



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE CAMPUS FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

MAYARA DA SILVA LIMA

ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E HIDRÁULICAS DE
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS PRODUZIDOS COM AGREGADOS NATURAIS E
RECICLADOS

FORTALEZA

2020

MAYARA DA SILVA LIMA

ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E HIDRÁULICAS DE PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS PRODUZIDOS COM AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus* Fortaleza, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Marcos Fabio Porto de Aguiar, D.Sc.

Coorientadora: Profa. Teresa Raquel Lima Farias, D.Sc.

FORTALEZA-CE

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L732a Lima, Mayara da Silva.
 ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E HIDRÁULICAS DE PAVIMENTOS
 PERMEÁVEIS PRODUZIDOS COM AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS / Mayara da Silva
 Lima. - 2020.
 106 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental,
 Campus Fortaleza, 2020.
 Orientação: Prof. Dr. Marcos Fabio Porto de Aguiar.
 Coorientação: Profa. Dra. Teresa Raquel Lima Farias.

1. Hidrologia. 2. Agregado Reciclado. 3. Drenagem. 4. Escoamento superficial. I. Título.

CDD 628

MAYARA DA SILVA LIMA

ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E HIDRÁULICAS DE PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS PRODUZIDOS COM AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus* Fortaleza, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Aprovado (a) em: 02 / 04 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Fabio Porto de Aguiar (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza

Profa. Dra. Teresa Raquel Lima Farias (Coorientadora)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza

Profa. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto

Universidade Federal do Ceará (UFC)

*Dedico este trabalho à
minha família.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo.

À minha mãe Socorro Ramiro, que nunca poupou esforços para me ajudar, agradeço também pelo amor, paciência e carinho de sempre.

À Haglaene Herculano por todo apoio, incentivo, paciência e compreensão.

Aos professores Teresa Raquel e Marcos Porto pelo apoio imensurável, por compartilharem suas experiências e conhecimentos, por todas as orientações, pela paciência, dedicação, confiança, e por propiciarem meu aprendizado desde a graduação até o presente.

Aos professores do PGTGA pelo conhecimento transmitido durante as aulas.

Ao professor Adeildo Cabral, pela estação pluviométrica cedida e ao aluno Michael, por toda ajuda e suporte com a mesma.

Aos laboratórios e seus respectivos membros das equipes: Laboratórios de Mecânica dos Solos (LMS) e de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE), Matheus, Wagner, Santiago, John, Raíssa, Bruna, Livia e Luan; Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC) da Universidade Federal do Ceará (UFC), Helano, pelo suporte dado na realização dos ensaios.

À ABCP, APODI e ECOCYCLE, pelo apoio com materiais utilizados na pesquisa.

Ao Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) do IFCE e ao Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC), por cederem o laboratório para realização de ensaios.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de pesquisa concedida.

Ao IFCE, que sempre foi uma casa para mim, desde o ensino médio até a pós-graduação.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para mais essa conquista, minha profunda gratidão.

*“O mais importante e bonito, do mundo, é isto: que as pessoas
não estão sempre iguais, ainda não foram terminadas,
mas que elas vão sempre mudando.”*

Grande sertão: veredas

Guimarães Rosa

RESUMO

A urbanização sem planejamento é acompanhada por sérios problemas ambientais e sociais. Geração de resíduos com descartes indevidos e extensas áreas cobertas por concreto e asfalto dificultam a infiltração das águas pluviais no solo, contribuindo para maiores taxas de escoamento superficial e possibilitando a ineficiência da rede de drenagem. O emprego de pavimentos permeáveis pode se apresentar como uma alternativa de medida mitigadora dos problemas citados. Nesta pesquisa foram analisadas as características mecânicas e hidráulicas de concreto permeável fabricado com agregados reciclados e naturais, levando-se em consideração as condições hidrológicas da região. Foram elaboradas cinco dosagens distintas para confecção do concreto permeável: uma primeira com 100% de agregado reciclado (AR); outra com 100% de agregado natural (AN); e outras três com a mistura de ambos em proporções distintas. Foram realizadas análises de resistência à compressão, tração na flexão e análise da condutividade hidráulica com concretos confeccionados. Os corpos de prova fabricados com agregado reciclado não apresentaram valores de resistência à compressão satisfatórios, contudo, corpos de prova produzidos com agregado natural, os quais atenderam ao que é exigido em norma quanto a características mecânicas para pavimentos permeáveis, apresentaram aos 28 dias valor de resistência à compressão de 25,9 MPa e valor de tração na flexão de 2,7 MPa. Quanto às características hidráulicas, todas as placas confeccionadas apresentaram valores satisfatórios em relação à condutividade hidráulica. Além disso, foi confeccionada uma parcela experimental em campo para a avaliação da condutividade hidráulica e da capacidade de infiltração do pavimento permeável submetido a eventos pluviométricos reais. Análises realizadas no pavimento permeável “*in situ*” mostraram que a condutividade hidráulica foi oito vezes menor que a analisada na placa, considerada, contudo, com características de média condutividade hidráulica. No período em que o pavimento foi monitorado, foram registrados 24 eventos pluviométricos. Em apenas um evento, o qual superou 50 mm, foi observado coeficiente de escoamento superficial de 0,16%, demonstrando desempenho eficiente deste no auxílio à redução do escoamento superficial gerado pelas precipitações. Com base nos resultados do estudo, infere-se que o pavimento permeável confeccionado se apresentou como um dispositivo capaz de minimizar taxas de escoamento superficial.

Palavras-chave: Hidrologia, Agregado Reciclado, Drenagem, Escoamento Superficial.

ABSTRACT

Urbanization without planning accompanies serious environmental and social problems. Generation of waste with improper disposal and extensive areas covered by concrete and asphalt hinder the infiltration of rainwater into the soil, contributing to higher rates of runoff and, as a consequence, the drainage network can become inefficient. The use of permeable pavements can present itself as an alternative to mitigate the aforementioned problems. In this research, mechanical and hydraulic characteristics of permeable concrete manufactured with recycled and natural aggregates were analyzed, considering the hydrological conditions of the region. Five different designs were prepared for making the permeable concrete, the first with 100% recycled aggregate (RA), the other with 100% natural aggregate (NA), and three more with the mixture of both in different proportions. Compressive strength, flexural tensile tests and hydraulic conductivity analysis were performed with prepared concrete. The specimens manufactured with recycled aggregate did not present satisfactory compressive strength values; however, specimens produced with natural aggregate met what is required in the standard regarding the mechanical characteristics for permeable pavements, presenting, after 28 days of evaluation, a compression resistance value of 25.9 MPa and a flexion traction strength of 2.7 MPa. As for the hydraulic characteristics, all the manufactured plates presented satisfactory values in terms of hydraulic conductivity. In addition, an experimental plot was made in the field to assess hydraulic conductivity and the infiltration capacity of the permeable pavement subjected to real rainfall events. Analyzes, carried out on the permeable pavement "in situ", showed that the hydraulic conductivity was eight times lower than that analyzed on the plate; it was, however, considered having characteristics of medium hydraulic conductivity. In the period when the pavement was monitored, 24 rainfall events were recorded. In just one event that exceeded 50 mm, a runoff coefficient of 0.16% was observed, demonstrating its efficient performance in helping to reduce runoff generated by rainfall. Based on the results of the study, it appears that the permeable pavement made for this research is as a device capable of minimizing runoff rates.

Keywords: Hydrology, Recycled Aggregate, Drainage, Surface Runoff.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de publicações por ano da base de dados <i>Scopus</i>	4
Figura 2 - Número de publicações por ano da base de dados <i>Web of Science</i>	5
Figura 3 - Alagamento na Av. Francisco Sá, Fortaleza-CE	6
Figura 4 - Alagamento na Av. Bezerra de Menezes, Fortaleza-CE	7
Figura 5 – Alagamento na Av.Oliveira Paiva, Fortaleza-CE	7
Figura 6 – Obstruções no sistema de drenagem (a) e (b)	10
Figura 7 – Pilares do SuDS	12
Figura 8 - Tipos de pavimentos considerados permeáveis	14
Figura 9 - Sistemas de infiltração do pavimento permeável com base em ABNT (2015b).15	
Figura 10 - Pavimentos analisados por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000).....	29
Figura 11 - Processo de beneficiamento do RCD.....	36
Figura 12 – Amostras separadas por granulometria	37
Figura 13 - Fluxograma de processo	41
Figura 14 - Corpos de prova em processo de cura	47
Figura 15 - Análise tátil-visual do concreto	48
Figura 16 – Corpo de prova após rompimento no ensaio de resistência à tração na flexão	50
Figura 17 – Teste de condutividade hidráulica na placa	52
Figura 18 – Análise de condutividade hidráulica no trecho experimental	53
Figura 19 – Localização da parcela experimental	57
Figura 20 – Processo de montagem da parcela experimental.....	58
Figura 21 – Diferença de armazenamento temporário de água em reservatório de pavimento sem inclinação (a) e com inclinação (b); sugestão de configuração da parcela montada com inclinação (c).	59
Figura 22 – Finalização da parcela experimental com forma acoplada para análise do escoamento superficial (a); estação pluviométrica (b).	60
Figura 23 – Esquema da estrutura do pavimento permeável.....	60
Figura 24 - Caracterização visual do agregado reciclado, sendo (a) concreto/argamassa, (b) asfalto, e (c) material cerâmico.....	61

Figura 25 - Curvas granulométricas das amostras.....	62
Figura 26 - Resistência à compressão simples <i>versus</i> tempos de cura.....	69
Figura 27 – Comparação da resistência à compressão dos cinco diferentes traços de concreto para 7, 14 e 28 dias de cura.	70
Figura 28 – Resistência à compressão <i>versus</i> dias de cura.....	72
Figura 29 - Resultados do ensaio de determinação de condutividade hidráulica da placa de concreto permeável.....	73
Figura 30 – Resultados do ensaio de PCC.....	75
Figura 31 – Condutividade hidráulica da parcela experimental ao longo dos dias.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dez maiores registros de chuvas em Fortaleza desde 1974.....	8
Tabela 2 – Principais resultados obtidos pelos autores abordados.....	25
Tabela 3 - Relação Agregado natural / Agregado reciclado.....	38
Tabela 4 – Identificação das amostras utilizadas nos ensaio de resistência à compressão em função de cada norma específica.	50
Tabela 5 - Parâmetros utilizados e intensidades de precipitações obtidas.	56
Tabela 6 – Porcentagens de agregados da mistura, dos agregados reciclados e naturais obtidas no ensaio de granulometria por peneiramento.	62
Tabela 7 - Resultados do ensaio de Abrasão “Los Angeles”	64
Tabela 8 - Valores de massas específicas e de absorção de água do agregado reciclado, da mistura do agregado reciclado com o natural, e do agregado natural.	64
Tabela 9 - Valores de massas unitárias soltas e compactadas e volume de vazios do agregado reciclado, do agregado natural, e da mistura de ambos.	66
Tabela 10 – Teor de absorção de água, índice de vazios, e massas específicas seca e real.	68
Tabela 11 – Valores de resistência à compressão dos cinco diferentes traços de concreto em 7, 14 e 28 dias de cura, expressos em Mpa.....	68
Tabela 12 – Resistência à compressão das peças de concreto permeável (MPa).....	71
Tabela 13 – Relação entre resistência à compressão, índice de vazios e absorção dos CPs.....	77
Tabela 14 – Dados de lâmina escoada, lâmina precipitada, duração do evento e intensidade de precipitação.	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável.	26
Quadro 2 - Relação condutividade hidráulica x grau de permeabilidade.	31
Quadro 3 - Exigências físicas e mecânicas do CP V ARI.	39
Quadro 4 - Descrição dos traços experimentais.	45
Quadro 5 – Consumo de materiais típico de concreto permeável.	46
Quadro 6 - Composição gravimétrica do agregado reciclado	61
Quadro 7 - Valores de massas específicas e de absorção obtidos nos trabalhos de Pereira e Barbosa (2015), Santos (2017), Oliveira (2017), e nesta pesquisa.	65
Quadro 8 - Valores de massas unitárias obtidas nos estudos de Santos <i>et al.</i> (2018), de Santos (2017), de Oliveira (2017) e nesta pesquisa.	67
Quadro 9 - Análise iônica do extrato lixiviado e solubilizado do RCD.	67
Quadro 10 – Condutividades hidráulicas de placas de concretos permeáveis obtidas por outros autores.	74

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland
ACI - American Concrete Institute
AN - Agregado Natural
AR - Agregado Reciclado
ARC - Agregado de Resíduo de Concreto
ARI - Alta Resistência Inicial
ARM - Agregado de Resíduo Misto
ASTM - American Society for Testing and Materials
BMP - Best Managements Practices
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP - Cimento Portland
CREF - Concreto de Referência
DMC - Diâmetro Máximo Característico
EPA - Enviromental Protection Agency
FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
LIP - Low Impact Development
MF - Módulo de Finura
MUC - Massa Unitária Compactada
MUS - Massa Unitária Solta
NBR - Norma Brasileira Regulamentadora
NCAT - Nacional Center for Asphalt Technology
PCC - Permeabilidade à Carga Constante
PCP - Pavimento de Concreto Permeável
PDDF - Plano Diretor de Drenagem de Fortaleza
PDDU - Plano Diretor de Drenagem Urbana
POC - Porous Concrete
RCD - Resíduo de Construção e Demolição
SEINF - Secretaria Municipal de Infraestrutura de Fortaleza
SEUMA - Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente
SUDS - Sustainable Urban Development System

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo geral.....	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	2
1.2	Justificativa	3
1.3	Estrutura da dissertação.....	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1	Estado da arte.....	5
2.2	Urbanização e drenagem urbana.....	6
2.3	Plano de Drenagem Urbana de Fortaleza.....	9
2.4	As melhores práticas de gerenciamento (BMPs), o desenvolvimento Urbano de baixo impacto (LID) e os sistemas urbanos de drenagem Sustentáveis (SUDs).....	11
2.5	Pavimentos permeáveis.....	14
2.6	Concreto permeável.....	17
2.7	Dimensionamento do revestimento permeável.....	26
2.8.	Técnicas de manutenção de pavimentos permeáveis.....	27
2.9	Escoamento superficial em pavimentos.....	29
2.10	Condutividade hidráulica do pavimento permeável.....	31
2.11	Efeito da ilha de calor (Urban Heat Island – UHI).....	32
2.12	Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD).....	33
2.13	Lixiviação e solubilização de resíduos sólidos.....	35
2.14	Equação de intensidade – Duração – Frequência (IDF).....	35
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1.	Materiais.....	37
3.1.1	Agregado reciclado.....	37
3.1.2	Mistura agregado natural e agregado reciclado.....	38
3.1.3	Aglomerante hidráulico.....	39
3.1.4	Aditivo superplastificante.....	40
3.2	Métodos.....	41
3.2.1	Caracterização do agregado.....	41
3.2.2	Estudo da dosagem do concreto permeável.....	45
3.2.3	Caracterização do concreto.....	47

3.2.4	<i>Confecção das placas de concreto.....</i>	52
3.2.5	<i>Análise da condutividade hidráulica da placa e do pavimento “in situ”.....</i>	52
3.2.6	<i>Análise da condutividade hidráulica do solo.....</i>	55
3.2.7	<i>Dimensionamento do reservatório do pavimento permeável.....</i>	55
3.2.8	<i>Precipitação e período de retorno.....</i>	57
3.2.9	<i>Montagem de parcela experimental.....</i>	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
4.1	Composição gravimétrica do Agregado Reciclado.....	62
4.2	Análise granulométrica.....	63
4.3	Desgaste por abrasão Los Angeles do agregado.....	64
4.4	Massa específica e absorção de água dos agregados.....	65
4.5	Massa unitária solta e compactada dos agregados e volume de vazios.....	67
4.6	Análise de lixiviação e solubilização do RCD.....	68
4.7	Absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto.....	69
4.8	Resistência à compressão axial.....	69
4.9	Resistência à tração na flexão.....	73
4.10	Condutividade hidráulica.....	74
4.10.1	<i>Condutividade hidráulica do concreto permeável.....</i>	74
4.10.2	<i>Condutividade hidráulica do solo de implantação do pavimento permeável.....</i>	76
4.10.3	<i>Condutividade hidráulica da parcela experimental.....</i>	76
4.11	Relação entre parâmetros.....	78
4.12	Dimensionamento do reservatório do pavimento permeável.....	78
4.13	Análise do escoamento superficial em parcela experimental.....	79
5	CONCLUSÕES.....	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da urbanização, surge, como consequência, um processo de minimização da condutividade hidráulica de áreas que contribuía com o abastecimento dos lençóis freáticos. O descarte inadequado de resíduos, em conjunto com o aumento de áreas tecnicamente impermeáveis, pode sobrecarregar sistemas de drenagem, influenciando diretamente no aumento do escoamento superficial, e contribuindo para enchentes e inundações no meio urbano. Nesse cenário, faz-se necessário o estudo de alternativas para mitigação desses efeitos.

Os pavimentos permeáveis são utilizados como uma prática de gerenciamento de águas pluviais devido à sua capacidade de infiltrar o escoamento dessas. Ao permitir que a água se infiltre em sua estrutura, trabalham para reduzir o volume de escoamento superficial e melhorar a qualidade da água. A utilização desse dispositivo tem se tornado cada vez mais necessária como medida compensatória para amortecer vazões de pico e atenuar efeitos causados pelas chuvas em áreas densamente urbanizadas (MARCHIONI; BECCIU, 2014; WEISS *et al.*, 2015; ONO; BALBO; CARGNIN, 2017; KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017; RAMA; SHANTHI, 2019; FORTALEZA, 2019).

Nas áreas urbanas onde a condição de superfície é tecnicamente impermeável, a qualidade da água pode ser alterada devido à presença de sedimentos e poluentes que ficam depositados sobre a superfície, e que são transportados aos corpos d'água pelo escoamento oriundo das precipitações (ONO, 2018; MARCHIONI, 2018). O aumento de áreas impermeáveis se apresenta como um dos principais resultados do crescimento urbano, e tem contribuído para catástrofes hídricas através do aumento da velocidade de escoamento superficial e dos picos de cheia (CHOCAT, 1997; NUNES *et al.*, 2017).

Com o crescimento urbano surge também a necessidade de destinação para a alta geração de resíduos oriundos da construção civil. Consoante Pinto (1999), não se observa um total comprometimento com o descarte adequado dos resíduos por parte dos geradores; logo, a problemática reside na sua disposição irregular, resultando em transtornos sociais causados pelas enchentes e danos ao meio ambiente, e representando custos elevados ao poder público e à sociedade.

Logo, duas vertentes ambientais se destacam nas grandes metrópoles: o manejo de águas pluviais e a destinação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Quanto à destinação do RCD, cabe enfatizar a logística reversa que, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), é um conjunto de ações, procedimentos e meios

destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para seu reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos; ou seja, para promover a reutilização do RCD, por vezes descartado de forma inadequada, como agregado reciclado.

Há uma busca por materiais alternativos, pois os agregados naturais estão escassos e são de difícil acesso e exploração no meio ambiente. A utilização de agregados reciclados pode gerar benefícios sociais, ambientais e econômicos. Na pavimentação permeável, sua utilização se configura como medida sustentável, podendo ser uma das alternativas para mitigar os impactos supracitados (RIVZI *et al.*, 2009; PEREIRA; BARBOSA, 2015; FINOCHIARO; GIRALDI, 2017; OLIVEIRA, 2017; SANTOS, 2017). A adição do RCD na composição do concreto permeável propicia uma redução dos impactos ambientais gerados pela construção civil (RIVZI *et al.*, 2009; SANTOS, 2017; OLIVEIRA, 2017; SANTOS *et al.*, 2018).

Dentro desse contexto, nesta pesquisa enfoca-se, por um lado, a possibilidade de utilização de agregados reciclados como alternativa aos agregados convencionais, e, por outro, a necessidade de se desenvolver dispositivos que minimizem o escoamento superficial de águas pluviais. Tem-se como proposta a análise de características mecânicas e hidráulicas de concretos permeáveis fabricados com agregados naturais e reciclados.

1.1. Objetivos

A seguir são apresentados os objetivos e a justificativa da presente pesquisa.

1.1.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar características mecânicas e hidráulicas de pavimentos permeáveis construídos com placas de concreto pré-moldadas, produzidas com agregados reciclados e naturais.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Estudar dosagens de concreto permeável produzidos com agregados do tipo reciclado e natural, avaliando o comportamento destes com base em ensaios hidráulicos e de resistência mecânica.
- Avaliar a eficiência de pavimento permeável na redução do escoamento superficial através de parcela experimental submetida a eventos pluviométricos.
- Contribuir para o estudo de pavimentos permeáveis, da minimização de recursos não renováveis e do desenvolvimento urbano de baixo impacto.

1.2. Justificativa

A indústria da construção civil é uma das mais importantes para o desenvolvimento econômico e social de uma cidade. Contudo, é um dos segmentos que mais causa impactos ao meio ambiente. Entre estes impactos encontra-se um processo de minimização da condutividade hidráulica em áreas que antes contribuía com o abastecimento dos lençóis freáticos, e que, devido à essa minimização, influenciam o aumento do escoamento superficial, e também uma alta geração de resíduos, que por vezes são descartados inadequadamente.

Esta pesquisa busca contribuir, por um lado, com o estudo de pavimentos permeáveis como alternativa para a minimização do escoamento superficial em áreas urbanas, e, por outro, com uma análise dos efeitos gerados pelo crescimento urbano sem planejamento, já que se observa que o número de áreas com baixa condutividade hidráulica tem aumentado, gerando transtornos para a população urbana, tais como enchentes, alagamentos, e efeitos de ilhas de calor. Em relação a este tópico, estudaremos inclusive a viabilidade de materiais reciclados na construção destes pavimentos.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada na divisão dos seguintes capítulos:

No capítulo 1 são apresentadas a introdução, objetivos e justificativa do tema.

No capítulo 2 são apresentadas: a fundamentação teórica (a qual aborda o estado da arte, urbanização e drenagem urbana), o Plano Diretor de Drenagem Urbana de Fortaleza, as melhores práticas de gerenciamento (BMPs), o desenvolvimento urbano de baixo impacto (LID), os sistemas urbanos de drenagem sustentáveis (SUDs), os pavimentos permeáveis e o concreto permeável, e um estudo sobre o dimensionamento do revestimento permeável. São abordadas também técnicas de manutenção dos pavimentos permeáveis, o escoamento superficial e a condutividade hidráulica em pavimentos, o efeito das ilhas de calor, agregados reciclados de RCD, lixiviação e solubilização de resíduos sólidos; e, por fim, uma análise de equações de Intensidade Duração Frequência desenvolvidas para a cidade de Fortaleza.

No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos que foram empregados para a realização dessa pesquisa.

O capítulo 4 descreve e discute os resultados da pesquisa e no capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas e recomendados novos trabalhos que possam dar continuidade à pesquisa. Por fim, são indicadas as referências bibliográficas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo destina-se à revisão de literatura, nele são apresentados conceitos acerca de urbanização e drenagem urbana; são também abordadas definições, pesquisas, e a hidráulica e manutenção de pavimentos permeáveis; por fim, consta nele uma abordagem sobre RCD e sobre a equação de chuva da cidade de Fortaleza-CE.

2.1. Estado da arte

A revisão de literatura constitui a fundamentação teórica desta dissertação, e para isso houve uma pesquisa na base de dados *Scopus* e *Web of Science*, adotando-se como descritores principais a combinação de palavras “*pervious concrete*”. Nas referidas bases de dados é possível se ter acesso a um levantamento estatístico acerca dos resultados encontrados pelas palavras-chave. As Figuras 1 e 2 demonstram qual a quantidade de artigos acadêmicos publicados, em ambas as bases, nos últimos 20 anos.

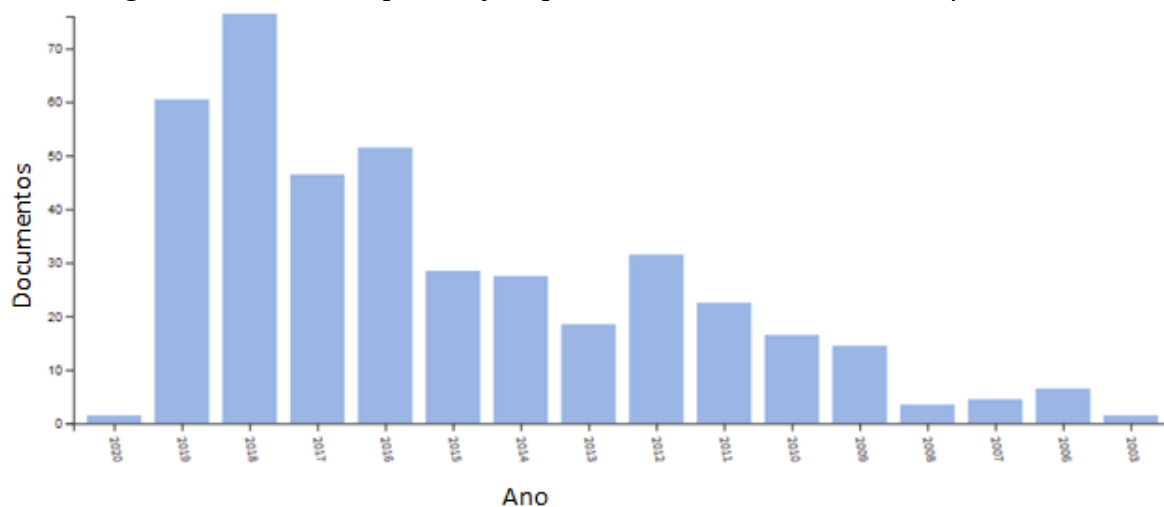


Fonte: Scopus (2020)

Os estudos acerca de concretos permeáveis vêm avançando ao longo dos anos. Infere-se da Figura 1 o leve crescimento destas pesquisas entre 2008 e 2010, assim como entre 2016 e os dias atuais: este levantamento foi realizado em janeiro de 2020, e somente neste mês foram publicados mais trabalhos que no período compreendido entre 2000 e 2005.

Na Figura 2, observa-se a mesma tendência constatada na base de dados da *Scopus*, ou seja, um crescimento de pesquisas relacionadas ao tema ao longo dos anos.

Figura 2 - Número de publicações por ano da base de dados *Web of Science*



Fonte: Web of Science (2020)

Nas referidas bases de dados encontra-se uma análise dos países que mais publicaram trabalhos relacionados ao tema “*pervious concrete*” nos últimos 20 anos. Em ambas as bases os países que mais publicam são Estados Unidos, China, Índia e Canadá, respectivamente. O Brasil aparece em 11º na base de dados *Scopus* e em 12º na *Web of Science*.

2.2. Urbanização e drenagem urbana

O processo de urbanização no Brasil ocorreu de maneira rápida e desordenada ao longo do século XX, influenciado pela migração da população que trocou o meio rural pelas novas oportunidades oferecidas pelas cidades. A falta de planejamento e o crescimento acelerado trouxeram consequências para os centros urbanos, tais como: problemas de saneamento básico e inundações devido à minimização da condutividade hidráulica do solo, poluição ambiental, entre outros (BATEZINI, 2013).

Como consequência do desenvolvimento de uma região aumenta-se a demanda por infraestrutura, habitações, transporte e drenagem. Em virtude disso, há um maior consumo de recursos naturais, concordando com mais áreas impermeáveis (OLIVEIRA, 2017). Em geral, uma área impermeabilizada gera cerca de sete vezes mais vazão que uma área não impermeabilizada, e pode ocorrer deterioração da qualidade da água superficial e subterrânea, devido ao carreamento de sedimentos pelo escoamento das águas (TUCCI, 2002). Os primeiros 25 mm de escoamento superficial geralmente transportam grande parte da carga poluente de origem pluvial (SHUELLER, 1987).

Esse desenvolvimento, através de áreas impermeáveis, altera as características de volume e qualidade do ciclo hidrológico, reduzindo a infiltração e a evapotranspiração, e

podendo direcionar a maior parte da água da chuva para o sistema de drenagem. Isso traz, como resultado final, o aumento das enchentes urbanas e a degradação da qualidade das águas pluviais (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; TUCCI, 2002; MARCHIONI, 2018).

Ratificado por Tucci (1997), quando as cidades crescem, há várias consequências indesejadas para o sistema de drenagem urbana (devidas a inúmeros fatores), tais como: aumento das vazões máximas, dos volumes escoados; rebaixamento do lençol freático; aumento da produção de sedimentos devido à desproteção das superfícies e à produção de resíduos sólidos; e a deterioração da qualidade da água, como consequência do carreamento de material sólido (principalmente no início das chuvas).

A drenagem urbana tem sido desenvolvida com o princípio de drenar a água das precipitações o mais rápido possível da montante para a jusante, produzindo aumento da frequência e magnitude das enchentes. Além disso, o carreamento de sedimentos causa deterioração da qualidade da água (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; MARCHIONI, 2018).

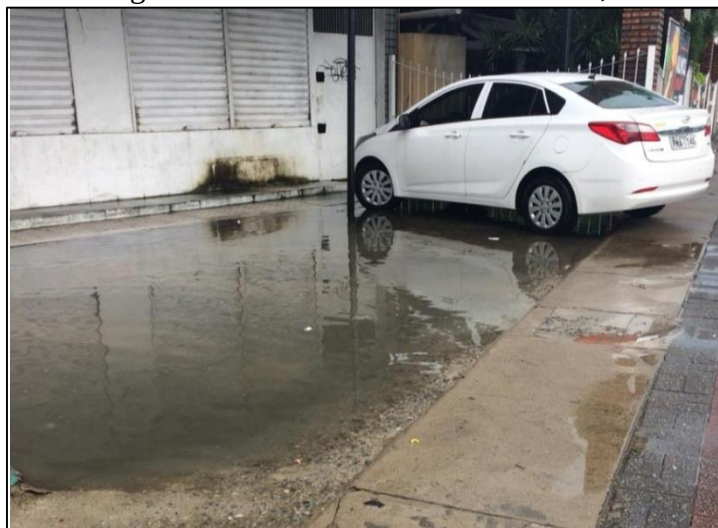
Em pesquisa de campo foram registradas, de acordo com as Figuras 3, 4 e 5, áreas da cidade de Fortaleza-CE onde há acúmulo de águas pluviais, logo após eventos, formando pequenas poças e alagamentos, o que demonstra, assim, a necessidade de implementação de políticas públicas mitigadoras deste problema social.

Figura 3 - Alagamento na Av. Francisco Sá, Fortaleza-CE



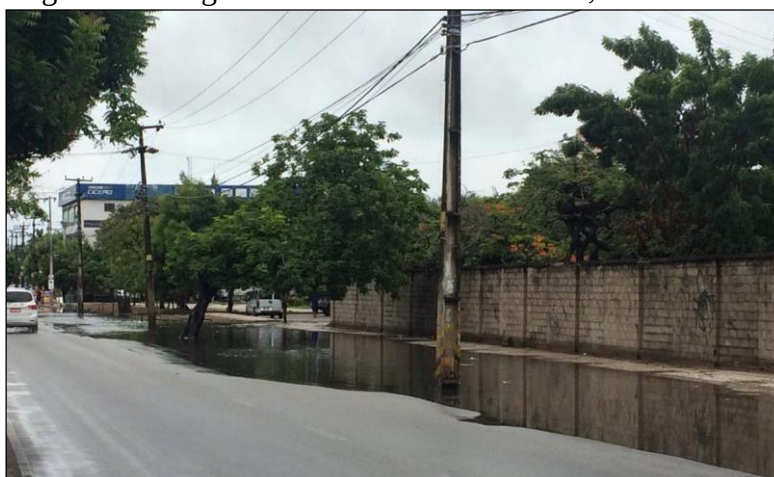
Fonte: Autora (2020)

Figura 4 - Alagamento na Av. Bezerra de Menezes, Fortaleza-CE



Fonte: Autora (2020)

Figura 5 – Alagamento na Av.Oliveira Paiva, Fortaleza-CE



Fonte: Autora (2020)

Consoante FUNCEME (2019), a precipitação média obtida no dia dos alagamentos das Figuras 3 e 4 foi de 53,2 mm (coletada no dia 06 de março de 2019 no posto do Pici). Já a precipitação dos alagamentos da Figuras 5 (obtida em 14 de dezembro de 2018 e coletada no posto do Castelão) foi de 24,6 mm.

Salienta-se que o pavimento permeável em estudo é adequado para o tráfego de pedestres. Contudo, ele pode exercer influência nos demais pavimentos localizados nas proximidades, como áreas de contribuição no volume de descarga de drenagem.

Está disponível em FUNCEME (2019) uma lista dos dez maiores eventos de precipitações pluviométricas que ocorreram na cidade de Fortaleza desde 1974 (Tabela 1), data em que começou a série histórica.

Tabela 1 – Dez maiores registros de chuvas em Fortaleza desde 1974

Data de ocorrência do evento	Total acumulado de chuva (mm)
29.01.2004	250,0
27.03.2012	197,5
20.03.1988	189,0
29.01.2004	180,6
07.03.2004	173,8
29.01.2004	170,3
02.06.1977	168,0
07.03.2004	162,5
24.04.1997	162,0
21.03.1981	161,6

Fonte: FUNCEME (2019)

Infere-se que as maiores precipitações pluviométricas se concentram nos primeiros meses do ano. Ainda de acordo com FUNCEME (2019), a maior precipitação registrada em Fortaleza desde 1974 ocorreu em 2004, com precipitação de 250 mm.

Conforme *United States Environmental Protection Agency – EPA* (2003), a urbanização dos espaços naturais altera o ciclo hidrológico e gera um grande volume de escoamento superficial, o qual pode inclusive equivaler a mais de cinco vezes o volume produzido em uma área correspondente florestada. Consequentemente, sem a cobertura vegetal necessária, compromete-se a conservação dos recursos hídricos, visto que há aumento de sedimentos carregados e elevação da temperatura da água, assim como a redução da infiltração da água pluvial no solo e o aumento de poluentes transportados.

Além dos impactos supracitados, enfatiza-se, ainda, o efeito das ilhas de calor, que ocorrem devido às extensas áreas impermeáveis. Para Tucci (2002), as superfícies impermeáveis absorvem parte da luz solar, aumentando a temperatura ambiente e produzindo ilhas de calor nos centros urbanos. O aumento da temperatura cria condições de movimento de ar que podem gerar o aumento de precipitações na região.

2.3. Plano Diretor de Drenagem Urbana de Fortaleza

As inundações e enchentes, principalmente nas cidades brasileiras, são um processo provocado, em geral, pela falta de planejamento da ocupação urbana. O custo do controle deste processo é muito alto quando o desenvolvimento já está implantado. A medida preventiva de controle a partir da qual os custos são reduzidos é a do Plano Diretor de Drenagem Urbana (TUCCI, 1997).

O município de Fortaleza possui um Plano Diretor de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas (FORTALEZA, 2015), o qual foi elaborado em conjunto com equipes da Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente de Fortaleza (SEUMA), da Secretaria Municipal de Infraestrutura de Fortaleza (SEINF) e da Defesa Civil.

De acordo com Fortaleza (2015), a infraestrutura de microdrenagem no Brasil é reconhecida como sendo da competência dos municípios. Cabe a eles definir as ações no setor. Contudo, os governos estaduais, na medida em que crescem de relevância as questões de macrodrenagem (cuja referência fundamental para o planejamento são as bacias hidrográficas), também exercem influência nas decisões. Portanto, é de competência da administração municipal os serviços de infraestrutura urbana básica relativos à microdrenagem e serviços correlatos.

O objetivo do Plano Diretor de Drenagem de Fortaleza (PDDEF) é o de oferecer diretrizes gerais que auxiliem na gestão das águas pluviais, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da cidade, e, mais especificamente, para a realização de diagnósticos do sistema de microdrenagem. Estes diagnósticos apontam as principais causas de alagamentos na cidade e seus pontos críticos. Também são realizados prognósticos que compreendem medidas de controle não estruturais e estruturais (FORTALEZA, 2015). O PDDEF indica as principais dificuldades e possíveis causas dos alagamentos do sistema de drenagem:

- Obstrução da rede por detritos, lixos e sedimentos, sendo esta a maior causa dos pontos de alagamento na cidade;
- Ocupação desordenada, inclusive nas áreas das margens de corpos hídricos, que ocasionam inundações constantes;
- O processo de crescimento acelerado experimentado em Fortaleza entre os anos de 1970 e 2000, sem que a infraestrutura urbana tenha sido ampliada de forma a suportar o adensamento da cidade;
- A modificação (pela ação antrópica) do caminho das águas drenadas pela hidrografia citada, associada ao processo de urbanização do curso natural, impondo a necessidade de soluções de drenagem;
- A ampliação das redes de abastecimento de água, esgoto e telefonia de forma independente, quando não ordenada e sem que haja articulação com a prefeitura, danificando as galerias. Isso, por vezes, obstrui o sistema de drenagem, pois essas

intervenções seccionam em alguns pontos as galerias, diminuindo sua área e dificultando o escoamento das águas.

Na Figura 6 são mostradas obstruções no sistema de drenagem de Fortaleza: (a) interferência de redes externas nas galerias de drenagem e (b) obstruções das redes por resíduos sólidos.

Figura 6 – Obstruções no sistema de drenagem (a) e (b)



(a) Interferência de redes externas nas galerias de drenagem

(b) Obstruções das redes por resíduos sólidos

Fonte: Fortaleza (2015)

Na formulação de alternativas que atendam aos sistemas de drenagem, Fortaleza (2015) considerou medidas estruturais e não estruturais. Os métodos estruturais consistem na criação de estruturas integrantes dos sistemas de drenagem, e estão relacionados aos aspectos físicos desses sistemas. Já as medidas não estruturais relacionam-se à educação e conscientização ambiental da população, à limpeza e manutenção dos canais naturais e dos dispositivos de drenagem, à análise da qualidade dos corpos hídricos e seu monitoramento, assim como ao cumprimento dos aspectos legais quanto ao uso e ocupação do solo, à disposição e destinação dos resíduos sólidos e ao lançamento de efluentes.

É de fundamental importância que, além de medidas tomadas pela iniciativa pública para manter o sistema de drenagem funcionando, também haja conscientização da população em geral quanto aos despejos irregulares de resíduos, uma vez que estes fatores são relevantes na obstrução do sistema de drenagem.

2.4. As melhores práticas de gerenciamento (BMPs), o Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (LID), e os Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentáveis (SuDS)

As melhores práticas de gerenciamento (BMPs - *Best Management Practices*) são métodos que foram determinados como os meios mais eficazes e práticos de prevenir ou

reduzir a poluição não pontual da fonte e, assim, ajudar a alcançar as metas de qualidade da água. O BMPS inclui medidas para prevenir e mitigar a poluição (Marchioni, 2018).

Consoante Nunes *et al.* (2017), a drenagem urbana sustentável dispensa a ideia do rápido afastamento das águas pluviais, e foca em condições que aumentam o tempo de concentração da bacia com o uso de técnicas de armazenamento e infiltração. Este novo conjunto de técnicas integradoras evoluiu das BMPs e traduz o conceito do Desenvolvimento de Baixo Impacto (*Low Impact Development* – LID).

De acordo com Marchioni (2018), a Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (EPA) classificou os pavimentos permeáveis como pertencentes às BMPs, e como uma das soluções sustentáveis para a drenagem urbana (a qual atua tanto na redução da impermeabilização das cidades como na redução da poluição).

Souza, Cruz e Tucci (2012) afirmam que o Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (LID) surgiu na década de 80 como uma estratégia de manejo de águas por meio do emprego de planejamento multidisciplinar integrado a práticas de tratamento e controle em pequena escala para minimizar o comportamento hidrológico natural. De acordo com Souza, Cruz e Tucci (2012), a estratégia avançou principalmente no manejo de águas pluviais, apresentando ênfase na utilização de ecossistemas naturais como infraestrutura, por meio de conservação e aproveitamento de características de solo e vegetação. Aplicações desta abordagem são encontradas em muitas regiões dos Estados Unidos, no Canadá e na Europa, sendo capazes de atender aos critérios estabelecidos em certificações ambientais para edificações.

O LID busca a conservação qualiquantitativa de processos hidrológicos, ao mitigar efeitos da ação antrópica pelo desenvolvimento de paisagens multifuncionais que considerem planejamento hidrológico, prevenção à poluição e preservação de recursos naturais. O diferencial da estratégia de LID encontra-se na integração com outros setores de interesse da sociedade via planejamento da bacia, assim como no empreendimento e aplicação de dispositivos de manejo integrado, viabilizando perturbação mínima de processos naturais e provimento de amenidades à população (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012).

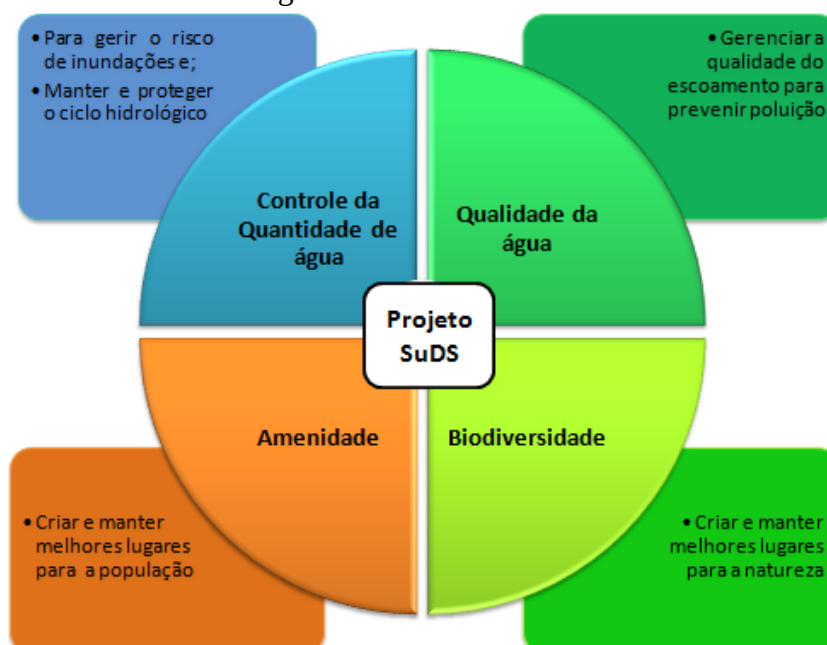
Marchioni (2018) enfatiza que os sistemas de drenagem urbana atuais compreendem dois subsistemas principais: o sistema de drenagem inicial, ou micro drenagem, e sistemas de macrodrenagem, responsáveis por direcionar e controlar o escoamento de águas pluviais, tendo como objetivo dissipar o escoamento superficial de sua geração apenas com a transferência para a jusante.

Até os anos 70, de acordo com Tucci (2005), vivia-se a fase higienista no gerenciamento urbano das águas, na qual estas eram consideradas um risco para a saúde. Acreditava-se que deveriam ser transportadas para longe de sua fonte. Após os anos 70, foi observada a necessidade de mudar essa abordagem e de gerenciar as inundações, além da necessidade de promover o tratamento da água, sendo esta, portanto, uma fase corretiva. Já na década de 90 iniciou-se o momento de uma filosofia sustentável, a qual orienta um planejamento da ocupação do espaço urbano: são obedecidos os mecanismos naturais de escoamento, o controle da poluição e o desenvolvimento sustentável do escoamento pluvial por meio da recuperação da infiltração. Esta fase prolonga-se até os dias atuais.

Para Ballard *et al.* (2015), é de fundamental importância manter a condição de drenagem, após desenvolvimento urbano, o mais próximo possível do escoamento natural dos solos, essa prática é comumente conhecida como SuDS (Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentáveis), BMPs de águas pluviais ou LID de águas pluviais. O objetivo dessas medidas é minimizar os impactos da urbanização, atuando na quantidade e na qualidade do escoamento superficial, e promovendo melhorias para a população e biodiversidade.

Os SuDS são projetos que auxiliam no gerenciamento de águas superficiais. De acordo com Ballard *et al.* (2015), existem quatro categorias principais de benefícios que podem ser alcançados pelo SuDS (Figura 7):

Figura 7 – Pilares do SuDS



Fonte: Adaptado de Ballard *et al.* (2015)

O controle da quantidade de água escoada é fundamental para gerir o risco de inundações e manter e proteger o ciclo da água. Monitorar a qualidade da água que escoar é importante para prevenir poluições difusas. Ballard *et al.* (2015) ainda trazem, nos chamados quatro pilares do SuDS, a relevância de se criar e manter melhores lugares para as pessoas e para a biodiversidade.

De acordo com Vasco (2016), a filosofia SUDS é aplicada em diversos países, os quais, devido aos custos onerosos originados pelas inundações, manutenção e construção de sistemas de drenagem de grandes dimensões para servir a grandes áreas impermeabilizadas, necessitaram de outra abordagem na temática da drenagem urbana. Destacam-se nesse sentido a utilização de dispositivos mitigadores dos impactos citados, como os telhados verdes, trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis, que têm como objetivo o combate à taxa de impermeabilização em meio urbano.

2.5. Pavimentos Permeáveis

Acioli (2005) relata que, em 1987, após várias pesquisas e descobertas acerca das técnicas e vantagens da pavimentação permeável, esse dispositivo passou a ser muito utilizado em vias, calçadas e praças. Por conhecerem cada vez mais os benefícios gerados pelos pavimentos permeáveis, países começaram a utilizá-los em maior escala. No Japão, devido à alta população, o pavimento passou a ser utilizado para ajudar na drenagem e escoamento na fonte. Na América Latina, o Chile foi o pioneiro no uso deste material drenante.

O termo pavimento aplica-se, de forma genérica, a qualquer tratamento ou cobertura da superfície que tem como finalidade suportar qualquer tipo de tráfego (VIRGILIIS, 2005). Permeabilidade é a propriedade que identifica a possibilidade de passagem de água através do material (TARTUCE; GIOVANETTI, 1990).

O pavimento permeável é aquele que possui espaços livres em sua estrutura e condutividade hidráulica significativamente elevada, de maneira a possibilitar a infiltração de volumes de precipitações. Minimiza-se assim o escoamento superficial, e reduz-se as solicitações do sistema de drenagem urbana (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; FERGUSON, 2005; VIRGILIIS, 2005; GONÇALVES; OLIVEIRA, 2014; MARCHIONI; BECCIU, 2014; OLIVEIRA, 2017; FORTALEZA, 2019).

A água que infiltra o pavimento permeável pode ser desviada (através de uma superfície permeável) para dentro de um reservatório de pedras localizado sob a superfície do terreno. A água, ao atingir a base de brita, ou se infiltra no solo ou é encaminhada para o

sistema de drenagem (URBONAS; STAHLRE, 1993). A capa de revestimento permeável age como um conduto rápido para que o escoamento chegue ao reservatório de brita, onde pode posteriormente infiltrar-se no subsolo ou ser coletada por tubos de drenagem. Dessa forma, a capacidade de armazenamento do pavimento é definida pela espessura do reservatório de britas (ARAÚJO *et al.*, 2000).

Usualmente, os sistemas permeáveis de pavimentação são compostos por pavimentos porosos (de concreto ou asfalto) ou por blocos de concreto (vazados ou não) (URBONAS; STAHLRE, 1993; ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; TENNIS; AKERS; LEMING, 2004; GONÇALVES; OLIVEIRA, 2014; ONO; BALBO; CARGNIN, 2017).

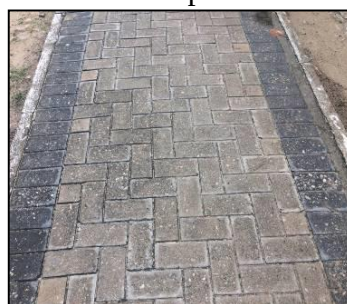
Tennis, Akers e Leming (2004) citam importantes aplicações de pavimentos permeáveis no cotidiano, tais como em: pavimentos de tráfego leve, calçadas, estacionamentos e parques aquáticos, entre outras aplicações. Outra considerável característica dos pavimentos permeáveis é a propriedade de minimizar os efeitos das ilhas de calor, já que possuem a capacidade de armazenar água temporariamente.

Na Figura 8 são apresentadas algumas superfícies consideradas permeáveis por Uribonas e Stahlre (1993), Pinto (2011) e ABNT (2015b), sejam elas: paralelepípedos intertravados (a), blocos intertravados (b), blocos vazados de concreto (c) e placa de concreto permeável (d), objeto deste estudo.

Figura 8 - Tipos de pavimentos considerados permeáveis



(a) Paralelepípedos



(b) Blocos intertravados



(c) Blocos vazados



(d) Concreto permeável

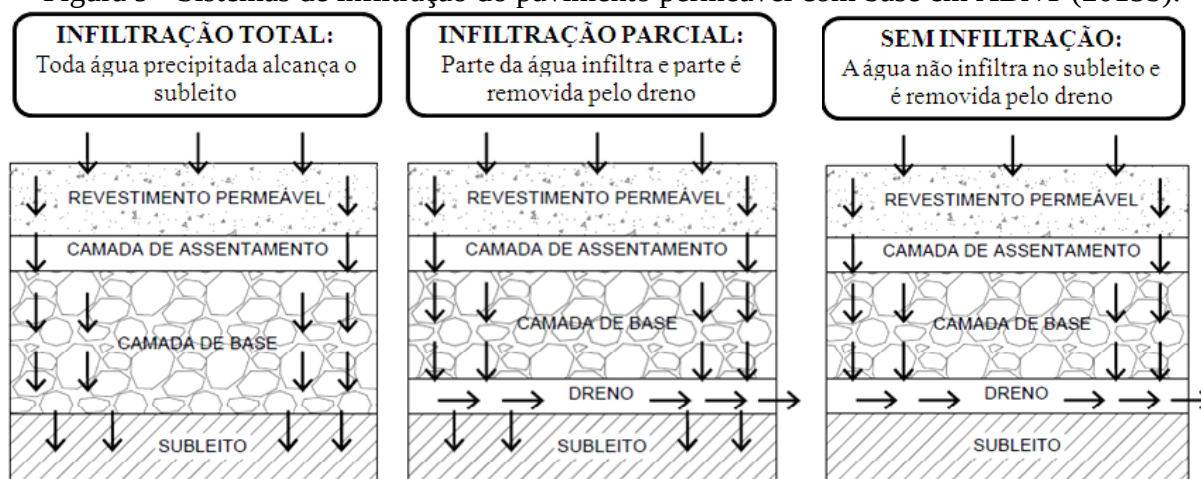
Fonte: Autora (2020)

Em uma abordagem sustentável, a tendência atual é buscar a manutenção dos pavimentos a partir de elementos que permitam a infiltração de água e retardem seu escoamento. Desta forma, os pavimentos permeáveis têm se tornado um elemento de papel fundamental, por reduzirem os volumes de escoamento superficial e o impacto sobre a qualidade da água (GONÇALVES; OLIVEIRA, 2014; MARCHIONI; BECCIU, 2014).

O município de Fortaleza possui uma cartilha de boas práticas para calçadas, na qual são indicados os materiais mais adequados para utilização em calçadas, entre eles: ladrilho hidráulico, concreto moldado “*in situ*”, piso intertravado de concreto e piso de concreto permeável. Fortaleza (2019) ressalta a importância de se usar pisos de concretos permeáveis e cita suas principais funções, tais como a de possibilitar o escoamento da água para o solo por meio de seus poros, ajudando na prevenção de enchentes, o que, consequentemente, previne também impactos ambientais.

De acordo com ABNT (2015b), os pavimentos permeáveis podem ser classificados de três maneiras em relação à infiltração de água precipitada: pavimentos permeáveis com infiltração total, com infiltração parcial e sem infiltração (Figura 9). A escolha do sistema de infiltração depende das características do solo ou de condicionantes de projeto.

Figura 9 - Sistemas de infiltração do pavimento permeável com base em ABNT (2015b).



Fonte: Elaborada com base em ABNT (2015b)

Nos pavimentos com infiltração total, toda água precipitada alcança o subleito. Aqueles considerados com infiltração parcial têm parte da água infiltrada e parte removida pelo dreno. Já os pavimentos permeáveis sem infiltração são aqueles em que a água não infiltra no subleito e é totalmente removida pelo dreno.

Shakir (2019) cita quais os benefícios dos pavimentos permeáveis:

- 1) Reduzem a poluição da superfície.
- 2) São uma aplicação importante dos edifícios sustentáveis em seu papel de preservar a qualidade da água que pode ser reciclada.
- 3) Reduzem a necessidade de tanques de sedimentos, bueiros, sistemas de gestão de águas pluviais e controle de inundações.
- 4) Reduzem o efeito das ilhas de calor e a reflexão da luz.
- 5) Possibilitam a recarga de águas subterrâneas para aumentar os períodos de uso de aquíferos.
- 6) Reduzem o ruído causado pelos pneus, já que parte do som é transferida para dentro do concreto.
- 7) São usados para reduzir a temperatura da atmosfera devido à evaporação através da camada permeável.

É de fundamental importância que a superfície de infiltração do pavimento poroso tenha condutividade hidráulica maior que a intensidade de precipitação pluviométrica (ONO, 2018). A melhor forma de avaliar o desempenho de um pavimento permeável e garantir que ele irá contribuir com a diminuição do escoamento superficial de água, problema típico de áreas com baixa condutividade hidráulica, é medindo a velocidade de infiltração de um volume conhecido de água, ou seja, determinando-se a sua condutividade hidráulica (MARCHIONI; SILVA, 2018).

2.6. Concreto Permeável

Desde o surgimento do concreto buscava-se inovações que melhorassem sua resistência. Segundo Acioli (2005), foi por meio dessas buscas que na França, entre os anos 1945-1950, se desenvolveu o concreto permeável. Em decorrência do pós-guerra e do crescimento populacional global, as drenagens existentes foram sobrecarregadas. Segundo Li (2009), o uso do concreto permeável teve início há mais de 150 anos, embora a sua real aplicação para as mais diversas finalidades somente veio a apresentar grande avanço há pouco mais de 20 anos, principalmente nos EUA.

Apesar de o concreto permeável já ser amplamente conhecido e utilizado pelo mundo, foi em 2006 que se fez a maior obra com este material no território brasileiro, em Minas Gerais, no Parque Tecnológico de Belo Horizonte, cuja pavimentação foi toda construída em concreto permeável. A obra foi realizada como uma tentativa de diminuir os riscos de inundações, assim como para alimentar as nascentes do Parque (HOLTZ, 2011).

O termo "concreto permeável" é usado para designar concretos com altos índices de vazios interligados entre si, os quais permitem, assim, a passagem de fluidos (devido à sua elevada condutividade hidráulica). Também chamado de concreto sem finos, deve ser pouco adensável, de modo que a pasta de cimento não escorra para o fundo. Um dos métodos para obtenção de tal configuração é o de retirar ou reduzir significativamente o agregado miúdo do concreto, de modo a apresentar praticamente nenhuma quantidade de finos na mistura (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; FERGUSON, 2005; ACI, 2010; PEREIRA; BARBOSA, 2015; OLIVEIRA 2017; CLAUDINO 2018).

Esse tipo de concreto possui baixos valores de coesão, e, por não haver ensaios específicos de trabalhabilidade, apenas visualmente é possível avaliar se a camada de revestimento é adequada. É considerado material de construção sustentável, uma vez que reduz o escoamento superficial das águas pluviais, melhora a qualidade da água de recarga do lençol freático, e pode minimizar impactos do crescimento urbano (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; FERGUSON, 2005; ACI, 2010; PEREIRA; BARBOSA, 2015; OLIVEIRA 2017; CLAUDINO 2018).

O concreto permeável apresenta menor peso específico quando comparado ao concreto convencional, devido à dosagem que dispensa ou reduz consideravelmente o uso de agregados miúdos e ao tipo de compactação (OLIVEIRA, 2017). De acordo com ACI (2010), para que uma amostra seja considerada porosa, ela deve ter entre 15% e 35 % de seu volume ocupado por vazios; estipula-se, contudo, uma tolerância de 5%. Já para Batezini (2013), o concreto permeável é considerado como de baixa porosidade quando apresenta valores de índice de vazios abaixo de 15%, e de alta porosidade quando os resultados estão acima de 30%. Para Marchioni (2019), um concreto permeável com porosidade no intervalo de 15% a 30% apresentará um bom desempenho hidráulico. Alguns autores recomendam que os vazios apresentados pelos concretos porosos devem observar o intervalo de 15% a 25% (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; ACI, 2006; HOLTZ, 2011; BECHARA, 2017).

Consoante Oliveira (2017), o tempo de aplicação do concreto permeável é bastante reduzido, pois sua mistura já apresenta pouca quantidade de água e seus vazios potencializam a evaporação, do que se infere que a trabalhabilidade do concreto permeável é menor que a do concreto convencional. Segundo ACI (2006), sua aplicação deve ocorrer em até 60 minutos, podendo ser prolongada para 90 minutos, através do emprego de aditivos retardadores de pega.

A compactação afeta propriedades do concreto permeável. A insuficiência dela pode provocar a baixa da resistência, bem como tornar a superfície do concreto desalinhada, com

heterogeneidade de rugosidade (OLIVEIRA, 2017). Já o excesso de compactação pode diminuir a condutividade hidráulica do concreto, diminuindo o índice de seus vazios e ocasionando o corrimento da pasta de cimento para o fundo do elemento. Isso resulta na desagregação dos materiais (SCHAEFER; KEVERN; WANG, 2011).

Suleiman (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. Observou que o adensamento com maior intensidade também ocasiona a diminuição dos índices de vazios, assim como o aumento das resistências do Pavimento de Concreto Permeável (PCP). Já o adensamento mal realizado pode precipitar a degradação do pavimento.

Segundo Ferguson (2005), a alta porosidade deste concreto diminui sua resistência. A relação entre a quantidade de finos e a resistência à compressão é diretamente proporcional: quanto menor a quantidade de finos, menor será o valor da compressão. Para Yang *et al.* (2008), os finos preenchem os espaços entre o agregado graúdo e a pasta de cimento, melhorando a ligação entre os agregados, e aumentando a resistência do concreto poroso. Por outro lado, o uso de material fino diminui os vazios e bloqueia a comunicação entre os poros, diminuindo a condutividade hidráulica (que é a principal propriedade desse material).

Rizvi *et al.* (2009) analisaram algumas porcentagens de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto (0%, 15%, 30%, 50% e 100%) em dosagem de concreto permeável. O objetivo da pesquisa foi determinar a porcentagem ideal de agregados reciclados que pode ser adicionada nesta dosagem, mantendo o desempenho estrutural e capacidades de drenagem do concreto permeável. Os autores realizaram testes de resistência à compressão e de condutividade hidráulica para este fim.

Rizvi *et al.* (2009) obtiveram como resistência à compressão (MPa), aos 48 dias de cura para as proporções 0%, 15%, 30%, 50% e 100%, respectivamente, 9,76; 9,20; 7,14; 7,73 e 5,53. Os autores verificaram 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; já para os demais, os autores obtiveram resultados até 56% menores em comparação à amostra referência.

Acerca da condutividade hidráulica, as amostras com 15% de substituição apresentaram valores semelhantes à dosagem na qual se utilizou apenas agregados naturais. Os autores enfatizaram que as taxas de condutividade hidráulica medidas para as amostras de 0% e 15% de substituição foram suficientes para lidar com a chuva no sul de Ontário –

Canadá. As demais amostras apresentaram maiores taxas de condutividade hidráulica; no entanto, substituições acima de 15% afetaram negativamente a resistência à compressão das amostras e, portanto, diminuíram a capacidade de carga.

Pereira e Barbosa (2015) desenvolveram concreto permeável produzido com RCD da região de Campinas - São Paulo, analisando suas propriedades mecânicas e hidráulicas. As autoras estudaram seis diferentes composições de concreto permeável, variando o tipo de agregado graúdo, em proporções de substituição parcial em 10%, 20% e 40% do agregado natural pelo (RCD), com uma relação água/cimento (a/c) de 0,3, e, posteriormente, variando a relação a/c de 0,3 para 0,5 em uma dosagem de referência, levando apenas agregado natural e em dosagem com substituição de 20% de RCD.

As autoras obtiveram valores de resistência à compressão para as amostras entre 10 MPa e 20 MPa. A condutividade hidráulica, que foi determinada através do método do permeâmetro à carga constante, variou entre $1\text{E-}03$ m/s e $1,2\text{E-}03$ m/s. As misturas com a/c de 0,3 possuem condutividade hidráulica superior em relação às misturas de a/c de 0,5. As autoras observaram que, com o aumento da relação a/c, é obtida uma maior variação na condutividade hidráulica do concreto permeável desenvolvido.

Oliveira (2017) analisou a condutividade hidráulica e a colmatação em concretos permeáveis produzidos com agregados reciclados de concreto. Inicialmente, foram determinadas as características dos agregados reciclados (AR) e agregados naturais (AN) utilizados. Na sequência, foram elaboradas três dosagens de concreto permeável, o primeiro utilizando apenas agregados naturais e com 15% e 20% de substituição do AN pelo AR.

A faixa granulométrica utilizada pela autora variou entre 19 mm e 2,4 mm. Oliveira (2017) observou que o agregado natural se apresentou com características próximas às do agregado reciclado. A característica que mais diverge entre os agregados naturais e os reciclados é a capacidade de absorção de água. A autora obteve para o AN uma absorção de 1,18%, enquanto que para o AR foi na ordem de 6,58%.

Oliveira (2017) ressaltou que, mesmo após a lavagem, o AR apresentou mais poros que o AN devido à presença de argamassa aderida às faces dos agregados, o que, geralmente, resulta em uma redução do coeficiente de permeabilidade e no aumento da resistência à compressão. A autora determinou resistência à compressão do concreto permeável desenvolvido em sua pesquisa aos 07 e 28 dias, analisando um total de 12 amostras. Obteve, para o concreto elaborado somente com agregados naturais (CREF), valor em torno de 12 MPa; para o concreto desenvolvido com 15% de agregado reciclado (C15), um valor em torno de 13 MPa; e para o concreto com 20% de agregado reciclado (C20), 14 MPa.

Oliveira (2017) concluiu que os valores obtidos aos 7 dias de idade apresentaram resultados que demonstraram que o emprego de 15% e 20% de substituição do AN pelo AR 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 ensaio de resistência de tração na flexão foi realizado com 28 dias de idade. A autora obteve como resultado para o CREF um valor de resistência à tração de 2,50 MPa, para o C15 um valor de 2,75 MPa, e para o C20, 2,00 MPa. 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.

Oliveira (2017) concluiu que o resultado de resistência à tração na flexão da mistura C20 apresentou valores 28% menores quando comparado ao C15. A autora concluiu que a composição do AR pode influenciar de maneira significativa a resistência à tração na flexão do concreto permeável. Para as três dosagens analisadas por Oliveira (2017), a condutividade hidráulica obtida foi em torno de $1,4E-03$ m/s.

Para compensar os impactos da urbanização no ciclo hidrológico, são propostas medidas de controle localizadas e de pequena escala, as quais promovem aumento da infiltração e do armazenamento. Nunes *et al.* (2017) aplicaram técnicas compensatórias no controle do escoamento superficial em um loteamento residencial em Jacarepaguá, no Rio de Janeiro. Seu objetivo era o de avaliar o impacto da adoção destas técnicas, as quais promovem o aumento da capacidade de infiltração e retenção das águas pluviais.

A metodologia utilizada pelos autores envolveu a caracterização da área do loteamento, o cálculo das vazões do escoamento superficial pelo método racional, e o dimensionamento das técnicas compensatórias pelo método da curva envelope para três cenários: (1) sem intervenção, (2) com implantação de trincheira de infiltração, e (3) com implantação de trincheira de infiltração e pavimento permeável.

As técnicas compensatórias utilizadas por Nunes *et al.* (2017) foram: pavimento poroso e trincheiras de infiltração (estruturas lineares que armazenam a água precipitada por tempo suficiente para sua infiltração no solo) - este dispositivo contribui para a redução do escoamento superficial, favorecendo a minimização de ocorrências de inundações.

Os resultados de Nunes *et al.* (2017) indicaram vazões de 440, 200 e 30,2 l/s para os cenários 1, 2 e 3, respectivamente. Os valores obtidos demonstraram que somente a adoção das trincheiras de infiltração não seria totalmente efetiva na redução dos escoamentos superficiais, sendo a combinação das trincheiras de infiltração e a adoção de pavimento

permeável a mais efetiva. Os resultados evidenciam a importância da utilização das técnicas compensatórias de drenagem na gestão das águas pluviais, visto que estas técnicas reduzem significativamente o valor do volume superficial escoado.

Claudino (2018) avaliou propriedades do concreto permeável para a realidade cearense utilizando insumos locais. A granulometria utilizada foi na faixa de 4,8 mm a 19 mm. O autor confeccionou corpos de prova de concreto permeável para análise de resistência mecânica e placas para análise da condutividade hidráulica. O traço utilizado foi 1:4 com 5% de agregado miúdo e um fator a/c de 0,4. Como resultado, foi obtido, aos 28 dias de cura do corpo de prova, resistência à compressão de 12,80 Mpa; e como resultado de resistência à tração na flexão, 1,37 MPa. A condutividade encontrada foi de $1,8E-2$ m/s.

Claudino (2018) concluiu que o concreto permeável, constituído por insumos cearenses, apresenta elevado potencial de auxiliar a drenagem urbana dos municípios locais. Segundo o autor, com a diminuição do escoamento superficial, o concreto permeável pode, inclusive, amenizar os danos causados pelas inundações urbanas.

Santos *et al.* (2018) desenvolveram uma pesquisa sobre o comportamento mecânico do concreto a partir da utilização de RCD como agregado graúdo. Segundo os autores, um destino viável para o reaproveitamento do RCD é a sua utilização na substituição do agregado natural como matéria-prima para confecção de concreto, camadas de base e sub-base, camadas de pavimentos, entre outros. O objetivo do trabalho dos autores foi o de avaliar, através de ensaios de resistência à compressão e absorção de água, o comportamento mecânico do concreto ao utilizar-se RCD como agregado graúdo, e compará-lo com o desempenho de um concreto produzido com agregado natural.

Santos *et al.* (2018) elaboraram quatro traços distintos, nos quais utilizaram 15%, 30% e 50% de RCD na composição, e um quarto traço elaborado somente com agregados naturais. Os autores moldaram corpos de prova para análise da resistência à compressão aos 14 dias. Eles verificaram que o concreto com adição de RCD em suas composições de 15%, 30% e 50% atingiu os resultados esperados, com ênfase no RCD de 15%, visto que este apresentou o melhor desempenho, superando assim o traço convencional após 14 dias de cura. Os autores observaram em sua pesquisa que o agregado de RCD proporcionou boas propriedades de resistência mecânica ao concreto, mantendo-se, assim, resultados próximos ou maiores aos alcançados com o agregado convencional.

Sandoval *et al.* (2018) analisaram a influência que a fração fina proveniente de agregados graúdos exerce no desempenho de concretos permeáveis, especificamente em propriedades mecânicas e hidráulicas. Os autores utilizaram agregados naturais (brita

basáltica) com Diâmetro Máximo Característico (DMC) de 19 mm (B1) e 9,5 mm (B0), e a combinação de ambas (50B0/50B1) na proporção de 50% cada. O traço utilizado por Sandoval *et al.* (2018) foi de 1:3,26 (cimento : agregado graúdo), e um fator a/c de 0,34. O consumo de cimento foi de 430 kg/m³, de agregado graúdo 1369,2 kg/m³, e de água 136 kg/m³.

A partir dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade, os autores observaram que o concreto permeável com agregados de granulometria descontínua (B0 e B1) obtiveram menores valores, decorrente do fato de que o contato pontual entre agregados é mais fraco quanto à aplicação de uma carga axial. Os maiores valores de resistência à compressão (19 MPa) e tração na flexão foram observados no concreto produzido com (50B0/50B1), justificando-se pelo melhor arranjo dos grãos.

Em termos de coeficiente de variação, os autores observaram que as menores variabilidades foram encontradas nos concretos permeáveis com agregados de B0 e com composição (50B0/50B1). Ressalta-se que essas duas granulometrias de agregados continham uma fração fina de 49,5% e 23,7%, respectivamente (os autores consideraram fração fina tudo aquilo menor que 4,8 mm). Com isso, verificaram que a porcentagem de fração fina pode ajudar na homogeneização e distribuição dos pontos de contato entre o agregado e a pasta de cimento. A maior variabilidade foi observada no concreto produzido com B1, o qual tinha uma fração fina de apenas 0,3%.

Acerca da condutividade hidráulica, os autores obtiveram para o concreto produzido com B0, B1 e 50B0/50B1, respectivamente: 2,8E-03, 4,2E-03 e 2,3E-03 m/s. Todos os valores de permeabilidade encontrados cumprem o que é recomendado em ACI (2010), 1,35E-03 m/s. B1 apresentou maior coeficiente de permeabilidade devido ao fato de que possui apenas 0,3% de finos em sua composição.

Mikami *et al.* (2018) analisaram a influência da composição dos agregados reciclados na resistência e condutividade hidráulica do concreto poroso. Para isso, agregados contendo teores de resíduo de cerâmica vermelha de 10, 25, 50 e 100% foram obtidos pela mistura de RCD, com 2,92% de cerâmica vermelha, 95,5% de fragmentos de rocha e pasta de cimento, e 1,58% de impurezas. Os concretos permeáveis foram caracterizados conforme a resistência à compressão axial, coeficiente de permeabilidade, índice de vazios, absorção de água e massa específica real e aparente. O traço utilizado pelos autores para a confecção do concreto permeável foi de 1:5 (cimento: agregado graúdo) em massa, e a relação a/c foi de 0,30.

Todos os agregados apresentaram volume de vazios semelhante, em torno de 50%. O resíduo de cerâmica vermelha resultou em uma absorção de água de 22,84%, cerca de

cinco vezes o valor de absorção do resíduo de concreto. Esse agregado foi o único que ultrapassou o limite de absorção de água para agregados reciclados, de 12%, conforme a ABNT (2004b).

A condutividade hidráulica de todos os concretos permeáveis estudados por Mikami *et al.* (2018) variou entre $8,2\text{E-}03$ e $9,5\text{E-}03$ m/s. O coeficiente de permeabilidade foi reduzido com o aumento da quantidade de cerâmica na mistura. A resistência à compressão axial do concreto com 0% de cerâmica foi superior à dos demais concretos, resultando em 10,15 MPa. Os concretos que continham cerâmica apresentaram resistência inferior a 3,00 MPa. Consoante os autores, a resistência foi maior com o aumento da massa específica aparente, e o coeficiente de permeabilidade foi menor nos concretos de maior absorção de água.

Mikami *et al.* (2018) concluíram que os resultados obtidos indicam que o uso de agregados reciclados mistos em substituição aos agregados naturais altera significativamente propriedades do concreto permeável, e que o teor de material cerâmico do agregado reciclado exerce influências negativas nas características do material.

Costa *et al.* (2019) realizaram um estudo da viabilidade técnica do uso de concreto permeável em pavimentos urbanos de baixo tráfego, utilizando agregados graúdos da região de Belém do Pará, a fim de identificar a influência da utilização desse dispositivo.

Os autores empregaram, na confecção do concreto permeável, seixo de origem quartzosa, e optaram por utilizar agregado graúdo com dimensões predominantes entre 19 mm e 12,5 mm. Os traços estudados foram (1:3), (1:4) e (1:5) - (cimento/agregado graúdo em massa) e a relação a/c foi 0,29 para o primeiro traço, 0,34 para o segundo e 0,40 para o terceiro traço. Costa *et al.* (2019) não utilizaram agregado miúdo em seu trabalho.

Acerca da caracterização do agregado graúdo, os autores obtiveram $1,39\text{ g/cm}^3$ de massa unitária e $2,61\text{ g/cm}^3$ de massa específica. O índice de vazios encontrado foi de 47%, demonstrando que este é um compósito com alta porosidade. Os resultados de resistência à compressão do concreto estudado por Costa *et al.* (2019) demonstraram que este se mostrou menos resistente que o concreto tradicional, apresentando valores de resistência à compressão axial variando de 4 a 28 MPa. Todos os traços apresentaram um alto coeficiente de permeabilidade, ultrapassando o limite mínimo estabelecido pela ABNT (2015b), que é de 10^{-3} m/s.

Os autores concluíram que os pavimentos permeáveis desenvolvidos apresentaram um bom desempenho dentro dos limites estabelecidos pela norma vigente, sendo então considerados adequados quanto à sua utilização neste quesito. Inferem, ainda, que a partir da

diminuição da relação a/c e do aumento da quantidade de seixo inserido na mistura ocorreu o crescimento do coeficiente de permeabilidade.

Pilz *et al.* (2019) realizaram um estudo das características do concreto drenante, levando em consideração aspectos como a resistência à tração, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e coeficiente de permeabilidade, através do desenvolvimento de vários traços. A partir de um traço referência, os autores avaliaram oito traços, sendo cinco referentes ao concreto drenante com adição de agregados mais finos ao traço referência (A, B, C, D e E), e três traços com a inclusão de fibras de polipropileno (espessura 0,9 mm), D1 (adição de fibra na proporção 1 kg/m³), D2 (adição de fibra na proporção 2 kg/m³), e D3 (adição de fibra na proporção 4 kg/m³). O objetivo era o de analisar os efeitos que a adição de fibras causa em propriedades do concreto drenante.

Em relação à resistência à tração, a maior alcançada neste teste foi a da mistura E, com um valor de 2,59 MPa. A adição de areia e brita 0 aumentou a resistência à tração, com ganhos relevantes especialmente quando a brita 0 foi adicionado às misturas. Este fato se deve a um maior arranjo da estrutura do concreto com a presença de agregados mais finos. A mistura A deveria apresentar uma das melhores permeabilidades, por não ter areia na dosagem, mas essa tendência não se manifestou no trabalho de Pilz *et al.* (2019). A mistura que alcançou os melhores resultados foi a B, com 5% de finos. Considerando ABNT (2015b), e com exceção das misturas A e E, todas as outras misturas atingiram o nível recomendado de valores mínimos de permeabilidade.

Pilz *et al.* (2019) concluíram que a adição de areia para concretos permeáveis para pavimentos moldados no local é benéfica, aumentando sua força mecânica. A redução da permeabilidade abaixo dos valores recomendados pela ABNT (2015b) só foi observada quando os níveis de areia excederam 35%.

Em relação aos traços elaborados com fibra de polipropileno, houve uma diminuição na resistência à compressão com a adição destas. De acordo com os autores, as fibras impediram o processo de amassamento do concreto, que por sua própria natureza já tinha uma trabalhabilidade quase nula. Uma formação de bolhas pôde ser observada em certas partes do concreto, gerando um elo fraco no qual surgiram zonas de fratura. Isto sugere que o processo de adição de fibra requer uma atenção maior quanto ao processo de amassamento do concreto, de forma a tornar a mistura mais homogênea.

Dos concretos com adição de fibra, o que apresentou maior resistência à tração foi a mistura D2, com um valor de 1,46 MPa em 28 dias. O fato de a mistura D1 ter uma quantidade menor de fibras em sua mistura do que as misturas D2 e D3 foi responsável por

proporcionar ao concreto um pequeno ganho de resistência à compressão, aproximando-se da resistência da mistura de referência D, que não continha fibras.

A condutividade hidráulica foi maior para a mistura D1. As misturas com adição de 2 kg/m³ e 4 kg/m³ de fibras de polipropileno apresentaram menor condutividade hidráulica. A mistura D3 apresentou menor condutividade hidráulica ($k = 9E-04$ m/s), enquanto a mistura D1 apresentou 1,2E-03 m/s, sendo este o valor mais alto obtido entre as misturas.

Pilz *et al.* (2019) concluíram que a presença das fibras alterou as características do concreto, levando-o a atingir maiores resistências e boa permeabilidade em seus traços. Os autores verificaram, ainda, melhoria na capacidade de resistência à tração na flexão do concreto drenante, principal propriedade para uso em pavimentos. Na Tabela 2 verificam-se os principais resultados obtidos pelos autores abordados neste capítulo.

Tabela 2 – Principais resultados obtidos pelos autores abordados.

Autor	K (m/s)	Resistência à compressão (MPa)
Rizvi <i>et al.</i> , 2009	0,0150 - 0,0780	5,53 - 9,76
Pereira e Barbosa, 2015	0,0010 - 0,0012	10,0 - 20,0
Oliveira, 2017	0,0014	12,0 - 14,0
Claudino, 2018	0,0180	12,8
Sandoval <i>et al.</i> , 2018	0,0023 - 0,0042	19,0
Mikami <i>et al.</i> , 2018	0,0082 - 0,0095	10,15
Costa <i>et al.</i> , 2019	> 0,0010	4,0 - 28,0
Pilz <i>et al.</i> , 2019	0,0009 - 0,0012	-

Fonte: Autora (2020)

2.7. Dimensionamento do revestimento permeável

A ABNT (2015b) estabelece os requisitos mínimos exigíveis ao projeto de execução dos pavimentos permeáveis de concreto (Quadro 1): a resistência mecânica esperada para cada tipo de pavimento permeável de concreto é relacionada ao tipo de solicitação e de sua respectiva espessura, bem como à norma que regerá o ensaio a ser realizado para análise da resistência mecânica. Com base nesta especificação, nesta pesquisa foram enquadradas as peças de concreto permeável desenvolvidas para tráfego de pedestres com dimensões determinadas pela norma, ou seja, com 60 mm de espessura, e atendendo a uma resistência à compressão mínima de 20 MPa.

Quadro 1 - Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável.

Quadro 1 – Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável				
Tipo de Revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima em (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Peças de concreto intertravadas	Tráfego de pedestres	60,0	≥ 35,0	Determinação da resistência à compressão – ABNT NBR 9781 (2013)
	Tráfego leve	80,0		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	≥ 20,0	
	Tráfego leve	80,0		
Placas de concreto Permeável	Tráfego de pedestres	60,0	≥ 2,0	Determinação da resistência à flexão ABNT NBR 15805 (2015)
	Tráfego leve	80,0		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,0	≥ 1,0	Determinação da resistência à tração na flexão – ABNT NBR 12142 (2010)
	Tráfego leve	100,0	≥ 2,0	

Fonte: ABNT (2015b)

2.8. Técnicas de manutenção de pavimentos permeáveis

De acordo com ABNT (2015b), a verificação do desempenho do pavimento permeável deve ser realizada periodicamente. Ela estabelece que quando o pavimento, durante sua vida útil, apresentar condutividade hidráulica menor ou igual a $1E-05$ m/s, deverão ser executadas nele manutenções com o objetivo de melhorar sua condutividade hidráulica. Para isso, ABNT (2015b) recomenda a utilização de jatos de água sob pressão, e de equipamentos de sucção e remoção de sujeiras através de varrição.

Carls, Becker e Pinheiro (2019) estudaram técnicas de manutenção de pavimentos de concreto permeável. De acordo com os autores, apesar de todos os benefícios oriundos da implementação do pavimento permeável, sua utilização ainda não é praticada devido à falta de uma metodologia padronizada de preparação, escolha de materiais, testes, práticas de execução e manutenção.

De acordo com os autores, para que seja mantida a funcionalidade do pavimento de concreto permeável, deve-se ter preocupação tanto com sua execução quanto com sua

manutenção, pois quando o escoamento superficial infiltra o concreto permeável ocorre a retenção de partículas em seu interior. Isso pode ocasionar a obstrução do pavimento, o que reduz gradualmente sua capacidade de infiltração.

Carls, Becker e Pinheiro (2019) enfatizaram a necessidade de técnicas de manutenção eficientes para que se atenda tanto à funcionalidade hidráulica quanto à melhoria na qualidade da água do escoamento superficial infiltrada pelo concreto permeável. Entre os métodos de manutenção analisados estão: lavagem sob pressão, aspiração, varrição e enxágue.

Após análises, os autores concluem que, dos métodos de manutenção citados acima, os mais indicados são: a lavagem sob pressão e a aspiração, ou a combinação dos dois. Ainda, quando analisados individualmente, a lavagem sob pressão e a aspiração possuem uma eficiência semelhante quanto à recuperação do coeficiente de permeabilidade do pavimento. Infere-se que a combinação da aspiração com a lavagem sob pressão resulta em ganhos substanciais na recuperação do coeficiente de permeabilidade do pavimento, a qual aumenta quase 50% quando comparada com os dois métodos realizados separadamente.

Equipamentos como caminhão de vácuo com uma mangueira de sucção, caminhão com varredor a vácuo e varredor com ar regenerativo, que força o ar sobre a superfície do pavimento, foram igualmente eficazes na remoção de material de obstrução do pavimento permeável. Carls, Becker e Pinheiro (2019) afirmam que não há como determinar a profundidade específica no pavimento permeável em que normalmente ocorre a obstrução. No entanto, um fator que pode ser levado em consideração é a idade do pavimento. Após a manutenção, o pavimento melhora sua capacidade de infiltração. Contudo, não se consegue chegar aos valores de permeabilidade obtidos no período de sua instalação.

A colmatação do concreto permeável é uma questão significativamente importante em termos de manutenção, considerada uma das principais limitações desse dispositivo (RAMA; SHANTHI, 2019). Para Kia, Wong e Cheeseman (2017), há dois tipos de colmatação, a física e a biológica. A física é causada pelo acúmulo de detritos na superfície e estrutura dos poros, mecanismo mais comum. Já a colmatação biológica é causada por algas, bactérias e penetração de raízes de plantas.

Rama e Shanthi (2019) realizaram estudos experimentais para analisar técnicas de remoção de sedimentos de concretos permeáveis com ênfase na investigação do desempenho hidráulico destes, induzindo a colmatação ao se utilizar diferentes materiais de sedimentação, e avaliando sua capacidade de infiltração.

De acordo com os autores, cerca de 70% da colmatação é causada por sólidos suspensos presentes nos materiais de sedimentação, 15% por crescimento microbiano, 10% por reações químicas, e os 5% restantes por outros meios.

Rama e Shanthi (2019) determinaram o padrão de deposição de sedimentos do concreto permeável utilizando três materiais: argila, areia e areia siltosa argilosa. As amostras colmatadas foram limpas por lavagem sob pressão, aspiração e um método combinado. No total, foram realizados dez ciclos de colmatação e limpeza.

Um ciclo de colmatação consiste em colmatar na primeira etapa e realizar limpeza na segunda etapa. No ciclo de teste, o material de colmatação é misturado com água, que é derramada na parte superior da amostra testada. Isso permite que a água flua através da amostra juntamente com o material de colmatação suspenso. Durante este processo, a condutividade hidráulica é medida. A água é completamente drenada, e um dos métodos de tratamento é selecionado para limpar a amostra colmatada. Após a limpeza, o teste de permeabilidade é realizado novamente. Os autores submeteram dez amostras a estes processos (ciclo). A análise de colmatação foi efetuada medindo-se a taxa de infiltração durante a colmatação e após a limpeza, para cada ciclo.

Rama e Shanthi (2019) enfatizaram que os métodos de lavagem sob pressão e aspiração revelam desempenho consistente na limpeza de sedimentação de areia, mas isso difere significativamente na limpeza de areia siltosa argilosa. Com base em resultados de testes experimentais de Rama e Shanthi (2019), o método combinado de limpeza foi considerado pelos autores o mais indicado na recuperação de permeabilidade para sedimentação de areia e areia siltosa argilosa. Os resultados indicaram que os métodos de limpeza citados podem restaurar consideravelmente o desempenho de pavimentos de concreto permeável, para um melhor gerenciamento das águas pluviais.

2.9. Escoamento Superficial em Pavimentos

O escoamento superficial é o movimento da água a partir da menor porção de chuva que, caindo sobre um solo saturado ou tecnicamente impermeável, escoar pela superfície, formando sucessivamente as enxurradas ou torrentes, córregos, ribeirões, rios e lagos, ou reservatórios de acumulação (PINTO *et al.*, 1976). De acordo com Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), o coeficiente de escoamento superficial é obtido pela razão entre o escoamento total, em mm, e a chuva total, em mm.

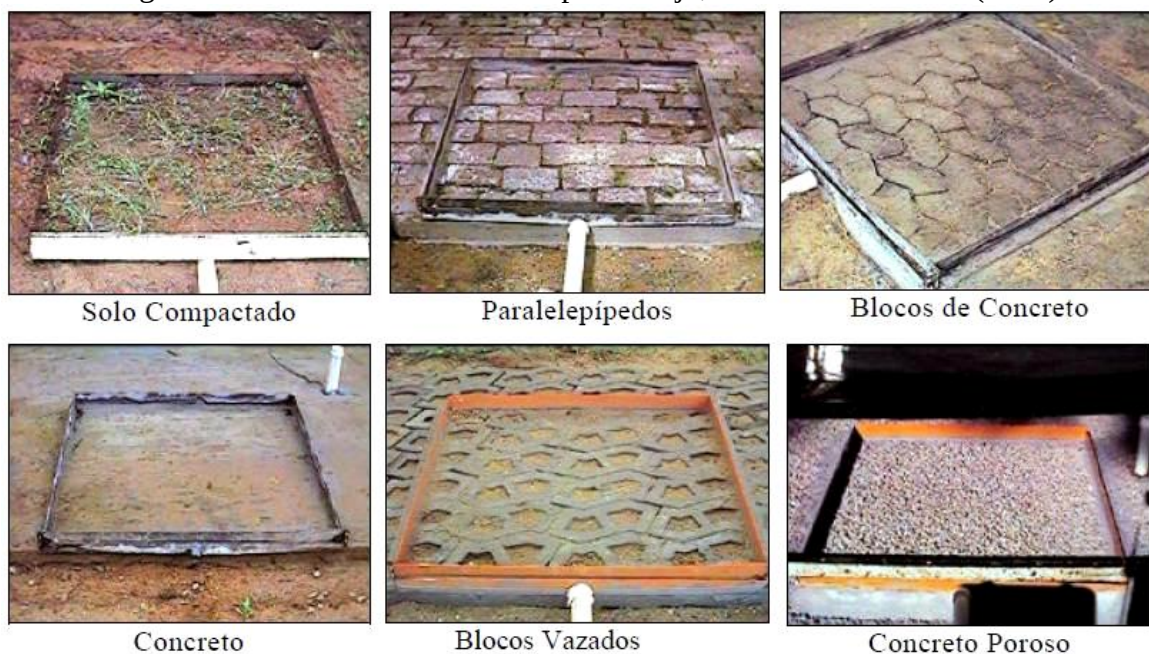
Para Tucci (1997), os principais impactos provocados pela urbanização nas redes de drenagem são o aumento do escoamento superficial, a redução da evapotranspiração, a

redução do escoamento subterrâneo, o rebaixamento do lençol freático, e o aumento da produção de material sólido proveniente da limpeza das ruas e da armazenagem inadequada do lixo pela população, resultando na deterioração da qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

O escoamento superficial promove, nas primeiras precipitações, a lavagem da superfície, e carrega sedimentos acumulados durante os períodos secos - fato esse conhecido como primeira descarga, na qual a maior parte da carga é lavada no início do evento, atingindo um pico inicial (MARCHIONI, 2018).

Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) realizaram uma análise da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial, através de simulações de precipitação, comparando o escoamento gerado em diversos tipos de pavimento e no solo compactado (Figura 10).

Figura 10 - Pavimentos analisados por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000)



Fonte: Araújo, Tucci e Goldenfum (2000)

Foram efetuados experimentos utilizando-se simulador de chuva em módulos de 1 m² para quatro diferentes tipos de coberturas urbanas: terreno existente; superfícies semipermeáveis; superfícies impermeáveis; e superfícies permeáveis.

Os autores realizaram simulações de chuva de projeto com duração de 10 minutos, período de retorno de 5 anos e intensidade de 111,9 mm/h. Após análises das superfícies estudadas, Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) obtiveram como coeficiente de escoamento superficial para o solo compactado 0,66, e para o concreto 0,95. Em blocos de concreto esse

coeficiente foi de 0,78, em paralelepípedos foi de 0,60, em blocos vazados, de 0,03, e em concreto poroso obtiveram 0,005.

Dentre as superfícies estudadas, o concreto poroso e os blocos vazados apresentaram menores valores de escoamento superficial. Segundo os autores, a tendência moderna na área de drenagem urbana é a busca da manutenção das condições de pré-desenvolvimento atuando na fonte de geração. Para isto, deve-se utilizar dispositivos de acréscimo de infiltração e que minimizem o escoamento superficial.

2.10. Condutividade hidráulica de pavimentos permeáveis

A condutividade hidráulica é uma propriedade que expressa a facilidade com que a água se movimenta, sendo de extrema importância ao entendimento do funcionamento dos pavimentos permeáveis. A eficiência de operação dos pavimentos permeáveis está diretamente relacionada à capacidade de infiltração do solo natural que vai servir de suporte para esta estrutura hidráulica. Trabalhos técnicos acerca do assunto têm adotado a condutividade hidráulica do solo como um parâmetro satisfatório para verificar a adequação do solo para receber dispositivos deste tipo (GONÇALVES; LIBARDE, 2013).

A condutividade hidráulica é o principal parâmetro requerido para mensurar o fluxo de água nos solos (JAVIER; GARCIA; MUÑOS, 2003). De acordo com Aguiar (2001), a composição mineralógica, o tamanho e a distribuição das partículas do solo, os vazios do solo e as características dos fluidos percolantes são fatores que influenciam a condutividade hidráulica do solo. Outro fator importante de influência na velocidade de percolação dos fluidos no solo é a presença de matéria orgânica, a qual pode diminuir a condutividade hidráulica do solo quando encontrada totalmente decomposta e em quantidades menores, ou pode aumentar quando encontrada em grande quantidade no solo e pouco decomposta.

A velocidade de percolação, na zona não saturada, varia em função das propriedades do meio poroso, das características do fluido e do teor de umidade volumétrica do material. É de fundamental importância que haja uma prévia saturação dos poros antes da análise da condutividade hidráulica, pois quanto maior a umidade, maior a condutividade hidráulica. Assim, a área útil condutora de água vai se tornando menor à medida que o teor de água decresce. Na zona saturada, a velocidade varia somente em função das propriedades do meio poroso e das características do fluido (STEPHENS, 1996).

A primeira equação utilizada para quantificar o movimento da água no solo foi introduzida por Henry Darcy, em 1856, o qual trabalhou com colunas de areia saturada com água. A equação de Darcy estabelece que a quantidade de água que passa por unidade de

tempo e de área pelo meio poroso saturado é proporcional ao gradiente de potencial total da água nesse meio (GONÇALVES; LIBARDI, 2013).

A constante de proporcionalidade foi denominada por Darcy de condutividade hidráulica, hoje conhecida como condutividade hidráulica do solo saturado K . A condutividade hidráulica do solo saturado descreve a funcionalidade de seu sistema poroso, englobando propriedades relacionadas com a sua porosidade, como quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros (GONÇALVES; LIBARDI, 2013).

No Quadro 2 traz-se uma relação entre a condutividade hidráulica e a classificação do grau de permeabilidade de solos.

Quadro 2 - Relação condutividade hidráulica x grau de permeabilidade.

Condutividade hidráulica do solo K		Grau de permeabilidade do solo
m/s	mm/h	
$>10^{-3}$	>3600	Alta
10^{-3} a 10^{-5}	3600 a > 36	Média
10^{-5} a 10^{-7}	36 a $> 0,36$	Baixa
10^{-7} a 10^{-9}	$0,36$ a $0,0036$	Muito baixa
$<10^{-9}$	$<0,0036$	Praticamente impermeável

Fonte: ABNT (2015b)

Um material com condutividade hidráulica superior a $0,001$ m/s é considerado com alto grau de permeabilidade. Já um com condutividade hidráulica inferior a 10^{-9} m/s é considerado praticamente impermeável.

2.11. Efeito da ilha de calor (*Urban Heat Island* – UHI)

Com a urbanização, superfícies naturais do solo estão sendo cobertas por pavimentos. As estruturas pavimentadas armazenam mais calor e possuem uma menor capacidade de evaporação do que as superfícies naturais do solo, e como consequência a temperatura nas áreas urbanas é geralmente mais alta do que em áreas rurais. Esse fenômeno ficou conhecido como Efeito da Ilha de Calor Urbana (*Urban Heat Island* - UHI). Atualmente muitas cidades sofrem com os efeitos das ilhas de calor. Estudos mostraram que pavimentos quentes contribuíram significativamente para este efeito (KOYAMA *et al.*, 2013; MOHAJERANI; BAKARIC; BAILEY, 2017; CHEN *et al.*, 2019; FENSTERSEIFER *et al.*, 2019).

A UHI é uma questão global que ameaça a habitabilidade das cidades. De acordo com Mohajerani, Bakaric e Bailey (2017), o efeito UHI pode aumentar a temperatura do ar

em uma cidade urbana entre 5 e 15°C. Isto é resultado de uma redução na vegetação e evapotranspiração, e uma maior prevalência de superfícies escuras, que armazenam calor.

Medidas de mitigação para combater o efeito UHI têm sido estudadas. Para Mohajerani, Bakaric e Bailey (2017), as principais medidas são: utilização de pavimentos frios, que são superfícies com capacidade de reter água, como os pavimentos permeáveis; aumento da utilização de telhados verdes; corredores verdes; e aumento da ventilação, recorrendo-se aos corredores de ar.

2.12. Agregados reciclados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

BRASIL (2010) institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, que reúne um conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações, objetivando dar um fim adequado para o resíduo gerado, compartilhando a responsabilidade sobre eles, e incentivando o desenvolvimento de uma cadeia produtiva sustentável com a cooperação entre o público e privado. Pode-se desenvolver, assim, pesquisas que se beneficiem dos resíduos.

Segundo BRASIL (2002), resíduos da construção civil são oriundos de construções, de reformas, e de demolições de obras de construção civil, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubos, fiação elétrica etc.

O Art.3º desta resolução define como os resíduos da construção civil deverão ser classificados: Classe A - São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados; Classe B - São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e gesso; Classe C - São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação; e Classe D – Resíduos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde, oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos, e materiais que contenham amianto ou outros produtos prejudiciais à saúde.

ABNT (2004c) define resíduos sólidos como: resíduos nos estados sólidos e semissólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

Foram elaboradas normas específicas em relação à utilização do RCD, com as abordagens que seguem:

- Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projetos, implantação e operação (ABNT, 2004e);
- Resíduos sólidos da construção civil - Área de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação (ABNT, 2004d);
- Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - execução de camadas de pavimentos - procedimentos (ABNT, 2004a);
- Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos (ABNT, 2004b);

ABNT (2004b) estabelece especificações para o preparo de concretos sem função estrutural. Entre outras exigências, fica estabelecido que o agregado reciclado (AR) pode ser utilizado em concreto sem função estrutural, desde que proveniente de material classe A. O AR pode ser usado para substituir integralmente ou parcialmente o agregado convencional.

Ceará (2016) institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos no âmbito do Estado do Ceará, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos (incluídos os perigosos), às responsabilidades dos geradores e do Poder Público, e aos instrumentos econômicos aplicáveis. Fortaleza (1994) dispõe sobre a disciplina, coleta e destinação dos resíduos sólidos gerados por obras de construção civil.

O concreto com agregados reciclados é aquele produzido com resíduos britados, em substituição parcial ou total aos agregados convencionais. Atualmente, a principal fonte de resíduos para a produção destes agregados é a própria construção civil. Como observado em Angulo e Figueiredo (2011), os agregados de RCD são constituídos por fragmentos de concretos, argamassas, cerâmicas e outros materiais secundários. A composição desse agregado é bastante variável.

Para Mehta e Monteiro (2008), quando da incorporação de agregados reciclados ao concreto permeável, as propriedades mais relevantes a serem determinadas são: granulometria, capacidade de absorção de água, forma, resistência à compressão, e o módulo de elasticidade. Para Batista (2009), o decréscimo da resistência nos concretos constituídos de agregados reciclados é causado principalmente pela alteração da relação a/c, pois este é um agregado mais poroso; conseqüentemente, ele precisará de uma maior quantidade de água para atingir a mesma trabalhabilidade que os concretos convencionais atingem.

2.13. Lixiviação e solubilização de resíduos sólidos

Um dos maiores desafios da atualidade em termos ambientais é a disposição adequada dos resíduos sólidos, principalmente os gerados na construção civil e nas indústrias (JACOBI; BESEN, 2011). Com o objetivo de preservar os recursos naturais e minimizar a degradação do meio ambiente, tais materiais devem atender requisitos mínimos de qualidade e risco. Portanto, são buscadas técnicas de controle que identifiquem nas matérias-primas os contaminantes que possam ser prejudiciais ao homem e ao meio ambiente (MOREIRA; BASTOS; FARIAS, 2019).

O RCD tem em sua composição algumas substâncias consideradas impuras ou contaminantes, como betume, polímeros, gesso, matéria orgânica, amianto, substâncias reativas etc., as quais podem prejudicar o desempenho estrutural dos materiais produzidos com esse material e o meio ambiente (CARNEIRO *et al.*, 2001; ÂNGULO; JOHN, 2002; OLIVEIRA, 2017).

A lixiviação é um procedimento regido pela ABNT (2004c), e tem como objetivo identificar a concentração de substâncias que se separam do material por meio de lavagem e percolação; ou seja, na lixiviação os materiais são arrastados pela água. Já a solubilização é conduzida pela ABNT (2004f), e tem como objetivo identificar a quantidade máxima pela qual uma substância pode ser dissolvida em um líquido; ou seja, trata-se de identificar os materiais que são solúveis em água.

2.14. Equação de Intensidade-Duração-Frequência (IDF)

Silva, Palácio Junior e Campos (2013) desenvolveram uma equação de Intensidade-Duração-Frequência (IDF), conhecida como equação de chuva, para a cidade de Fortaleza-CE, a partir de 30 anos de registros pluviográficos (1970-1999), utilizando dados da estação climatológica da Universidade Federal do Ceará – UFC. Esta Equação (1) permite calcular as intensidades de precipitação para períodos de retorno de 5 a 100 anos e durações de chuva de até 120 minutos.

$$i = \frac{2345,29 \cdot T^{0,173}}{(t + 28,31)^{0,904}} \quad (1)$$

Em que: i é a intensidade média de chuva em mm/h para a duração da chuva de t minutos e T denota o período de retorno da precipitação em anos.

Para o desenvolvimento da equação, Silva, Palácio Junior e Campos (2013) avaliaram séries anuais de eventos de intensidades médias máximas de chuvas para durações de 5, 10, 20, 30, 45, 60 e 120 minutos. Os resultados da nova equação foram comparados com os valores obtidos pela aplicação de outras três desenvolvidas para Fortaleza anteriormente: equação elaborada pela Autarquia Metropolitana de Fortaleza (AUMEF) em 1976, equação de Matos Neto e Fraga (1983), e equação de Rodrigues *et al.* (2008).

A equação proposta apresentou resultados semelhantes aos obtidos pela utilização das outras três equações de chuva para Fortaleza, calculadas para uma mesma duração e período de retorno. No entanto, apresentou uma tendência de incremento nas intensidades de precipitação superior às calculadas pela equação da AUMEF (CEARÁ, 1978). A maior diferença entre as intensidades de precipitação calculada foi de 27%, pela equação proposta por Silva, Palácio Junior e Campos (2013), e pela de Rodrigues (2008), para um período de retorno de 100 anos e duração de cinco minutos. Contudo, esta diferença se reduz até um mínimo de 2,5% para durações de chuva superiores a 60 minutos.

Silva, Palácio Junior e Campos (2013) enfatizam que há uma tendência incremental nas intensidades de precipitação resultantes da ordem cronológica de desenvolvimento das quatro equações de chuva disponíveis para Fortaleza, e que devido a esse incremento há uma necessidade de se proceder periodicamente a uma revisão destas equações.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo destina-se a apresentar informações sobre a caracterização dos materiais utilizados, bem como os critérios e métodos adotados para a realização dos experimentos laboratoriais.

3.1. Materiais

A seguir são elencadas características e informações acerca dos agregados reciclados e naturais, aglomerante e aditivo utilizados no desenvolvimento da pesquisa.

3.1.1. Agregado reciclado

O RCD foi coletado em uma usina de beneficiamento no município de Aquiraz-CE, Região Metropolitana de Fortaleza. Na usina de beneficiamento ocorre a separação manual do material grosseiro, que logo após é levado ao britador e triturado em uma dimensão predeterminada. Ao passar pela esteira imantada, o material que contenha algum tipo de metal será separado. A usina recebe resíduos de construção e demolição, e os revende como solo e brita (após o processo de beneficiamento) por 150% a mais que o valor cobrado no recebimento do material bruto (resíduo sem tratamento). Na Figura 11 são mostrados o britador utilizado na usina de tratamento (a) e o RCD obtido após este tratamento (b).

Figura 11 - Processo de beneficiamento do RCD



(a) Britador utilizado na usina de tratamento
Fonte: Autora (2020)



(b) RCD após tratamento na usina

Como a empresa produz apenas mistura de solo e agregado reciclado, para o emprego do material nesta pesquisa houve um melhoramento do material, de modo a viabilizar sua utilização como agregado reciclado na confecção do concreto permeável. Tal tarefa

consistiu em um peneiramento, no qual materiais superiores a 19 mm e inferiores a 4,75 mm foram descartados e o restante do material, com granulometria entre 4,75 mm e 19 mm, sofreu um processo de separação granulométrica manipulada para que se tentasse adequá-lo à granulometria de materiais utilizados em pesquisas anteriores (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; ACI, 2006; OLIVEIRA, 2017; CLAUDINO, 2018).

A dimensão escolhida para a confecção do concreto permeável foi definida na faixa de 4,75 mm a 19 mm (Figura 12). Ressalta-se a definição de agregado contida em ABNT (2011b), no qual elucida-se que agregado é o material granular, geralmente inerte, com medidas e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto.

Figura 12 – Amostras separadas por granulometria



Fonte: Autora (2020)

Vale salientar as diversas pesquisas que vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos com agregado reciclado de RCD (LEITE, 2001; CABRAL 2007; RIVZI *et al.*, 2009; LIMA 2015; PEREIRA; BARBOSA, 2015; FINOCHIARO; GIRALDI, 2017; OLIVEIRA, 2017; SANTOS, 2017).

3.1.2. Mistura agregado natural e agregado reciclado

Nesta pesquisa realizou-se uma mistura entre agregados reciclados e agregados naturais, com objetivo de avaliar diferentes dosagens de concreto permeável. Foram utilizadas as seguintes proporções de agregados: Concreto Referência (CREF), 100% agregado natural; Concreto com Agregado Reciclado de Resíduo Misto (C-ARM), 70% agregado natural e 30% agregado reciclado de resíduo misto; Concreto com Agregado Reciclado de Resíduo de Concreto (C-ARC), 70% agregado natural e 30% agregado

reciclado de resíduo de concreto; Concreto Mistura (C-MIS), 50% agregado natural e 50% agregado reciclado; e, por fim, Concreto com Agregado Reciclado (C-AR), 100% de agregado reciclado (Tabela 3).

Tabela 3 - Relação Agregado natural / Agregado reciclado

	Agregado Natural	Agregado Reciclado
CREF	100	0
C-ARM	70	30
C-ARC	70	30
C-MIS	50	50
C-AR	0	100

Fonte: Autora (2020)

Em diversos estudos já realizados, foi comprovado que o RCD é um material com alta capacidade de absorção de água (LEITE, 2001; CABRAL 2007; RIVZI *et al.*, 2009; LIMA 2015; PEREIRA; BARBOSA, 2015; FINOCHIARO; GIRALDI, 2017; OLIVEIRA, 2017; SANTOS, 2017). Por isso, na dosagem do concreto, deve-se levar em consideração esta propriedade do material.

3.1.3. Aglomerante hidráulico

O principal ligante hidráulico utilizado como aglomerante em concretos permeáveis é o cimento Portland. Além deste, materiais suplementares, como cinza volante, escória granulada de alto forno moída, e sílica ativa, são também empregados com a finalidade de melhorar as características mecânicas do produto final. É importante garantir que o produto final possua elevada porosidade e condutividade hidráulica, parâmetro esse de suma importância para o correto funcionamento do sistema de pavimento permeável (BATEZINI, 2013).

O aglomerante escolhido para esta pesquisa foi o CP V-ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), também utilizado em pesquisas anteriores (PEREIRA; BARBOSA, 2015; LAMBERTI *et al.*, 2017). De acordo com ABNT (1991), este tipo de cimento, em geral, apresenta um mínimo de resistência, aos 7 dias, de 34,0 MPa.

O CP V-ARI é um aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de clínquer Portland, e constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio (ABNT, 1991). Ele é amplamente

utilizado na produção industrial de peças de concreto, na qual se exige desforma rápida, como na produção de em pré-moldados.

No Quadro 3 estão elencadas algumas exigências físicas e mecânicas do CP V-ARI estabelecidas em ABNT (1991).

Quadro 3 - Exigências físicas e mecânicas do CP V ARI.

Características e propriedades		Limites
Finura	Resíduo na peneira 75 μm (%)	6
	Área especificada (m^2/Kg)	300
Tempo de início de pega (h)		1
Expansibilidade a quente (mm)		5
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	14
	3 dias	24
	7 dias	34

Fonte: ABNT (1991)

Os concretos preparados com CP V-ARI exigem uma quantidade maior de água, para que se obtenha neles a mesma consistência alcançada em outros tipos de cimento. Esse comportamento demanda cautela, já que, na busca indiscriminada por resistências mais altas nas primeiras idades, podem surgir manifestações patológicas, como, por exemplo, fissuras decorrentes da maior retração por secagem em determinadas condições ambientais (na ocorrência de ventos, insolação, temperaturas elevadas ou baixa umidade relativa do ar). Uma cura adequada em conjunto com a utilização de aditivos pode evitar patologias no concreto (ABCP, 2019).

3.1.4. Aditivo superplastificante

Neste trabalho foi utilizado o aditivo superplastificante *mira flow*. De acordo com ABNT (2011a), aditivos para concretos são produtos adicionados durante o processo de preparação do concreto, em quantidade não maior que 5% da massa de material cimentício contida no concreto, com o objetivo de modificar propriedades no estado fresco ou no estado endurecido.

Esses aditivos são empregados de acordo com a necessidade de se obter produtos com qualidade superior, pois modificam ou proporcionam propriedades do material fresco ou endurecido, tornando-o mais trabalhável, mais resistente às solicitações mecânicas e químicas, ou, ainda, mais econômico e durável (TARTUCE, 1990).

Os aditivos superplastificantes promovem a redução acentuada da água de mistura do concreto, permitindo aumentar a resistência e fluidez do concreto. O aumento da resistência à compressão do concreto com a redução da relação a/c permite reduzir o consumo de cimento do concreto, e também favorece a utilização de materiais alternativos, tais como agregados reciclados e novas adições minerais (MILA, 2019).

Alguns autores que empregaram RCD na confecção do concreto utilizaram aditivos superplastificantes com o objetivo de fixar a relação água/cimento, uma vez que o RCD absorve muita água e, quando se aumenta a quantidade de água no concreto, reduz-se sua resistência (OLIVEIRA, 2017; SANTOS, 2017).

3.2. Métodos

Os métodos utilizados consistiram nas seguintes etapas: inicialmente, a de campo, na qual foram coletadas as amostras de RCD e reunidos os materiais necessários para a execução da pesquisa. Procedeu-se à realização de ensaios no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) e Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) do IFCE. Foi realizada mistura e caracterização das amostras de agregados, através dos seguintes ensaios: granulometria, massa unitária solta e compactada, massa específica, volume de vazios, absorção e desgaste por abrasão.

Na segunda etapa, foi definido o traço de concreto a ser utilizado, e foram moldados os corpos de prova. No Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC) da UFC foram realizados ensaios de resistência por compressão axial, conforme ABNT (2007), e tração na flexão, conforme ABNT (2010). No Núcleo de Tecnologia Industrial do Estado do Ceará (NUTEC) foram realizados os ensaios de resistência por compressão axial, conforme ABNT (2013).

Na terceira etapa, placas de concreto permeável foram construídas de agregados reciclados e agregados naturais, para análise da condutividade hidráulica, conforme metodologia descrita em ABNT (2015b). Após os resultados, a dosagem com melhor desempenho foi utilizada para estruturação da parcela experimental de pavimento permeável, de modo a determinar sua condutividade hidráulica “*in situ*” e avaliar o coeficiente de escoamento superficial com base em eventos pluviométricos reais. Para isto, foi instalada uma estação pluviométrica automática no local de implantação da parcela experimental.

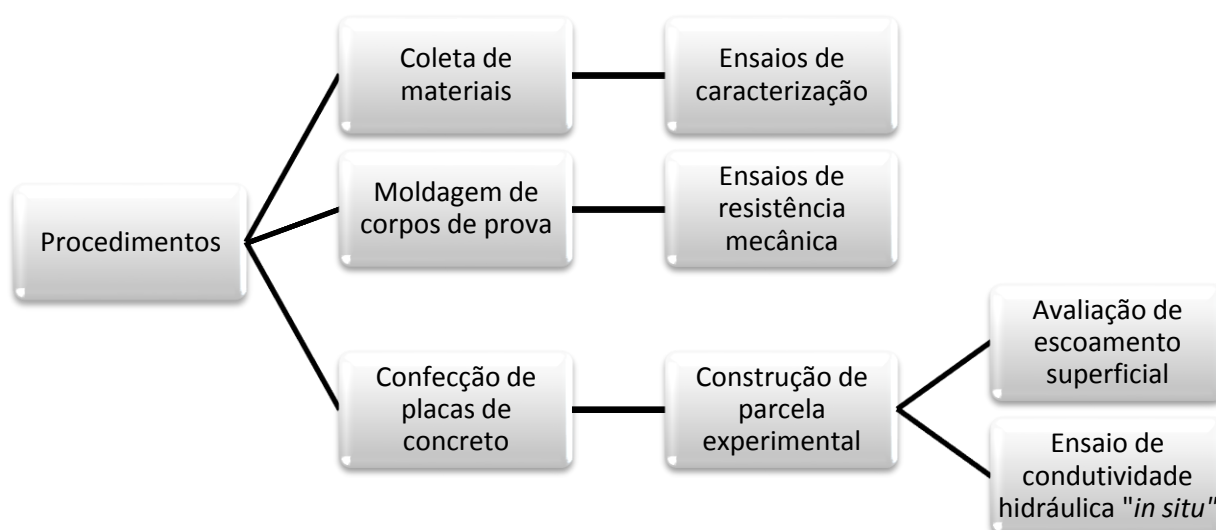
Para os ensaios de resistência à compressão, conforme ABNT (2007), foram utilizados seis corpos de prova cilíndricos para cada traço: C-AR, C-MIS, C-ARM, C-ARC,

CREF, totalizando 30 amostras. Para os ensaios de resistência à compressão, conforme ABNT (2013), foram utilizados nove corpos de prova prismáticos para o traço C-ARC, e nove para o traço CREF, somando um total de 18 amostras.

Para os ensaios de resistência à tração na flexão foram utilizados três corpos de prova prismáticos, confeccionados com o traço que apresentou melhor resistência à compressão. Já para a análise da condutividade hidráulica, utilizou-se três placas de concreto, sendo testados os seguintes traços: CREF, C-AR e C-ARM.

Na Figura 13 estão descritos resumidamente os processos de desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 13 - Fluxograma de processo



Fonte: Autora (2020)

3.2.1. Caracterização do agregado

A seguir são elencados os ensaios e procedimentos realizados para caracterizar o agregado reciclado e natural.

a) Composição gravimétrica

A determinação da composição dos agregados reciclados graúdos por análise visual foi baseada em ABNT (2004b). Esta análise é também conhecida por composição gravimétrica, a qual traduz o percentual de cada constituinte do resíduo em relação à massa

total da amostra. Essa característica é de grande relevância, principalmente quando se trata de RCD, um resíduo bastante heterogêneo.

Para a separação visual, procedeu-se assim: separou-se 1 kg da amostra em quatro grupos, G1 (fragmentos que apresentam pasta de cimento endurecida em mais de 50% do volume), G2 (fragmentos constituídos por rocha em mais de 50% do volume), G3 (fragmentos de cerâmica branca ou vermelha em mais de 50% do volume) e G4 (fragmentos de materiais não minerais de natureza orgânica).

De acordo com ABNT (2004b), os agregados reciclados classificam-se em: Agregado de Resíduo Misto (ARM) e Agregado de Resíduo de Concreto (ARC). Serão considerados ARC aqueles que apresentarem em sua composição percentagem igual ou superior a 90% de concreto e argamassas. Já aqueles que apresentarem percentagem inferior a 90% desses materiais serão considerados ARM.

b) Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi executada conforme ABNT (2003). Para a realização do ensaio foi utilizado um conjunto de peneiras para agregados graúdos (25 mm, 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, e 6,3 mm). Para a granulometria dos agregados inferiores a 6,3 mm, foi utilizada a peneira 4,75 mm. As amostras foram peneiradas através de malhas com aberturas estabelecidas pela norma, e a agitação da amostra foi realizada através do agitador mecânico de peneiras. Após isso, foram registradas as massas retidas em cada malha. Com a análise granulométrica é possível determinar importantes propriedades dos agregados, como DMC e Módulo de Finura.

c) Desgaste por abrasão

O ensaio de desgaste por Abrasão foi realizado conforme os procedimentos da ABNT (2001). A partir da granulometria do agregado reciclado, enquadrrou-se o agregado reciclado na faixa A e o agregado natural na faixa B. O cálculo do percentual de perda por abrasão foi calculado através da Equação 2.

$$P = \frac{m - m_1}{m} \times 100 \quad (2)$$

Em que: P = perda por abrasão (%); m = massa do agregado (g) e m₁ = massa do material retido na peneira com abertura de malha de 1,7 mm (g).

d) Massa específica e absorção de água

Os ensaios de massa específica e absorção de água foram realizados conforme ABNT (2009a). Em virtude da dimensão máxima característica do agregado ser de 25,0 mm, a massa de amostra usada para a realização do ensaio foi de 4 kg. A partir de então, a massa de amostra foi submersa em água, e, após 24 horas, foi retirada dali e envolvida em pano absorvente, até que toda a água visível fosse eliminada; imediatamente após ser enxugado, o agregado saturado com superfície seca foi pesado.

Para a determinação da massa em água da amostra, foi utilizado um cesto de arame com abertura de malha que impede a perda de material ou a retenção de água quando submerso; o cesto, ligado a uma balança hidrostática através de um fio de sustentação, ficou submerso em um tanque com água à temperatura a $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. A amostra foi posta no cesto, e então foi registrada sua massa em água. Após isso, a amostra foi submetida à temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ em estufa, e, após 24 horas, foi registrada a massa do agregado seco.

A massa específica do agregado seco foi obtida através da Equação 3.

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (3)$$

A massa específica do agregado saturado foi determinada através da Equação 4.

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (4)$$

A massa específica aparente do agregado seco foi calculada através da Equação 5.

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (5)$$

A absorção do agregado foi obtida através da Equação 6.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (6)$$

Em que: m: massa do agregado seco (g); m_a: massa em água do agregado (g);
m_s: massa do agregado saturado (g); A: absorção de água do agregado (%);
d: massa específica seca (g/cm³); d_s: massa específica saturada (g/cm³), e
d_a: massa específica aparente (g/cm³).

e) Massa unitária e volume de vazios

Foi calculada a massa unitária solta e compactada e volume de vazios das amostras, de acordo com ABNT (2006). O ensaio consiste em depositar o agregado em um recipiente cilíndrico de massa e dimensões conhecidas; enche-se o recipiente até que transborde, despejando-se o agregado de uma altura que não supere 50 mm acima da sua borda superior. Evita-se ao máximo a segregação dos agregados que compõem a amostra, nivela-se a camada superficial do agregado; e, por fim, determina-se a massa do recipiente mais seu conteúdo.

A massa unitária é determinada pela razão entre a massa de agregado depositada no recipiente totalmente cheio e o volume do recipiente. Para o cálculo da massa unitária compactada, procede-se ao despejo de agregado no recipiente em três camadas uniformes, e em cada camada desfere-se 25 golpes com uma haste de adensamento.

O volume de vazios foi calculado pela Equação 7.

$$e = \frac{d \times pw - pap}{d \times pw} \times 100 \quad (7)$$

Em que:

e: índice de vazios (%); d: massa específica relativa do agregado seco (kg/m³);

pw: massa específica da água (kg/m³), e pap: massa unitária média (kg/m³).

f) Análise de Lixiviação e Solubilização do RCD

Foram realizados ensaios de lixiviação ABNT (2004c) e solubilização ABNT (2004f) no RCD. Após esse processo, foram obtidos os extratos líquidos das amostras, os quais foram analisados em um cromatógrafo para obtenção das concentrações dos compostos iônicos daquilo que fora lixiviado e solubilizado dos materiais. As análises foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental - LABOSAN, da Universidade Federal do Ceará - UFC.

3.2.2. Estudo da dosagem do concreto permeável

A dosagem do concreto permeável foi realizada de forma empírica e embasada em estudos anteriores, os quais abordaram traços de concretos permeáveis e características dos materiais empregados. Foi adotado inicialmente traço de 1:4 e fator a/c de 0,40. O concreto com esta dosagem foi identificado como concreto de agregado reciclado (C-AR).

No desenvolvimento da pesquisa, percebeu-se a necessidade de adaptação do traço. Assim, foram elaborados cinco traços distintos (Quadro 4).

Quadro 4 - Descrição dos traços experimentais.

Identificação Características	Traço	Consumo de materiais em kg/m ³				
		Cimento	Areia de rio	Brita AR	Brita AN	Água
C-AR: Concreto 100% AR	1 : 0 : 4 : 0 : 0,4	318	0	1274	0	127
C-MIS: Concreto 50% AR, 50% A.N e 5% finos.	1 : 0,2 : 2 : 2 : 0,4	371	74	743	743	156
C-ARM: Concreto 30% AR, 70% A.N, 8% de finos e aditivo.	1 : 0,32 : 1,2 : 2,8 : 0,39	460	146	552	1289	179
C-ARC: Concreto 30% ARC, 70% A.N e 20% finos.	1 : 0,6 : 0,9 : 2,1 : 0,38	385	230	346	808	146
CREF: Concreto 100% AN, 20% finos e aditivo.	1 : 0,6 : 0 : 3 : 0,37	415	249	0	1244	153

Fonte: Autora (2020)

Como esta pesquisa se propôs a estudar diferentes traços na confecção do concreto permeável, à medida que os resultados de resistência eram obtidos alterava-se o novo traço, para um melhor desempenho quanto a esse aspecto. O traço escolhido inicialmente não compreendia agregados miúdos, tampouco agregados naturais. Contudo, em virtude do concreto produzido com este traço não apresentar valor de resistência à compressão significativa ou aceitável, estabeleceu-se um novo traço (que contemplaria agregados miúdos) e uma mistura de agregado natural e reciclado em uma proporção de 50%, que foi identificado como concreto de mistura (C-MIS).

Na análise da dosagem pode-se observar que a quantidade de água diminui a proporção que se aumenta a quantidade de agregado natural; ou seja, a quantidade de água no traço é inversamente proporcional à quantidade de agregado natural. Neste caso, isso é explicado pela utilização do RCD, material que tende a absorver mais água quando comparado ao agregado natural; logo, ao substituí-lo por AN, deve-se atentar ao fato de que, caso não seja alterada a relação a/c, o concreto ficará mais fluido.

Foram elaborados ainda mais três traços, o terceiro além da mistura de agregados. Acrescentou-se um aditivo superplastificante e aumentou-se a quantidade de agregados miúdos, a qual passou de 5% do peso do agregado gráudo para 8%, de modo a aumentar a

resistência. Esse traço foi identificado como C-ARM, concreto com Agregado de Resíduo Misto.

O agregado utilizado inicialmente foi classificado gravimetricamente como (ARM). Para melhorar a resistência do agregado, houve uma separação manual dos agregados que não eram oriundos de argamassa ou concreto, tornando assim esse novo material um Agregado de Resíduo de Concreto (ARC). Um traço foi elaborado com este material na proporção 30% de ARC e 70% AN (C-ARC). Por fim, foi elaborado um traço com 100% de agregado natural e 20% de agregados miúdos, identificado como CREF.

O Quadro 5 traz o consumo de materiais típico de concreto permeável.

Quadro 5 – Consumo de materiais típico de concreto permeável.

Autores	Consumo / proporção			
	Cimento (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Relação a/c
ACI (2010)	270 a 415	De 0 a 1:1	1190 a 1480	0,27 a 0,34
Batenzini (2013)	270 a 415	De 0 a 1:1	1190 a 1700	0,27 a 0,34
Pereira e Barbosa (2015)	400	0	1660	0,30 a 0,50
Kia, Hong e Cheeseman (2017)	150 a 700	0 a 100	1100 a 2800	0,20 a 0,50
Oliveira (2017)	374	0	1660	0,30
Sandoval (2018)	430	0	1369	0,34
Autora (2020)	318 a 460	0 a 249	1154 a 1841	0,37 a 0,40

Fonte: Autora (2020)

Observa-se que o consumo de materiais utilizado nesta pesquisa se enquadra na faixa de dosagens que vem sendo estudada durante os anos, e que a dosagem CREF, utilizada no concreto selecionado para fabricação de peças de concreto permeável (utilizadas na parcela experimental), enquadra-se na faixa recomendada por ACI (2010) - com exceção do fator a/c, o qual ficou um pouco acima dela. O consumo de cimento foi de 415 kg/m³, o consumo de agregados miúdos foi de 249 kg/m³, o consumo de agregados graúdos foi de 1244 kg/m³, e o fator, de a/c, 0,37.

3.2.3. Caracterização do concreto

Apresenta-se a seguir ensaios e procedimentos realizados para caracterizar o concreto permeável.

a) Moldagem dos corpos de prova

Para que os materiais fossem misturados de forma homogênea, foi utilizado o misturador (betoneira). Após este passo, houve a compactação do concreto no molde cilíndrico em duas camadas de 25 golpes cada, conforme norma ABNT (2015a). Após a confecção do concreto permeável, os corpos de prova foram moldados (Figura 14).

Figura 14 - Corpos de prova em processo de cura



Fonte: Autora (2020)

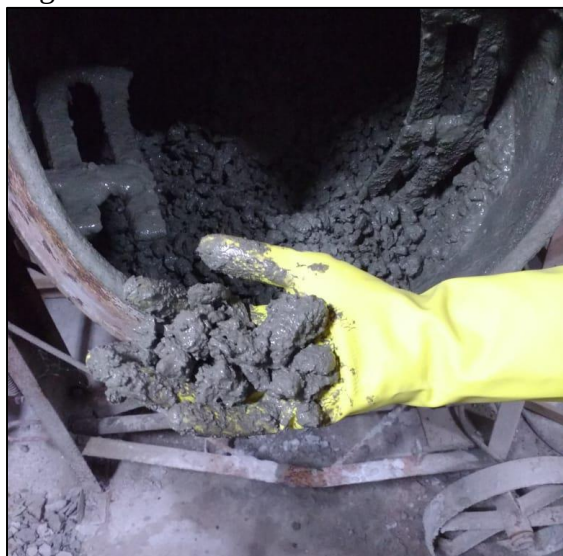
Após 24 horas de cura em câmara úmida, houve a desmoldagem desses corpos de prova, os mesmos foram deixados submersos até a data de rompimento que ocorreu aos 7, 14 e 28 dias para análise de resistência à compressão.

No dia especificado para cada rompimento do corpo de prova, procedeu-se ao seu capeamento. O capeamento é realizado com o intuito de regularizar as superfícies superiores e inferiores. Devido à ausência de agregados finos, essas superfícies se tornam muito irregulares. Para evitar danos aos ensaios de resistência à compressão, se faz necessária a realização deste procedimento. O material utilizado no capeamento foi uma pasta obtida com a mistura de cimento, água e gesso. A análise da resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos foi realizada conforme ABNT (2007), com os cinco traços elaborados.

Foram confeccionadas, ainda, peças de concreto permeável prismáticas com dimensões de 100 mm x 200 mm x 60 mm, para análise da resistência à compressão, conforme ABNT (2013). Esta análise foi realizada apenas com o CREF e o C-ARC, pois estes foram os que apresentaram melhor desempenho de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos.

O concreto permeável não é coeso (Figura 15). Em virtude disto, o ensaio de abatimento do tronco de cone não foi realizado. Este ensaio não consegue mensurar a consistência desse tipo de concreto, pois o concreto poroso possui pouca trabalhabilidade. O processo de adensamento deve ser realizado com bastante cuidado, a fim de se evitar a segregação da pasta de cimento.

Figura 15 - Análise tátil-visual do concreto



Fonte: Autora (2020)

Posteriormente, foram moldados três corpos de prova prismáticos com dimensões de 50 cm x 15 cm x 15 cm, objetivando avaliação da resistência à tração na flexão (ABNT, 2010) aos 7, 14 e 28 dias. O adensamento dos corpos de prova foi realizado conforme recomenda ABNT (2015a): para corpos de prova prismáticos com as referidas dimensões e adensamento manual, desferem-se 25 golpes em cada uma das duas camadas. Foram feitas cinco marcações em cada CP, conforme recomenda a norma que rege este ensaio. Assim, marca-se uma linha em cada extremidade, distante 2,5 cm desta, e marca-se também o terço médio. O traço escolhido para utilização nos corpos de prova de tração foi aquele que apresentou melhor desempenho quanto à resistência à compressão, o C-REF.

b) Absorção de Água, Índice de vazios e Massa específica do concreto

O ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto permeável foi realizado conforme ABNT (2009b). Para tanto, foram analisados seis corpos de prova com dimensões de 20 cm de comprimento, 10 cm de largura e alturas médias de 7

cm. Destes, três eram Corpos de Prova (CPs) de concreto poroso fabricado com AN, e três CPs de concreto poroso fabricado com ARC.

A absorção de água do concreto permeável foi determinada utilizando-se a Equação 8.

$$A = \frac{Msat - Ms}{Ms} \times 100 \quad (8)$$

O índice de vazios foi calculado utilizando-se a Equação 9.

$$e = \frac{Msat - Ms}{Msat - Mi} \times 100 \quad (9)$$

A massa específica da amostra seca foi determinada pela Equação 10.

$$\rho_s = \frac{Ms}{Msat - Mi} \quad (10)$$

A massa específica real foi obtida através da Equação 11.

$$\rho_r = \frac{Ms}{Ms - Mi} \quad (11)$$

Em que:

A: absorção de água (%);

e: índice de vazios (%);

ρ_s : massa específica da amostra seca (g/cm^3);

ρ_r : massa específica real (g/cm^3);

ms: massa da amostra seca em estufa (g);

msat: massa da amostra saturada (g);

mi: massa da amostra saturada imersa em água (g).

c) Resistência por compressão axial

As análises de resistência à compressão axial foram realizadas com a máquina universal para ensaios mecânicos, modelo EMIC (monitorada por computador), com capacidade máxima de 3.000 kN. Os ensaios foram realizados conforme procedimentos de ABNT (2007) nos corpos de prova cilíndricos, e ABNT (2013) nos corpos de prova prismáticos.

A resistência à compressão foi obtida através da relação entre a força aplicada até romper-se o corpo de prova e a área em contato com a prensa (Equação 12).

$$F_{ck} = \frac{F}{A} \quad (12)$$

Em que: F_{ck} : *Feature Compression Know* - Resistência Característica do Concreto à Compressão, podendo ser expressa em MPa;

F: Força, podendo ser expressa em N;

A: Área, podendo ser expressa em mm².

A análise da resistência à compressão foi realizada aos 7, 14 e 28 dias de cura com os seguintes corpos de prova (Tabela 4):

Tabela 4 – Identificação das amostras utilizadas nos ensaio de resistência à compressão em função de cada norma específica.

Formato do CP	Norma	Identificação	Quantidade de amostras
Cilíndrico	ABNT (2007)	CP-AR	6
		CP-MIS	6
		CP-ADI	6
		CP-REF	6
		CP-ARC	6
Prismático	ABNT (2013)	CP-REF	9
		CP-ARC	9

Fonte: Autora (2020)

d) Resistência à tração na flexão

O ensaio de determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos (Figura 16) foi realizado conforme procedimentos de ABNT (2010).

Figura 16 – Corpo de prova após rompimento no ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Autora (2020)

De acordo com a norma que rege este ensaio, a ruptura do corpo de prova deve ocorrer no terço médio, ou então a uma distância não superior a 5 cm, o que foi verificado nesta pesquisa, tornando o ensaio válido.

A resistência à tração na flexão foi calculada pela Equação 13.

$$F_{ct,f} : p \cdot \ell / b \cdot d^2 \quad (13)$$

Em que:

$F_{ct,f}$: resistência à tração na flexão (MPa); p : carga máxima aplicada (N); ℓ : distância entre elementos de apoio (mm); b : largura média do corpo de prova na seção de ruptura (mm); d : altura média do corpo de prova na seção de ruptura (mm).

O procedimento foi realizado apenas com o traço de concreto que apresentou melhores resultados no ensaio de resistência à compressão axial, pois, em geral, valores de resistência à tração na flexão representam cerca de 10% dos valores de resistência à compressão. Consoante esta afirmação, o único traço que atenderia à especificação de ABNT (2015b) seria o que utilizou 100% de agregado natural.

3.2.4. Confeção das placas de concreto

Placas de concreto permeável foram moldadas para análise da condutividade hidráulica em laboratório e em campo, com a construção da parcela experimental. Cada placa possui 25 cm de largura por 25 cm de comprimento, e alturas variando entre 6 cm e 6,5 cm. Para análise da condutividade hidráulica das placas de concreto permeável (realizada em laboratório, de modo a analisar-se o desempenho das placas antes do assentamento), foram confeccionadas três placas distintas produzidas com CREF, C-ARM e C-AR.

Para a construção da parcela experimental, foram confeccionadas 16 placas de concreto permeável, produzidas com CREF (já que este foi o traço que apresentou melhor desempenho mecânico e hidráulico após análise das placas em laboratório). Juntas, as placas totalizaram uma área de cerca de 1 m².

3.2.5. Análise da condutividade hidráulica da placa e do pavimento “in situ”

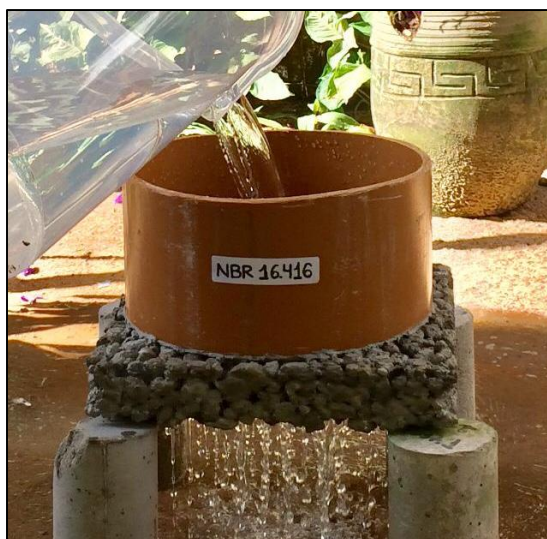
Para avaliar o desempenho hidráulico de um pavimento permeável e garantir que este irá contribuir com a diminuição do escoamento superficial de água, problema típico de áreas urbanas, estimou-se a condutividade hidráulica saturada das placas de concreto permeável através da medição da velocidade de infiltração de um volume conhecido de água.

Para determinação da condutividade hidráulica, foram utilizados os procedimentos descritos por ABNT (2015b). De acordo com esta norma, exige-se condutividade hidráulica superior a 10^{-3} m/s para um pavimento recém-construído. Orienta-se que antes do procedimento o pavimento seja limpo, retirando-se sedimentos e outros materiais que não estejam aderidos a este. Após essa limpeza, deve haver uma pré-molhagem, e iniciar-se o ensaio em até 2 minutos.

O tempo de pré-molhagem depende da massa escolhida para a realização do ensaio. Nesta pesquisa, optou-se por realizar o ensaio duas vezes em cada tipo de placa. Em ambas as ocasiões, utilizou-se massa de água de 3,6 kg para tempo de pré-molhagem superior a 30 segundos; e em um segundo momento, de 18 kg para tempo de pré-molhagem igual ou inferior a 30 segundos.

Foi utilizado um anel de infiltração cilíndrico vazado, com diâmetro de 300 mm, conforme exige ABNT (2015b). Neste anel foram feitas duas linhas de referência com distâncias de 10 mm, e uma outra de 15 mm em relação à face inferior do anel. A partir destas linhas se controlaria a velocidade com que a água seria vertida. A execução do ensaio está demonstrada na Figura 17.

Figura 17 – Teste de condutividade hidráulica na placa



Fonte: Autora (2020)

O anel cilíndrico foi acoplado no centro da placa de concreto, e, em um período menor que de dois minutos após a pré-lavagem, a água foi vertida no anel de infiltração, com velocidade suficiente para manter o nível da água entre as alturas de 10 mm a 15 mm do anel, conforme recomenda a norma que rege este ensaio. No momento em que a água atingiu

a superfície da placa, um cronômetro foi acionado, e quando não houve mais água livre na superfície, o cronômetro foi parado, sendo então registrado o tempo de percolação da água.

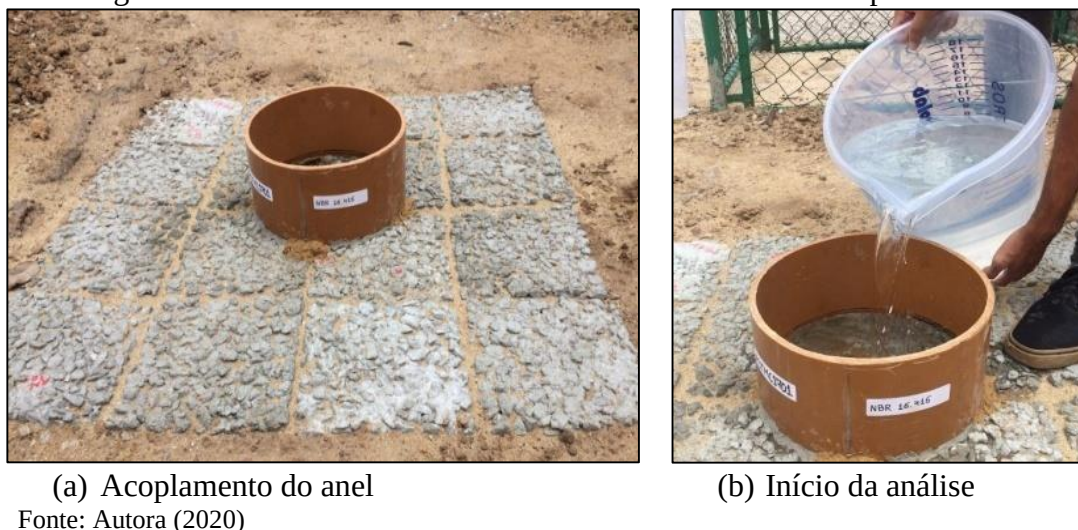
Para análise da condutividade hidráulica das placas de concreto permeável foram confeccionadas três placas distintas produzidas com CREF, C-ARM e C-AR. O ensaio foi realizado duas vezes em cada placa, sendo registrados os tempos para infiltração total da massa de água. Após esses procedimentos, seguiu-se com a determinação da condutividade hidráulica (K), conforme Equação 14.

$$K = \frac{C.m}{(d^2.t)} \quad (14)$$

Em que: K é a condutividade hidráulica (mm/h); C – fator de conversão SI; m – massa de água infiltrada (Kg); d – diâmetro interno do cilindro (mm); e t – tempo de percolação da água (s).

Foi realizada também a análise da condutividade hidráulica do concreto permeável “in situ”. A Figura 18 (a) demonstra o acoplamento do anel cilíndrico, e (b) o início da análise.

Figura 18 – Análise de condutividade hidráulica no trecho experimental



As análises foram realizadas com intuito de avaliar a diferença no desempenho do concreto permeável após montagem do trecho e com o passar dos dias. Os testes de condutividade hidráulica na parcela experimental foram realizados no 4º dia após a execução do pavimento, e também aos 45 e 74 dias.

3.2.6. Análise da condutividade hidráulica do solo

Para o dimensionamento do reservatório do pavimento permeável é necessária uma análise da condutividade hidráulica do solo no qual o pavimento será implantado. Com esse objetivo, foram coletadas amostras indeformadas na camada superficial do solo (a uma profundidade 0,2 m) para obtenção da condutividade hidráulica.

A condutividade hidráulica (K) foi obtida utilizando-se o método do Permeâmetro de Carga Constante (PCC). Para isso, foram coletadas seis amostras indeformadas de solo, as quais foram deixadas em saturação por cerca de 24 horas.

A condutividade hidráulica saturada do solo foi determinada pela Equação 15.

$$K = \frac{V \cdot L}{h \cdot A \cdot t} \quad (15)$$

Em que: K: condutividade hidráulica saturada (cm/s)

V: volume de água observado na proveta no tempo t (cm³)

h: altura da carga hidráulica, constante durante o ensaio (cm)

A: área da secção do corpo de prova (cm²)

L: altura do corpo de prova (cm)

t: tempo decorrido para a água percolar no volume Q (s)

3.2.7. Dimensionamento do reservatório do pavimento permeável

A camada subjacente ao revestimento permeável deve possuir espessura suficiente para que possa armazenar temporariamente o volume de água drenado da superfície. Assim, esta camada de base deve ser dimensionada baseando-se na chuva de projeto.

ABNT (2015b) traz critérios para o dimensionamento hidráulico das camadas de base e sub-base de pavimentos permeáveis, e recomenda levar em consideração as condições locais de solo e de precipitação. Essa norma esclarece que o dimensionamento da altura de base refere-se exclusivamente à função de reservatório de água do pavimento permeável. Não se exclui a necessidade do dimensionamento mecânico conforme o tipo de pavimento escolhido, devendo-se adotar o maior valor que atenda simultaneamente aos requisitos hidráulicos e mecânicos.

O dimensionamento hidráulico da altura da base granular é definido utilizando-se a Equação 16.

$$H_{\text{máx}} = \frac{\Delta Q_c R + P - f T e}{V_r} \quad (16)$$

Em que: $H_{\text{máx}}$: espessura total da camada reservatória (m); ΔQ_c : precipitação excedente da área de contribuição para uma dada chuva de projeto (m); R : relação entre a área de contribuição e a área de pavimento permeável; A_c : área de contribuição (m²); A_p : área de pavimento permeável (m²); P : precipitação de projeto (m); f : taxa de infiltração no solo (m/h); T_e : tempo efetivo de enchimento da camada reservatória, geralmente igual a 2 horas; V_r : índice de vazios da camada.

Para utilização de britas no reservatório, foi seguida a recomendação da ABNT (2015b), que orienta utilização de uma faixa entre 9,5 mm e 19 mm. Schaefer, Kevern e Wang (2011) observaram que o emprego de diferentes tamanhos de agregados reduz a taxa de porosidade e infiltração do concreto permeável.

A Equação 17 foi utilizada por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) para o dimensionamento da profundidade da camada reservatória do pavimento permeável desenvolvido pelos autores. De acordo com eles, a camada reservatória deve ser dimensionada de forma a acomodar o volume de escoamento de uma precipitação de projeto menos o volume de escoamento que é infiltrado durante a precipitação. A profundidade da camada reservatória foi determinada por:

$$H = \frac{(i_p + C - i_e) t_d}{f} \quad (17)$$

Em que: H é a profundidade da camada reservatória do pavimento (mm); i_p é a intensidade máxima da chuva de projeto (mm/h); i_e é a taxa de infiltração do solo (mm/h); t_d é o tempo de duração da chuva (horas); f é a porosidade do material utilizado na camada reservatória; C é um fator de contribuição de áreas externas ao pavimento permeável, que pode ser estimado pela Equação 18.

$$C = \frac{i_p A_c}{A_p} \quad (18)$$

Em que: A_c é a área externa de contribuição para o pavimento permeável; e A_p é a área de pavimento permeável.

3.2.8. Precipitação e período de retorno

De acordo com ABNT (2015b), a determinação da chuva de projeto deve seguir a metodologia adotada para dimensionamento do sistema de microdrenagem. As equações e curvas de intensidade/duração/frequência (IDF) podem ser utilizadas para gerar chuvas de projeto, a partir da obtenção de valores de precipitação em intervalos de tempo menores do que a duração total da chuva.

ABNT (2015b) determina que, na ausência de curvas IDF para locais próximos à área em estudo, recorra-se a análises estatísticas de dados de chuvas de pluviômetros, coletados em intervalo de tempo diário.

O período de retorno, também conhecido como período de recorrência ou tempo de recorrência, é o período de tempo médio em que um determinado evento hidrológico é igualado ou superado pelo menos uma vez. É um parâmetro fundamental para a avaliação e projeto de sistemas hídricos, como reservatórios, canais, vertedores, bueiros, galerias de águas pluviais, entre outras obras hidrológicas (RIGHETTO, 1998).

ABNT (2015b) determina que o período de retorno a ser adotado no dimensionamento hidráulico de pavimentos permeáveis deve ser de no mínimo dez anos, considerando-se a duração mínima de 1 hora. Nesta pesquisa, variou-se os parâmetros em 10, 15 e 20 anos de período de retorno, e 60 e 120 minutos de duração de chuva, como forma de avaliar a variação da intensidade de precipitação.

Para o dimensionamento da base do reservatório desta pesquisa, fez-se necessária a utilização da intensidade de precipitação em mm/h. Para tal determinação, utilizou-se a equação IDF desenvolvida por Silva, Palácio Junior e Campos (2013). As intensidades de precipitação obtidas encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados e intensidades de precipitações obtidas.

T (anos)	t (min)	i (mm/h)
10	60	60,81
10	120	38,06
15	60	65,23
15	120	40,83
20	60	68,56
20	120	42,91

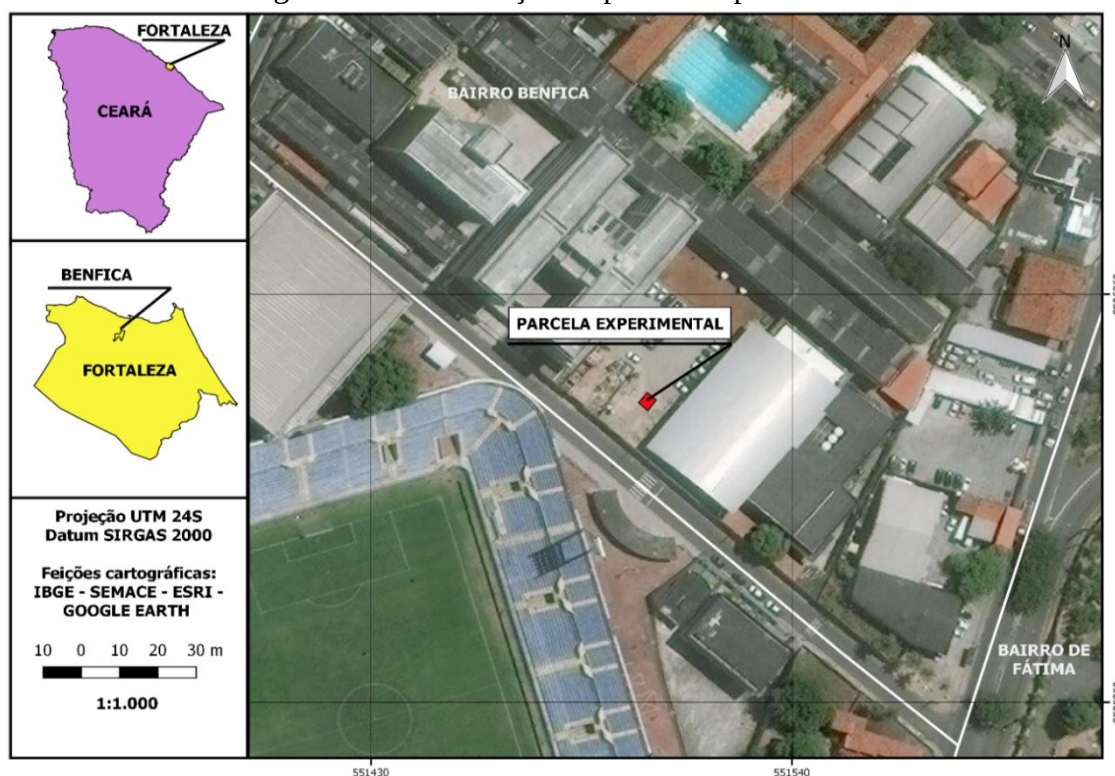
Fonte: Autora (2020)

Para um período de retorno de 20 anos e duração de chuva de 1 hora, obteve-se a intensidade de precipitação de 68,56 mm/h.

3.2.9. Montagem de parcela experimental

A parcela experimental foi montada no dia nove de dezembro de 2019, próxima ao estacionamento do IFCE, localizado na Av. 13 de Maio, Benfica, Fortaleza-CE (Figura 19), com o auxílio de um pedreiro e um ajudante. Dimensionada com base em ABNT (2015b), possui uma camada de revestimento permeável (concreto permeável) de 60 mm, assentada em uma camada de regularização com cerca de 50 mm, sobrepostas a uma camada de base (reservatória) com espessura de 150 mm, com função de armazenar temporariamente a água infiltrada no pavimento, por sua vez assentada sobre o terreno natural.

Figura 19 – Localização da parcela experimental



Fonte: Autora (2020)

Todo o procedimento (Figura 20) durou cerca de 4 horas e consistiu em:

- Escavação do fosso (Figura 20a), com dimensões aproximadas de 1 m por 1 m, profundidade de 30 cm e inclinação de 5%. O solo do fundo foi umedecido e compactado;
- Colocação de uma manta geotêxtil (Figura 20b), que permitisse a passagem do fluxo de água e evitasse a migração de partículas sólidas entre as camadas do pavimento;

- Colocação de duas formas com 15 cm de altura, para separar o reservatório em três (Figura 20c), como recomenda Leming *et al.* (2007), evitando assim que a água infiltrada fosse direcionada totalmente para a parte mais baixa;
- Despejamento da brita, até que atingisse a altura das formas (15 cm), e realização da sua compactação. A brita utilizada tinha dimensões entre 9,5 mm e 19 mm, como recomenda ABNT (2015b) e ACI (2010). Novamente colocou-se uma manta geotêxtil, evitando-se assim que o material mais fino fosse carregado para o reservatório de britas;
- Montagem, acima do reservatório, de uma camada de assentamento (Figura 20d), na qual se utilizou areia de rio. A camada foi dimensionada com 6 cm antes da compactação, conforme recomenda ABNT (2015b) – não se deveria ultrapassar essa altura. A camada foi levemente compactada e recebeu as placas de concreto permeável, as quais foram assentadas com juntas de espaçamento de 1 cm. O rejunte foi realizado com areia de rio.

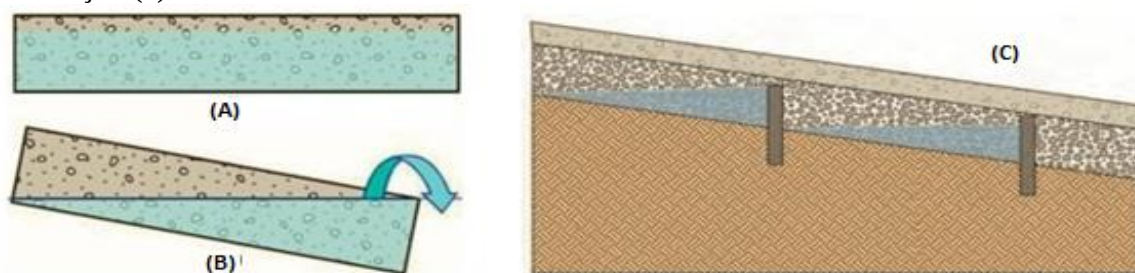
Figura 20 – Processo de montagem da parcela experimental



Fonte: Autora (2020)

Na Figura 21 encontra-se uma ilustração que explica a necessidade da separação do reservatório de britas de pavimentos que possuem inclinação. Na Figura 21 (a) é mostrado um reservatório de pavimento sem inclinação, na (b) um reservatório de pavimento com inclinação, e em (c) um modelo de configuração de reservatório com inclinação no qual a água infiltrada é distribuída de forma proporcional.

Figura 21 – Diferença de armazenamento temporário de água em reservatório de pavimento sem inclinação (a) e com inclinação (b); sugestão de configuração da parcela montada com inclinação (c).



Fonte: Leming *et al.* (2007)

De acordo com Leming *et al.* (2007), se o pavimento não estiver nivelado e a intensidade da precipitação for maior que a taxa de infiltração do solo, a porção superior do pavimento não será preenchida e os volumes precipitados escoarão rapidamente para a parte inferior (Figura 21b). Quando essa parte estiver cheia, a chuva tenderá a saturar a parte mais baixa do reservatório, e os efeitos benéficos do concreto permeável poderão não ser observados.

Portanto, é de fundamental importância que um pavimento permeável construído com inclinação possua separações em seu reservatório de armazenamento temporário de água, pois, assim, a água que porventura infiltrar será armazenada parcialmente de forma concordante. Como nesta pesquisa a parcela experimental foi montada com inclinação, houve um seccionamento do reservatório de armazenamento, atendendo a Leming *et al.* (2007).

Na Figura 22a, observa-se a parcela anexada a uma forma de aço galvanizado, objetivando análise do escoamento superficial nos dias em que houvesse precipitações. A forma possui um orifício de saída localizado na parte mais baixa do pavimento, pela qual a água escoaria e seria direcionada para um reservatório de armazenamento temporário. A forma possuía dimensões aproximadas de 1,04 m x 1,04 m. Na Figura 22b, vê-se a estação pluviométrica automática instalada ao lado da parcela experimental, utilizada para coleta de dados de precipitação.

Figura 22 – Finalização da parcela experimental com forma acoplada para análise do escoamento superficial (a); estação pluviométrica (b).



(a) Parcela experimental com forma acoplada

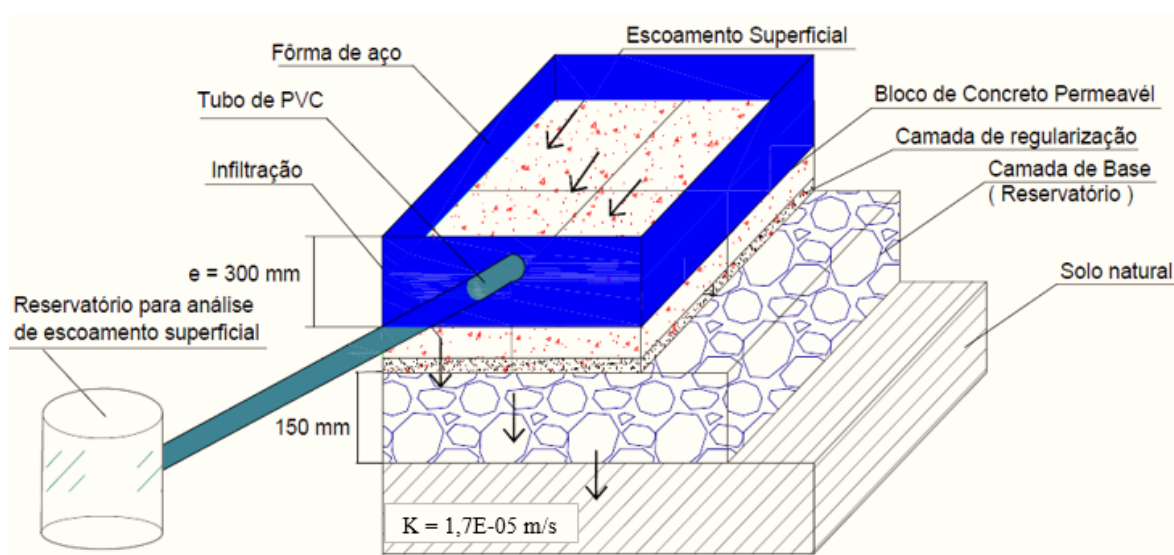


(b) Estação pluviométrica

Fonte: Autora (2020)

A Figura 23 traz um esquema da estrutura do pavimento permeável montado. Ao final de cada evento pluviométrico foi realizada conferência do volume de água escoada, a qual compôs, juntamente aos dados de precipitação obtidos na estação pluviométrica automática instalada, o cálculo do escoamento superficial gerado.

Figura 23 – Esquema da estrutura do pavimento permeável.



Fonte: Autora (2020)

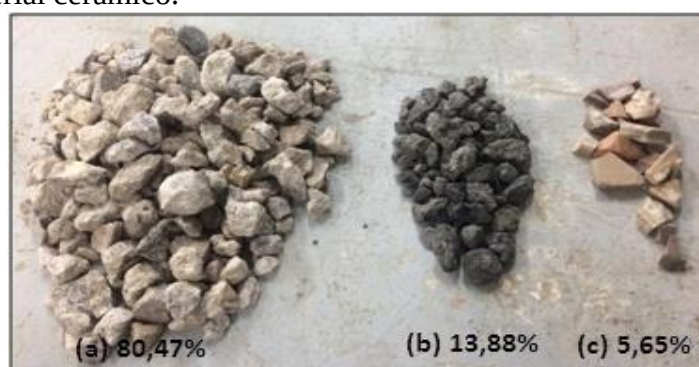
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo os resultados encontrados durante o desenvolvimento da pesquisa são analisados e discutidos.

4.1. Composição gravimétrica do Agregado Reciclado

Os resultados da determinação da composição dos agregados reciclados graúdos por análise visual (Figura 24), baseada em ABNT (2004b), estão no Quadro 6.

Figura 24 - Caracterização visual do agregado reciclado, sendo (a) concreto/argamassa, (b) asfalto, e (c) material cerâmico.



Fonte: Autora (2020)

Quadro 6 - Composição gravimétrica do agregado reciclado

Material	Grupo	Porcentagem (%)
Cerâmica	G3	5,65
Asfalto	G4	13,88
Concreto/Argamassa	G1 e G2	80,47

Fonte: Autora (2020)

Observa-se que a amostra é predominantemente oriunda de concreto e argamassa, sendo que mais de 80% da amostra é composta por este material. Ainda deve-se ressaltar que há apenas 5,65% de presença de cerâmica e 13,88% de asfalto. Como nesta pesquisa a porcentagem apresentada de concreto e argamassa foi de cerca de 80%, este agregado reciclado classifica-se como Agregado de Resíduo Misto (ARM).

Posteriormente aos ensaios mecânicos do concreto, percebeu-se a necessidade de melhoria no agregado reciclado. Logo, houve uma manipulação da composição desse material. A porcentagem de asfalto e cerâmica foi retirada, tornando o agregado 100% oriundo de resíduos de concreto (ARC). Os agregados ARM e ARC foram utilizados em traços distintos.

4.2. Análise granulométrica

A partir do ensaio de granulometria por peneiramento (ABNT, 2003) para o Agregado Reciclado (AR), para o Agregado Natural (AN), e para a mistura, obteve-se os resultados demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Porcentagens de agregados da mistura, dos agregados reciclados e naturais obtidas no ensaio de granulometria por peneiramento.

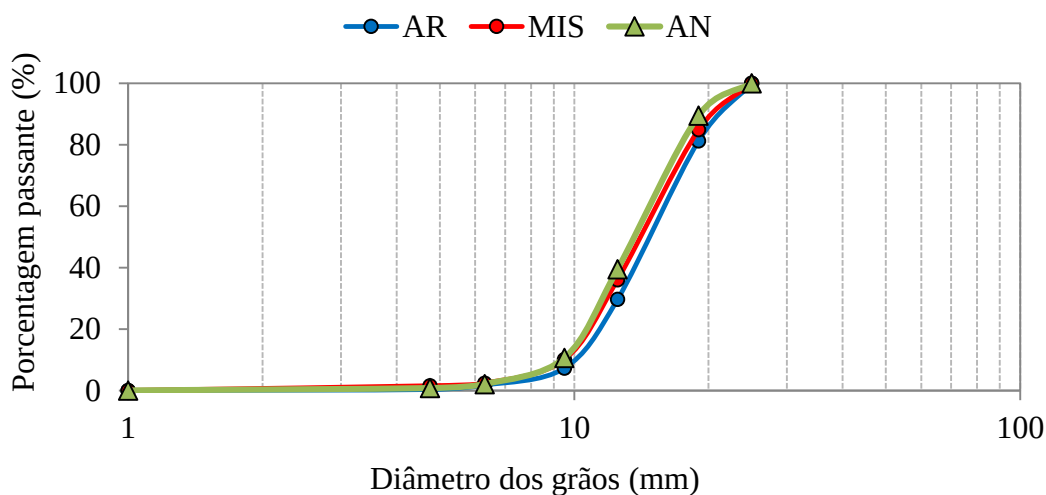
Abertura da peneira	Porcentagem retida acumulada		
	Mistura	AR	AN
25,0 mm	0	0	0
19,0 mm	15	18	11
12,5 mm	63	70	60
9,5 mm	89	92	89
6,3 mm	97	98	98
4,75 mm	98	99	99
<4,75 mm	100	100	100

Fonte: Autora (2020)

Conforme manipulação da granulometria do agregado reciclado, pode-se constatar que se atingiu o objetivo de enquadrar os agregados em faixa granulométrica recomendada pela ACI (2006). De mesmo modo, equiparou-se esta granulometria a trabalhos anteriores (ARAÚJO; TUCCI, GOLDENFUM., 2000; OLIVEIRA, 2017; CLAUDINO 2018).

A partir do ensaio de granulometria obteve-se as curvas granulométricas das amostras, demonstradas na Figura 25.

Figura 25 - Curvas granulométricas das amostras.



Fonte: Autora (2020)

A partir da análise dos resultados encontrados, pode-se perceber a similaridade na composição granulométrica das amostras, sendo ambas constituídas de material predominantemente pedregulhoso – pois, conforme escala granulométrica da ABNT (2003), pedregulho é aquele material que tem seus grãos compreendidos entre 76 mm e 4,75 mm. Contudo, este é um resultado esperado, pois a granulometria de ambos os materiais foi enquadrada em uma faixa específica.

Ainda com base na granulometria, foram obtidos alguns coeficientes importantes para a caracterização dos materiais. Como exemplo, cita-se o diâmetro máximo característico do agregado (DMC). Este corresponde ao diâmetro no qual a porcentagem acumulada é inferior ou igual a 5%, desde que essa porcentagem seja superior a 5% na peneira imediatamente abaixo. O módulo de finura (MF) também foi determinado, através da soma das percentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal dividido por cem. Quanto maior o módulo de finura, maior o tamanho dos grãos. O DMC das amostras foi de 25 mm, o MF para o AR foi de 7,1 e, para a mistura e para o AN, foi de 7,0.

De acordo com Yang e Jiang (2003), o concreto poroso com agregado graúdo de DMC 19 mm produz vantagem hidrológica, já que apresenta poros de maiores tamanhos e maior condutividade hidráulica em relação ao concreto de DMC de 9,5 mm. Entretanto, esse concreto possui menor resistência à compressão, pois tem menor área de superfície de contato interna entre o agregado e a pasta de cimento. ABNT (2004b) traz recomendações acerca de alguns requisitos para a utilização de agregado reciclado na pavimentação. Entre eles, está a especificação de um DMC máximo, o qual não pode ultrapassar 63 mm.

A respeito do módulo de finura, quanto maior for seu valor, mais grosso será o material. Este parâmetro pode ser utilizado em metodologia de dosagem do concreto. Já o DMC é de fundamental importância no ensaio de desgaste por abrasão. Conforme Yang e Jiang (2003), ele exerce influência na resistência à compressão e na condutividade hidráulica do material.

4.3. Desgaste por abrasão Los Angeles dos agregados

O desgaste por abrasão encontrado para o AN foi de 37%; para o ARC, de 32%; e para o ARM, de 49% (Tabela 7). O desgaste do agregado reciclado de resíduo misto foi de cerca de 32% superior em relação ao desgaste do agregado natural, e 53% maior quando comparado ao agregado reciclado de resíduo de concreto. DNIT (2006) estabelece que, para uso em camadas granulares de pavimentos, a fração granular deve apresentar um desgaste

por abrasão Los Angeles igual ou inferior a 50%, podendo ser aceito um valor de desgaste maior, desde que haja experiência no uso do material.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de Abrasão “Los Angeles”

Material	Perda por abrasão (%)
AN	37
ARC	32
ARM	49

Fonte: Autora (2020)

Com base nos resultados de desgaste por abrasão, infere-se que todos os agregados estudados podem compor camadas de pavimentos.

4.4. Massa específica e absorção de água dos agregados

Os valores de absorção de água e de massa específica seca, saturada e aparente obtidos para o agregado reciclado (AR), para o agregado natural (AN), e para a mistura de ambos na proporção de 50% são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de massas específicas e de absorção de água do agregado reciclado, da mistura do agregado reciclado com o natural, e do agregado natural.

Característica	Agregado reciclado	Mistura AR e AN 50%	Agregado natural
Massa específica seca (g/cm ³)	2,517	2,401	2,648
Massa específica saturada (g/cm ³)	2,225	2,343	2,615
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,341	2,370	2,628
Absorção de água (%)	5,20	1,19	0,48

Fonte: Autora (2020)

Em relação às massas específicas, infere-se que, entre as três amostras analisadas, o agregado natural possui maiores valores de massas específicas. Analisando-se os valores de absorção, observa-se que o valor de absorção do agregado reciclado foi cerca de 10 vezes superior ao do agregado natural.

A absorção encontrada para o agregado reciclado desta pesquisa foi de 5,2%. Apesar de ser um valor elevado, está dentro dos parâmetros requeridos pela ABNT (2004b), que estabelece requisitos para a utilização de agregados reciclados de classe A em pavimentação e preparo de concretos sem função estrutural. Conforme esta norma, os agregados de resíduos de concreto (ARC) devem possuir uma absorção máxima de 7%; já para os agrupados como agregados de resíduos mistos (ARM), como os desta pesquisa, se aceita absorção igual ou inferior a 12%.

Segundo Leite (2001), quando se estuda o uso dos agregados reciclados em concretos, um dos fatores mais importantes é o da absorção de água dos agregados reciclados, pois esta taxa intervém diretamente na relação final de a/c das misturas. No entanto, se a absorção não for levada em conta, além da diminuição da relação a/c, haverá uma redução da trabalhabilidade do material, que é uma das propriedades mais afetadas pelo uso do agregado reciclado, tornando o concreto muito seco. Ainda segundo o autor, os concretos produzidos com agregados reciclados (AR) necessitam de 5% de água livre a mais em relação aos concretos convencionais (para que se garanta aos primeiros a mesma consistência destes últimos). Isto se dá porque, comumente, o agregado reciclado possui uma capacidade de absorção de água superior à do agregado natural.

O Quadro 7 traz alguns trabalhos que avaliaram características físicas de concretos permeáveis produzidos com RCD: Pereira e Barbosa (2015), Santos (2017), Oliveira (2017); e os resultados desta pesquisa. Conforme pode ser observado nos estudos anteriores, o agregado reciclado apresenta valores menores de massa específica em relação ao agregado natural. Este trabalho segue a mesma tendência.

Quadro 7 - Valores de massas específicas e de absorção obtidos nos trabalhos de Pereira e Barbosa (2015), Santos (2017), Oliveira (2017), e nesta pesquisa.

Autores	Material	Massa específica seca (g/cm ³)	Absorção de água (%)
Pereira e Barbosa (2015)	AR	1,93	2,46
Santos (2017)	AN	3,19	1,69
	AR	2,31	8,62
Oliveira (2017)	AN	3,06	1,18
	AR	2,73	6,57
Autora (2020)	AN	2,64	0,48
	AR	2,51	5,2
	Mistura 50%	2,40	1,19

Fonte: Autora (2020)

De acordo com Cabral (2007), para a massa específica, esta redução ocorre em função das características das matérias-primas dos mesmos, uma vez que são menos densas do que as dos agregados graúdos naturais.

É fato que os agregados reciclados possuem elevados valores de absorção quando comparados aos agregados naturais. Santos (2017) obteve uma absorção do AR de 8,62%, cerca de 5 vezes maior que a do AN (1,69%). Oliveira (2017) obteve uma absorção para o agregado reciclado de 6,57%. A absorção encontrada para o agregado reciclado utilizado

nesta pesquisa foi inferior à obtida por estes autores, estando, no entanto, dentro da margem estabelecida por ABNT (2004b). De acordo com Cabral (2007), isto ocorre, principalmente, em função da grande variabilidade da composição e porosidade dos RCD, bem como da sua forma de britagem. O autor ainda ressalta que, ao se produzir concretos com agregado reciclado, é de relevante importância que esta característica seja levada em consideração.

Segundo Tam, Gao e Tam (2005), agregados com altas taxas de absorção geralmente conduzem a concretos com desempenhos inferiores, os quais têm afetadas propriedades como resistência, durabilidade, deformação e retração. Quanto aos agregados reciclados de cerâmica vermelha, parece que sua porosidade é diretamente proporcional à porosidade dos artefatos cerâmicos que os originaram e, assim, consequentemente, à sua resistência mecânica (SCHULZ; HENDRICKS, 1992).

4.5. Massa unitária solta e compactada dos agregados e volume de vazios

Os valores de volume de vazios e de massas unitárias soltas e compactadas obtidas para o agregado reciclado, para o agregado natural, e para a mistura de ambos na proporção de 50% são expostas na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de massas unitárias soltas e compactadas e volume de vazios do agregado reciclado, do agregado natural, e da mistura de ambos.

Característica	Agregado reciclado	Mistura AR e AN 50%	Agregado natural
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,187	1,299	1,380
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,302	1,431	1,484
Volume de vazios (%)	50,57	43,15	45,92

Fonte: Autora (2020)

Com base nos resultados, observa-se uma tendência: os AR apresentam valores menores de massa unitária, e um crescimento que é proporcional ao aumento da porcentagem de AN. Os estudos anteriores de Santos *et al.* (2018), de Santos (2017), e de Oliveira (2017), que avaliaram características físicas de concretos permeáveis produzidos com AR e AN, e que realizaram análises comparativas de valores de massas unitárias, foram expostos no Quadro 8. Nesses estudos, foram observados, de forma geral, valores menores para o AR, os quais são corroborados pelos valores obtidos nesta pesquisa. Cabral (2007) afirma que a forma irregular das partículas dos agregados contribui para a redução da massa unitária. Contudo, essas reduções são dependentes também da granulometria dos AR.

Quadro 8 - Valores de massas unitárias obtidas nos estudos de Santos *et al.* (2018), de Santos (2017), de Oliveira (2017) e nesta pesquisa.

Autores	Material	Massa unitária solta (g/cm ³)	Massa unitária compactada (g/cm ³)
Oliveira (2017)	AN	1,53	1,70
	AR	1,17	1,31
Santos (2017)	AN	1,34	2,97
	AR	1,08	1,12
Santos <i>et al.</i> (2018)	AN	1,45	-
	AR	1,09	-
Autora (2020)	AN	1,38	1,48
	AR	1,18	1,30
	Mistura 50%	1,29	1,43

Fonte: Autora (2020)

Ressalta-se que o volume de vazios dos agregados desta pesquisa assemelha-se a valores obtidos em outras pesquisas (MIKAMI *et al.*, 2018; COSTA *et al.*, 2019).

4.6. Análises de Lixiviação e Solubilização do RCD

Os resultados de lixiviação e solubilização estão no Quadro 9. A amostra foi analisada e classificada de acordo com ABNT (2004c).

Quadro 9 - Análise iônica do extrato lixiviado e solubilizado do RCD.

Lixiviado (mg/l)							
Amostragem	F-	Cl	SO ₄	N	Br-	PO	HNO ₂
RCD	0,5959	7697,456	48,016	7,4675	0,2725	0,2075	9,6481
Limite ABNT (2004c)	150,00	-	-	-	-	-	-
Solubilizado (mg/l)							
Amostragem	F-	Cl	SO ₄	N	Br-	PO	HNO ₂
RCD	0,3756	15,3817	72,4519	2,7162	0,0045	-	0,2325
Limite ABNT (2004c)	1,50	250,00	250,00	10,00	-	-	-

Fonte: Autora (2020)

De acordo com ABNT (2004c), o limite máximo de Fluoreto é de 150 mg/l. A partir dos resultados de lixiviação, infere-se que a amostra estudada de RCD praticamente não apresentou concentração deste elemento. Quanto aos resultados de solubilização, o RCD atende ao que é exigido pela norma. As concentrações de fluoreto, cloro, sulfato e nitrogênio estão bem inferiores ao limite estabelecido por ABNT (2004c). Portanto, o RCD utilizado nesta pesquisa classifica-se como Resíduo Classe II – não perigoso.

4.7. Absorção de água, Índice de vazios e Massa específica do concreto

Após os procedimentos realizados conforme ABNT (2009b), foi possível determinar a absorção de água, índice de vazios e massas específicas do concreto permeável. Os valores estão demonstrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Teor de absorção de água, índice de vazios, e massas específicas seca e real.

Propriedade	C-ARC	CREF
Absorção de água (%)	5,30	5,52
Índice de vazios (%)	14,95	11,24
Massa específica seca (g/cm ³)	2,824	2,037
Massa específica real (g/cm ³)	3,320	2,296

Fonte: Autora (2020)

De acordo com ABNT (2013), as peças de concreto devem apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6%. Enfatiza-se que o teor médio de absorção de água do concreto permeável ficou dentro da margem estabelecida.

A porosidade do pavimento de concreto permeável, em geral, apresenta resultados entre 15% e 25% (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; ACI, 2006; HOLTZ, 2011). Para Batenzine (2013), valores abaixo desta faixa são considerados de baixa porosidade. Aqueles acima de 30% são considerados como de alta porosidade. Para Marchioni (2019), essa faixa é de 15% a 30%. Contudo ACI (2013) estipula uma tolerância de 5%. Logo, apesar do índice de vazios encontrado para o concreto permeável estudado nesta pesquisa se encontrar abaixo do recomendado, essa propriedade está dentro da margem de tolerância.

Quanto às massas específicas, os valores obtidos seguem a tendência de outros trabalhos (TENNIS, LEMING, AKERS, 2004; OLIVEIRA, 2017; CLAUDINO, 2018), nos quais a massa específica seca é, geralmente, menor que a massa específica real.

4.8. Resistência à compressão axial

Na Tabela 11 são apresentados os resultados de resistência à compressão obtidos.

Tabela 11 – Valores de resistência à compressão dos cinco diferentes traços de concreto em 7, 14 e 28 dias de cura, expressos em Mpa.

Identificação	7 dias	14 dias	28 dias
C-AR	2,38	3,12	5,22
C-MIS	3,62	4,16	5,35
C-ARM	4,54	6,30	9,04
C-ARC	6,85	8,17	10,33
CREF	11,23	14,03	25,90

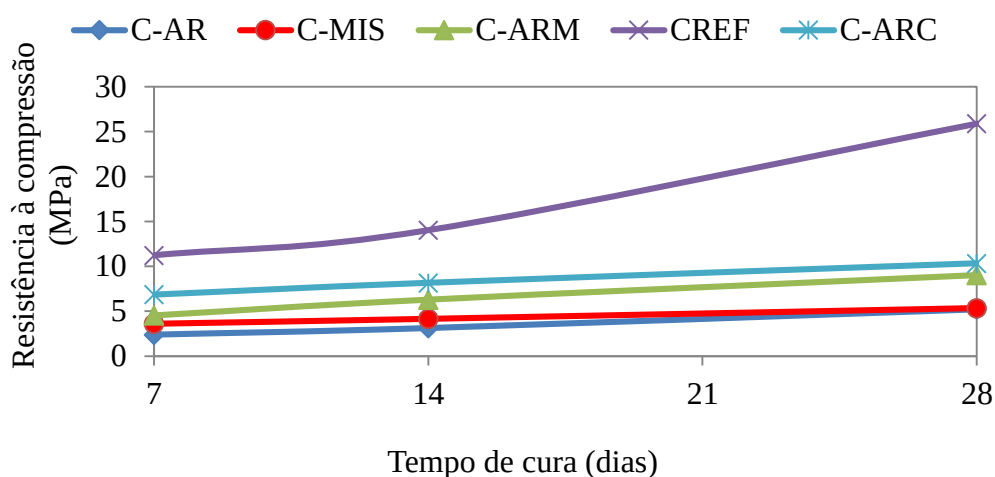
Fonte: Autora (2020)

Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos, os quais foram produzidos tendo como base os cinco diferentes traços elaborados com agregados reciclados e naturais. A partir dos resultados, infere-se que o concreto produzido somente com agregado reciclado teve um baixo desempenho quanto à resistência à compressão. O concreto produzido com a mistura de agregados apresentou um valor de cerca de 52% maior que o do concreto AR aos 7 dias. Isto se explica por dois fatos: substituição de 50% do AR por agregado natural e acréscimo de 5% de agregados miúdos.

Os traços C-ARM (concreto produzido com 30% de agregado de resíduo misto e 70% de agregado natural e aditivo superplastificante) e C-ARC (concreto produzido com 30% de agregado de resíduo de concreto e 70% de agregado natural) apresentaram valores bem discrepantes aos 7 e 14 dias de cura. Contudo, aos 28 dias de cura os resultados não apresentaram tanta diferença, ainda que o concreto ARC tenha apresentado valores um pouco mais elevados (um incremento de cerca de 14%). Isto se deu, provavelmente, devido à presença no concreto de uma maior heterogeneidade dos agregados de resíduos mistos, os quais possuem em sua composição resíduos de cerâmica e asfalto.

Na Figura 26 são verificadas as curvas de resistência à compressão para os traços de concretos avaliados em função dos tempos de cura.

Figura 26 - Resistência à compressão simples *versus* tempos de cura.



Fonte: Autora (2020)

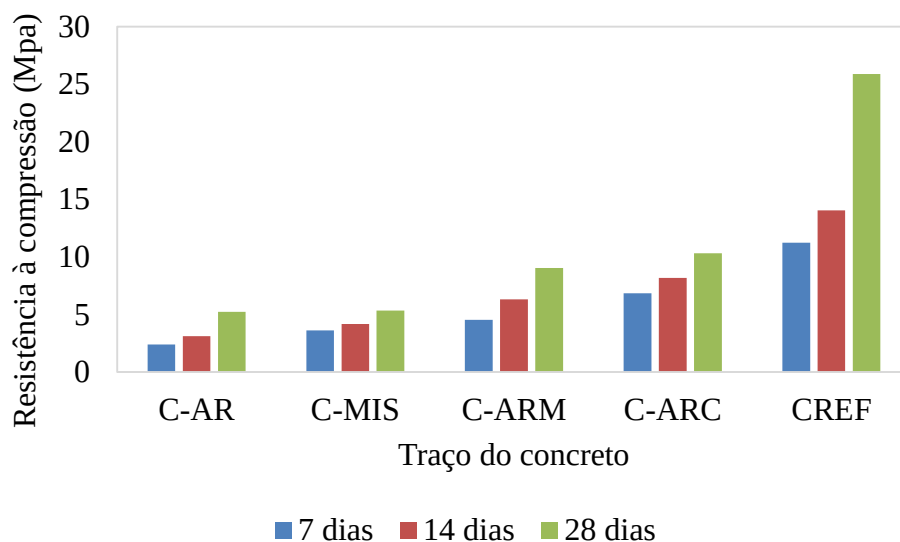
Observa-se uma tendência de crescimento das resistências à compressão dos concretos estudados. Percebe-se também o salto que o concreto produzido com agregados naturais dá a partir dos 14 dias de cura, sendo este último aquele que apresenta maior evolução ao longo do tempo de cura. Desse modo, o corpo de prova que apresentou melhores

resultados de compressão foi desenvolvido somente com agregado natural. Aos 28 dias, o CREF superou o C-AR numa escala de cerca de cinco vezes mais.

Consoante ABNT (2015b) e FORTALEZA (2020), peças de concreto permeáveis devem apresentar uma resistência à compressão superior a 20 MPa para 28 dias de cura. O único traço que atendeu a esse requisito, nesta pesquisa, foi o elaborado com agregado natural. A resistência baixa dos traços desenvolvidos com agregado reciclado deve-se, provavelmente, à baixa qualidade do RCD, uma vez que este apresentou alto valor de desgaste por abrasão e elevada absorção, características que também podem contribuir para menores valores de resistência, conforme Tam, Gao e Tam (2005).

Na Figura 27, é possível encontrar um diagrama que demonstra a comparação entre os cinco diferentes traços de concreto (para 7, 14 e 28 dias de cura) no que diz respeito à resistência à compressão. De acordo com ACI (2010), o concreto poroso deve apresentar, no estado endurecido, resistência à compressão simples variando entre 2,8 MPa e 28 MPa. Logo, o concreto estudado nesta pesquisa enquadra-se na faixa de ACI (2010), excetuando-se apenas o C-AR (aos 7 dias de cura).

Figura 27 – Comparação da resistência à compressão dos cinco diferentes traços de concreto para 7, 14 e 28 dias de cura.



Fonte: Autora (2020)

Para Cabral (2007), os valores de resistência à compressão de concretos produzidos com AR geralmente são menores que os de concretos produzidos com agregados naturais. Segundo o autor, essas reduções podem atingir a ordem de 45% da resistência dos concretos de referência, o que corrobora os resultados obtidos nesta pesquisa (a qual constatou que a resistência à compressão diminuiu à medida que se aumentou a quantidade de AR). Enfatiza-

se também as alterações no fator a/c e na quantidade de agregado miúdo na diversidade dos traços. Apresenta-se, assim, através da pesquisa, uma variabilidade nos valores de resistência mecânica.

Santos *et al.* (2018) obtiveram resistência à compressão para uma mistura entre AR e AN na proporção de 50% (utilizada em concreto permeável) aos 7 e 14 dias, respectivamente, de 11 MPa e 14 MPa. Já Oliveira (2017) verificou, para um concreto permeável confeccionado com 20% de agregados reciclados, valor de resistência à compressão aos 7 dias de 12 Mpa, e aos 28 dias de cerca de 14 MPa. Santos (2017) obteve aos 28 dias resistência à compressão de 7,22 MPa em um concreto permeável com substituição de 35% do AN por AR e adição de aditivo superplastificante.

Conforme Yang e Jiang (2003), baixa resistência geralmente é associada à alta porosidade do concreto. Conforme foi visto anteriormente, o concreto desta pesquisa apresenta porosidades entre 11% e 15%; logo, estão justificados os baixos valores de resistência mecânica obtidos.

De acordo com Oliveira *et al.* (2007), algumas características do concreto que podem ser modificadas pelo uso de resíduos reciclados são: resistência mecânica, absorção de água, porosidade, condutividade hidráulica e massa específica. Isto é corroborado por Rizvi *et al.* (2009). Segundo esta, as características do concreto com reciclado tendem a variar mais que as de concretos convencionais, devido à variabilidade da composição do AR.

Lian e Zhuge (2010) estudaram relações a/c entre 0,30 e 0,38, e concluíram que para uma relação a/c maior que 0,34 a resistência à compressão diminui e a condutividade hidráulica aumenta. Os melhores resultados foram obtidos a 0,32, não sendo recomendado pelos autores relação a/c menor que 0,30. Nesta pesquisa foi utilizado, inicialmente, um fator a/c de 0,40, o qual foi sendo então gradualmente diminuído.

Consoante ABNT (2013), foi realizada a determinação da resistência à compressão da peça de concreto permeável. Foram confeccionadas peças (100 mm x 200 mm x 60 mm) produzidas com o concreto ARC e o concreto RER (Tabela 12).

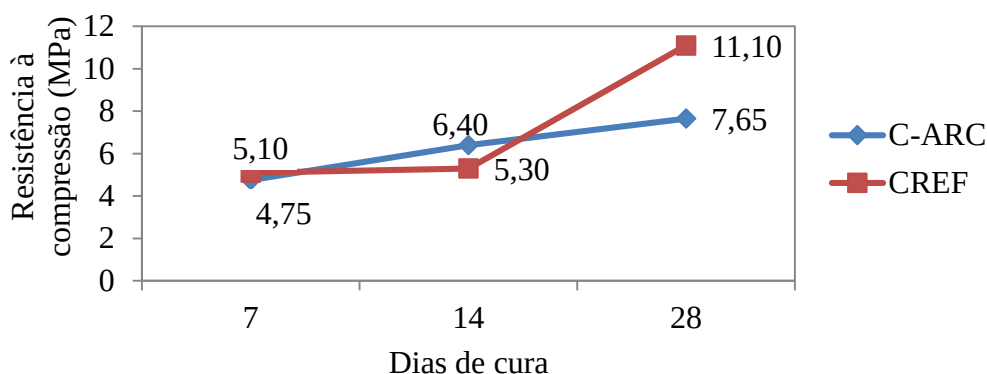
Tabela 12 – Resistência à compressão das peças de concreto permeável (MPa)

Dias de cura	C-ARC	CREF
7	4,75	5,10
14	6,40	5,30
28	7,65	11,10

Fonte: Autora (2020)

Na Figura 28 observa-se a relação entre a resistência à compressão e o tempo de cura do concreto. Aos 14 dias, a resistência do concreto ARC superou a do concreto AN. Contudo, aos 28 dias, o concreto AN superou ARC em cerca de 45%.

Figura 28 – Resistência à compressão *versus* dias de cura



Fonte: Autora (2020)

O valor máximo encontrado por Rivzi *et al.* (2009) para um concreto produzido com RCD foi de 5,53 Mpa; e para um produzido com AN, 9,76 MPa. Já Mikami *et al.* (2018) obteve uma resistência em torno de 3 MPa em concretos produzidos com RCD, e cerca de 10 Mpa em concretos produzidos com AN.

Lian e Zhuge (2010) avaliaram a resistência à compressão e a condutividade hidráulica para concretos produzidos com diferentes tipos de agregados e graduações. Segundo os autores, o tipo de rocha de que se obtém o agregado graúdo afeta a resistência do concreto poroso independentemente da sua graduação. Esses autores afirmam ainda que as partículas que têm alta absorção de água não produzem altas resistências, já que a pasta em volta do agregado perde água e é produzida uma zona de transição ainda mais fraca.

Com base na afirmação de Lian e Zhuge (2010), justifica-se os baixos valores de resistência mecânica do concreto permeável desta pesquisa. Salienta-se, ainda, que os AR são materiais que apresentam valores elevados de absorção, ou seja, são mais porosos, propriedade essa que influencia diretamente na resistência do concreto. Além disso, há o fato da heterogeneidade do material, o qual também pode afetar sua resistência. Entretanto, os valores obtidos nesta pesquisa se assemelham aos encontrados em outras (RIVZI *et al.*, 2009; BATEZINE, 2013; OLIVEIRA, 2017; CLAUDINO, 2018; MIKAMI *et al.*, 2018).

4.9. Resistência à tração na flexão

Foram executados ensaios para determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos, conforme ABNT (2010). O procedimento foi realizado apenas

com o traço de concreto que apresentou melhores resultados no ensaio de resistência à compressão axial, pois valores de resistência à tração na flexão representam, em geral, cerca de 10% dos valores de resistência à compressão. Consoante esta afirmação, o único traço que atenderia à especificação de ABNT (2015b) seria aquele no qual se utilizou 100% de agregado natural.

Os CPs foram produzidos com 100% de AN e 20% de agregados miúdos e de aditivo superplastificante. Aos 28 dias, o CP apresentou um valor de 2,7 MPa. ABNT (2015b) recomenda que, para placas de pavimentos permeáveis de concreto para tráfego de pedestres e com espessura de 60 mm, o valor de resistência de tração na flexão seja superior a 2,0 MPa. Desse modo, o CP confeccionado com AN atende a esta especificação. Os valores obtidos assemelham-se, inclusive, aos obtidos em pesquisas anteriores (OLIVEIRA, 2017; PILZ *et al.*, 2019; CLAUDINO, 2018).

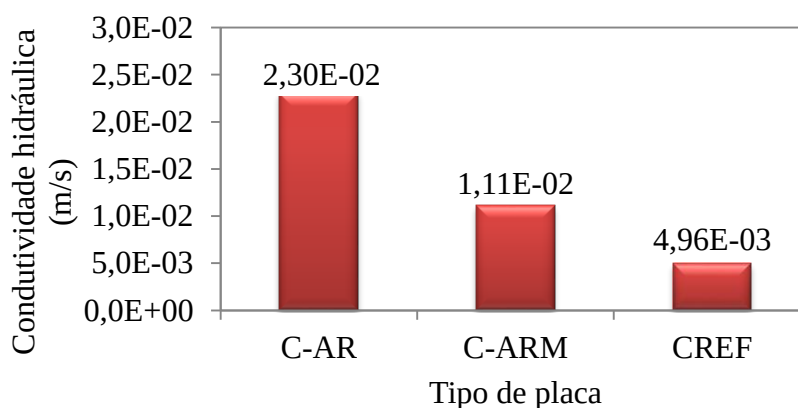
4.10. Condutividade hidráulica

A seguir são apresentados e discutidos os valores de condutividade hidráulica das placas de concreto permeável (C-AR, C-ARM e CREF), da parcela experimental e do solo onde foi implantado o pavimento.

4.10.1 Condutividade hidráulica da placa de concreto permeável

Os resultados obtidos no ensaio de determinação de condutividade hidráulica das placas de concreto permeável encontram-se na Figura 29.

Figura 29 - Resultados do ensaio de determinação de condutividade hidráulica da placa de concreto permeável.



Fonte: Autora (2020)

Observa-se que a placa produzida com concreto 100% AR (C-AR) apresentou condutividade hidráulica de $2,30\text{E-}2$ m/s; para a placa confeccionada com a mistura dos agregados reciclados e naturais (C-ARM) obteve-se $1,11\text{E-}2$ m/s; e para a placa produzida somente com agregado natural (CREF) obteve-se $4,96\text{E-}3$ m/s. À medida que se foi diminuindo a quantidade de agregados miúdos no traço, a condutividade hidráulica foi aumentando. A placa que apresentou maior condutividade hidráulica não possuía agregados miúdos em sua composição, e a placa com menor condutividade hidráulica possuía cerca de 20% destes. Entretanto, para maiores resistências mecânicas se faz necessário a utilização destes agregados.

Os valores de condutividade hidráulica obtidos encontram-se na mesma ordem de grandeza que aqueles obtidos por outros autores, conforme Quadro 10.

Quadro 10 – Condutividades hidráulicas de placas de concretos permeáveis obtidas por outros autores.

Autor / Ano	Condutividade hidráulica (m/s)
Pereira e Barbosa (2015)	$1,2\text{E-}3$
Finocchiaro e Girardi (2017)	$1,1\text{E-}2$ a $8\text{E-}3$
Santos (2017)	$1,2\text{E-}2$ a $2,3\text{E-}2$
Mikami <i>et al.</i> (2018)	$9,5\text{E-}3$
Sandoval (2018)	$4,2\text{E-}3$
Claudino (2018)	$1,8\text{E-}2$
Pilz (2019)	$1,2\text{E-}3$
Autora (2020)	$2,3\text{E-}2$ a $4,9\text{E-}3$

Fonte: Autora (2020)

Claudino (2018) realizou ensaios para determinação de condutividade hidráulica, conforme metodologia descrita em ABNT (2015b), em uma placa produzida com agregado natural. Ele obteve valor de $1,8\text{E-}2$ m/s. Já Santos (2017) realizou estas análises em quatro placas: uma com 100% de agregados naturais; outra com 15% de AR; uma terceira com 25% de AR; e, por fim, uma com 35% de AR. O ensaio foi promovido consoante ASTM (2009), norma norte americana que deu embasamento para a norma brasileira, sendo obtido, respectivamente, $2,35\text{E-}2$ m/s, $1,77\text{E-}2$ m/s, $2,08\text{E-}2$ m/s e $1,20\text{E-}2$ m/s. Finocchiaro e Girardi (2017) realizaram a análise em concretos permeáveis com três traços distintos e obtiveram, respectivamente, $8,0\text{E-}3$ m/s, $1,9\text{E-}2$ m/s e $1,1\text{E-}2$ m/s.

Yang e Jiang (2003) argumentam que agregados com DMC de 19 mm produzem vantagens hidráulicas, já que apresentam poros de maiores tamanhos e maior condutividade

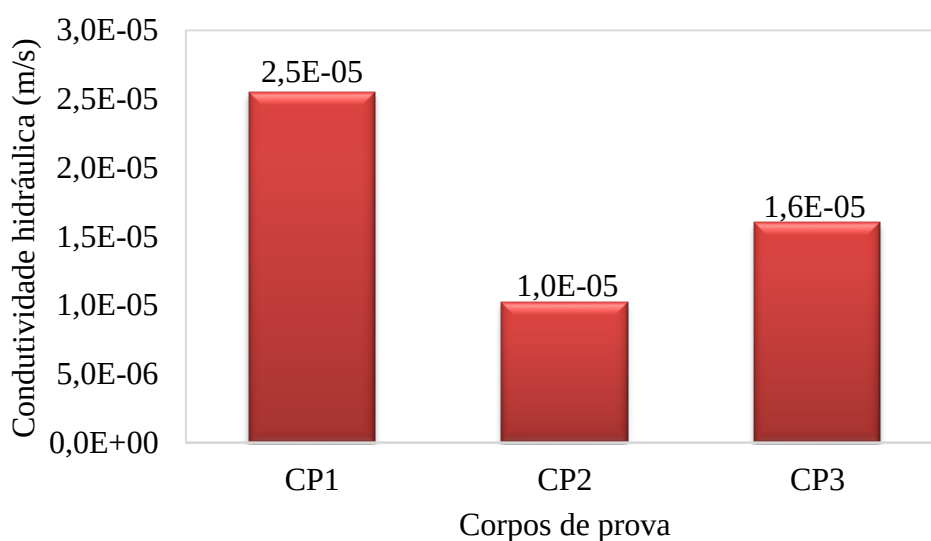
hidráulica em relação aos agregados com DMC inferior. O DMC dos agregados desta pesquisa foi de 25 mm; logo, se justifica seus elevados valores de condutividade hidráulica.

O traço que atendeu ao que é exigido em ABNT (2015b) e Fortaleza (2020) quanto à resistência mecânica foi o CREF. Portanto, a placa produzida com o concreto de referência foi selecionada para compor a parcela experimental, por atender à resistência mecânica e à condutividade hidráulica requeridas.

4.10.2 Condutividade hidráulica do solo de implantação do pavimento permeável

Foram realizados ensaios de permeabilidade à carga constante com amostras do solo da área na qual fora implantada a parcela experimental. Estas análises foram utilizadas para dimensionamento do reservatório do pavimento, bem como para a escolha do tipo de sistema de infiltração, conforme ABNT (2015b). Os resultados do ensaio de Permeabilidade à Carga Constante (PCC) são apresentados na Figura 30.

Figura 30 – Resultados do ensaio de PCC.



Fonte: Autora (2020)

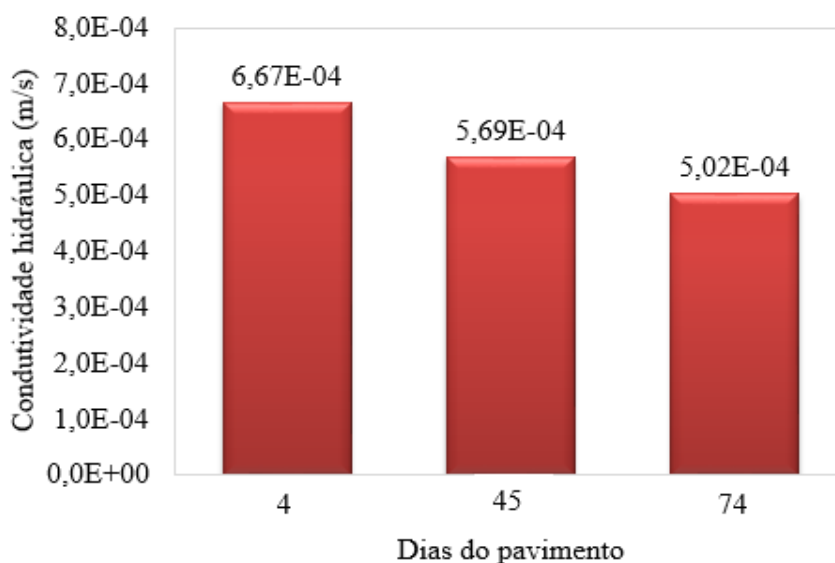
A condutividade hidráulica determinada para o solo onde fora implantado o pavimento foi de, em média, $1,7\text{E}-05$ m/s. Conforme ABNT (2015b), este solo apresenta um grau de permeabilidade mediano, e pode ser utilizado para implantação do pavimento, levando-se em consideração apenas esta característica.

4.10.3 Condutividade hidráulica da parcela experimental

Com o objetivo de avaliar a diferença no desempenho do concreto permeável após montagem do trecho e da parcela experimental ao longo dos dias, foram realizadas análises

de condutividade hidráulica na parcela experimental. A parcela foi montada com as placas que apresentaram melhor desempenho mecânico e hidráulico. Concomitantemente, a placa que atendeu aos dois parâmetros foi a CREF. As análises foram realizadas em dois pontos distintos da parcela para cada idade do pavimento, no 4º dia após a construção do pavimento, aos 45 dias e aos 74 dias. Na Figura 31 encontra-se a condutividade hidráulica média realizada para cada dia de análise da parcela experimental.

Figura 31 – Condutividade hidráulica da parcela experimental ao longo dos dias.



Fonte: Autora (2020)

Verificou-se um leve decréscimo na condutividade hidráulica ao longo dos dias. Contudo, os valores obtidos estão na mesma ordem de grandeza. Aos 74 dias de vida do pavimento não foi identificada colmatção. Comparando-se o desempenho da placa CREF (que apresentou condutividade hidráulica de $4,9\text{E-}03$ m/s) ao da parcela experimental, observa-se uma diminuição na condutividade hidráulica, sendo a desta última oito vezes menor. Isso se deve à influência das camadas de assentamento das placas e da condutividade hidráulica do solo de implantação do pavimento.

De acordo com a ABNT (2015b), exige-se uma condutividade hidráulica maior que 10^{-3} m/s para um pavimento recém-construído. A condutividade hidráulica da parcela desenvolvida não atendeu ao critério de condutividade hidráulica contido em ABNT (2015b). Contudo, a norma enfatiza que este valor deve ser obtido nos primeiros dias do pavimento. Comparou-se os dados obtidos com os valores típicos de condutividade hidráulica de solos disponíveis em ABNT (2015b). A parcela desenvolvida nesta pesquisa se enquadrou na classificação de média condutividade hidráulica.

Ono, Balbo e Cargnin (2017) analisaram a capacidade de infiltração de blocos de concreto unidirecionalmente articulados em uma pista experimental localizada na Universidade de São Paulo (USP), e obtiveram como condutividade hidráulica média $4,9\text{E}-03$ m/s. Marchioni e Silva (2019) afirmam que, para verificar se o pavimento é efetivamente permeável, deve-se determinar o coeficiente de permeabilidade do pavimento acabado, ou seja, “*in situ*”; e que valores de condutividade hidráulica acima de $1\text{E}-05$ m/s atestam que o pavimento irá funcionar de forma adequada. A condutividade hidráulica da parcela experimental estudada nesta pesquisa foi superior a $1\text{E}-05$ m/s, atendendo ao critério de condutividade hidráulica estabelecido por estes autores.

4.11. Relação entre parâmetros

Na Tabela 13 é apresentada uma relação entre a compressão dos corpos de prova aos 28 dias, o índice de vazios e a absorção dos CPs.

Tabela 13 – Relação entre resistência à compressão, índice de vazios e absorção dos CPs.

	fck 28d (MPa)	e (%)	Absorção (%)
C-ARC	7,65	14,95	5,30
CREF	11,10	10,77	5,27

Fonte: Autora (2020)

Quanto maior for a porcentagem de índice de vazios, maior é a diminuição da resistência à compressão. Inclusive, à medida que a capacidade de absorção do CP aumenta, a compressão diminui. Ambos os corpos de prova apresentaram comportamentos semelhantes. Este fato também foi verificado por Oliveira (2017).

4.12. Dimensionamento do reservatório do pavimento permeável

Ao aplicar-se os coeficientes nas equações de dimensionamento disponível em Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) e em ABNT (2015b), obteve-se um valor de $H_{\text{máx}}$ ou H negativo ou insignificante (a demanda de chuva da região de estudo é inferior à capacidade de infiltração do pavimento). A intensidade de chuva de projeto obtida a partir da equação IDF desenvolvida por Silva, Palácio Junior e Campos (2013) para um período de retorno de 20 anos e duração de chuva de 2 horas foi de $68,56$ mm/h ou $1,9 \cdot 10^{-5}$ m/s, e a condutividade hidráulica média do solo foi de $1,7 \cdot 10^{-5}$ m/s. Logo, adotou-se a espessura mínima de camada de reservatório recomendada por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), de 150 mm. A partir desses valores, obteve-se espessura inferior à mínima.

4.13. Análise de coeficientes de escoamento superficial em parcela experimental

A montagem completa da parcela foi realizada no dia 23 de dezembro de 2019, sendo que o primeiro evento de precipitação ocorreu em 30 de dezembro de 2019. Ocorreram 22 eventos de precipitação que variaram de 2,03 mm a 42,40 mm, em que não se observou lâmina escoada superficialmente no pavimento, somente no 23º evento de 56,63 mm e duração de 20 horas, precedido de eventos em dias imediatamente anteriores obteve-se lâmina escoada. As precipitações, duração do evento e intensidades de precipitação observadas encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 – Dados de lâmina escoada, lâmina precipitada, duração do evento e intensidade de precipitação.

Data do evento	Lâmina escoada (mm)	Lâmina precipitada (mm) posto IFCE	Duração do evento (h)	Intensidade de precipitação (mm/h)
30.12.19	0	15,2	1,5	10,1
31.12.19	0	4,0	2,0	2,0
01.01.20	0	14,0	5,5	2,5
02.01.20	0	12,2	4,5	2,7
08.01.20	0	3,2	1,0	3,2
26.01.20	0	4,8	3,0	1,6
28.01.20	0	22,3	4,0	5,5
30.01.20	0	2,7	5,0	0,5
31.01.20	0	36,6	15,5	2,3
02.02.20	0	36,3	4,5	8,0
04.02.20	0	22,8	18,0	1,2
05.02.20	0	19,0	7,5	2,5
06.02.20	0	6,8	5,3	1,2
07.02.20	0	2,0	0,5	4,0
09.02.20	0	2,0	0,5	4,0
10.02.20	0	4,0	3,0	1,3
11.02.20	0	9,3	7,5	1,2
13.02.20	0	17,0	13,0	1,3
15.02.20	0	6,0	1,5	4,0
16.02.20	0	7,3	1,0	7,3
17.02.20	0	42,4	10	4,2
18.02.20	0	7,8	3,5	2,2
19.02.20	0,0925	56,6	20,0	2,8
20.02.20	0	2,7	6,5	0,4

Fonte: Autora (2020)

Observa-se, a partir das análises, que a precipitação capaz de gerar escoamento no pavimento foi apenas a que ocorreu no 23º evento, no dia 19 de fevereiro de 2020, com precipitação de 56,63 mm, o qual gerou uma lâmina de água de 0,0925 mm. O coeficiente de escoamento superficial, obtido pela razão entre a lâmina escoada superficialmente e o total precipitado, foi de 0,0016 ou 0,16%. Ou seja, a parcela avaliada praticamente não gerou escoamento superficial.

Em estudos realizados por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), precipitações médias de 18 mm geraram coeficientes de escoamento superficial entre 0,6 e 0,96 em solo compactado, concreto convencional e blocos de concreto. Blocos vazados de concreto geraram um coeficiente de escoamento de 0,03 com precipitação média de 18 mm. Já para o concreto permeável com precipitação de 20 mm, o coeficiente foi de 0,005.

Os resultados do estudo sugerem que o pavimento permeável avaliado nesta pesquisa mostrou desempenho eficiente para minimizar o escoamento superficial gerado pelas precipitações em área urbana. Entretanto, sugere-se que uma observação por período mais longo, no qual haja a possibilidade de ocorrência de eventos de maior magnitude, seja realizada.

5. CONCLUSÕES

Como conclusões do estudo, infere-se que os valores de massa unitária e massa específica dos agregados reciclados, em geral, são menores que os valores de agregado natural. Ressalta-se ainda que os agregados reciclados possuem alta absorção de água, devendo-se levar essa característica em consideração quando da confecção de concretos com este material.

Diante do exposto neste trabalho, verificou-se que há influência do agregado reciclado de RCD em propriedades mecânicas do concreto permeável, corroborada pelos valores encontrados em outras pesquisas, nas quais a resistência mecânica de concretos desenvolvidos com agregados reciclados de RCD apresentaram valores menores que os desenvolvidos com agregados naturais. Contudo, não se desestimula a utilização desses materiais, uma vez que são considerados materiais alternativos em relação aos agregados convencionais, e podem também minimizar a exploração de recursos naturais. Sugere-se mais estudos que viabilizem sua utilização na composição do concreto permeável.

Sobre os resultados de resistência à compressão, destaca-se a grande variabilidade da composição do RCD utilizado na fabricação do agregado reciclado. Este pode ser um dos fatores responsáveis pela baixa resistência observada do concreto fabricado com este material. Outro fator é o da grande porosidade do concreto permeável, sendo a resistência deste tipo de concreto inferior quando comparada à do concreto convencional. Em geral, são utilizados percentuais pequenos de agregados miúdos em traços de concreto permeável, aumentando-se assim sua porosidade. Isso eleva sua condutividade hidráulica e, como consequência, diminui sua resistência.

Nesta pesquisa, realizou-se uma análise para produzir um concreto que atendesse concomitantemente a requisitos hidráulicos e mecânicos. O concreto permeável produzido com agregados naturais e com 20% de agregados miúdos apresentou desempenho satisfatório. Ele foi utilizado nas placas da parcela experimental. Foram atendidas as características mecânicas exigidas em norma para pavimentos permeáveis, ultrapassando-se valores mínimos de resistência à compressão e tração na flexão, com valores médios de 25,9 MPa e 2,7 MPa, respectivamente.

Nas análises de condutividade hidráulica, as placas de concreto permeável apresentaram valor médio de $2,8E-03$ m/s, o qual é considerado elevado. Entretanto, em estudos realizados no pavimento permeável “*in situ*”, a condutividade hidráulica foi de uma ordem de grandeza menor, com valor médio de $5,8E-04$ m/s - apesar de oito vezes inferior à

das placas, pode ser, contudo, considerada com características de média condutividade hidráulica.

Em relação ao escoamento superficial, a parcela avaliada gerou escoamento somente em evento de precipitação de cerca de 56 mm – ela, praticamente, não gerou escoamento superficial. O pavimento de concreto permeável desenvolvido nesta pesquisa mostrou desempenho eficiente no auxílio à redução do escoamento superficial gerado pelas precipitações em áreas urbanizadas, de modo a contribuir com a minimização dos efeitos da diminuição da condutividade hidráulica. Contudo, recomenda-se, por questões estruturais, o uso deste concreto permeável em pavimentos de tráfego de pedestres, e, com o intuito de aumentar sua resistência, indica-se a utilização de uma maior proporção de agregados naturais, quando realizada a mistura com agregados reciclados.

RECOMENDAÇÕES

- Realizar outras proporções de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado e analisar a influência da utilização dessas proporções na resistência do concreto permeável.
- Confeccionar um concreto permeável com outro tipo de RCD, em face da grande variabilidade da composição do material, incluindo um que se enquadre, de acordo com a composição gravimétrica, como ARC.
- Realizar análises de escoamento superficial em pavimento permeável de concreto em outra região, analisando a influência da intensidade pluviométrica na infiltração deste pavimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005. 62 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Departamento de Engenharia Hidráulica. Rio Grande do Sul, 2005.

AGUIAR, A. B. **O emprego do Permeâmetro de Guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura**. 2001. 90 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2001.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **Committee 522, Pervious Concrete, 522R-06**. 25 p. Report on Pervious Concrete. Farmington Hills, Michigan, 2006.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – 38 p. Report on Pervious Concrete. Farmington Hills, Michigan, 2010.

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

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. **Concreto**: Ciência e Tecnologia. 2. ed. Capítulo 47 - Concreto com agregados reciclados. Publicação: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. 2011.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Normalização dos agregados graúdos de Resíduos de Construção e Demolição reciclados para concretos e a variabilidade. **Anais do IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Foz do Iguaçu, 2002.

ARAÚJO, P. R.; CARLOS, E. M.; GOLDENFUM, J. A.; TUCCI, C. E. M. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**. v. 5. n. 3. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Cimento Portland CP V ARI**. Disponível em: <<https://www.abcp.org.br/cms/perguntas-frequentes/cimento-portland-cp-v-ari-alta-resistencia-inicial-nbr-5733/>>. Acesso em: 04 de fevereiro de 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do número de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009a. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 51:** Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15.115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – execução de camadas de pavimentação – procedimentos. Rio de Janeiro, 2004a. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **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, 2004b. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9935:** Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011b. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009b. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5733:** Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015a. 9 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004:** Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004c. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15.114:** Resíduos sólidos da construção civil – áreas de reciclagem – diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004d. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15.113:** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – aterro – diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004e. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10006: Solubilização de Resíduos – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004f.

BALLARD, B; WILSON, S; UDALE-CLARKE, H; IIMAN, S; SCOTT, T; ASHLEY, R; KELLAGHER, R. **The SuDS Manual**. v. 2. ed. CIRIA C753. p.937. Londres, 2015.

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

BATISTA, C. G. **Influência na resistência à compressão de concretos com agregados reciclados de concreto em substituição ao agregado natural**. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) – Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). Criciúma, 2009.

BECHARA, L. A. C. **Concreto poroso como revestimento de pavimento permeável: alternativa de drenagem urbana não estrutural à região metropolitana de Belém**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, PA. 2017.

BRASIL, Lei Nº 12305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 02 ago. 2010.

BRASIL, Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 307, de 5 de julho de 2002. Ministério das Cidades, Secretária Nacional de Habitação. Publicada no **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 05 jul. 2002.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da Universidade de São Paulo – USP. 2007.

CARNEIRO, A. P. Caracterização do Entulho e do Agregado Reciclado. Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção. **Projeto Entulho Bom**. Salvador: Ed. EDUFBA, 2001.

CARLS, B; BECKER, N; PINHEIRO, I. G. Manejo de águas urbanas com pavimento de concreto permeável: métodos de dosagem e técnicas de manutenção. **Revista Educação Ambiental em Ação**. N. 66. 2019.

CEARÁ, (Estado). Lei Nº 16032, de 20 de junho de 2016. Política Estadual de Resíduos Sólidos. **Assembléia Legislativa do Ceará**, 2016.

CHEN, J; CHU, R; WANG, H; ZHANG, L; CHEN, X; DU, Y. Alleviating urban heat island effect using high-conductivity permeable concrete pavement. **Cleaner Production**. 12p. 2019.

CHOCAT, B. 1997. **Encyclopédie de Hydrologie Urbaine et de Assainissement**. 1136p. ed. Paris. 1997.

CIMENTO.ORG. **O mundo do cimento**. CP V ARI Cimento Portland de Alta Resistência inicial. 2010. Disponível em: <<https://cimento.org/cp-v-ari-cimento-portland-de-alta-resistencia-inicial/>> Acesso em: 16 de abril de 2019.

CLAUDINO, G. O. **Drenagem urbana: avaliação das propriedades do concreto permeável para a realidade cearense utilizando insumos locais**. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, *campus* Quixadá. 2018.

COSTA, M. C. B; SILVA, L. S; NOGUEIRA, M. H. P; LIMA, G. K. M; BATISTA, N. J. S. Estudo da viabilidade técnica do uso de concreto permeável em pavimentos urbanos de baixo tráfego utilizando agregado graúdo regional (Belém-PA). **Revista de ciência e tecnologia**. v.5. n.8. 2019.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

FENSTERSEIFER, P; LAMBERTI, L; TASSI, R; CERVO, T; DANIEL G. ALLASIA⁵, BRUNA MINETTO, B; CAROLINE DE B. DIAS, C. B. Pavimentos permeáveis como uma estratégia no combate a ilhas de calor urbano: avaliação preliminar. **Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Foz do Iguaçu, 2019.

FERGUSON, B. K. **Porous Pavements. Integrative Studies in Water Management and Land Development**. Florida, 2005.

FINOCHIARO, P; GIRALDI, R. Concreto permeável produzido com agregado reciclado. **Revista de Engenharia da Faculdade Salesiana**. n.5, 19-26 p. 2017.

FORTALEZA. Secretaria do Planejamento. **Autarquia da Região Metropolitana de Fortaleza**. Plano Diretor de Drenagem na Região Metropolitana de Fortaleza. Fortaleza, 1978. 269 p.

FORTALEZA. Decreto nº 9374, de 20 de abril de 1994. Disciplina a coleta e a destinação dos resíduos sólidos gerados por obras de construção civil e dá outras providências. **Prefeitura municipal de Fortaleza**, 1994.

FORTALEZA. Drenagem e manejo das águas pluviais urbanas do município de Fortaleza. Plano municipal de saneamento básico. **Prefeitura municipal de Fortaleza**. Secretaria Municipal de urbanismo e meio ambiente. Abril de 2015.

FORTALEZA. Plano Municipal de Caminhabilidade de Fortaleza (PMCFOR) - Cartilha de Boas Práticas para Calçadas. **Prefeitura municipal de Fortaleza**. Disponível em: <<https://urbanismoemeioambiente.fortaleza.ce.gov.br/images/urbanismo-e-meioambiente/apresentacoes-oficias/CARTILHA-PMCFOR.pdf>>. Acesso em: dez de 2019.

FORTALEZA. Plano Municipal de Caminhabilidade de Fortaleza (PMCFOR) – Manual Técnico para Calçadas. **Prefeitura municipal de Fortaleza**. Disponível em: <https://urbanismoemeioambiente.fortaleza.ce.gov.br/images/urbanismo-e-meioambiente/infocidade/manual_tecnico_para_calçadas.pdf>. Acesso em: mar de 2020.

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Séries históricas.** março/2012. Disponível em: <<https://www.casacivil.ce.gov.br/2012/03/27/maior-chuva-deste-ano-na-capital-chega-a-quase-200mm/>>. Acesso em: 10 de junho de 2019.

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Calendário das Chuvas no estado do Ceará.** Disponível em: <<http://www3.funceme.br/funceme2.5/index.php/areas/23monitoramento/meteorol%C3%B3gico/406-chuvas-di%C3%A1rias>>. Acesso em: 01 de março de 2020.

GONÇALVES, A. B.; OLIVEIRA, R. H. **Pavimentos Permeáveis e sua Influência sobre a Drenagem – Seminários.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. 12 p. 2014.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v. 37, p. 1174-1184, 2013.

HOLTZ, F. C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

JACOBI, P. R; BESEN, G. R. **Gestão de resíduos sólidos em São Paulo:** desafios da sustentabilidade. *Estudos Avançados.* v.25. n.71. P 135-158. São Paulo. 2011.

JAVIER, A.; GARCIA, D.; MUÑOS, R. Determinación de la conductividad hidráulica en suelos mediante um permeámetro de carga variable automatizado. **Servicio de investigación y tecnología agrária junta de castilla y león.** Espanha, 2003.

KIA, A; HONG, S; CHEESEMAN, C. Clogging in permeable concrete: a review. **Environmental Management.** Londres, v.193, p.221-233. 2017.

KOYAMA, T. et al (2013). Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green facades using freestanding walls. **Building and Environment.** v. 66, pp. 96–103.

LAMBERTI, L. A; SANTOS, J. R; CASSOL, M. A; MELO, W. W; ALLASIA PICCILLI, D. G. A; CERVO, T. C. Caracterização da permeabilidade de concretos por meio de permeâmetro de carga variável e carga constante. **Anais do 59º Congresso Brasileiro de Concreto. IBRACON.** 2017.

LEITE, M. A. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Porto Alegre – RS, 2001. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 270 p. 2001.

LEMING, M. L.; MALCOM, H. R.; TENNIS, P. D. **Hydrologic design of pervious concrete.** Portland Cement Association, 2007. 72 p.

LI, J. Mix Design of Pervious Recycled Concrete. **GeoHunan International Conference – Material Design, Construction, Maintenance, and Testinf of Pavements**. V. 195, n. 15, p. 103–108, Ago. 2009.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation. **Constrution and Building Materials**. 2010.

LIMA, M. S. **Análise do comportamento da mistura de resíduos de construção e demolição com adição de solo, submetida a diferentes energias de compactação**. 2015. 40f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. Fortaleza-CE, 2015.

MARCHIONI, M. L. **Pavimento permeável contra enchentes**. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/pavimento-permeavel-contra-enchentes/>. Acesso em: 23 de dezembro de 2019.

MARCHIONI, M. L. **Porous Surfaces for permeable pavement: clogging and filtration mechanisms**. Thesis (Doctorate). Politecnico di Milano. Department of civil and Environmental Engineering. Doctoral Programme in Environmental and Infrastructure Engineering. 158P. 2018.

MARCHIONI, M. L; SILVA, C. O. **Prática recomendada. Sistemas construtivos: pavimentos permeáveis – conceitos e requisitos para pavimentos intertravado permeável**. Disponível em: <https://www.sahara.com.br/pdfsaharatecnologia/PR2ConceitosrequisitosPavpermeaveis>. Acesso em: 14 de agosto de 2019.

MARCHIONI, M. L; BECCIU, G. Permeable pavement used on sustainable drainage systems (SUDs): a synthetic review of recent literature. **WIT Press Urban Water II**, 2014.

MATOS NETO, C. E. A.; FRAGA, N. S. Equação de Chuvas Intensas para a Cidade de Fortaleza. **Anais do V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos**, 1983, Blumenau-SC. Anais V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 1983.

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

MIKAMI, R. J; KRUGER, P; PEREIRA, E; KUMMER, A. C. B; DOLL, M. M. R. Influência do teor de cerâmica vermelha do agregado reciclado nas propriedades do concreto permeável. **Revista Matéria**. v.23. n. 03. 2018.

MILA, M. Evolução e qualidade no processo construtivo. **Construchemical**. Ano 3, n 16. 2014. Disponível em: <https://www.construchemical.com/edicao/16/files/assets/common/downloads/publication.pdf>. Acesso em: 08 de agosto de 2019.

MINETTO, B; PERSCH, C. G; PICCILLI, D. G. A; TASSI, R; LAMBERTI, L. A; PIMENTEL, F. C; FENSTERSEIFER, P; DIAS, C. B. Plataforma arduino como uma solução de baixo custo para o monitoramento de estruturas de baixo impacto. **Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Foz do Iguaçu, 2019.

MOHAJERANI, A; BAKARIC, J; BAILEY, T. J. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. **Environmental Management**. 2017.

MOREIRA, D. F; BASTOS, J. B. S; FARIAS, T. R. L. Análises dos compósitos iônicos presentes em solos estabilizados com resíduos. **Anais do VIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica**. Fortaleza. 2019.

NUNES, D. M; ALVAREZ, M. G. L; OHNUMA JUNIOR, A. A; SILVA, L. P. Aplicação de técnicas compensatórias no controle dos escoamentos superficiais: estudo de caso em loteamento residencial em Jacarepaguá, Rio de Janeiro. **Revista Internacional de Ciências**. v. 07. 2017.

OLIVEIRA, D.; LIMA, M.; MEIRA, G.; LIRA, R.; PADILHA, M. Estudo do concreto reciclado utilizando agregado miúdo reciclado: Avaliação da Resistência Mecânica. II **Anais do Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica**. João Pessoa, PB. 2007.

OLIVEIRA, L. C. B. **Análise da permeabilidade e da colmatção em concretos permeáveis produzidos com agregados reciclados de concreto**. Dissertação (mestrado). Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de ciências exatas, ambientais e tecnologias. Pós-Graduação em sistemas de infraestrutura urbana. 108 p. 2017.

ONO, B. W. **Análise do desempenho estrutural e hidráulico de um pavimento permeável com revestimento de blocos de concreto unidirecionalmente articulados**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2018.

ONO, B. W; BALBO, J. T; CARGNIN, A. P. Análise da capacidade de infiltração em pavimentos permeáveis de bloco de concreto unidirecionalmente articulado. **Revista Transportes**. v.25. n.2. 2017.

PEREIRA, K. K.; BARBOSA, M. P.: Desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de resíduos de construção civil da região de Campinas. **Anais do V encontro de iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação**. Campinas, 2015.

PILZ, S. E; OLIVEIRA, P; REGOSO, F; PAULON, V. A; COSTELLA, M. F. Pervious concrete: study of dosage and polypropylene fibers addiction. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. v.12. n.1. 2019.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. Ed. Edgard Blucher. v.1. 278p. 1976.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado em engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

PINTO, L. L. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. Escola de Engenharia de São Carlos, EESC/USP, 1998. 840p.

M. RAMA; V. M. SHANTHI. Experimental study on Sedimentation removal of pervious concrete. **Archives of Civil Engineering**. v. 64. 2019.

RIZVI, R.; TIGHE, S. L.; NORRIS, J.; HENDERSON, V. 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.

RODRIGUES, J. O; ANDRADE, E. M.; OLIVEIRA, T. S.; LOBATO, A. O. Equações de Intensidade-Duração-Frequência de Chuvas para as Localidades de Fortaleza e Pentecoste, Ceará. **Ciência Agrária**. Curitiba. v.9, n.4, p.511-519. 2008.

SANDOVAL, G. F. B; CESARIO, N. S; NOGUEIRA, G. S; TORALLES, B. M. Influência da porcentagem da fração fina proveniente do agregado graúdo no desempenho do concreto permeável. **Ciência y Poder Aéreo**. v.13. n.2. 2018.

SANTOS, C. J. R; LIMA, D. A; SILVA JUNIOR, E. R; BATISTA, L. S; FERREIRA, M. L. M. Estudo do comportamento mecânico do concreto a partir da utilização de RCD como agregado graúdo. **Anais do 1º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e sustentabilidade (CONRESOL)**. Gramado-RS. 2018.

SANTOS, R. R. **Estudo da resistência mecânica do concreto permeável com substituição de agregado natural por agregado reciclado**. 2017. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Santa Rosa, 2017.

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.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, C. F. Recycling of masonry rubble. In: recycling of demolished concrete and masonry, **RILEM Technical Committee Report**. N. 6. London, p. 164-255, 1992.

SHAKIR, Q. M. **Permeable Concrete**. University of Kufa/Faculty of Engineering. Disponível em: <http://eng.uokufa.edu.iq/en/archives/9219>. Acesso em: set, 2019.

SILVA, F. O. E; PALÁCIO JUNIOR, F. F. R; CAMPOS, J. N. B. Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC. **Revista DAE**. n.192. 2013.

SCHUELLER, T. R. **Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs**. Washington, DC: Metropolitan Washington Council of Governments, 1987.

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**. Porto Alegre, v.17, n.2. p. 9-18. 2012.

STEPHENS, D. B. **Vadose Zone Hydrology**. Lewis Publishers. 347 p. 1996.

SULEIMAN, M. T; KEVERN, J. T; 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, 24-25 p. 2006.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analyses of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**. v. 35, p. 1195-1203. 2005.

TARTUCE, R. GIOVANETTI, E. **Princípios Básicos sobre Concreto de Cimento Portland**. São Paulo. Ed. Pini/IBRACON, 1990

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

TUCCI, C. E. M. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v.2, n.2. p. 5-12. 1997.

TUCCI, C. E. M; MARQUES, D. M. L. M. **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre. Ed. Universidade. 558p. 2000.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v.7, n.1. p. 5-27. 2002.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**: Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades. 197p. 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Protecting Water Quality from Urban Runoff**. Washington: 2003. Disponível em: <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/nps_urban-facts_final.pdf>. Acesso em: Dez. 2019.

URBONAS, B.; STAHERE, P. **Stormwater: Best Management Practices and detention for water quality, drainage, and CSO management**. 1993. 449 f. Englewood Cliffs, New Jersey: PTR Prentice-Hall. 1993.

VASCO, J. R. J. **Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável**. Mestrado (Dissertação) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – ISEL. Programa de Pós-Graduação em engenharia civil. 156p. 2016

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. **Procedimento de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 213 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. 2005.

WEISS, P. T.; KAYHANIAN, M.; KHAZANOVICH, L.; GULLIVER, J. S. **Permeable pavements in cold climates: state of the art and cold climate case studies – Report.** Center for Transportation Studies. University of Minnesota, Minneapolis. 2015.

YANG, J; JIANG, G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research.** vol.33, P. 381-386, 2003.

YANG, Z; MA, W; SHEN, W; ZHOU, M. The Aggregate Gradation for the Porous Concrete Pervious Road Base Material. **Wuhan University of Technology-Mater.** Sci. Ed., 2008.