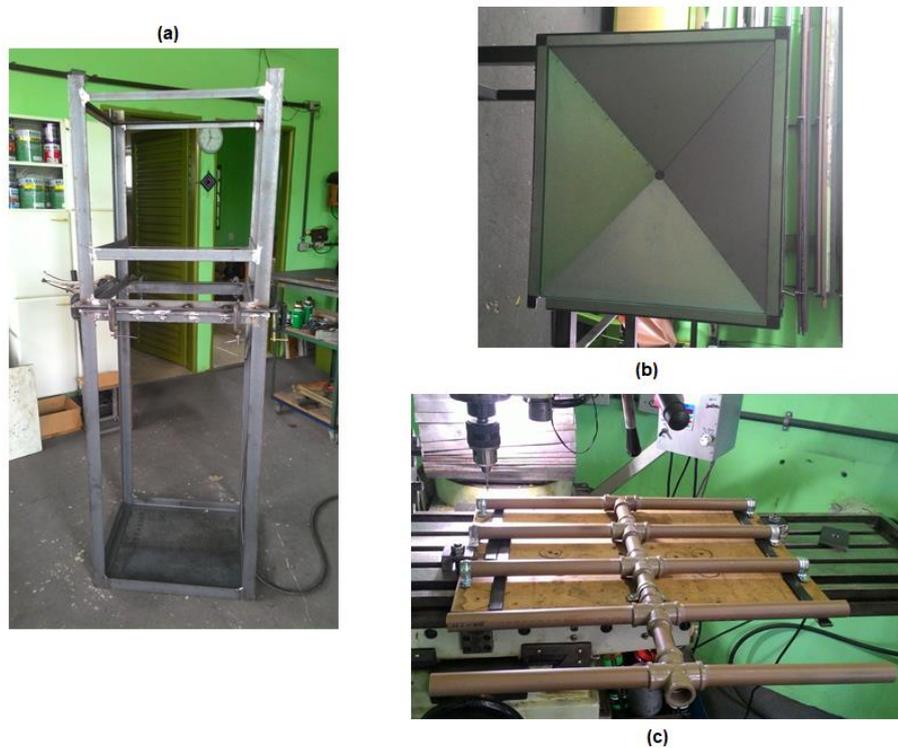
Acima das janelas estão as bases de apoio que possibilitam a inserção dos tubos de chuva alinhados, garantindo que a água da tubulação seja dispersa sobre a placa de maneira uniforme.

O conjunto de tubulações direciona a água coletada pela bomba para o extravasor que este situado acima da placa. Nesta pesquisa foram empregados

dois tipos de extravasores, um com furos de 1 mm para passagem da água limpa e outro com furos de 3 mm para facilitar a passagem dos sedimentos que circulam durante a simulação de chuva.

Na Figura 41 pode ser observado o processo de construção do dispositivo.

**Figura 41:** Etapas de Construção do Simulador de Chuvas

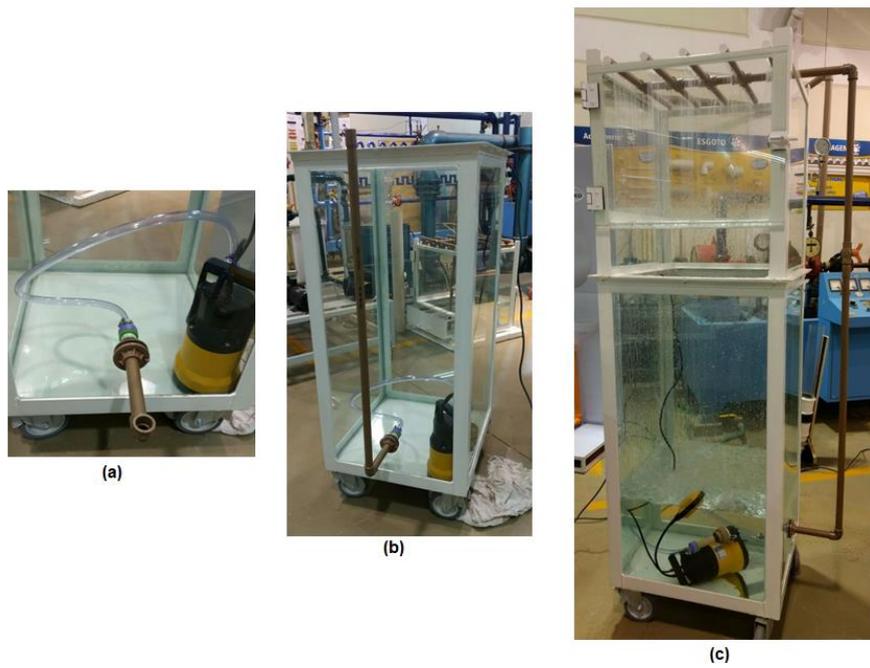


Onde,

- (a) Estrutura metálica sendo soldada
- (b) Direcionador de água finalizado
- (c) Furação dos tubos extravasores de água

Já na Figura 42 pode-se observar a montagem do equipamento no laboratório.

**Figura 42:** Montagem do Simulador de Chuvas em Laboratório



Onde,

(a) Detalhe da Conexão Bomba - Tubulação

(b) Montagem do Sistema de Tubulação

(c) Ensaio de estanqueidade do simulador de chuvas.