



**ESTUDO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE  
RESÍDUO DE CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO AO  
AGREGADO GRAÚDO PARA CONCRETOS  
PERMEÁVEIS**

**Adilson Campos de Paula Junior**

Juiz de Fora

2019

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Faculdade de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ESTUDO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE  
RESÍDUO DE CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO AO  
AGREGADO GRAÚDO PARA CONCRETOS  
PERMEÁVEIS**

**Adilson Campos de Paula Junior**

Área de concentração: Estruturas e Materiais

Linha de Pesquisa: Materiais e Componentes de Construção

Orientadora: Prof. D.Sc. Thaís Mayra de Oliveira – UFJF

Coorientador: Prof. D.Sc. Antônio Eduardo Polisseni – UFJF

Juiz de Fora

2019

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Paula Junior, Adilson Campos de.

Estudo do potencial de aplicação de resíduo de concreto em substituição ao agregado graúdo para concretos permeáveis / Adilson Campos de Paula Junior. -- 2019.

141 f. : il.

Orientadora: Thaís Mayra de Oliveira

Coorientador: Antônio Eduardo Polisseni

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2019.

1. Concreto permeável. 2. Resíduo de concreto. 3. Estudo de dosagem. 4. Drenagem urbana. 5. Sustentabilidade. I. Oliveira, Thaís Mayra de, orient. II. Polisseni, Antônio Eduardo, coorient. III. Título.

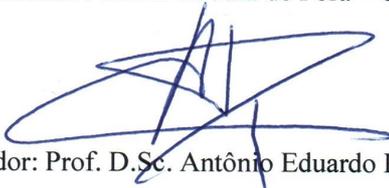
# **ESTUDO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE RESÍDUO DE CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO GRAÚDO PARA CONCRETOS PERMEÁVEIS**

**Adilson Campos de Paula Junior**

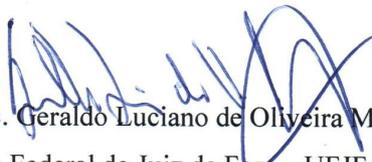
Esta dissertação foi apresentada em sessão privada e aprovada em 19 de fevereiro de 2019, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Universidade Federal de Juiz de Fora, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



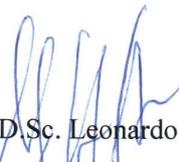
Orientadora: Prof. D.Sc. Thaís Mayra de Oliveira  
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF



Coorientador: Prof. D.Sc. Antônio Eduardo Polisseni  
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF



Membro: Prof. D.Sc. Geraldo Luciano de Oliveira Marques  
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF



Membro: Prof. D.Sc. Leonardo Gonçalves Pedroti  
Universidade Federal de Viçosa – UFV

Dedico este trabalho aos meus pais Adilson e Mena, ao meu afilhado Mateus, à minha irmã Giseli e à minha namorada Cláudia. Tudo o que sou hoje, tudo o que conquistei e vou conquistar, é graças ao amor de vocês.

## Agradecimentos

Sou grato primeiramente a Deus, que me permitiu chegar até aqui, guiando-me em todos os caminhos de minha vida.

Agradeço aos meus pais, Adilson e Mena, pelo exemplo de força, superação e humildade. Pelo apoio incondicional que me dá forças para continuar perseverando na busca pelo que é certo.

À minha querida irmã Giseli e seu esposo Tadeu, não somente pelo exemplo de cumplicidade que representam a mim, mas também pela amizade e companheirismo ao longo de mais uma etapa alcançada.

Agradeço aos maiores presentes que ganhei nesse período: minha namorada e futura esposa Cláudia e meu sobrinho e afilhado Mateus. Vocês me mostraram que é possível um homem amar alguém mais do que a si mesmo.

Agradeço à professora Thaís, por ter se disponibilizado a me orientar na concepção e elaboração do trabalho, sempre com muita atenção e carinho. Agradeço, também, ao professor Polisseni, por partilhar um pouco do seu conhecimento comigo. Vocês representam o exemplo de profissional que quero me tornar.

Quero agradecer aos meus parceiros de estudo Gustavo e Beatriz. A colaboração de vocês foi primordial para o resultado final deste trabalho, que é nosso!

Ao Sebastião e à Romilda, e a todos do Laboratório de Materiais de Construção Civil. Inclusive ao Vitor, do Laboratório de Pavimentação. Obrigado pela atenção e auxílio irrestrito. Parte desta conquista também é de vocês!

Agradeço a todos os meus familiares e amigos, novos e antigos, que se fizeram presentes em minha vida, sempre me apoiando nos momentos mais difíceis.

À UFJF por todo apoio e incentivo oferecido ao longo desses anos. Tenho orgulho de alcançar mais uma vitória ao lado dessa instituição.

Um agradecimento especial, também, às instituições de fomento à pesquisa: CAPES, FAPEMIG e CNPq, que estiveram presentes durante todo o estudo, incentivando o desenvolvimento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Às empresas: Petra Agregados, pela disponibilização de material para a pesquisa; Companhia Nacional de Cimento, pelo fornecimento dos dados referentes ao cimento utilizado;

e Fundação Centro Tecnológico de Juiz de Fora, pela realização de ensaios fundamentais para a conclusão deste trabalho.

À ProInfra, em especial ao Fábio, ao Higor, e a todos os funcionários que participaram direta e indiretamente da elaboração do estudo, me ajudando a tirá-lo do papel.

Aos professores Geraldo e Leonardo Pedroti, por aceitarem o convite de participar da minha defesa, contribuindo para o meu desenvolvimento acadêmico.

*"Seja a mudança que você quer ver no mundo".*

*(Mahatma Gandhi)*

## Resumo

A busca pela preservação ambiental e conservação dos recursos naturais, motivada pelas atividades deletérias ao meio ambiente associadas à indústria da construção, faz com que surjam novos conceitos e soluções técnicas viáveis em prol do desenvolvimento sustentável. A gênese do presente trabalho deriva exatamente da insuficiência de recursos financeiros que caracteriza a atual situação econômica das universidades brasileiras, aliada à crescente demanda por reparos nas edificações da Universidade Federal de Juiz de Fora: utilizar a grande quantidade de resíduos de concreto gerados e depositados nas áreas do Campus em substituição aos agregados de origem natural na produção do concreto permeável, que, por sua vez, representa um excelente artifício no combate ao fenômeno da impermeabilização superficial urbana. São inúmeros os benefícios do uso de revestimentos permeáveis na pavimentação: reduzir o escoamento superficial; armazenar temporariamente o volume de água excedente, aliviando o sistema de drenagem; realimentar o aquífero subterrâneo e recuperar a capacidade de filtração do solo; além de apresentar menor custo de ciclo de vida em detrimento a outros materiais convencionais. Esta pesquisa envolve a avaliação pioneira sobre a influência da utilização desses resíduos reciclados em substituição à 100% do agregado convencional de origem pétreo no comportamento mecânico e hidráulico do concreto permeável por meio de ensaios preconizados pela ABNT NBR 16416:2015, sem a utilização de aditivos. Para tanto, realizou-se um estudo de dosagem com o intuito de determinar o traço mais adequado para confecção do compósito drenante enquanto pavimento, esperando-se obter um material em conformidade com os requisitos normativos de resistência e permeabilidade, a partir de procedimentos tecnicamente viáveis. Todos os coeficientes de permeabilidade obtidos em laboratório superaram o limite normativo de 0,1 cm/s, chegando a alcançar valores de até 2,36 cm/s. Do mesmo modo, obtiveram-se valores médios de resistência característica à compressão das peças ensaiadas próximos ao limite de 20 MPa estipulado pela norma (23,98 MPa e 19,57 MPa, referentes às peças de 60 mm e 80 mm, respectivamente) e a resistência à tração na flexão foi igualmente atendida: média de 2,08 MPa, superior ao mínimo preconizado (2 MPa). Em vista da perspectiva favorável, os produtos finais poderão ser fabricados em série pela instituição e utilizados na manutenção das áreas do Campus, reduzindo direta e indiretamente os dispêndios associados ao resíduo da construção civil e à impermeabilização dos pavimentos urbanos.

Palavras-chaves: concreto permeável, resíduo de concreto, estudo de dosagem, drenagem urbana, sustentabilidade.

## Abstract

The search for environmental preservation and conservation of natural resources, motivated by the activities harmful to the environment associated with the construction industry, makes new concepts and technical solutions viable for sustainable development. The genesis of the present work derives precisely from the lack of financial resources that characterize the current economic situation of Brazilian universities, together with the growing demand for repairs in the Federal University of Juiz de Fora buildings: to use the large amount of concrete waste generated and deposited in areas of the Campus replacing natural aggregates in the production of pervious concrete, which, in turn, represents an excellent artifice in the fight against the phenomenon of urban surface waterproofing. There are numerous benefits of using permeable coatings in paving: reduce runoff; temporarily storing the surplus water, relieving the drainage system; to feed the underground aquifer and recover the soil filtration capacity; in addition to presenting lower life cycle cost in detriment to other conventional materials. This research involves the pioneering assessment about the influence of the use of these recycled waste in replacement to 100% of the conventional aggregate of stone origin in the mechanical and hydraulic behavior of the pervious concrete by means of tests recommended by ABNT NBR 16416: 2015, without the use of additives. For that, a dosage study was carried out to determine the most suitable trait for the preparation of the drainage composite as a floor, and it was hoped to obtain a material in accordance with the normative requirements of resistance and permeability, from technically feasible procedures. All the permeability coefficients obtained in the laboratory exceeded the normative limit of 0.1 cm/s, reaching values of up to 2.36 cm/s. Likewise, average compressive strength values of the test pieces close to the limit of 20 MPa stipulated by the standard (23.98 MPa and 19.57 MPa for 60 mm and 80 mm pieces respectively) were obtained and the flexural tensile strength was also observed: mean of 2.08 MPa, higher than the recommended minimum (2 MPa). In view of the favorable outlook, the final products can be manufactured in series by the institution and used in the maintenance of the Campus areas, directly and indirectly reducing the expenses associated with the construction waste and the waterproofing of the urban pavements.

Keywords: pervious concrete, concrete waste, dosage study, urban drainage, sustainability.

## Lista de Figuras

Figura 1 – Ciclo hidrológico antes e depois da urbanização.....	7
Figura 2 – Fluxo de água ilustrando as vazões máximas. ....	7
Figura 3 – Concreto permeável. ....	9
Figura 4 – Revestimento de pavimento intertravado permeável.....	14
Figura 5 – Revestimento de pavimento constituído de placas de concreto permeável. ....	14
Figura 6 – Pavimento com revestimento de concreto permeável moldado no local.....	14
Figura 7 – Sistemas de infiltração de pavimento permeável.....	15
Figura 8 – Permeâmetro de carga constante.....	25
Figura 9 – Coeficiente de permeabilidade por anel de infiltração. ....	26
Figura 10 – Mecanismo elaborado para medição do coeficiente de permeabilidade em concretos permeáveis.....	26
Figura 11 – Relação entre índice de vazios e condutividade hidráulica do concreto permeável.....	28
Figura 12 – Fissuras observadas nas diferentes fases do concreto permeável: (a) entre a pasta e a ZT; (b) e (c) entre o agregado e a pasta. ....	29
Figura 13 – Indicadores de geração de RCC.....	42
Figura 14 – Origem dos RCC em alguns municípios brasileiros em 2005. ....	44
Figura 15 – Taxa de absorção d’água de resíduo com 9,5 mm de diâmetro máximo. ....	49
Figura 16 – Taxa de absorção d’água de brita 0.....	49
Figura 17 – Quantificação de resíduos de uma obra convencional.....	51
Figura 18 – Comparação da zona de transição entre a pasta de cimento nova e o agregado natural (esquerda) com a zona de transição entre a antiga matriz cimentícia e o agregado reciclado (direita). Mag. 2.500x. ....	63
Figura 19 – Zonas de transição entre o agregado reciclado e as matrizes cimentícias. Mag. 5x. ....	63
Figura 20 – Resíduo de concreto triturado. ....	68

Figura 21 – (a) Triturador de mandíbula; (b) Peneira vibratória automática. ....	68
Figura 22 – Curva granulométrica do resíduo de concreto (ABNT NBR 7211:2009) ....	70
Figura 23 – Distribuição granulométrica do resíduo de concreto. ....	70
Figura 24 – Pré-umidificação do agregado reciclado.....	75
Figura 25 – Lubrificação da betoneira. ....	75
Figura 26 – Mistura dos materiais na betoneira. ....	76
Figura 27 – Análise tátil-visual do concreto. ....	76
Figura 28 – Moldes para moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos.....	77
Figura 29 – Formas para moldagem das peças e placas de concreto permeável.....	77
Figura 30 – Moldagem de prisma e placa de concreto permeável. ....	78
Figura 31 – Cura inicial dos corpos de prova.....	79
Figura 32 – Cura das amostras em câmara úmida: (a) peças, CPs cilíndricos e prismáticos em tanque d’água; (b) placas cobertas por panos úmidos em câmara úmida.....	79
Figura 33 – Ensaio de determinação da massa específica do concreto permeável no estado fresco. ....	83
Figura 34 – Determinação da massa seca das amostras. ....	84
Figura 35 – Determinação da massa submersa das amostras. ....	84
Figura 36 – Corpos de prova cilíndricos capeados.....	85
Figura 37 – Prensa eletro-hidráulica utilizada nos ensaios mecânicos. ....	86
Figura 38 – Corpo de prova cilíndrico posicionado na prensa antes (a) e depois do rompimento (b). ....	86
Figura 39 – Ensaio de resistência à tração na flexão.....	87
Figura 40 – Condição de corpo de prova prismático submetido ao ensaio de resistência à tração na flexão após o rompimento.....	88
Figura 41 – Capeamento das peças de concreto permeável para pavimentação intertravada. ....	89
Figura 42 – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. ....	92

Figura 43 – Detalhe do anel de infiltração calafetado para a realização do ensaio de permeabilidade.....	94
Figura 44 – Ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade. ....	94
Figura 45 – Placa de concreto permeável após ensaio de determinação de coeficiente de permeabilidade.....	95
Figura 46 – Dreno instalado na vaga experimental.....	97
Figura 47 – Assentamento das camadas de sub-base da vaga (a) e do passeio (b) experimentais.....	97
Figura 48 – Mistura dos materiais realizada manualmente.....	98
Figura 49 – Confeção (a) e assentamento (b) das peças de concreto permeável.....	98
Figura 50 – Lançamento (a), adensamento (b) e nivelamento (c) do concreto permeável moldado <i>in loco</i> . ....	99
Figura 51 – Vaga de estacionamento (a) e segmento de passeio intertravado (b) experimentais de concreto permeável produzido com agregado reciclado. ....	99
Figura 52 – Concreto permeável elaborado no estudo.....	100
Figura 53 – Relação entre resistência à compressão axial média e a idade dos CPs para diferentes amostras de resíduo.....	118
Figura 54 – Corpo de prova prismático de concreto permeável produzido com resíduo de concreto após o rompimento. ....	119
Figura 55 – Relação entre índice de vazios e massa específica no estado endurecido para diferentes corpos de prova.....	120

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável. ....	17
Tabela 2 – Consumos e proporções típicos em misturas de concreto permeável .....	18
Tabela 3 – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade.....	27
Tabela 4 – Quantitativo das fissuras subsuperficiais das amostras de concreto permeável. .....	29
Tabela 5 –Níveis de ruído aferidos em concreto permeável. ....	30
Tabela 6 – Propriedades químicas, físicas e mecânicas do Cimento Portland CP V-ARI. .....	67
Tabela 7 – Análise granulométrica do resíduo de concreto estudado. ....	69
Tabela 8 – Propriedades físicas das amostras de resíduos. ....	71
Tabela 9 – Amostragem dos corpos de prova. ....	81
Tabela 10 – Fator multiplicativo p. ....	90
Tabela 11 – Ensaio de Caracterização do Subleito.....	96
Tabela 12 – Fluxograma resumo da metodologia de produção do concreto permeável. ....	101
Tabela 13 – Resultados de massa específica no estado fresco, referentes à cada concretagem realizada, juntamente a média, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos. .....	103
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de massa específica no estado endurecido e índice de vazios referentes aos CPs cilíndricos.....	104
Tabela 15 – Resultados dos ensaios de massa específica no estado endurecido e índice de vazios referentes às peças de 60 mm de espessura. ....	104
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de massa específica no estado endurecido e índice de vazios referentes às peças de 80 mm de espessura. ....	105
Tabela 17 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados dos ensaios de massa específica no estado endurecido e índice de vazios.....	105
Tabela 18 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial. ....	107

Tabela 19 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias. ....	108
Tabela 20 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão aos 28 dias. ....	109
Tabela 21 – Resultados dos ensaios de resistência característica à compressão aos 28 dias. ....	111
Tabela 22 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico.....	112
Tabela 23 – Resultados dos ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade. ....	114
Tabela 24 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados dos ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade.....	114
Tabela 25 – Valores médios dos ensaios realizados nos CPs cilíndricos para diferentes amostras de resíduo. ....	117

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Relação água/cimento
ACI	American Concrete Institute
ANOVA	Analysis of Variance
ASTM	American Society for Testing and Materials
BH-Tec	Parque Tecnológico de Belo Horizonte
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCP	Concreto de Cimento Portland Convencional
CEET	Comissão de Estudo Especial Temporária de Resíduos Sólidos
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP 15	Conferência Climática de Copenhague
CP	Corpo de Prova
Eco-92	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento
EPA	Environmental Protection Agency
EUA	Estados Unidos da América
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
ISO	International Standard Organization

LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MG	Minas Gerais
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
NPCA	National Pervious Concrete Association
NRMCA	National Ready Mixed Concrete Association
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
Poli-USP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
ProInfra	Pró-Reitoria de Infraestrutura e Gestão
RCC	Resíduos da Construção Civil
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SSS	Saturado com Superfície Seca
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## Lista de Símbolos

$K$	Coeficiente de permeabilidade
$Vol$	Volume
$L_{cp}$	Comprimento do corpo de prova
$h$	Carga hidráulica
$A$	Área da seção transversal do corpo de prova
$T$	Tempo
$CO^2$	Dióxido de carbono
$C$	Consumo de cimento
$\gamma_c$	Massa específica do cimento
$\gamma_r$	Massa específica do agregado graúdo
$\alpha$	Volume de ar
$r$	Quantidade de agregado graúdo
$x$	Fator água/cimento
$\gamma_{cp}$	Massa específica do concreto permeável
$f_{ck}$	Resistência característica à compressão
$I_v$	Índice de vazios da amostra
$M_{sec}$	Massa seca
$M_{sub}$	Massa submersa
$\gamma_a$	Massa específica da água

$f_c$	Resistência à compressão
$F$	Carga de ruptura
$D$	Diâmetro do corpo de prova
$\pi$	Constante matemática com valor aproximado de 3,1415
$f_{ct,f}$	Resistência à tração na flexão
$l$	Distância do vão entre os apoios
$b$	Largura média do corpo de prova
$d$	Altura média do corpo de prova
$f_p$	Resistência média das peças
$f_{pi}$	Resistência individual das peças
$f_{pk, est}$	Resistência característica estimada à compressão
$n$	Número de peças da amostra
$s$	Desvio padrão da amostra
$t$	Coefficiente de Student, dado em função do tamanho da amostra
$L$	Distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores
$V$	Velocidade
$E_d$	Módulo de elasticidade dinâmico
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$m$	Massa de água infiltrada
$d_i$	Diâmetro interno do cilindro de infiltração
$C_v$	Fator de conversão de unidades do sistema SI

## Sumário

1	Introdução .....	1
1.1	Considerações Iniciais .....	1
1.2	Relevância .....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho .....	4
1.5	Inovação.....	5
2	Revisão Bibliográfica .....	6
2.1	Drenagem Urbana.....	6
2.2	Concreto Permeável.....	9
2.2.1	Contexto Histórico do Concreto Permeável.....	9
2.2.2	O Concreto Permeável no Brasil .....	12
2.2.3	Pavimentos Permeáveis de Concreto: Norma Brasileira.....	13
2.2.4	Materiais Utilizados na Composição do Concreto Permeável .....	17
2.2.5	Características do Concreto Permeável.....	19
2.2.6	Características do Concreto Permeável no Estado Fresco .....	23
2.2.7	Características do Concreto Permeável no Estado Endurecido .....	24
2.2.8	Aplicações do Concreto Permeável.....	34
2.2.9	Benefícios Ambientais .....	35
2.2.10	Outros Aspectos sobre o Concreto Permeável .....	37
2.3	Resíduos da Construção Civil .....	39
2.3.1	Conceitos .....	40
2.3.2	Resíduos Sólidos .....	40
2.3.3	Classificações .....	41
2.3.4	Geração dos Resíduos .....	43
2.3.5	Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Construção Civil.....	45

2.3.6	Características dos resíduos da construção civil .....	49
2.3.7	Composição e Quantificação dos Resíduos .....	50
2.3.8	Panorama dos Resíduos da Construção Civil no Brasil .....	52
2.3.9	Reciclagem na Construção Civil .....	54
2.3.10	Aplicação dos Resíduos da Construção Civil .....	57
3	Materiais e Métodos de Ensaio .....	65
3.1	Caracterização dos Materiais .....	65
3.1.1	Cimento .....	66
3.1.2	Agregado Graúdo: Resíduo de Concreto .....	67
3.2	Metodologia de Dosagem .....	71
3.3	Procedimento de Mistura dos Materiais .....	74
3.4	Moldagem dos Corpos de Prova .....	77
3.5	Dimensão e Amostragem dos Corpos de Prova .....	80
3.6	Ensaaios Normativos Realizados .....	82
3.6.1	Massa Específica no Estado Fresco .....	82
3.6.2	Índice de Vazios e Massa Específica no Estado Endurecido .....	83
3.6.3	Resistência à Compressão Axial .....	85
3.6.4	Resistência à Tração na Flexão .....	87
3.6.5	Resistência Característica à Compressão das Peças .....	89
3.6.6	Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica .....	91
3.6.7	Módulo de Elasticidade Dinâmico .....	92
3.6.8	Coeficiente de Permeabilidade .....	93
3.7	Modelos Reais: Vaga e Passeio Experimentais .....	96
3.8	Resumo da Metodologia de Produção do Concreto Permeável .....	100
4	Resultados e Análises .....	102
4.1	Massa Específica no Estado Fresco .....	102

4.2	Massa Específica no Estado Endurecido e Índice de Vazios .....	103
4.3	Resistência à Compressão Axial.....	107
4.4	Resistência à Tração na Flexão .....	109
4.5	Resistência Característica à Compressão das Peças .....	110
4.6	Módulo de Elasticidade Dinâmico .....	112
4.7	Coefficiente de Permeabilidade .....	113
4.8	Modelos Reais .....	115
4.9	Variabilidade dos Resultados .....	116
4.9.1	Diferentes Amostras de Resíduo .....	117
4.9.2	Ausência de Metodologias Padronizadas .....	119
5	Conclusões e Recomendações .....	121
	Referências .....	126

# 1 Introdução

## 1.1 Considerações Iniciais

Historicamente, o campo da construção civil tem papel fundamental no desenvolvimento econômico e social da humanidade, o que o torna direta e indiretamente responsável por inúmeras atividades deletérias ao meio ambiente. Destaca-se, dentre elas, o enorme consumo de recursos naturais e de energia além da própria alteração da paisagem natural, que é transformada no ambiente construído, se adequando ao desenvolvimento das mais diversas atividades (JOHN, 2000).

A preocupação com a preservação ambiental e a conservação das jazidas minerais faz com que a indústria da construção desenvolva novos conceitos e soluções técnicas visando à sustentabilidade de suas atividades. Neste cenário, a procura pelo reaproveitamento dos resíduos gerados pelo setor vem aumentando consideravelmente ao longo das últimas décadas. O crescimento descomedido no volume de Resíduos da Construção Civil (RCC), inerente ao mau aproveitamento de recursos em obra, intensifica o cuidado quanto à preservação do meio ambiente, sobretudo na busca pela redução do consumo das reservas naturais de matéria-prima (ÂNGULO, 2000).

No cenário atual de constante expansão em que se encontra a Universidade Federal de Juiz de Fora, onde as obras no Campus – reformas e novas construções – foram retomadas após um período de paralização devido ao término de contratos com empreiteiras, o acúmulo de RCC se intensificou, o que, de modo geral, favoreceu a deposição irregular desses materiais por toda a área da UFJF. Iniciou-se, portanto, com o apoio da Pró-Reitoria de Infraestrutura e Gestão (ProInfra), a busca por alternativas viáveis que contribuíssem de modo efetivo para o aproveitamento de resíduos dessa natureza e remediação ambiental das áreas atingidas.

Neste contexto, o presente trabalho discorre acerca da avaliação da potencialidade de utilização de resíduos de concreto no desenvolvimento do chamado “Concreto Permeável”, cujo emprego representa uma forma de redução da problemática associada à deficiência dos sistemas de drenagem urbana, originada a partir do crescimento desordenado do processo de urbanização.

## 1.2 Relevância

A grande geração de entulho (como são conhecidos popularmente os RCC) nas construções civis evidencia o desmedido desperdício de materiais, seja na extração de matéria-prima, durante o transporte ou nos próprios canteiros de obra (BOIBELMAN, 2006). Como avalia Sanchez (2013), toda a sociedade é atingida por essa “irracionalidade” na construção, não só pelo aumento do custo final das construções, como também pela intensificação dos custos com remoção e tratamento dos resíduos.

Essa problemática na qual estão envolvidos os RCC revela a necessidade de práticas que viabilizem a reciclagem e o consequente emprego desses resíduos como insumos da construção civil. A reutilização de materiais, tanto nos canteiros de obras como após as demolições, deve ser implementada como método de minimização das perdas. Os processos de reciclagem devem ser desenvolvidos a fim de produzir novos materiais que serão reinseridos no próprio setor (EVANGELISTA *et al.*, 2010).

Frequentemente, esse resíduo é retirado da obra e disposto clandestinamente em locais como:

- terrenos baldios ou terras baixas, junto a elementos de sistemas de drenagem ou mesmo diretamente no leito de canais, levando à obstrução do escoamento e provocando inundações;
- ao longo dos cursos d'água ou encostas, gerando depósitos instáveis que posteriormente causam deslizamentos de terra catastróficos;
- vias de tráfego, passeios ou áreas verdes, podendo ocasionar uma série de problemas de natureza socioambiental, como a contaminação do solo por gesso, tintas e solventes, o impedimento ao tráfego de veículos e pedestres, a deterioração da paisagem urbana, além da proliferação de insetos e outros vetores, que, por sua vez, contribuem para o agravamento de problemas de saúde pública (MENDES *et al.*, 2004).

Segundo Tucci (2006), todos os transtornos relacionados aos resíduos se agravam em ambientes onde ocorreu a impermeabilização de áreas originalmente permeáveis. Esse fenômeno, por sua vez, geralmente vinculado ao processo de urbanização, é responsável por provocar alterações no ciclo hidrológico, as quais resultam em:

- diminuição da infiltração no solo;

- acúmulo de água na superfície, aumentando o volume escoado superficialmente e coletado pela rede de drenagem que, quando sobrecarregada, resulta em inundações e alagamentos;
- aumento da velocidade de escoamento superficial, podendo elevar a vazão máxima de inundação em até sete vezes.

Neste panorama se encontra a implementação de pavimentos permeáveis, que, conforme analisa Tucci (2006), apresentam inúmeras vantagens em detrimento aos convencionais, as quais auxiliam na eficácia dos sistemas de drenagem urbana: diminuição do escoamento superficial e da lâmina de água em estacionamentos e passeios, além da redução da quantidade de condutos e, conseqüentemente, dos custos totais do sistema de drenagem. Este sistema de drenagem atua até mesmo como reservatório transitório da água infiltrada no pavimento permeável.

Outro fator primordial, o qual representa a epítome do atual trabalho, trata-se da possibilidade de emprego de resíduos de construção na fabricação deste pavimento. De acordo com Safiuddin *et al.* (2011), a utilização de resíduos dessa categoria soluciona problemas quanto ao seu descarte, além de conservar os recursos naturais, reduzir os custos de transporte e até mesmo, de modo geral, mitigar a poluição ambiental, protegendo o equilíbrio ecológico.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a potencialidade de aplicação do resíduo de concreto em substituição a 100% do agregado graúdo convencional na confecção de concreto permeável destinado à pavimentação urbana, sobretudo quanto aos quesitos de resistência mecânica e condutividade hidráulica. Esse material é obtido através da trituração de concretos – estruturais ou não – provenientes de obras de construção e demolição localizadas por toda a extensão do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora.

Para tanto, este trabalho se compromete a analisar o comportamento da mistura obtida a partir do desenvolvimento de uma metodologia de dosagem tecnicamente viável. A avaliação do produto obtido se deu por intermédio de ensaios estipulados pela norma referente a pavimentos permeáveis, adaptados ao contexto da universidade e às particularidades do compósito.

Além desses objetivos gerais, o trabalho apresenta, ainda, alguns objetivos específicos que envolvem:

- produção de concreto permeável sem a utilização de aditivos, haja vista a dificuldade da instituição em adquirir produtos dessa natureza em pregões;
- criação de um sistema de controle tecnológico simplificado para produção interna do material pela ProInfra;
- análise acerca da representatividade do ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico quando submetido a compósitos drenantes;
- avaliação do desempenho de revestimentos de concreto permeável direcionados ao tráfego leve de veículos e ao tráfego de pedestres em modelos reais.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

O presente documento, que desenvolve um estudo sobre o potencial de utilização de resíduos de concreto como agregado graúdo em pavimentos de concreto permeável, traz, como introdução, assuntos gerais pertinentes à temática abordada, os quais serão analisados com mais abrangência ao decorrer do trabalho. O capítulo seguinte contém uma revisão bibliográfica acerca da problemática intrínseca aos sistemas de drenagem urbana, além de caracterização mais aprofundada do principal objeto de estudo do trabalho: o concreto permeável. Discorre-se, ainda, sobre os resíduos da construção civil, com enfoque no seu reaproveitamento pela indústria da construção, em especial na produção de concretos permeáveis como solução para os problemas relativos à drenagem urbana.

Já no terceiro capítulo, são apresentadas as caracterizações dos materiais empregados, bem como a metodologia experimental utilizada, que envolve desde a dosagem do traço até os ensaios normatizados que qualificam o concreto estudado como pavimento permeável, além da descrição dos procedimentos para construção dos modelos reais elaborados. Posteriormente, os dados e os resultados experimentais obtidos são analisados, seguidos de um capítulo trazendo as conclusões, sugestões para a sequência do estudo e as considerações finais. Por fim, são citadas as referências bibliográficas do trabalho.

## 1.5 Inovação

Este estudo aborda algumas questões capazes de caracterizá-lo como “Inovação Tecnológica”:

- Substituição de 100% do agregado de origem natural por resíduo de concreto sem a utilização de aditivos ou adições como artifício para incrementar certas propriedades do material.
- Elaboração de metodologias de dosagem, mistura, moldagem e adensamento específicas com o intuito de viabilizar a produção do compósito.
- Adoção da norma que regulamenta o uso de revestimentos permeáveis – NBR 16416 (ABNT, 2015c) – como referência, estabelecida originalmente para agregados de origem pétreo.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Drenagem Urbana

Com o crescente desenvolvimento do processo de urbanização, o qual intensificou-se principalmente no decorrer do século XX, surge uma série de problemas associados ao crescimento acelerado e desordenado das cidades, aliado à falta de planejamento urbano e consequente ausência de uma estratégia de ocupação do solo. Esses transtornos vão desde o saneamento básico inadequado até a existência de pontos de alagamento causada pela ineficiência do sistema de drenagem das águas pluviais, que passam a escoar superficialmente devido ao processo gradual de impermeabilização do solo (PINTO, 2011).

E essa dinâmica de expansão urbana nas últimas décadas, onde amplas áreas predominantemente ocupadas por instalações rurais foram transformando-se em centros residenciais, gerando o aumento do número de edificações e a expansão dos grandes centros urbanos, vem tornando o desafio da drenagem urbana cada vez maior e mais complexo. São englobados aspectos sanitários, ambientais, e paisagísticos, além dos propriamente técnicos, principalmente porque, segundo Batezini e Balbo (2015), nestes últimos anos, o crescimento da população urbana tem se dado sobretudo na periferia das metrópoles, ocupando áreas de mananciais e de risco de inundações e escorregamentos de terra.

Tucci (1997) correlaciona, ainda, algumas implicações indesejadas ao sistema de drenagem urbana com o crescimento dos centros urbanos, que vão desde o aumento dos volumes escoados e da produção de sedimentos até a redução da evapotranspiração e do escoamento subterrâneo, além da própria degradação da qualidade da água. Essas ocorrências sobrevêm em virtude da desproteção das superfícies, da produção exacerbada de resíduos sólidos e, essencialmente, do crescimento da taxa de impermeabilização superficial. O volume de água, que antes era retido pelas plantas e se infiltrava pelo solo, escoando pelo subterrâneo, passa a escoar superficialmente, provocando uma demanda de aumento da capacidade de escoamento dos condutos e canais (CARDOSO, 2017), afetando, ainda, o ciclo hidrológico local, o qual pode ser verificado na Figura 1:

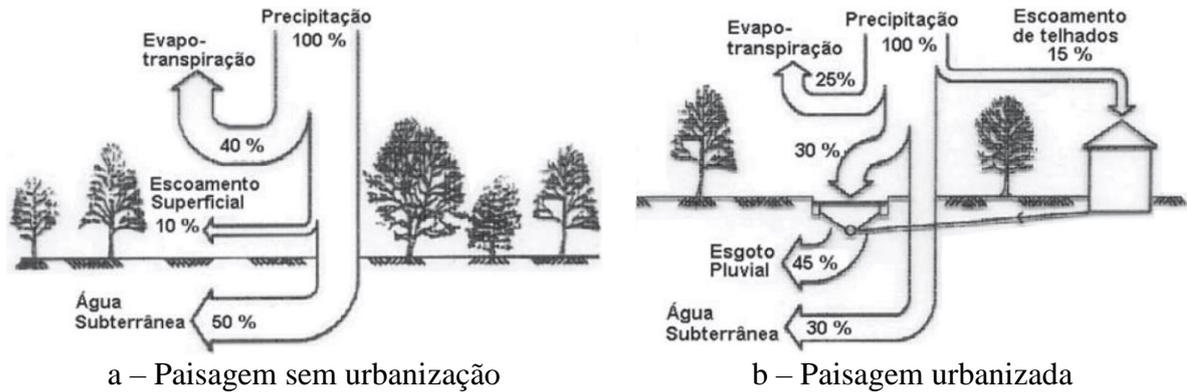


Figura 1 – Ciclo hidrológico antes e depois da urbanização.  
(Fonte: OECD, 1986, *apud* Tucci, 2006)

E com a infiltração de um menor volume de água, intensifica-se o escoamento superficial, que se dá de forma mais veloz e em um menor tempo, uma vez que o excedente pluvial é carregado pelo sistema de drenagem. O que prejudica também a recarga dos aquíferos, levando a uma redução do lençol freático, como expõe Acioli (2005). Esse panorama resulta no aumento das vazões máximas e na antecipação dos picos de cheias, justamente em função dessa chegada do fluxo de água com mais energia aos corpos d'água (Figura 2).

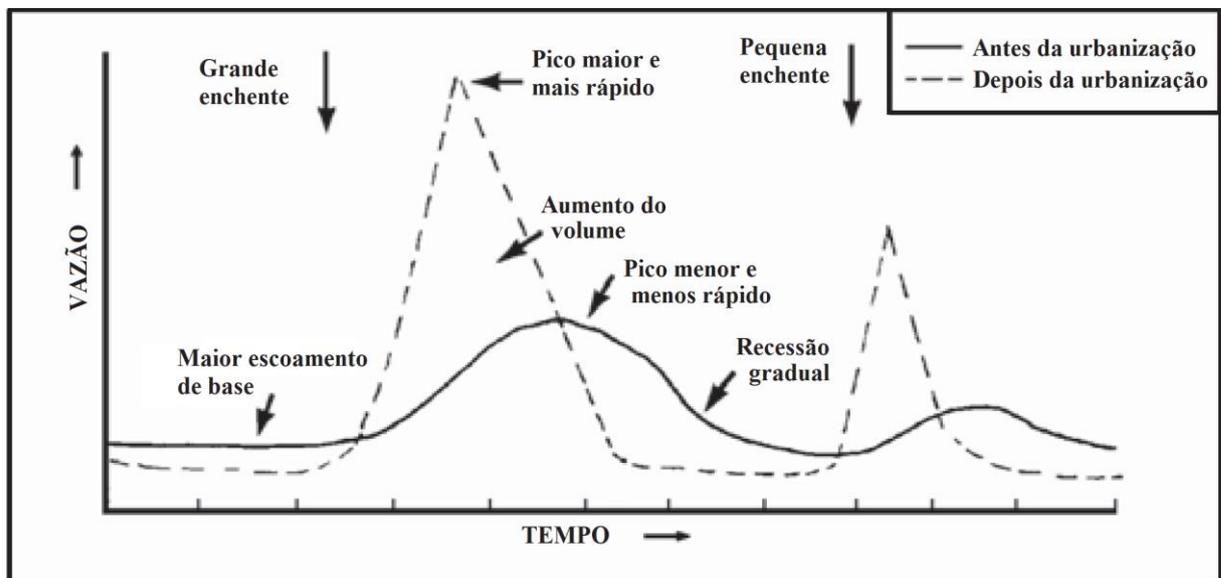


Figura 2 – Fluxo de água ilustrando as vazões máximas.  
(Fonte: Schueler, 1987, adaptado por Tucci, 2006)

Bispo e Levino (2011) também descrevem esse fenômeno: o regime de produção nas bacias hidrográficas urbanas é alterado devido ao processo de urbanização. A impermeabilização do solo, que impede a infiltração da água, aumenta os picos de cheias, intensificando os problemas associados à erosão urbana. Ademais, com a minimização da recarga dos aquíferos, a disponibilidade de água nos períodos de baixa precipitação é reduzida.

Essa alteração gradativa da superfície, tornando-a menos permeável, favorecendo, assim, o escoamento superficial, cria demandas progressivas ao sistema de drenagem urbana. Essas demandas, no entanto, vêm sendo enfrentadas a partir da construção de sistemas de drenagem cada vez maiores, onde a objetivo principal se baseia em fazer com que os grandes volumes de águas pluviais sejam canalizados e retirados mais rapidamente das áreas mais afetadas. Contudo, Tucci (2007) afirma que implementar esses projetos de microdrenagem, nos quais se planeja mobilizar grandes fluxos para outros pontos, de uma forma geral, acaba transferindo a problemática de um local para outro à jusante.

Como tais recursos não consideram as implicações para o restante da bacia, a sobrecarga dos condutos atribuídos à drenagem secundária suscita alagamentos dissipados na malha urbana, afetando as vias de tráfego. Ademais, a descarga brusca dos excedentes pluviais nos corpos d'água, sobrecarrega, por sua vez, os elementos de macrodrenagem (canais e riachos), estes responsáveis pelo escoamento da água da maior parte dos centros metropolitanos (HÖLTZ, 2011).

Conforme elucidada Canholi (2005), a construção paliativa de enormes sistemas de drenagem não é sustentável. De fato, a situação vigente, de modo geral, envolve a utilização de onerosos recursos à construção desses sistemas de grande porte como, por exemplo, dutos forçados, diques com bombeamentos, extensas canalizações, reversões e barragens, os quais exigem, para sua instalação, grandes interferências no tecido urbano já constituído.

Para mitigar ou até mesmo eliminar as consequências danosas associadas à drenagem urbana (escassez hídrica, inundações e seus inerentes problemas de saneamento e saúde pública), autores como Canholi (2005) e Tucci (2007) entendem que é imprescindível que haja uma abordagem mais abrangente acerca da gestão das águas, envolvendo uma visão mais integrada entre bacia, o ambiente urbano e as suas relações. E dentro dessa visão holística a ser adotada nos estudos de macrodrenagem, encontra-se, na utilização do concreto permeável, um artifício fundamental na gestão de águas pluviais, uma vez que se trata de um tipo de pavimento de grande eficiência que, além de auxiliar na infiltração, também age como reservatório provisório de grande parte do volume de água excedente.

## 2.2 Concreto Permeável

O concreto permeável (Figura 3), também conhecido como concreto poroso ou drenante, surge para combater os impactos ambientais e toda a problemática associada à impermeabilização urbana, direta ou indiretamente. Além de ser usado como pavimento, favorecendo a infiltração e o retardo do escoamento superficial das águas pluviais, pode ser utilizado também na fabricação de elementos do sistema de drenagem, impedindo o seu entupimento e evitando a entrada de detritos nas tubulações e canalizações (LAMB, 2014).



Figura 3 – Concreto permeável.  
(Fonte: Mazzonetto, 2011)

### 2.2.1 Contexto Histórico do Concreto Permeável

De acordo com Francis (1965), a utilização do concreto permeável no processo de construção tem sua origem em meados do século XIX, em diversos países da Europa, seja em casas, edifícios, blocos ou até mesmo em painéis pré-fabricados. Contudo, Li (2009) aponta que o avanço nos estudos quanto à sua aplicação enquanto pavimento permeável ou em peças de sistemas de drenagem, se intensificou há cerca de 20 anos, sobretudo nos Estados Unidos da América (EUA).

O boletim ACI 522R-10 (ACI, 2010), reuniu e analisou com maior profundidade uma gama de estudos acerca do tema, identificando que os primeiros registros da utilização de concretos com grande percentual de vazios e sem a presença de agregados miúdos foram encontrados na Europa. Mais precisamente no Reino Unido, em 1852, onde duas casas foram construídas a partir somente de cimento, brita e água. Inicialmente, o seu uso associava-se mais à redução de

peso e de custos das estruturas do que propriamente ao aumento do seu potencial permeável (HÖLTZ, 2011).

Os próximos registros do uso dessa tecnologia só são datados a partir de 1923, quando, na Escócia, cerca de 50 edificações compostas por dois pavimentos foram construídas usando-se agregados à base de clínquer. Foi então que a “*Scottish Special Housing Association Limited*” adotou, durante a década seguinte, a implementação do concreto permeável em construções residenciais, devido principalmente à sua leveza e capacidade de isolamento térmico. E graças a essas evidentes propriedades térmicas e ao seu baixo custo, o concreto permeável já havia sido empregado na construção de mais de 900 casas em todo o Reino Unido (ACI, 2010).

A utilização dos métodos construtivos que envolviam o uso de concretos dessa espécie se acentuou principalmente após a Segunda Guerra Mundial, a qual deixou grande parte do continente europeu com uma enorme demanda por moradias. Em virtude da pouquidão de cimento, a grande disponibilidade de resíduos de construção e a escassez de mão de obra, o uso do concreto permeável despontou, dentre outros métodos, em razão do seu menor consumo de cimento em detrimento ao concreto convencional (MALHOTRA, 1976).

Francis (1965) ainda salienta que o concreto permeável, antes da eclosão da Segunda Guerra mundial em 1939, tinha sua produção restrita basicamente a construções residenciais de até dois pisos. Após 1946, com o aumento vertical das edificações, efeito do desenvolvimento nos processos de projeto de edificações e fabricação de concreto, o compósito permeável começou a ser empregado numa variedade maior de aplicações, chegando até a ser utilizado na confecção de prédios que ultrapassavam 10 andares.

Embora o concreto permeável tenha sido utilizado em grande escala por toda a Europa, a sua utilização no continente americano como material construtivo até o fim do século XX limitou-se a ocorrências isoladas. Como no Canadá, onde o concreto permeável foi empregado na construção civil apenas na década de 60, em algumas pequenas edificações em Toronto, bem como base não estrutural do “*Federal Building*”, situado em Ottawa (ACI, 2010). Isso se deve ao fato de a América não ter vivido a abstinência por materiais de construção comum a toda Europa ao fim da Segunda Guerra Mundial (GHAFOORI, 1995).

Ghafoori (1995) ainda revela que os EUA começaram a utilizar o concreto permeável apenas nos anos 70, não relacionado à redução de custos ou de materiais nem às suas propriedades de isolamento térmico, mas sim pela sua capacidade enquanto material permeável. O objetivo majoritário consistia em mitigar os efeitos das cada vez mais frequentes inundações

que surgiram simultaneamente ao processo de impermeabilização em áreas de construções recentes, aumentando o escoamento superficial que, por sua vez, está intimamente atrelado ao desenvolvimento urbano.

Mulligan (2005) afirma que o concreto permeável começou a ser empregado inicialmente nos Estados da Flórida, Utah e Novo México, com o intuito de incrementar a permeabilidade em zonas urbanizadas. Alcançou, posteriormente, devido ao bom desempenho obtido, outros estados americanos, tais como a Califórnia, Oklahoma e Illinois. O resultado foi tão efetivo que a tecnologia começou a se difundir, surgindo, assim, uma gama de pequenos fornecedores do material, junto a uma associação, a NPCA (*National Pervious Concrete Association*).

A partir de meados da década de 90, surgem os primeiros estudos sobre o uso do concreto permeável como um artifício aos sistemas de drenagem. Sua função básica envolvia absorver e armazenar temporariamente o excedente pluvial, aliviando o escoamento superficial da água e reduzindo a incidência de inundações. Além, é claro, de contribuir para a manutenção dos aquíferos subterrâneos (LAMB, 2014).

O alto coeficiente de permeabilidade desse material é, pois, o motivo fundamental da pesquisa e produção do concreto permeável presentemente. As águas pluviais que infiltram por entre sua estrutura porosa diminuem a vazão superficial e favorecem ao uso mais eficiente do solo, dispensando grandes obras de drenagem tais como pontos de retenção, valas ou tubulações (ACIOLI, 2005).

De acordo com Hóltz (2011), o concreto permeável, além de demandar um menor custo durante o seu ciclo de vida em detrimento aos sistemas de drenagem convencionais, auxilia, também, na redução da incidência das enxurradas urbanas, responsáveis por carrear uma grande quantidade de resíduos e poluentes aos corpos de água. Os materiais desta natureza, de fato, ainda absorvem menos radiação solar, favorecendo a conservação da arborização em áreas pavimentadas, pois possibilita a o recebimento de água e ar pelas raízes.

Essas inúmeras vantagens tornaram não somente o concreto permeável, como os pavimentos permeáveis em geral, objetos de estudo da comunidade científica internacional, na intenção de caracterizá-lo e normalizá-lo de um modo sistêmico, objetivando sua popularização. Neste contexto, segundo Polastre e Santos (2006), diversos países vêm intensificando as pesquisas acerca do material enquanto alternativa aos sistemas de drenagem convencional, como é o caso do Japão e do Chile.

### 2.2.2 O Concreto Permeável no Brasil

Embora esse tipo de concreto já seja empregado há décadas na Europa e nos Estados Unidos, pesquisas e referências acerca dessa tecnologia ainda são incipientes no Brasil. Os concretos asfálticos e os bloquetes de concreto convencional ainda representam o foco dos estudos nacionais a respeito da pavimentação permeável. É de extrema importância que o país acompanhe e colabore para o desenvolvimento do material, uma vez que o concreto permeável pode representar o avanço das questões associadas à drenagem urbana, atenuando os problemas de inundações, além de contribuir para o aumento da sustentabilidade e redução do impacto ambiental (HÖLTZ, 2011).

A inserção do concreto permeável no mercado brasileiro vem se desenvolvendo, mesmo que paulatinamente, a partir da adoção de projetos demonstrativos. Corporações relacionadas à cadeia do cimento já se dedicam a introduzir o composto como alternativa viável em relação à infiltração e à garantia de permeabilidade durante o processo de pavimentação, no que tange aos requisitos das legislações municipais. Polastre e Santos (2006) citam alguns projetos-pilotos onde o concreto permeável já começou a ser empregado:

- Na cidade de Belo Horizonte (MG), o projeto do Parque Tecnológico de Belo Horizonte (BH-Tec), que começou a ser construído em abril de 2006, foi idealizado para ser executado de maneira ecologicamente correta e sem precedentes na América Latina. A pavimentação do recinto é toda de concreto permeável, o que minimiza os riscos de inundações e ainda alimenta as nascentes do Parque.
- Em São Paulo, em meados de junho de 2006, a Secretaria de Coordenação das Subprefeituras, juntamente com entidades e empresas privadas, divulgou que seriam avaliadas novas técnicas para a recuperação de algumas áreas degradadas, onde a empresa de arquitetura CASA COR colaboraria realizando testes com a calçada viva, empregando, entre outras inovações, o concreto permeável, por auxiliar na manutenção dos aquíferos subterrâneos.

Silveira (2010) afirma que o conhecimento sobre pavimentos de concreto asfáltico permeável apresenta maior abrangência do que os estudos acerca dos concretos permeáveis com matriz cimentícia. Ainda não há estudos científicos de grandes magnitudes envolvendo compostos de concreto permeável no Brasil. Enquanto em São Paulo, engenheiros da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP) converteram cerca de 800 metros de estacionamento em asfalto drenante, comparando o seu desempenho ao de blocos pré-moldados

porosos, concluindo, finalmente, que, para se obter melhores resultados, o asfalto drenante e os blocos pré-moldados deveriam ser empregados em conjunto,

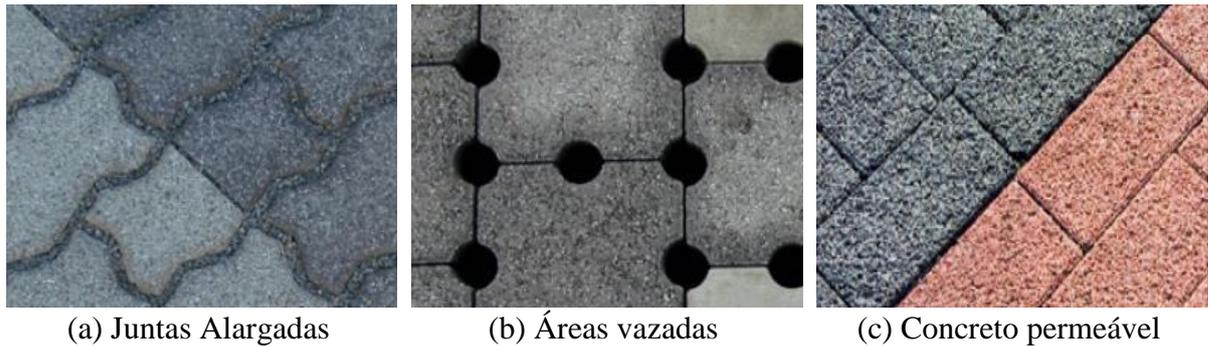
Além dos procedimentos de dosagem, moldagem, avaliação e caracterização sistemática do material, é preciso desenvolver, também, estudos que ponderem sobre os benefícios ambientais e econômicos intrínsecos ao concreto estudado no vigente trabalho. A fim de assegurar a qualidade do concreto permeável, bem como viabilizar o seu uso com segurança, a *International Standard Organization* (ISO) criou, em 2011, um grupo com especialistas advindos do Brasil, Coréia, China, Estados Unidos e Japão, onde discutiu-se a formulação de normas referentes ao material (HÖLTZ, 2011).

Mesmo a partir daí a presença do concreto permeável no Brasil ainda é restrita, limitando-se a aplicações isoladas em estacionamentos de shoppings centers e condomínios (MAZZONETTO, 2011). Entretanto, em agosto de 2015, foi publicada a “ABNT NBR 16416:2015: Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e Procedimentos”, que estabelece os requisitos mínimos de projeto, especificação, execução e manutenção de pavimentos permeáveis de concreto, contemplando técnicas de avaliação de desempenho quanto a sua capacidade de infiltração.

### **2.2.3 Pavimentos Permeáveis de Concreto: Norma Brasileira**

O documento se inicia trazendo a definição de termos pertinentes à pavimentação permeável, destacando requisitos que envolvem a resistência de esforços mecânicos, além de segurança e conforto, concomitantemente à capacidade de percolação de água por entre sua estrutura. Os pavimentos permeáveis de concreto podem ser executados a partir de tipologias de revestimento distintas. Contemplam-se, como alternativas de revestimento do pavimento permeável:

- Peças de concreto para pavimentação intertravada, as quais subdividem-se entre: peças com juntas alargadas (Figura 4a), onde a percolação da água ocorre pelas juntas; peças com áreas vazadas (Figura 4b), onde a percolação ocorre pelas áreas vazadas; ou peças de concreto permeável (Figura 4c), onde a percolação ocorre através da própria peça.



(a) Juntas Alargadas

(b) Áreas vazadas

(c) Concreto permeável

Figura 4 – Revestimento de pavimento intertravado permeável.

(Fonte: Febestral, 2008)

- Placas de concreto permeável, cujo assentamento difere-se do apresentado pelas peças de concreto permeável por não apresentar intertravamento, como identificado na Figura 5:



Figura 5 – Revestimento de pavimento constituído de placas de concreto permeável.

(Fonte: Silva, 2012)

- Concreto permeável moldado *in loco*, visualizado na Figura 6:



Figura 6 – Pavimento com revestimento de concreto permeável moldado no local.

(Fonte: Marchioni e Silva, 2011)

O dimensionamento hidráulico deve considerar os dados de precipitação da região, o coeficiente de permeabilidade do solo e o risco de contaminação do lençol freático. Em relação

ao sistema de infiltração de água precipitada do pavimento permeável, são definidas três modalidades, conforme apresentado na Figura 7:

- Infiltração total, onde toda a água é direcionada ao subleito.
- Infiltração parcial, que apresenta uma tubulação de drenagem para complementar a infiltração.
- Sem infiltração (a água é direcionada por completo para uma tubulação de drenagem).

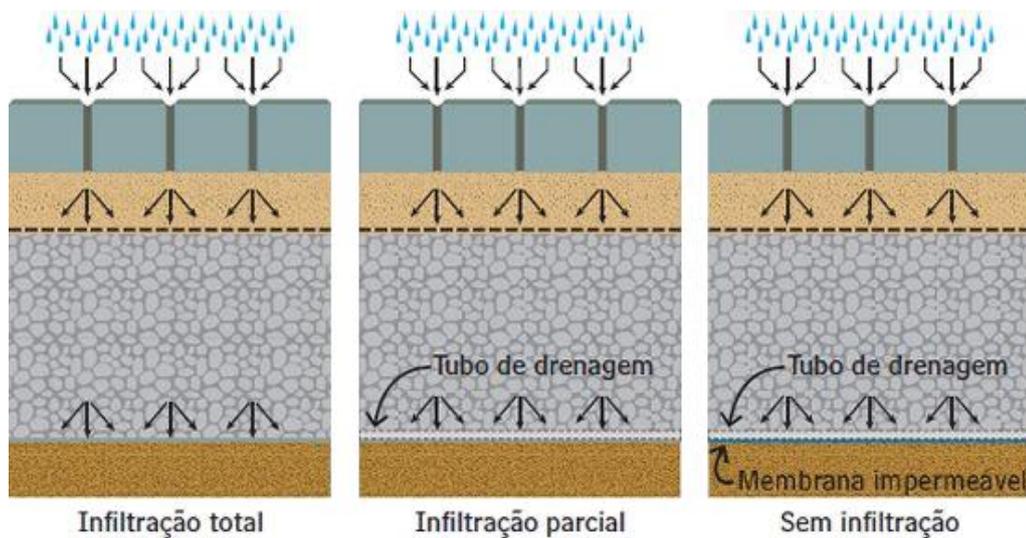


Figura 7 – Sistemas de infiltração de pavimento permeável.  
(Fonte: Silva, 2012)

Já quanto aos requisitos, é definido que 100% da água precipitada sobre a superfície do pavimento e eventuais áreas de contribuição deve percolar por entre a área pavimentada para que ela seja considerada permeável. Vale salientar que a capacidade de infiltração de um pavimento não representa o único fator que influi na transformação da precipitação em escoamento superficial: a declividade do pavimento, cujo valor é limitado pela norma em 5%, também tem papel fundamental.

Ainda em requisitos de projeto, a NBR 16416 (ABNT, 2015c) preconiza as características para os materiais de base, sub-base, além da camada de assentamento e do rejunte, se necessários. Quanto ao uso de material de rejuntamento, é essencial garantir o coeficiente de permeabilidade do material, atentando-se sobretudo ao teor de finos, definido na norma como um conteúdo inferior a 2% de material passante da peneira 0,075 mm.

Outro importante parâmetro definido pela norma trata-se do coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), que representa a velocidade de percolação da água em um elemento ou estrutura permeável.

Deve ser superior a  $10^{-3}$  m/s (ou 0,1 cm/s) para pavimentos recém construídos, qualquer que seja o tipo de revestimento adotado.

Nessa norma, dividem-se os métodos de ensaio por locais de avaliação. O método para determinação da permeabilidade em campo proposto baseia-se no ensaio descrito pela norma internacional ASTM C1701 – *Standard Test Method for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete* (ASTM, 2017). Essa metodologia utiliza-se de um permeâmetro de carga variável simplificado dotado de um anel de infiltração, e pode ser aplicada para a avaliação prévia em laboratório do coeficiente de permeabilidade em todos os tipos de revestimento permeável. Já o método laboratorial de carga constante mencionado na NBR 13292 (ABNT, 1995) só pode ser utilizado para concretos permeáveis, independentemente de sua estrutura (peça, placa ou moldado *in loco*).

Quando o ensaio em campo demonstra que o pavimento construído apresenta um coeficiente de permeabilidade inferior ao valor de  $10^{-3}$  m/s limitado pela norma, é necessário executar procedimentos de limpeza com o intuito de se alcançar pelo menos 80% do coeficiente de permeabilidade limitado pela norma para pavimentos recém construídos. Esses procedimentos consistem na retirada de detritos da superfície a partir da limpeza com jato de água sob pressão, do uso de equipamentos de sucção, e se aplicável, da substituição do material de rejuntamento.

São mencionados, ainda, os requisitos de resistência mecânica e espessura mínima para os revestimentos, conforme a Tabela 1. O texto propõe, também, em caráter informativo, um método de dimensionamento hidráulico alternativo das camadas de base e/ou sub-base.

Tabela 1 – Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável.

<b>Tipo de revestimento</b>	<b>Tipo de solicitação</b>	<b>Espessura mínima (mm)</b>	<b>Resistência mecânica característica (MPa)</b>	<b>Método de ensaio</b>
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 35,0^a$	ABNT NBR 9781
	Tráfego leve	80,0		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 20,0^a$	
	Tráfego leve	80,0		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 2,0^b$	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80,0		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 1,0^c$	ABNT NBR 12142
	Tráfego leve	100,0	$\geq 2,0^c$	

<sup>a</sup> determinação da resistência à compressão, conforme ABNT NBR 9781.

<sup>b</sup> determinação da resistência à flexão, conforme na ABNT NBR 15805.

<sup>c</sup> determinação da resistência à tração na flexão, conforme na ABNT NBR 12142.

Fonte: ABNT NBR 16416, 2015c.

#### 2.2.4 Materiais Utilizados na Composição do Concreto Permeável

O concreto permeável é produzido a partir de materiais comuns à composição do concreto de cimento Portland convencional (CCP). Distinguem-se, fundamentalmente, pela redução da quantidade de agregados miúdos – ou até mesmo pela sua ausência – apresentada pelo compósito permeável. Este, por sua vez, exige um controle visual mais intensivo, a fim de alcançar as propriedades ansiadas do produto final (TENNIS *et al.*, 2004).

O ligante hidráulico mais usado como aglomerante em concretos permeáveis trata-se do tradicional cimento Portland. Materiais suplementares como a cinza volante, a escória granulada de alto forno moída e a sílica ativa podem, ainda, ser empregados com o intuito de otimizar determinadas propriedades mecânicas do concreto (ACI, 2010). Entretanto, para garantir seu potencial permeável, Batezini (2013) salienta que é necessário analisar criteriosamente as proporções dessas adições incorporadas à mistura.

Já os agregados utilizados nas misturas são, normalmente, do tipo uniforme, com diâmetro máximo de 19 mm. Para curvas descontínuas, que apresentam variabilidade do diâmetro do agregado, são usualmente empregadas graduações que variam entre 19 mm e 4,8 mm, 9,5 mm e 2,4 mm, ou ainda 9,5 mm e 1,2 mm (TENNIS *et al.*, 2004).

Eventualmente são incorporados, ainda, aditivos à mistura, pelo mesmo motivo que são empregados no CCP. Os aditivos superplastificantes tem por objetivo predominante a melhoria da trabalhabilidade das misturas de concreto permeável; já os aditivos retardadores de pega são acrescidos à mistura para controle do tempo de pega, a qual ocorre muito rapidamente no concreto permeável; os aditivos redutores de água são também muito utilizados, dependendo da relação água/cimento (a/c) considerada (NRMCA, 2011).

As proporções desses materiais são definidas por meio de experimentos e procedimentos de dosagem em laboratório, a chamada dosagem experimental (ou racional), na qual devem ser considerados os tipos de insumos disponíveis no local de produção. A Tabela 2 apresenta as faixas de consumo e proporções dos materiais comumente utilizados nas composições de concreto permeável.

Tabela 2 – Consumos e proporções típicos em misturas de concreto permeável

<b>Materiais</b>	<b>Consumos/Proporções (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Material cimentício (kg/m <sup>3</sup> )	270 a 415
Agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	1.190 a 1.480
Relação água/cimento (a/c) em massa	0,27 a 0,34
Relação cimento/agregado em massa	1:4 a 1:4,5
Relação agregado miúdo/agregado graúdo em massa	0 a 1:1

Fonte: Tennis *et al.*, 2004.

É válido ressaltar a importância de dois fatores quanto à mistura de concreto permeável: a razão cimento/agregado juntamente ao procedimento de compactação ou adensamento empregado na produção do material. Afinal, são capazes de influenciar diretamente as características mecânicas do compósito, como, por exemplo, a massa específica, que varia, geralmente, entre 1600 kg/m<sup>3</sup> e 2000 kg/m<sup>3</sup> (ACI, 2010).

A NBR 16416 (ABNT, 2015c) não especifica nenhum método quanto à moldagem do concreto permeável. Entretanto, Schaefer *et al.* (2006) analisaram que a ordem de mistura dos componentes altera a qualidade do produto final. Deste modo, desenvolveram uma metodologia diferente da convencional, onde os agregados são misturados a água e o cimento é adicionado posteriormente. O novo procedimento elaborado consiste na mistura dos agregados com uma pequena porcentagem de cimento, seguida da adição da água com o restante do aglomerante. Os pesquisadores obtiveram, por meio deste procedimento, um material com propriedades mecânicas e hidráulicas superiores ao tradicional.

### 2.2.5 Características do Concreto Permeável

O concreto permeável trata-se, essencialmente, de um material conglomerado poroso, constituído por partículas de agregado graúdo de graduação uniforme, revestidas por uma camada espessa de aglomerante hidráulico (normalmente o cimento), que reage com a água de amassamento. Ocasionalmente, são incorporados, ainda, determinados tipos de adições e aditivos com o objetivo de alterar positivamente certas propriedades do concreto, conferindo-lhe melhor desempenho, durabilidade, resistência e trabalhabilidade, seja no estado fresco ou no estado endurecido. O uso de agregado miúdo é dispensado. Contudo, em certos casos, acrescentam-se pequenas quantidades de areia com o intuito de aumentar o volume da camada de recobrimento, sem acrescer o custo (ACI, 2010).

Essa técnica permite obter um material com um índice de vazios entre 15% e 30%, permitindo a percolação da água proveniente das precipitações por entre os poros da placa de concreto, reduzindo substancialmente o volume de escoamento superficial das águas pluviais (HENDERSON *et al.*, 2009). Uma porosidade inferior seria capaz de comprometer as suas propriedades hidráulicas, afirmam Montes e Haselbach (2006).

Segundo Tennis *et al.* (2004), o índice de vazios e a massa específica próprios do concreto permeável são diretamente influenciados pelas propriedades e proporções relativas dos materiais constituintes, assim como pelo processo de compactação utilizado na sua aplicação. Geralmente, são encontrados valores de massa específica aparente do concreto permeável na ordem de 1.300 kg/m<sup>3</sup> a 2.000 kg/m<sup>3</sup> no estado fresco.

Associa-se, também, a essa pequena ou até mesmo nula quantidade de agregados miúdos em sua composição, a textura superficial específica dos concretos permeáveis, a qual se diferencia por lhes proporcionar uma superfície mais rugosa, quando comparada à do concreto convencional, elevando o seu coeficiente de atrito (TENNIS *et al.*, 2004).

Essa textura inerente a concretos dessa natureza, traz, como benefícios à segurança dos usuários, além do próprio acréscimo do atrito entre a estrutura do pavimento e as rodas dos veículos, uma diminuição efetiva dos riscos de hidroplanagem devido à condição permeável do concreto, sobretudo em períodos chuvosos ou em episódios de neve ou gelo na pista. A água oriunda dessas intempéries, que se infiltra pelo revestimento permeável do pavimento, não permanece na sua superfície, impedindo a formação de poças d'água, o que atenua a ocorrência do efeito spray, responsável pela redução da visibilidade dos condutores de veículos (ACIOLI, 2005).

Para assegurar a permeabilidade do concreto, Polastre e Santos (2006) reiteram que o concreto deve apresentar um alto índice de vazios interligados, com pouca ou nenhuma porção de areia na sua composição, a fim de permitir a percolação de grande quantidade de águas pluviais. Quando da dimensão adequada do material, o seu coeficiente de permeabilidade deve ser suficiente para propiciar a passagem total do fluxo precipitado durante a maioria dos eventos pluviométricos, reduzindo efetivamente o escoamento superficial.

Ainda acerca da permeabilidade, destacam-se os estudos do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), reproduzidos por Araújo *et al.* (2000), que analisaram a eficiência dos pavimentos permeáveis na mitigação do escoamento superficial. A partir dos testes efetuados, foi possível avaliar que as superfícies impermeáveis usualmente empregadas na pavimentação urbana, com uso de asfalto, placas de concreto e pedras, geraram um escoamento superficial 44% maior que outras superfícies estudadas, como o solo compactado. Nas áreas semipermeáveis, por sua vez, constituídas por pavimentos permeáveis com bloquetes e paralelepípedos, registrou-se um nível de escoamento inferior ao das áreas impermeáveis, cerca de 11% a 22% superior ao que foi verificado em solos compactados. Já ao se utilizar o concreto permeável, praticamente não ocorreu escoamento superficial, o que demonstra o potencial dessa nova tecnologia no auxílio à redução do volume das enxurradas, subvertendo, consideravelmente o cenário problemático associado à elevada taxa impermeabilização do solo.

Isso ocorre graças às taxas de fluxo características de penetração da água através do concreto permeável, que superam o potencial de absorção da maioria dos solos, de modo que a efetiva capacidade de infiltração do sistema é determinada pelo tipo de solo que constitui as camadas inferiores (TENNIS *et al.*, 2004). Contudo, mesmo em solos pouco permeáveis, a implementação do concreto permeável sobre uma camada de assentamento de brita é capaz de reduzir a quantidade de água que esco superficialmente, criando um potencial de retenção no conjunto, principalmente em eventos pluviométricos de grande intensidade e rápida duração, os quais favorecem a incidência de inundações. Em situações extremas, o concreto permeável pode ser empregado no desenvolvimento de um sistema de bacias de armazenamento de águas pluviais de grandes proporções, de modo a reduzir ou retardar a onda de cheia (SANTOS, 2016).

Pesquisas recentes acerca do comportamento mecânico e hidráulico desse compósito atestaram sobre os seus significativos desempenho e durabilidade enquanto revestimento de

pavimentos. Quando combinado com seu potencial drenante, possibilita a sua utilização no ambiente urbano como dispositivo minimizador da impermeabilização superficial do solo, acentuada devido ao fenômeno de urbanização das cidades (PINTO, 2011).

De acordo com a norma americana ACI 522R-10 (ACI, 2010), os compostos de concreto permeável tendem a desenvolver resistências mecânicas de compressão na faixa de 2,8 a 28 MPa; já Polastre e Santos (2006) asseguram que, em média, são obtidos valores de resistência dos concretos permeáveis normalmente produzidos por volta de 25 MPa.

No entanto, Lamb (2014) afirma que seu uso é muitas vezes restrito a áreas de tráfego leve ou pouco intenso, devido à sua alta porosidade, o que torna os valores de resistência desse concreto inferiores aos do concreto convencional. De fato, o alto índice de vazios do material possui uma relação intrínseca às características de resistência mecânica no seu estado endurecido (BATEZINI, 2013).

Ainda segundo Batezini (2013), o compósito é denominado de baixa porosidade quando seu índice de vazios é inferior a 15%; já um índice de vazios superior a 30%, descreve um material altamente poroso. Já Olek *et al.* (2003) indicam que a média do índice de vazios do concreto permeável varia entre 15% e 35%. Entretanto, consoante Rizvi *et al.* (2010), valores muito acima de 30% ocasionariam níveis muito inferiores de resistência.

Embora os autores diverjam acerca do limite superior desse parâmetro, todos confluem quanto à necessidade da busca por um valor ótimo que garanta concomitantemente boas características de resistência e permeabilidade. Tennis *et al.* (2004) testificam que os índices de vazios ideais para que concretos dessa espécie alcancem padrões aceitáveis de ambas as propriedades giram em torno de 20%.

Contudo, pode-se afirmar que, apesar do elevado índice de vazios, o próprio contato entre os agregados graúdos que compõem a estrutura do concreto permeável garante uma resistência satisfatória. A pasta ou argamassa de cimento, utilizada em porções menores, garante a aglutinação dos agregados, evitando, assim, o desmoronamento do compósito, inibindo a perda de material por abrasão (HÖLTZ, 2011).

É possível associar, ainda, à sua elevada porosidade e às suas boas propriedades acústicas, a sua utilização como material para isolamento térmico de paredes bem como para barreiras acústicas. Kajio *et al.* (1998), a fim de analisarem seus potenciais acústicos, fizeram um estudo comparador entre os níveis de ruído gerados em pavimentos revestidos em concretos permeáveis e em pavimentos asfálticos densos, contendo agregados com duas diferentes

dimensões e considerando diferentes velocidades de veículos sobre a pista. Verificaram que os níveis sonoros aferidos no pavimento de concreto permeável eram de menor intensidade quando comparados com os níveis medidos no pavimento revestido com concreto asfáltico convencional, para ambos os diâmetros de agregados utilizados.

Ademais, observaram que a variação do diâmetro máximo dos agregados intervém minimamente na propagação do ruído, haja vista que os resultados colhidos na pesquisa muito se assemelham entre si. Consoante Olek *et al.* (2003), há uma divergência no tempo de chegada e de reflexão das ondas sonoras derivadas da movimentação dos veículos sobre o pavimento em virtude da estrutura porosa do concreto permeável, uma vez que a onda sonora, por se tratar de uma onda mecânica, se propaga melhor em meios mais densos. Essa divergência, reduz o nível da intensidade do ruído, o que se traduz na absorção pelo revestimento de parte do ruído gerado pelo tráfego.

Como destaca a norma ACI 522R-10 (ACI, 2010), o tempo necessário às operações de concretagem do material objeto do presente estudo não deve exceder em uma hora entre o tempo inicial de mistura e o término do trabalho, o que representa um valor menor que o comumente adotado para concretos convencionais. Basicamente, o concreto permeável se distingue por apresentar, no estado fresco, elevada consistência, traduzida numa baixa trabalhabilidade (NRMCA, 2011).

Essa situação se deve em função das características do material, as quais favorecem o aumento da taxa de evaporação, que o faz perder umidade com maior velocidade. Contudo, isso pode ser manipulado utilizando aditivos retardadores e estabilizadores de hidratação que prolongam a concretagem em até 1,5 horas, dependendo da dosagem adotada (POLASTRE e SANTOS, 2006).

A composição porosa da estrutura e a face áspera do concreto permeável expõem à evaporação uma maior área superficial de pasta de cimento hidratado, tornando a cura ainda mais imprescindível do que no concreto convencional. Por esse motivo, é recomendado que, ao final da concretagem, a estrutura seja coberta com uma lona plástica por, no mínimo, sete dias (ACI, 2010).

De acordo com Delatte e Clearly (2006), são definidos três tipos de concretos permeáveis, caracterizados pela resistência e drenabilidade. O material que apresenta baixa resistência mecânica e elevada permeabilidade é conhecido como concreto permeável hidráulico e é empregado para fins não estruturais. Já aquele que possui resistência e permeabilidade

intermediárias é denominado concreto permeável normal, o qual pode ser utilizado para na construção de estacionamentos e calçadas (não apresenta agregado miúdo em sua composição). Finalmente, tem-se, ainda, o concreto permeável estrutural, que, em virtude da sua elevada resistência mecânica associada à uma baixa permeabilidade, obtidas a partir da adição de materiais com granulometria reduzida na mistura, pode ser empregado em estacionamentos, ruas e avenidas que atuam sob tráfego de veículos pesados.

### **2.2.6 Características do Concreto Permeável no Estado Fresco**

O concreto permeável se caracteriza, no seu estado fresco, por apresentar baixa trabalhabilidade em detrimento ao concreto convencional, principalmente por efeito da sua elevada consistência. O que representa à mistura um valor de abatimento geralmente inferior a 20 mm, excetuando determinados casos onde se utiliza abatimentos superiores a 50 mm (TENNIS *et al.*, 2004; ACI, 2010).

Esse valor de consistência elevado se configura no infrequente emprego do ensaio de abatimento de tronco de cone enquanto processo de controle na produção de misturas de concreto permeável. Para tanto, os ensaios de massa unitária e controle visual representam os métodos mais adotados nessa etapa. Como resultado, tem-se que a média da massa unitária dos materiais estudados por este trabalho equivale aproximadamente a 70% da massa unitária de concretos convencionais (NRMCA, 2011).

Já acerca do tempo útil de trabalho do concreto permeável sabe-se que, em comparação ao tempo do concreto convencional, é geralmente inferior. Conforme indica o ACI (2013), o tempo útil de trabalho para concretos dessa natureza deve respeitar 60 minutos após a hidratação da mistura. Excetuando-se casos onde se utilizam de aditivos retardadores de pega. Esse tempo pode ser acrescido até cerca de 90 minutos, de acordo com o tipo de aditivo e às condições ambientais.

Os métodos e processos padrões para produção de corpos de prova e realização de ensaios laboratoriais empregados ao concreto convencional não se aplicariam para o concreto permeável sem análise e comprovação prévia, em virtude das características singulares deste material. No âmbito nacional, mesmo após a implementação da norma que regulamenta a aplicação de revestimentos permeáveis de pavimento, os estudos acerca do concreto permeável ainda estão sendo ajustados de acordo com as suas propriedades (BATEZINI, 2013).

## 2.2.7 Características do Concreto Permeável no Estado Endurecido

### 2.2.7.1 Permeabilidade

A condutividade hidráulica, também denominada como a taxa de percolação ou o coeficiente de permeabilidade, representa um dos parâmetros de maior relevância do concreto permeável (BATEZINI, 2013). É definida por Tennis *et al.* (2004) como o índice de infiltração da água através de sua estrutura.

Schaefer *et al.* (2006) encontraram, em sua pesquisa, coeficientes de permeabilidade variando entre 0,04 cm/s e 1,45 cm/s, análogos aos valores alcançados por Montes e Haselbach (2006): 0,01 cm/s a 1,19 cm/s. Segundo Tennis *et al.* (2004), os valores característicos de condutividade hidráulica de concretos permeáveis para revestimento de pavimentos são da ordem de 120 l/m<sup>2</sup>/min a 320 l/m<sup>2</sup>/min, que correspondem à taxa variável entre 0,20 cm/s e 0,54 cm/s, chegando a alcançar índices superiores a 1,20 cm/s (700 l/m<sup>2</sup>/min), quando da medição em laboratório. Contudo, Bean *et al.* (2007), a partir de estudos em campo, obtiveram valores de condutividade hidráulica entre 0,07 cm/s a 0,77 cm/s.

Na literatura encontram-se inúmeros modos para se realizar a medição em laboratório da condutividade hidráulica. A NBR 16416 (ABNT, 2015c), como avaliado anteriormente, preconiza duas formas de obtenção do coeficiente de permeabilidade. A primeira baseia-se numa adaptação da NBR 13292 (ABNT, 1995), que se refere à “determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante”, para avaliação do coeficiente de permeabilidade do concreto permeável.

Para realização deste ensaio, emprega-se um permeâmetro com carga constante (Figura 8) equipado em sua parte inferior por um anel plástico onde é posicionado o corpo de prova, o qual é revestido por uma membrana flexível posicionada internamente ao anel plástico com o intuito de impedir perda de água pelas laterais da amostra. O invólucro utilizado para produzir a pressão de água sobre a amostra deve ser provido de uma entrada e uma saída d'água, além de um extravasor, para evitar o transbordamento da água.



Figura 8 – Permeômetro de carga constante.  
(Fonte: Batezini e Balbo, 2015)

O controle da coluna d'água é obtido através do nivelamento de água no recipiente, o qual calibra-se pela vazão da água de entrada. Posteriormente, a água de saída é coletada em um recipiente, cronometrando-se o tempo de coleta. Finalmente, o recipiente deve ser pesado para determinação do volume de água coletado. De posse do volume e o do tempo decorrido na coleta, é possível determinar, portanto, o coeficiente de permeabilidade da amostra, segundo a Equação 1.

$$K = \frac{Vol \cdot L_{cp}}{h \cdot A \cdot T} \quad (1)$$

Onde:

$K$  = coeficiente de permeabilidade (cm/s);

$Vol$  = volume de água coletado (cm<sup>3</sup>);

$L_{cp}$  = comprimento do corpo de prova (cm);

$h$  = carga hidráulica (cm);

$A$  = área da seção transversal do corpo de prova (cm<sup>2</sup>);

$T$  = tempo decorrido para a coleta da água (s).

Já a segunda forma é realizada a partir da fixação de um anel de infiltração cilíndrico vazado com altura mínima de 50 mm, posicionado sobre o local do ensaio e vedado na parte em contato com o pavimento, conforme apresentado na Figura 9. Logo após, despeja-se uma quantidade pré-estabelecida de água e, a partir do contato da água com o pavimento, cronometra-se o tempo necessário para eliminar toda a água livre em sua superfície. Então, este

tempo de percolação aferido permite, juntamente com os valores da massa de água utilizada e do diâmetro do cilindro, calcular o coeficiente de permeabilidade do pavimento permeável.



Figura 9 – Coeficiente de permeabilidade por anel de infiltração.  
(Fonte: Marchioni e Silva, 2011)

Muitos autores utilizam-se, também, de permeômetros de carga variável para a obtenção do coeficiente de permeabilidade do concreto permeável em razão da sua praticidade. O cuidado neste tipo de ensaio é para que a amostra cilíndrica seja preparada impedindo a perda de água pelas laterais do corpo de prova, para que todo o volume de água percole apenas entre as suas faces superior e inferior. A Figura 10 traz o permeômetro desenvolvido por Olek *et al.* (2003), que se assemelha à grande maioria dos mecanismos elaborados por outros autores no estudo do concreto permeável.



Figura 10 – Mecanismo elaborado para medição do coeficiente de permeabilidade em concretos permeáveis.  
(Fonte: Olek *et al.*, 2003)

Esse método de ensaio proposto por Olek *et al.* (2003) consiste na inserção de uma amostra de concreto permeável no interior de um tubo de acrílico com diâmetro ligeiramente maior ao do corpo de prova. Juntamente a outro tubo utilizado para formar um reservatório superior, tendo a ligação entre eles vedada de modo a se garantir fluxo de água apenas pelo próprio concreto. Envolve-se a amostra de concreto permeável em uma faixa de látex como artifício para impedir o fluxo lateral ao longo de sua altura. Posteriormente, já durante a realização do ensaio, é adicionada uma coluna de água na parte superior do corpo de prova, que por ele infiltra. Finalmente, é medido o tempo em que a coluna de água demora a percolar entre dois pontos da coluna de água, permitindo-se calcular o coeficiente de permeabilidade através da lei de Darcy.

Entretanto, após a promulgação da NBR 16416 (ABNT, 2015c, p. 14), baseada em conceitos básicos de mecânica dos solos, “o pavimento permeável, independentemente do tipo de revestimento adotado, deve apresentar, quando recém-construído, coeficiente de permeabilidade maior que  $10^{-3}$  m/s”. Essa norma apresenta os requisitos mínimos à determinação do coeficiente de permeabilidade, reproduzidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade.

Tipo de revestimento	Método de Ensaio		Coeficiente de permeabilidade do pavimento recém construído (m/s)
	Local de avaliação		
	Em laboratório	Em campo	
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Anexo A*	Anexo A*	$> 10^{-3}$
Peça de concreto Permeável	ABNT NBR 13292 ou Anexo A*		
Placa de concreto permeável			
Concreto permeável moldado no local			

\* O Anexo A se refere ao ensaio que envolve o anel de infiltração descrito pela própria norma.

Fonte: ABNT NBR 16416, 2015c.

Os conceitos fundamentais de mecânica dos solos envolvidos determinam que os ensaios de carga variável devem ser aplicados a materiais que apresentem níveis de condutividade hidráulica inferiores, devido, sobretudo, à inviabilidade de manutenção da carga constante, o que eleva o tempo requerido para passagem da água pela sua estrutura. Logo, chega-se à conclusão de que eles não são indicados como parâmetro de determinação de condutividade hidráulica em estruturas de pavimentos permeáveis, onde se classifica o objeto de estudo do

presente trabalho, esclarecendo a ausência desses ensaios que se utilizam de permeômetros de carga variável na referida norma.

Henderson *et al.* (2009) aborda um dos principais problemas concernentes à capacidade drenante de revestimentos dessa natureza, o qual se associa à selagem superficial da camada de revestimento. Trata-se de uma condição muito comum quando a superfície é compactada em excesso durante as etapas do processo construtivo. Os vazios se entopem à medida que a área superficial é selada, impermeabilizando toda a camada que reveste o pavimento. Esta circunstância identifica-se por intermédio da chamada análise visual de condição de superfície do pavimento acabado, verificada, por exemplo, pela ocorrência de poças d'água.

A permeabilidade também é prejudicada ao longo do tempo, em geral como resultado da incrustação de partículas sólidas (areia ou solo) nos poros do revestimento de concreto permeável, num processo denominado de colmatção. Esse fenômeno é abordado por Kuang *et al.* (2007), que reitera sobre a necessidade da execução de procedimentos de manutenção e restauração da capacidade permeável serem executados com periodicidade máxima de seis meses, como consequência da tendência de diminuição da permeabilidade em pavimentos com o passar do tempo. A eficiência desses processos de manutenção pode ser exemplificada pela utilização do sistema de limpeza de pavimento a vácuo, a partir do qual consegue-se recuperar mais de 95% da capacidade inicial de condutividade hidráulica do revestimento.

Por fim, Schaefer *et al.* (2006) ainda correlacionam a condutividade hidráulica de corpos de prova de concreto permeável com o seu índice de vazios, analisando a sua alteração. Os resultados encontrados pelos autores são apresentados na Figura 11:

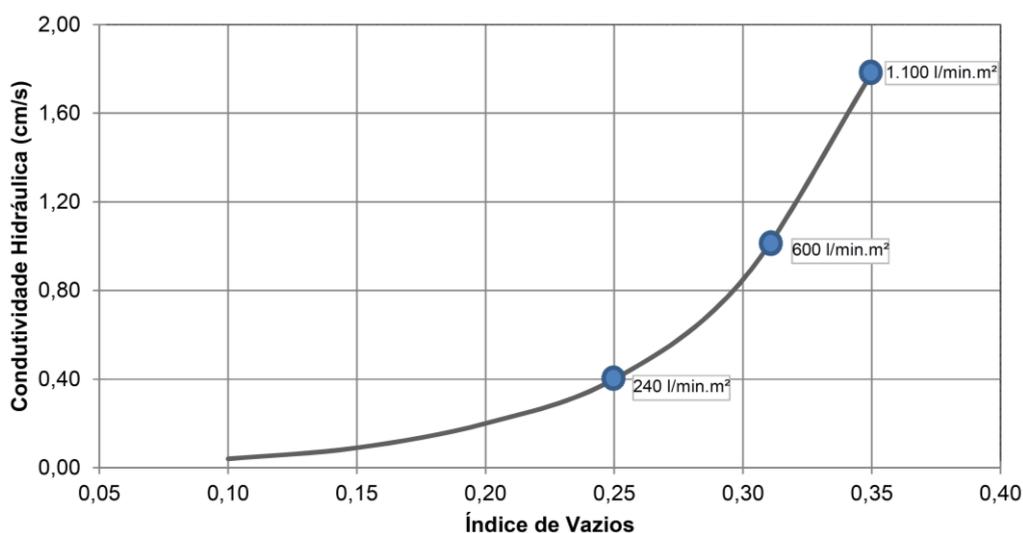


Figura 11 – Relação entre índice de vazios e condutividade hidráulica do concreto permeável. (Fonte: Schaefer *et al.*, 2006, adaptado por Batezini, 2013)

### 2.2.7.2 Durabilidade

Com o propósito de estabelecer a relação entre a microestrutura intrínseca ao material estudado e determinar a sua condição de durabilidade, Vancura *et al.* (2011), realizaram análises microscópicas em corpos de prova de concreto permeável. As amostras utilizadas na pesquisa foram adquiridas a partir de pavimentos de rodagem com tempo de serviço variáveis entre 1 e 5 anos, localizadas no estado de Minnesota (EUA), região que se notabiliza por apresentar clima temperado com invernos rigorosos.

Os concretos por eles analisados são compostos por três diferentes tipos de agregado: cascalho de rio; calcário dolomítico e granito britado. O consumo de ligante hidráulico nas misturas foi de 356 kg/m<sup>3</sup> e as relações a/c utilizadas variavam entre 0,27 e 0,30. Os resultados encontrados, resumidos quantitativamente na Tabela 4, demonstram que as fissuras se propagaram através da pasta (P), do agregado (A) e na zona de transição (ZT) entre a pasta e o agregado, que representam as 3 principais fases do concreto.

Tabela 4 – Quantitativo das fissuras subsuperficiais das amostras de concreto permeável.

Tipo de agregado	Nº de estruturas	Nº de amostras	Número de amostras com fissura subsuperficial por fase							
			Nenhuma	P	A	ZT	P e A	P e ZT	A e ZT	P, A e ZT
Calcário	11	21	3	6	2	1	0	1	1	7
Cascalho	5	8	1	1	0	0	0	3	0	3
Granito	2	4	3	0	0	1	0	0	0	0
Total	18	33	7	7	2	2	0	4	1	10

Fonte: Adaptado de Vancura *et al.*, 2011.

Os tipos de propagação de fissuras geradas são visualizados nas imagens dos corpos de prova que se seguem (Figura 12), obtidas por meio do uso de microscópio óptico:

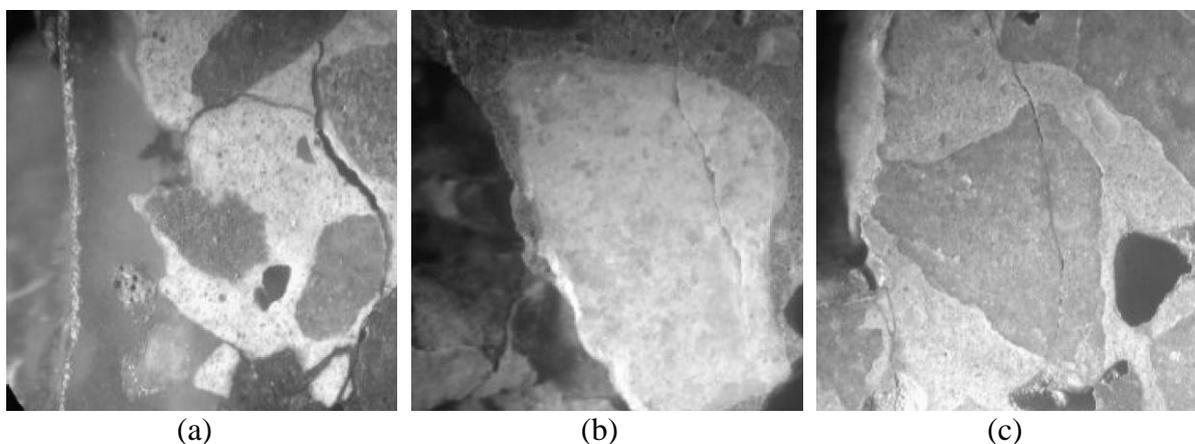


Figura 12 – Fissuras observadas nas diferentes fases do concreto permeável: (a) entre a pasta e a ZT; (b) e (c) entre o agregado e a pasta.  
(Fonte: Vancura *et al.*, 2011)

A ocorrência das fissuras em uma ou mais fases relaciona-se diretamente com o tipo de agregado que compõem as misturas. Verifica-se, nessas imagens, que o concreto permeável estudado apresenta alta concentração de pasta envolvendo os agregados, concomitantemente a uma quantidade pequena de poros, indicando um baixo índice de vazios apresentado pelo compósito (BATEZINI, 2013).

### 2.2.7.3 Emissão de Ruído

Por se tratar de uma onda mecânica, o som necessita de um meio material para se propagar. De um modo geral, essa propagação se dá mais rapidamente em meios sólidos. A estrutura porosa do concreto permeável acarreta uma discrepância entre o tempo de chegada e o de reflexão das ondas sonoras procedentes da passagem dos veículos sobre o pavimento. Dessa forma, diminui-se a intensidade do ruído, de modo que o revestimento se torna responsável por absorver parte do ruído provocado pelo tráfego (OLEK *et al.*, 2003).

Essa propriedade fez com que grandes pesquisadores começassem a se enveredar por esta área de estudo em busca da elaboração de pavimentos mais silenciosos. Kajio *et al.* (1998) compararam níveis de ruído oriundos de pavimentos asfálticos densos com pavimentos revestidos por concretos permeáveis, compostos por agregados de 6,3 mm e 12,5 mm de diâmetro, considerando velocidades de veículos diversas. A Tabela 5 apresenta os resultados do nível de ruído aferidos.

Tabela 5 –Níveis de ruído aferidos em concreto permeável.

Veículo	Condição do pavimento	Velocidade (km/h)	Nível de ruído (dB)		
			Concreto permeável (Ø máx em mm)		Revestimento asfáltico
			6,3	12,5	
de Passeio	Seco	40	65,8	66,6	72,3
		60	72,2	74,5	79,9
		75	75,1	77,9	82,5
	Molhado	40	66,8	68,1	70,6
		60	73,1	74,4	77,2
		75	75,9	77,8	80,4
Caminhão	Seco	40	73,8	72,5	80,6
		60	82,0	81,0	86,5
	Molhado	40	74,8	76,1	78,6
		60	81,7	81,3	84,5

Fonte: Adaptado de Kajio *et al.*, 1998.

Verifica-se e que os níveis de ruído encontrados no pavimento de concreto permeável tiveram menor intensidade quando comparados ao pavimento revestido por concreto asfáltico convencional, para as duas dimensões de agregados empregadas. Constatou-se, ainda, que a variação do diâmetro máximo dos agregados pouco influencia na propagação sonora, já que os resultados averiguados na pesquisa muito se assemelham para ambos os casos.

#### 2.2.7.4 Resistência Mecânica

O uso do concreto permeável como revestimento de pavimentos depende do seu comportamento estrutural, o qual é influenciado pela resistência mecânica do compósito bem como pelas suas propriedades elásticas. Estas, por sua vez, são afetadas por diversos fatores, destacando-se, sobretudo, o índice de vazios da mistura (LI, 2009).

Os estudos acerca do assunto refletem a escassez de resultados de ensaios de módulo de elasticidade e de resistência à tração na flexão, em função das características irregulares comumente encontradas nos corpos de prova de concreto permeável, as quais dificultam a execução de ensaios dessa natureza em laboratório. São mais frequentes, portanto, as análises de desempenho e comportamento alusivos à resistência à compressão e às condições de permeabilidade dos compósitos (BATEZINI, 2013).

De fato, resistência à compressão e índice de vazios representam grandezas diretamente proporcionais, independentemente do corpo de prova que esteja sendo analisado. No entanto, quando correlacionadas graficamente, há certa divergência entre os autores quanto à equação que melhor se adequa à curva de tendência descrita pela nuvem de pontos. De acordo com os estudos realizados por Delatte e Cleary (2006), os valores de resistência à compressão tendem a decrescer exponencialmente com o aumento do índice de vazios. Já Crouch *et al.* (2006) associou um decrescimento linear à curva do gráfico que correlaciona esses dois parâmetros. Essa tendência linear, segundo Batezini (2013), representa a hipótese mais fundamentada estatisticamente, uma vez que apresenta a menor dispersão dos resultados, comparando-se os valores de  $R^2$  obtidos para cada pesquisa (0,80 e 0,99 respectivamente).

De acordo com a revisão de literatura elaborada por Kevern *et al.* (2009), as misturas para fabricação de concreto permeável constituem-se, basicamente, de agregado graúdo com distribuição granulométrica uniforme, cuja condutividade hidráulica de, em média, 0,6 cm/s, era considerada elevada. No entanto, devido ao seu alto índice de vazios, o material apresentava, ainda, baixos níveis de resistência à compressão (entre 6,7 MPa e 17,5 MPa). Esse panorama

foi observado, ao fim da década de 90, quando a EPA (*Environmental Protection Agency*) noticiou que cerca de 75% dos sistemas de pavimentos permeáveis nos EUA demonstraram-se ineficazes, em virtude, especialmente, das baixas resistências dos pavimentos ocasionadas pela elevada porosidade ou pela adoção de técnicas construtivas inadequadas.

#### 2.2.7.5 Fadiga

Batezini (2013) afirma que diversas pesquisas a respeito de resistência à fadiga são realizadas estritamente para materiais convencionais de pavimentação, tais como o concreto asfáltico ou o próprio CCP. Diante deste panorama, estudos envolvendo o desempenho de concretos permeáveis quando submetidos a carregamentos cíclicos ainda são escassos. De todo modo, Klaiber e Lee (1982), analisando especificamente o CCP, constataram que há uma redução da vida de fadiga à medida que se aumenta a quantidade de poros ou vazios na estrutura.

Pindado *et al.* (1999) analisaram a influência da incorporação de sílica ativa e polímero em misturas de concreto permeável visando examinar o comportamento do material à fadiga em compressão. Empregaram-se proporções distintas de agregados graúdo e miúdo na pesquisa, além de aditivos superplastificantes. Os ligantes hidráulicos utilizados foram provenientes da Alemanha, Holanda e Espanha uma vez que instituições oriundas desses três países corroboraram com o desenvolvimento do estudo.

Como resultado, os autores determinaram que a variação da temperatura interna de amostras de concreto permeável aumenta durante a execução dos ensaios de fadiga, apresentando índices superiores aos registrados em concretos convencionais. Ademais, verificaram que quanto menor a diferença entre as tensões máximas e mínimas de carregamento e descarregamento durante a aplicação dos ciclos de carga, denominada amplitude de carga, menor será a vida útil de fadiga à compressão do material.

As misturas nas quais foram incorporados os polímeros apresentaram maior resistência à fadiga em comparação às misturas sem adições ou com adição de sílica ativa. Isso possivelmente ocorre devido à tendência de aumento da ductilidade do concreto permeável endurecido quando um polímero é adicionado à mistura, reduzindo a taxa de evolução de danos causados por carregamentos cíclicos.

#### 2.2.7.6 Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson

Goede (2009) determinou, em seus estudos, o módulo de elasticidade estático e o coeficiente de Poisson a partir de ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto permeável produzidos com agregados de diâmetro único (12,5 mm) e relação a/c variando entre 0,27 e 0,28. Os valores de módulo de elasticidade encontrados variam de 12,0 GPa a 15,1 GPa, inferiores aos encontrados habitualmente para concretos convencionais.

Esse resultado já era esperado em função da discrepância entre os índices de vazios desses dois materiais: a quantidade de vazios afeta diretamente o módulo de elasticidade. Já em relação ao coeficiente de Poisson, o autor identificou valores entre 0,14 e 0,34, resultando numa média de 0,22. Concluiu-se, portanto, que o coeficiente de Poisson do concreto permeável é análogo ao do concreto convencional.

#### 2.2.7.7 Comportamento a Baixas Temperaturas

Diversos estudos evidenciam que, durante episódios de nevasca em países de clima temperado, a remoção da neve acumulada sobre revestimentos de concreto permeável ocorre com maior velocidade quando comparados aos revestimentos de pavimento tradicionais. Esse fato se deve principalmente à elevada porosidade do material, que contribui na ação de descongelamento (BATEZINI, 2013).

Henderson (2008) revela que os vazios presentes em uma estrutura de concreto permeável são locais suscetíveis ao congelamento e à expansão da água. Neste cenário, seria possível que a estrutura interna do concreto se rompesse, acarretando numa posterior perda de agregados. Contudo, a umidade na camada de revestimento é mínima em virtude da sua elevada permeabilidade, já que a água das intempéries percola rapidamente pelo revestimento permeável armazenando-se nas camadas subjacentes, atenuando os riscos de ruptura da estrutura interna do revestimento por congelamento da água.

Nos países de clima temperado, onde é frequente a ocorrência de ciclos de gelo e degelo, há diversos trabalhos que envolvem a caracterização desse mecanismo. Kevern *et al.* (2009) analisaram a variação de temperatura em uma estrutura de pavimento com revestimento de concreto permeável a partir da comparação com o revestimento de concreto convencional. Foi elaborada uma pista experimental em um estacionamento localizado no campus da *Iowa State University*, nos EUA. A sua área foi dividida entre o emprego do concreto convencional e do

permeável como material de revestimento. Como resultado, os autores identificaram que a base granular da estrutura permeável impede a formação de camadas de gelo. Constataram, ainda, que a temperatura se mostrou mais elevada para o revestimento de concreto permeável, em situações onde ocorreu exposição direta de ambos os revestimentos à luz do sol.

### **2.2.8 Aplicações do Concreto Permeável**

De acordo com a *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA, 2011), a destinação do concreto permeável não se restringe apenas ao revestimento de pavimentos, seja em calçadas, estacionamentos, parques, praças ou pátios residenciais. Os europeus já o utilizam como material de vedação há muitos anos. Destaca-se ainda o emprego do material em painéis de enchimento, forros e estruturas hidráulicas; decks de piscinas; estabilização de encostas; e em camadas de pavimentos de alta resistência. Suas propriedades ainda permitem que seja utilizado até mesmo em muros de arrimo.

O concreto permeável foi também muito empregado em prédios industriais, públicos ou domésticos, de modo a obter um isolamento térmico mais eficiente, sem grande acréscimo de peso, graças a sua alta porosidade. Foi empregado, ainda, em áreas do Círculo Ártico, devido à inviabilidade do uso de materiais de construção convencionais, associada aos altos custos do transporte dos tijolos, aos riscos de incêndios com a madeira e às baixas propriedades de isolamento térmico do concreto comum (MALHOTRA, 1976).

Durante a década de 1970, sobretudo nos EUA, surgiram inúmeras pesquisas sobre a utilização dos pavimentos permeáveis como forma de se evitar a aquaplanagem, a redução de ruído, o ofuscamento do farol dos carros e o efeito de spray. Estes estudos foram posteriormente retomados com o intuito de prevenir os problemas hidráulicos na esteira da recarga dos aquíferos, além de representar uma solução complementar aos problemas de drenagem (SCHUELER, 1987).

Conforme Araújo *et al.* (2000), os principais benefícios quanto à aplicação do pavimento permeável estão relacionados à minimização dos impactos causados a partir das enxurradas urbanas, permitindo a infiltração direta do excedente pluvial para o subsolo. Todavia, à medida que o reservatório se tornar saturado em eventos com grande volume de precipitação, é possível que haja uma redução da eficiência do pavimento em detrimento àquela observada em situações favoráveis.

De modo geral, o concreto permeável pode ser considerado um revestimento econômico, uma vez que sua aplicação reduz – ou até mesmo dispensa – a implementação de guias e sarjetas, além de retentores de enxurradas, como piscinões, bombas, tubulações de drenagem ou outros sistemas de drenagem urbana, reduzindo os custos de propriedade devido à otimização do aproveitamento da área útil do solo (SCHUELER, 1987). É importante considerar também o caráter sustentável do concreto permeável: há pouco desperdício na sua utilização enquanto sistema de revestimento, já que é aplicado no local de acordo com as necessidades do projeto; ademais, representa um material com potencial reciclável ao final do seu ciclo de vida (LAMB, 2014).

O concreto permeável ainda se mostra vantajoso pois, diante de suas propriedades térmicas e acústicas, pode ser utilizado como isolante térmico em paredes de prédios ou como barreiras à passagem do som (POLASTRE e SANTOS, 2006). Segundo evidências coletadas pelos autores, o uso desse material pode contribuir para a redução dos efeitos de ilha de calor, favorecendo a vegetação; diminuir a incidência de acidentes originados por escorregamento em superfícies lisas com acúmulo de água; colaborar para a captura de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); e minimizar o consumo de agregados quando comparado aos concretos convencionais.

### **2.2.9 Benefícios Ambientais**

Segundo a EPA, o concreto permeável é classificado como uma prática apropriada de gestão (*Best Management Practice – BMP*), o que favorece a sua implementação, considerando-se questões relacionadas à sustentabilidade. Ao ser implantado, pode, ainda, auxiliar o empreendimento quanto à obtenção da certificação *LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)*, concebida e concedida pela organização não governamental *U.S. Green Building Council* (HÖLTZ, 2011).

Höltz elenca três características fundamentais que fazem do concreto permeável um material sustentável, considerando-se os critérios para avaliação *LEED*:

- contribui na diminuição do aquecimento terrestre, uma vez que permite a troca de calor entre o subsolo e a superfície;
- trata-se de um material reciclável, o que o torna reaproveitável ao final do seu ciclo de vida;
- sua produção pode ser realizada a partir de materiais locais.

A NRMCA (2011) argumenta que o concreto permeável volta a ganhar notoriedade diante do aumento de diretrizes rigorosas de gerenciamento de águas pluviais, além, é claro, da própria designação do produto como um material de construção sustentável.

A problemática associada aos sistemas de drenagem urbana pode ser mitigada por meio da implementação do concreto permeável. Onde estacionamentos, rodovias e telhados impermeáveis propiciam a ocorrência de fluxos elevados de água contaminada por poluentes de diversas naturezas, a partir de enxurradas e alagamentos, o impacto ambiental é reduzido de modo seguro e econômico (HÖLTZ, 2011). Huffman (2005), além da preocupação com o transporte de poluentes químicos para os corpos de água e, eventualmente, para a cadeia alimentar reitera sobre o fato de que as enxurradas tendem a elevar a temperatura das águas pluviais, o que pode ser desfavorável à vida da vegetação, dos peixes e de outras formas de vida aquática.

Quanto aos efeitos térmicos, atribui-se outra vantagem ambiental à aplicação dos concretos permeáveis. Essa vantagem envolve a minimização dos efeitos de ilha de calor nos centros urbanos, à medida que a pavimentação asfáltica escura é substituída por um material mais claro e que armazena água. (PINTO, 2011).

É importante ressaltar outro atributo positivo inerente ao sistema de pavimento de concreto permeável: sua capacidade de filtragem e consequente potencial de controle hidrológico e químico de partículas das águas pluviais. Quando a precipitação pluviométrica incide sobre o concreto permeável, a água percola pela estrutura do pavimento e parte das impurezas é retida, apurando a qualidade da água. Reduzem-se, então, os efeitos negativos referentes aos materiais baseados em hidrocarbonetos, que seriam carregados para os corpos d'água durante uma enxurrada. A matriz de agregados do concreto permeável captura e degrada aerobicamente resíduos dessa natureza e os poluentes são convertidos por microbactérias. Os componentes voláteis que se aderem aos agregados são aquecidos pelo calor do sol e o carbono remanescente é absorvido pelo solo nativo, onde é digerido por plantas, fungos ou micróbios (HUFFMAN, 2005).

Kuang *et al.* (2007) analisaram a capacidade de remoção de partículas existentes nas águas pluviais quando estas infiltram por um sistema de pavimento permeável. Determinou-se uma redução de mais de 80% do valor total de fósforo presente na água antes de entrar no sistema. Quanto à turbidez do efluente, também foram detectados índices de redução elevados, variando entre 50% a 90%.

O processo de infiltração presente em pavimentos permeáveis permite ainda que as raízes das árvores recebam água e oxigênio numa proporção muito maior quando comparados aos pavimentos convencionais, o que auxilia na manutenção da qualidade da vegetação em áreas urbanas. Conforme elucida a NRMCA (2011), as árvores plantadas em estacionamentos e calçadas proporcionam sombra e produzem um efeito de resfriamento, reduzindo a sensação de aquecimento nas cidades. Deste modo, verifica-se a necessidade de utilização de pavimentos permeáveis em locais onde diversas plantas apresentam dificuldades de desenvolvimento devido à impermeabilidade superficial.

De fato, a utilização do concreto permeável representa um panorama favorável na busca pela redução da impermeabilização superficial urbana através de métodos sustentáveis e economicamente viáveis. Em vista disso, o presente trabalho se propõe a compreender todos os benefícios ambientais vinculados ao material juntamente à substituição de agregados de origem natural por resíduos de concreto, elevando ainda mais o potencial sustentável do produto final.

#### **2.2.10 Outros Aspectos sobre o Concreto Permeável**

Considerando-se os critérios estruturais, a NRMCA (2011) indica que o concreto permeável, por apresentar em sua composição pouca ou nenhuma quantidade de agregados miúdos, apresenta, em sua superfície, uma textura muito específica. Os agregados angulares e circulares que compõem o material, como o cascalho e a brita, especialmente os que se encontram expostos, têm a capacidade de acentuar o poder de tração dos veículos, prevenindo a ocorrência de derrapagens. Essa textura superficial demonstra sua importância sobretudo durante condições climáticas mais severas, como chuva ou neve.

A permeabilidade inerente a esse concreto representa também um fator favorável à segurança dos usuários. A chuva que incide sobre o pavimento escoar através do concreto, eliminando problemas associados às enxurradas e ao acúmulo de água superficial. Isso se reflete na redução dos clarões noturnos para os motoristas, além, é claro, de diminuir os riscos de derrapagem. Comparativamente ao pavimento asfáltico, após eventos pluviométricos, enquanto este se mantém escorregadio com a água da chuva, a superfície do concreto permeável permanece inalterada (TENNIS *et al.*, 2004).

A NRMCA (2011) apresenta, também, números que elucidam a capacidade de armazenamento dos pavimentos permeáveis: um pavimento com 125 mm e 20% de vazios estoca até 25 mm de água pluvial, o que engloba a grande maioria das precipitações

atmosféricas dos EUA. Quando se acrescenta um pavimento de 150 mm de cascalho ou de brita, a capacidade de estocagem aumenta em 75 mm. Vale ressaltar que o índice de permeabilidade do concreto permeável, bem como os valores de retração por secagem, são dependentes das operações de concretagem e compactação, além do próprio traço e dos seus materiais constituintes.

Em relação especificamente à retração, entretanto, o concreto permeável não é tão afetado por esse fenômeno quanto o concreto convencional. Observam-se índices de retração inferiores em até 50% à retração obtida em misturas convencionais (NRMCA, 2011). Tal fato é explicado, sobretudo, pela baixa quantidade de pasta ou argamassa do material, quando é utilizada nenhum ou apenas uma pequena parcela de materiais finos na composição da mistura.

Em razão dessa baixa retração e de sua textura irregular, muitos concretos permeáveis são produzidos sem controle de juntas. Entretanto, essa prática não é preconizada. Estima-se que entre 50% e 80% da retração verificada no concreto permeável ocorre nos primeiros 10 dias, provocando o surgimento de possíveis fissurações aleatórias. Diferentemente do que ocorre no concreto convencional, onde, no mesmo período, a retração é de, apenas, 20% a 30% (HÖLTZ, 2011).

Além do menor índice de resistência, outra limitação identificada quanto à utilização do concreto permeável para pavimentos se refere ao maior custo inicial por m<sup>2</sup> em detrimento ao pavimento asfáltico. Contudo, o aumento do custo específico pode ser atenuado a partir da diminuição da drenagem resultante da área, uma vez que grande parte do volume de água se infiltra pela estrutura do compósito drenante, o que reduz o escoamento superficial e a demanda por sistemas de grande porte (ARAÚJO *et al.*, 2000).

Ademais, Polastre e Santos (2006), apontam que a maioria dos concretos permeáveis funciona bem com pouca ou nenhuma manutenção, a qual se constitui, basicamente, na prevenção de entupimentos da estrutura de vazios. Os problemas de obstrução ocorrem em virtude da penetração de detritos nos espaços vazios, restringindo a permeabilidade, o que reduz a proficiência e a vida útil do sistema, que, em ambientes favoráveis, pode chegar a até 15 anos.

### 2.3 Resíduos da Construção Civil

O campo da construção civil destaca-se como o maior consumidor de recursos naturais do planeta, além de ser, sobretudo, o maior gerador de resíduos. Isso se deve ao fato de produzir os maiores bens de consumo da sociedade, o que o notabiliza como um dos principais setores econômicos do mundo (JOHN, 2000). E a destinação final desses resíduos que, na maioria das vezes, é feita de maneira inconsciente, acarreta uma série de problemas de natureza socioambiental.

A fim de auxiliar a solucionar essa situação no cenário brasileiro, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgão responsável pela regulamentação de toda a gestão de resíduos no Brasil, juntamente com órgãos estaduais e municipais, elaborou a sua Resolução nº 307, que “estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil” (BRASIL, 2002, p. 1). Publicada em 5 de julho de 2002, vigora desde janeiro de 2003. De modo geral, disciplina ações necessárias à minimização dos impactos ambientais.

Para tanto, a Resolução CONAMA nº 307 considera:

- a política urbana de pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana, conforme disposto na Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001;
- a necessidade de implementar diretrizes para uma efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos;
- que a disposição dos resíduos em locais inadequados contribui para a degradação da qualidade ambiental;
- que os resíduos da construção civil representam significativo percentual dos resíduos sólidos produzidos em áreas urbanas;
- que os geradores de RCC devem se responsabilizar pelos resíduos das atividades de construção, reforma, reparo e demolição de estruturas e estradas, assim como pelos resultantes de remoção de vegetação e escavação de solos;
- a viabilidade técnico-econômica da produção e uso de materiais reciclados oriundos da construção civil;
- e que a gestão integrada dos resíduos deve proporcionar benefícios de ordem social, econômica e ambiental.

### 2.3.1 Conceitos

Os conceitos de lixo e resíduo variam de acordo com a época e o lugar. Depende de fatores jurídicos, econômicos, ambientais, sociais e tecnológicos. A definição e a conceituação dos termos “lixo”, “resíduo” e “reciclagem” diferem conforme a situação em que são expostas. Seu uso distingue-se de outras acepções adotadas mediante a visão institucional ou segundo o seu significado econômico. Na linguagem corrente, o termo resíduo é tomado genericamente como sinônimo de lixo. Lixo é todo material considerado inútil. Designa todo material descartado, posto em lugar público. De certa forma, lixo é tudo aquilo que se “joga fora”. É o objeto ou a substância que se considera inútil ou cuja existência em dado meio é tida como nociva. Já resíduo é a palavra adotada muitas vezes para corresponder à sobra no processo produtivo, geralmente industrial. É associada, também, como equivalente a refugo ou rejeito (CALDERONI, 2003).

O termo reciclagem, aplicado a lixo ou a resíduo, também é definido por Calderoni (2003). Representa o reprocessamento de materiais de modo a possibilitar sua reutilização. Basicamente, reciclagem trata-se do processo que permite a qualquer produto ou material, que já tenha servido aos seus propósitos iniciais e que tenha sido separado do lixo, ser reintroduzido no processo produtivo e transformado em um novo produto, com características e destino independentes do original.

Relacionando ao Direito Ambiental, Milaré (2009) define, como resíduo, tudo aquilo que resta, ou seja, que constitui o remanescente das atividades humanas, sejam domésticas, industriais ou até mesmo agrícolas, e que são lançados no solo, nos rios ou na atmosfera. Trata-se dos efluentes, das emissões e dos resíduos sólidos.

### 2.3.2 Resíduos Sólidos

Para Miller Junior (2007, p. 446), “resíduo sólido é qualquer material indesejável ou descartado que não seja gasoso ou líquido”. Ele afirma ainda que, na natureza, não há resíduo sólido, uma vez que os resíduos de um organismo são transformados em nutrientes para outros seres.

Já a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na Norma Brasileira “ABNT NBR 10004:2004: Resíduos sólidos – Classificação”, define resíduo sólido como quaisquer resíduos nos estados sólido e semissólido, resultantes de atividades de origem industrial,

doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Incluem-se, nesta definição, os lodos originários de sistemas de tratamento de água, os gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como certos líquidos cujas peculiaridades tornem o seu lançamento inviável na rede pública de esgotos ou corpos de água (ABNT, 2004a).

Segundo a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, chamada de Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), resíduo sólido trata-se de todo material, substância, objeto ou bem descartado provenientes de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se dá nos estados sólido ou semissólido, assim como gases contidos em recipientes e líquidos cujas características tornem impraticável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou, quando muito, demandam soluções técnica ou economicamente inviáveis frente à tecnologia disponível.

Na PNRS, no art. 13, alínea h, a aceção de resíduos sólidos da construção civil envolve os resíduos gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, além dos resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis (BRASIL, 2010).

Verifica-se, portanto, com essas definições, a associação genérica anteriormente analisada do termo resíduo sólido como sinônimo de lixo, normalmente em referência àquilo que sobra do processo de produção ou de consumo, porém entendido como inútil.

Entretanto, a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), em seu artigo 2º, inciso I, exhibe uma definição mais completa e adequada aos resíduos sólidos da construção civil:

São os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

### **2.3.3 Classificações**

Os resíduos da construção civil, também conhecidos como Resíduos de Construção e Demolição (RCD), podem ser classificados quanto à sua utilização, ao seu destino, ao fator econômico ou ainda à sua periculosidade. O Artigo 3º da Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), sobreposto pelas Resoluções nº 348/04 e nº 431/11, subdivide os RCC por classes:

- Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
  - a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
  - b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
  - c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.
- Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso.
- Classe C: resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação.
- Classe D: resíduos perigosos 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 nocivos à saúde.

A Figura 13 demonstra os indicadores de geração de resíduos conforme sua classificação:

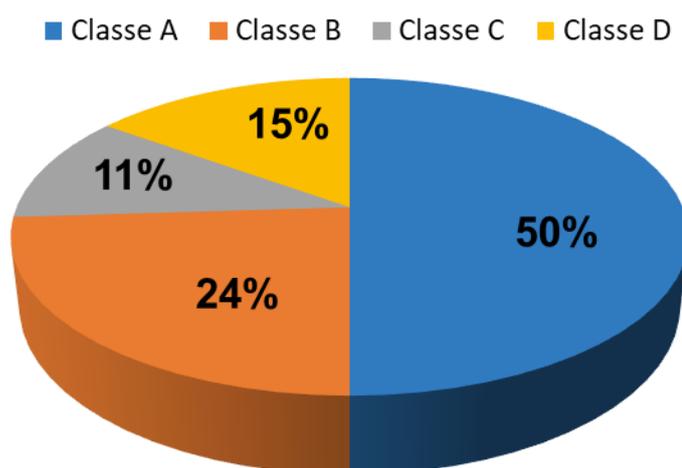


Figura 13 – Indicadores de geração de RCC.  
(Fonte: Adaptado de Melo e Frota, 2009)

Já a norma NBR 10004 (ABNT, 2004a) classifica os resíduos envolvendo a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, quanto aos seus constituintes e características e quanto a comparação desses constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto

à saúde e ao meio ambiente é conhecido. Para os efeitos dessa norma, os resíduos são classificados em:

- Resíduos classe I – perigosos: definidos como aqueles que, isoladamente ou por mistura, devido às suas características de toxicidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, radioatividade e patogenicidade em geral, representam riscos à saúde pública ou são capazes de ocasionar impactos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos sem os cuidados pertinentes.
- Resíduos classe II – não perigosos, que por sua vez se subdividem em:
  - a) Resíduos classe II A – não inertes: são aqueles não abrangidos pela classe I ou pela II B;
  - b) Resíduos classe II B – inertes.

Nessa classificação, os resíduos sólidos da construção civil se enquadram como “resíduos classe II B – não perigosos e inertes”. São definidos como resíduos cujas amostras representativas não detêm nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada à temperatura ambiente.

#### **2.3.4 Geração dos Resíduos**

Para se compreender o mecanismo da geração de resíduos, deve-se analisar o processo construtivo de edificações ou de obras de infraestrutura, o qual é composto por cinco fases básicas (BLUMENSCHHEIN, 2007):

- Inicial, que inclui o planejamento e a análise de viabilidade do empreendimento.
- Elaboração de projeto.
- Construção (execução).
- Utilização, que abrange não só o uso da edificação, como também a realização de manutenção e reformas.
- Demolição, geralmente quando se finda a vida útil de uma edificação.

Deve-se ressaltar que todos os participantes envolvidos em qualquer uma destas fases tem a responsabilidade de prevenir e reduzir a geração de resíduos.

Segundo a Resolução nº 307 do CONAMA (BRASIL, 2002, p. 2), geradores são “pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos que

gerem resíduos”. De uma maneira geral, toda e qualquer atividade desenvolvida no setor da construção civil pode ser categorizada como geradora de resíduos.

Os altos índices de entulhos gerados provêm das perdas durante o processo executivo da obra, segundo atesta Zordan (2003). Em seu estudo, o autor afirma que as atividades de maior geração de entulho se concentram durante o processo construtivo e, mesmo que a perda não seja totalmente convertida em resíduo de fato, esse desperdício associado equivale a cerca de 50% do total.

Essa situação é verificada, por exemplo, em obras de reforma, onde há uma carência de políticas de gestão, reutilização e reciclagem dos materiais. Esse diagnóstico é um parâmetro que caracteriza a construção civil como um dos setores que mais degrada o meio ambiente (PINTO, 2005).

Nos municípios brasileiros, como origem dos RCC, destacam-se as reformas, ampliações e demolições, de acordo com Pinto e González (2005). Os percentuais referentes a essas atividades são descritos na Figura 14:

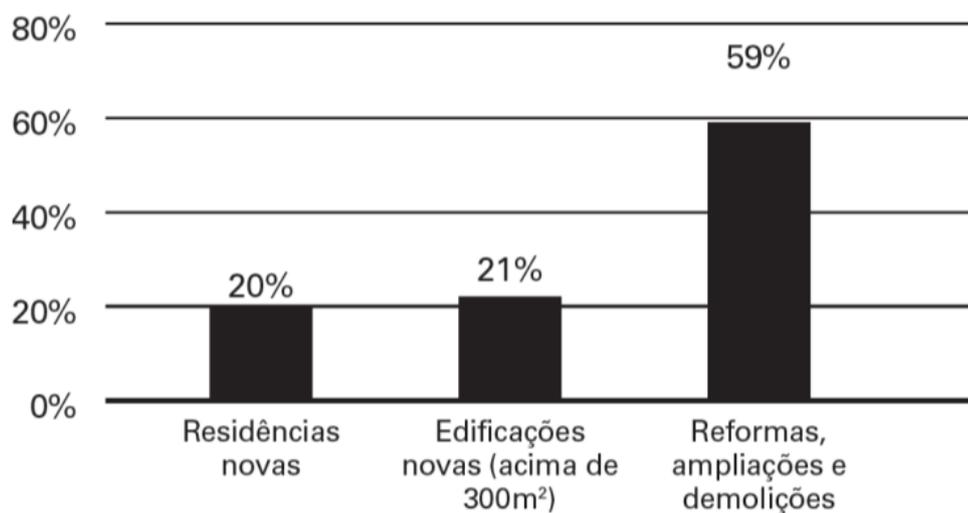


Figura 14 – Origem dos RCC em alguns municípios brasileiros em 2005.  
(Fonte: Pinto e González, 2005)

Esses dados remetem, ainda, a uma realidade crítica do setor. Com base nos dados obtidos em Gusmão (2008), durante a execução de uma edificação, considerando-se as três fases da construção – demolição, escavação e construção, observa-se que, nas primeiras etapas, mesmo estas correspondendo a um período de tempo muito inferior, o quantitativo de resíduos gerados supera a etapa de construção, tendo em vista o período da execução.

Segundo Souza *et al.* (2004), a geração desses resíduos se relaciona diretamente ao excesso de consumo de materiais nos canteiros de obra. Define-se esse desperdício como a razão entre a quantidade de material teoricamente necessário e a quantidade realmente utilizada.

De acordo com os estudos de Pinto (1999), a geração dos resíduos da construção civil estudados em 10 cidades brasileiras representa de 41% a 70% do resíduo sólido do município. Estima-se, pois, que a geração per capita de resíduos da construção civil no Brasil varia de 230 a 760 kg/hab.ano. Já os EUA apresentam uma realidade distinta quanto a essa problemática: enquanto os norte-americanos geram cerca de 63 kg/hab.ano de RCC (EPA, 1998), a geração brasileira apresenta uma mediana de 510 kg/hab.ano.

Hendrickson e Harvoath (2000) atribuem essa discrepância principalmente à menor geração de resíduos associada aos sistemas construtivos mais comumente usados nos Estados Unidos. Além disso, os autores consideram, ainda, a menor influência da construção sobre a economia do país.

### **2.3.5 Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Construção Civil**

Como assegura Carneiro *et al.* (2001), o gerenciamento equivocado de resíduos (ou até mesmo a sua ausência) está intrinsecamente relacionado ao desperdício não só de materiais como também de mão de obra durante a fase de execução dos empreendimentos no setor da construção civil. A implementação de um projeto de gerenciamento de RCC, que a princípio pode ser recebido como um empecilho, representa uma grande ferramenta na busca pela redução da geração desses resíduos.

Segundo pesquisa efetuada por Schneider e Philippi (2004), as construtoras de pequeno porte são as responsáveis por grande parte da geração do entulho urbano. Visando reduzir custos, essas empresas se limitam apenas a transferir para a sociedade toda a responsabilidade sobre a deposição regular.

Com o intuito de amenizar essa problemática, despontam diversas medidas que devem adotadas sob forma de políticas de aproveitamento de resíduos, das quais cita-se: restrições quanto ao uso de substâncias perigosas na composição de materiais de construção; adoção de materiais de construção mais duráveis; incentivo à fabricação e ao emprego de materiais de construção reciclados ou recicláveis; implantação de sistema de triagem obrigatória de resíduos

em canteiros de obras; elevação das taxas para a deposição de resíduos em aterros; e até mesmo implementação de controle mais rigoroso nas demolições (ZORDAN, 2003).

O conceito de planejamento aplicado à construção civil relaciona-se intrinsecamente à economia de recursos financeiros, à otimização do tempo, à racionalização de material e mão de obra e, naturalmente, à sustentabilidade do empreendimento. “O planejamento deve ser feito para reduzir custos, evitando retrabalhos e mudanças do projeto já em execução, isso proporciona redução no tempo de execução e melhor qualidade” (MARTINS, 2012, p. 1).

O planejamento da obra se desenvolve a partir de uma gestão minuciosa, visando minimizar o desperdício e, por conseguinte, mitigar os impactos ambientais. Martins (2012) afirma que o processo de gestão de resíduos envolve todas as etapas das obras, desde a utilização responsável dos materiais, reduzindo os desperdícios, até a reciclagem e correta destinação de todos os resíduos.

John e Agopyan (2000) apresentam algumas fontes e causas da geração de resíduos observadas na construção, a julgar pelas diferentes fases da obra:

No projeto:

- falta de atenção na dimensão dos produtos;
- alterações realizadas no projeto durante o decorrer dos trabalhos;
- inexperiência do arquiteto na sequência e método da construção;
- desconhecimento quanto aos tamanhos padrões existentes no mercado;
- falta de conhecimento do arquiteto quanto a produtos alternativos;
- escassez de informação nos desenhos;
- equívocos no contrato;
- contrato incompleto no início do projeto;
- seleção de produtos de pouca qualidade.

Na execução:

- erros cometidos durante o transporte ou pelos trabalhadores;
- acidentes devido à negligência;
- danos no trabalho concluído causados por operações posteriores;
- uso incorreto do material, exigindo substituição futura;
- aquisição de quantidades inexatas de insumos devido à falta de planejamento;

- atrasos na entrega de informações ao construtor acerca dos produtos a serem utilizados;
- mau funcionamento dos equipamentos;
- condições climáticas adversas.

No manuseio de materiais:

- danos durante o transporte;
- armazenamento inapropriado, que leva à deterioração ou dano dos materiais;
- materiais fornecidos em embalagens separadas (por exemplo, sacos de cimento);
- utilização do material existente nas proximidades do local de trabalho, mesmo que não seja o mais indicado;
- conflitos entre a equipe de projeto e os trabalhadores.

Nos aspectos contratuais:

- erros de encomenda (por exemplo, encomendar materiais excedentes ou faltantes);
- impossibilidade de encomendar menores quantidades de insumos;
- adquirir produtos que não cumprem as especificações exigidas.

Na manutenção:

- correção de manifestações patológicas, de reformas ou da modernização total ou parcial do edifício;
- descarte de componentes que tenham degradado e atingido o final da vida útil.

Marcondes e Cardoso (2005) dividem a cadeia produtiva da construção civil em duas etapas. A primeira compreende o desenvolvimento dos fornecedores, que consiste, basicamente, na racionalização dos recursos e na redução das suas perdas durante os processos de extração, transporte e entrega em obra. Já a segunda corresponde ao processo produtivo, que envolve a gestão de perda de materiais e a segregação dos resíduos. Todas as etapas construtivas devem ser concebidas tendo em vista a busca pela sustentabilidade (MOTTA e AGUILAR, 2009).

De fato, a sustentabilidade na construção é de responsabilidade mútua entre empresários e sociedade e precisa ser considerada desde a concepção do projeto até o planejamento de qualidade de vida dos usuários. Para tanto, é imprescindível o emprego de recursos sustentáveis na construção de novos empreendimentos. A gestão de resíduos sólidos da construção civil é

de notável importância quanto à sustentabilidade de uma cidade ou de uma região. Entretanto, não obstante as iniciativas privadas, grande parte dos representantes das construtoras brasileiras não reconhece as suas atribuições enquanto geradores de resíduos da construção civil e, quando muito, não compreendem a devida relevância do cenário ambiental. O que pode ser observado pelo baixo índice de reaproveitamento desses resíduos nos canteiros de obra (PAULA, 2010).

A perda dos resíduos da construção civil se relaciona diretamente ao consumo exacerbado dos recursos naturais. Pinto (1999) afirma que, dependendo da tecnologia empreendida durante o processo construtivo, essas perdas representam entre 20% e 30% da massa total. A redução das perdas de materiais é responsável por representar benefícios tanto na mitigação da extração de recursos naturais quanto na redução de entulhos lançados em diversas áreas urbanas (PALIARI *et al.* 2002).

Schneider (2003) e Santos (2008) constataram, em seus estudos, que o planejamento visando à minimização dos RCD deve ser estabelecido desde o início da obra, envolvendo a especificação dos materiais quanto a sua durabilidade e potencial reciclável, seguindo diretrizes como foco na maior utilização de materiais reciclados. Essa política se baseia em países como a Alemanha, a Coreia e o Japão, que introduziram instrumentos regulatórios a partir de leis recomendatórias a este fim.

Com o passar dos anos, o meio ambiente e a sustentabilidade vêm se tornando assuntos de grande interesse social, o que permitiu o surgimento de uma série de eventos que objetivam debater sobre o tema e progredir quanto à redução dos impactos ambientais. Em 1972, foi realizada, em Estocolmo, a Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano, que se tornou reconhecida como marco sem precedentes nas tratativas quanto à melhoria das relações do homem com o meio ambiente, além de ter inaugurado a procura pelo equilíbrio entre desenvolvimento econômico e redução da degradação ambiental.

Já em 1987, foi elaborado o documento “Nosso Futuro Comum”, também com o intuito de debater sobre a questão ambiental. Houve, então, em 1992, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (Eco-92), no Rio de Janeiro, resultando na Agenda 21, plano de ação que apresentava definições e metas a serem alcançadas nas décadas seguintes (CAMARGO, 2003). Posteriormente, em dezembro de 2009, ocorreu a Conferência Climática de Copenhague (COP 15), com o intuito principal de instaurar um tratado em substituição ao Protocolo de Quioto, que permaneceu vigente de 2008 a 2012. Segundo Paula (2010), essa reunião representou um grande salto em direção à busca pela sustentabilidade do planeta.

### 2.3.6 Características dos resíduos da construção civil

De acordo com Zordan (2003), o RCC possui, de maneira geral, forma sólida e irregular, com propriedades físicas diversas, podendo inclusive se apresentar em dimensões e geometrias comuns aos materiais de construção convencionais. Segundo Carneiro *et al.* (2001), a maioria dos resíduos de construção é inerte, podendo, portanto, ser utilizada como alternativa viável aos agregados de origem natural. A principal diferença entre o agregado reciclado e o agregado convencional baseia-se na alta absorção de água intrínseca dos resíduos.

Esse fato foi corroborado por Alves (2016), que comparou as taxas de absorção d'água de resíduos com 9,5 mm de diâmetro máximo à absorção de britas com granulometria equivalente (Figuras 15 e 16).

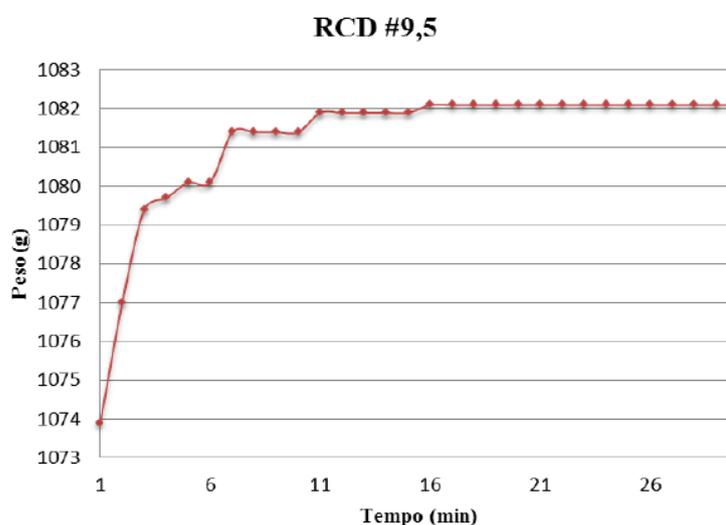


Figura 15 – Taxa de absorção d'água de resíduo com 9,5 mm de diâmetro máximo. (Fonte: Alves, 2016)

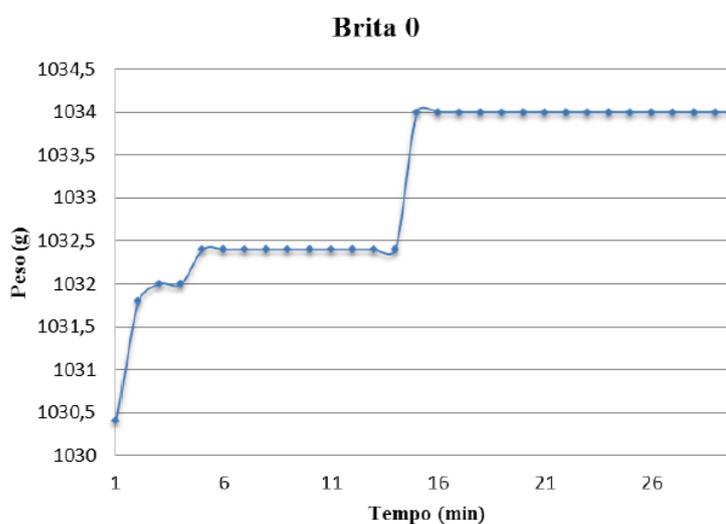


Figura 16 – Taxa de absorção d'água de brita 0. (Fonte: Alves, 2016)

Conclui-se, portanto, que o resíduo de construção civil demonstra um teor de absorção d'água muito superior ao do agregado natural. Ademais, o resíduo não apresenta um padrão de absorção nos primeiros 11 minutos, à medida que a brita demonstra patamares de absorção d'água. Essa divergência comportamental pode representar, em misturas constituídas por agregado reciclado, a perda da água de amassamento para o resíduo.

Carneiro *et al.* (2001) atenta, ainda, para a fonte dos agregados reciclados. Resíduos originados a partir de materiais compostos por escórias de alto teor de metais pesados, por exemplo, quando reinseridos na construção civil, tendem a gerar agregados prejudiciais não só ao meio ambiente, como também à saúde dos trabalhadores e usuários.

### **2.3.7 Composição e Quantificação dos Resíduos**

Os RCC trazem, em sua composição, um conjunto de materiais que, quando dissociados, são identificados pela NBR 10004 (ABNT, 2004a) como inertes. Contudo, Zordan (2003) defende que enquanto não forem disponibilizadas análises específicas acerca da solubilidade do resíduo oriundo da construção civil, este se enquadraria como “Resíduo de classe II A – não inerte”.

Oliveira *et al.* (2001) são mais assertivos em suas colocações: verificaram, por meio de análises químicas e difratométricas, que o resíduo exclusivamente de concreto não pode ser considerado um material inerte. O descarte em locais inapropriados também contribui para agravar a conjuntura, uma vez que é capaz de provocar a contaminação de águas e a sua consequente mineralização. Portanto, os autores sugerem a reclassificação do resíduo de concreto de classe II B – resíduos inertes, para a classe II A– Resíduos não inertes, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004a).

Basicamente, os resíduos de construção civil são constituídos por concretos, argamassas e materiais cerâmicos, como blocos, tijolos e lajotas, que demonstram alto potencial reciclável. Consideram-se, também, outros materiais passíveis de reciclagem, como o papel, os plásticos e a borracha. As madeiras, por sua vez, apresentam um agravante: se impermeabilizadas ou pintadas, devem ser caracterizadas como material poluente e tratadas como resíduos industriais perigosos, em decorrência do risco de contaminação. Em vista disso, são classificadas como parcialmente recicláveis (BRASIL, 2002; BANIAS *et al.*, 2010).

Corcuera (2003, *apud* PAULA, 2010) afirmam que a composição dos resíduos varia de acordo com o tipo de obra em que é gerado, além dos aspectos econômicos da região e do sistema construtivo empregado. As características desses resíduos estão diretamente ligadas a parâmetros específicos de sua região geradora, além da variação ao longo do tempo. Em países desenvolvidos, por exemplo, as construções prediais geram muitos resíduos oriundos de embalagens de materiais, enquanto nos países em desenvolvimento os resíduos gerados são, de modo geral, provenientes das etapas construtivas, como concreto, blocos, argamassa, azulejos e tijolos, em razão das altas perdas durante todo o processo (CARNEIRO *et al.*, 2001).

Muitos aspectos influenciam nas características, na composição e na quantidade desses resíduos: o grau de desenvolvimento da indústria da construção civil local; a qualidade da mão de obra disponível de acordo com o treinamento a ela oferecido; as técnicas de construção e demolição além dos processos de gestão e reciclagem de resíduos adotados; os tipos de materiais predominantes disponíveis na região; e até mesmo a demanda por novas construções (KARPINSKI *et al.*, 2009).

No Brasil, as obras residenciais e comerciais, que se utilizam dos processos construtivos convencionais – estrutura de concreto armado conjugada a vedações em alvenaria com blocos de concreto ou cerâmicos –, são capazes de gerar entre 0,10 m<sup>3</sup> e 0,15 m<sup>3</sup> de resíduos da construção civil por m<sup>2</sup> de área construída (CARELI, 2014). Carelli (2014) afirma, ainda, que, conforme observa-se na Figura 17, 50% desse volume se refere a alvenaria, concreto, argamassas e cerâmicas; 30% a madeira; 10% a gesso; 7% a papel, plástico e metais; e 3% são compostos de resíduos perigosos e outros resíduos não recicláveis, inclusive rejeitos.

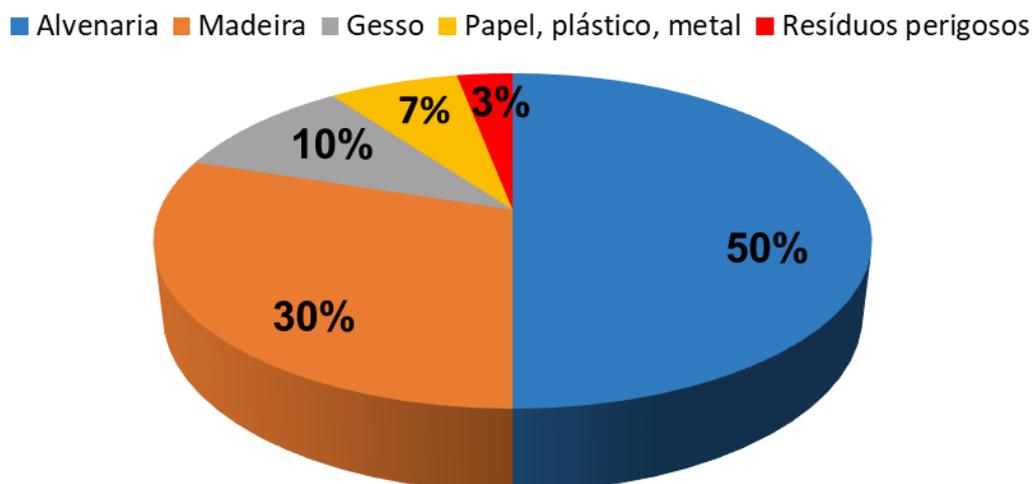


Figura 17 – Quantificação de resíduos de uma obra convencional.  
(Fonte: Adaptado de Careli, 2014)

Carneiro *et al.* (2000) evidenciam que a grande variedade de matéria-prima, assim como de técnicas e metodologias construtivas, interfere nas propriedades dos entulhos gerados. Especialmente em sua composição e quantidade, condicionando, portanto, as características dos materiais à realidade da região.

Morais (2006) indica que, nas obras de demolições, os tijolos e concretos representam a maior parte da composição dos resíduos. Enquanto que, em construções novas, a geração dos RCD corresponde, essencialmente, às perdas físicas oriundas do processo construtivo, desde a fundação, passando pela elevação das alvenarias e pela aplicação dos revestimentos, até os acabamentos das edificações.

Manahan (2001) discorre a respeito da eficácia de uma gestão de resíduos, que se desenvolve, sobretudo, a partir da redução do montante gerado e da minimização do risco inerente ao material descartado. Para administrá-lo de maneira satisfatória, alguns procedimentos primordiais devem ser considerados. Destacam-se: a busca pela redução das perdas, associada à reciclagem como alternativa sustentável; o tratamento dos resíduos de modo a não os tornar perigosos; além da disposição adequada e do seu monitoramento constante.

Entretanto, Oliveira (2003) adverte que os resíduos de construção e demolição contêm, em sua composição, dependendo de sua origem, materiais de pintura ou substâncias de tratamento de superfícies, que podem contaminar o solo. De acordo com John (2000), o tratamento desses resíduos depende muito do sistema de coleta, o que o torna deveras oneroso, elevando o valor do produto final. Portanto, o êxito da reciclagem desses resíduos esbarra na inviabilidade econômica que representa tratá-los.

### **2.3.8 Panorama dos Resíduos da Construção Civil no Brasil**

A reciclagem de resíduos no Brasil como materiais de construção, comparando-se a países do primeiro mundo, ainda é tímida, com exceção apenas da reciclagem praticada pelas indústrias de cimento e aço. A maior experiência brasileira na área da reciclagem de produtos gerados por outros setores da indústria na produção de materiais de construção civil é administrada pela indústria cimenteira, que se utiliza principalmente de escórias de alto forno e cinzas volantes (ÂNGULO *et al.*, 2007).

Marques Neto (2005) reitera que o setor da construção civil, em países em desenvolvimento como o Brasil, tem importante papel no processo de crescimento e redução

do desemprego, devido à sua capacidade de originar vagas diretas e indiretas no mercado de trabalho e absorver significativo percentual de mão de obra nacional. A indústria da construção civil representa, portanto, uma das principais fontes de degradação ambiental, responsável pela enorme geração e deposição irregular de resíduos das diferentes etapas do processo produtivo.

Os RCC integram os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e atualmente revelam-se como um dos maiores transtornos aos sistemas de saneamento municipais. O excedente gerado sobrecarrega, invariavelmente, os serviços de limpeza pública, degradando a qualidade de vida urbana (MIRANDA, 2009).

No Brasil, a geração contínua de RCC está diretamente associada ao elevado desperdício de materiais na realização dos empreendimentos. As retiradas de entulho dos depósitos clandestinos e das vias públicas contribuem para o alto custo da limpeza urbana dos municípios brasileiros (PINTO, 1999).

Romeiro (2003) argumenta que a maior parte dos municípios não se encontra estruturada para gerenciar as enormes quantidades de resíduos e os problemas criados por eles. Entretanto, o impacto causado ao meio ambiente pela produção descomedida desses resíduos e a necessidade de soluções imediatas têm levado a sociedade e os governos municipais a buscarem alternativas para reduzir a degradação da natureza.

Até 2002, não havia no país políticas públicas específicas acerca dos resíduos gerados pelo setor da construção civil. A legislação municipal de São Paulo – maior cidade do Brasil –, até aquele ano, apenas limitava-se a proibir a deposição de RCD em vias e logradouros públicos, conferindo ao gerador a responsabilidade total pela sua remoção e destinação (SCHNEIDER e PHILIPPI JR, 2004).

No entanto, em 2004, devido à progressiva preocupação da sociedade quanto às questões ambientais e ao desenvolvimento sustentável, a ABNT criou a Comissão de Estudo Especial Temporária de Resíduos Sólidos (CEET-00.01.34), para revisar a ABNT NBR 10004:1987, visando ao seu aprimoramento e, deste modo, prover auxílios ao gerenciamento desses resíduos. (ABNT, 2004a). Outras normas técnicas referentes à gestão dos RCC também foram elaboradas no mesmo ano:

- NBR 15112:2004: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Definem procedimentos para o manejo na triagem dos resíduos das diversas classes, inclusive quanto à proteção ambiental e controles diversos (ABNT, 2004b).

- NBR 15113:2004: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Definem procedimentos para o preparo da área e disposição dos resíduos de classe A, proteção das águas e proteção ambiental, planos de controle e monitoramento (ABNT, 2004c).
- NBR 15114:2004: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Definem procedimentos para o isolamento da área e para o recebimento, triagem e processamento dos resíduos classe A (ABNT, 2004d).
- NBR 15115:2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Definem características dos agregados e as condições para uso e controle na execução de reforço de subleito, sub-base, base e revestimento primário (cascalhamento) (ABNT, 2004e).
- NBR 15116:2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Definem condições de produção, requisitos para uso de agregados em pavimentação e em concreto, e o controle da qualidade do agregado reciclado (ABNT, 2004f).

Embora a Resolução CONAMA nº 307 tenha sido aprovada em 2002, apenas em 2 de agosto de 2010 ocorreu a aprovação da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, por meio da Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010). Segundo o artigo 1º, a PNRS dispõe sobre princípios, objetivos e instrumentos, assim como sobre as diretrizes referentes à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos.

### **2.3.9 Reciclagem na Construção Civil**

Com o intenso processo de industrialização, aliado ao advento de novas tecnologias e ao crescimento populacional, os resíduos transformaram-se num enorme transtorno às autoridades urbanas. Os problemas se caracterizam pela escassez de áreas de deposição de resíduos, além dos altos custos que o seu gerenciamento representa para a sociedade. Essa problemática se intensifica diante dos modelos atuais de produção, onde as matérias-primas utilizadas são, geralmente, de origem natural e não renováveis. (GONÇALVES, 2013).

A busca pela preservação ambiental diante da tendência de escassez dos recursos naturais faz com que a construção civil adquira novos conceitos e soluções técnicas visando à

sustentabilidade de suas atividades. Uma das soluções fundamentais aos empecilhos gerados é a reciclagem de resíduos, que é vista, na construção civil, com grande potencial de utilização, já que o consumo de recursos naturais do setor chega a 75% de toda a exploração de recursos (PINTO, 1999).

Deste modo, a reciclagem de resíduos pela indústria da construção vem se firmando como prática essencial à sustentabilidade, seja suavizando o impacto ambiental gerado pelo próprio setor, ou até mesmo reduzindo os custos. Dentre os evidentes benefícios que a reciclagem oferece, destaca-se a redução no consumo de recursos naturais não-renováveis; a minimização de volume de resíduos transportados, reduzindo as áreas necessárias para aterro; a diminuição do consumo de energia durante o processo de produção e a consequente redução da poluição causada pela disposição indevida dos RCC (PASCHOALIN FILHO *et al.*, 2014).

Antes de se conceituar a reciclagem propriamente dita, alguns processos quanto ao aproveitamento de resíduos devem ser considerados: trata-se da chamada recuperação, definida como a retirada do resíduo de seu ciclo convencional de coleta e tratamento; além da valorização, termo empregado quando pretende-se adicionar um valor econômico ao resíduo. Já a reciclagem tem como finalidade substituir total ou parcialmente uma matéria prima por um resíduo, inserindo-o no seu próprio ciclo de produção (BRAGA e DIAS, 2008).

A reciclagem de resíduos apresenta consideráveis vantagens a respeito do seu potencial sustentável. Entretanto, essas vantagens se estabelecem apenas a partir da análise do seu ciclo de vida, de modo que esse novo material originado pelos RCC não se torne um empecilho à sociedade, seja pela contaminação da água, radiação ou até mesmo pela volatilização de frações orgânicas (EPA, 1998).

John (2000) demonstra que há dois setores que vêm evoluindo seus programas de reciclagem de maneira mais efetiva: a indústria cimenteira e o setor siderúrgico. Grande parcela do aço é reutilizada no concreto armado produzido no Brasil. O processo de reciclagem, além de impedir a geração de resíduos, também contribui na preservação dos recursos naturais por evitar a extração de matéria-prima, reduzindo as emissões de CO<sup>2</sup>.

Ainda segundo John (2000), o limite da vida útil de um produto se estende até o período em que ele se transforma em resíduo. Até mesmo aqueles considerados duráveis possuem vida útil finita, haja vista que todo processo de transformação de energia é constituído a partir de uma forma mais nobre para uma menos nobre. De fato, todos os produtos estão fadados a se transformarem em pós-consumo. Parte desses produtos se torna resíduo simplesmente por não

se enquadrarem às especificações. Diante desse cenário, o autor aponta a reciclagem como condição essencial ao desenvolvimento sustentável, uma vez que possibilita o fechamento do ciclo de vida de um produto.

Dentre os benefícios inerentes à reciclagem dos RCC no âmbito socioeconômico e ambiental, evidencia-se a diminuição dos custos de construção, sobretudo de casas populares, aliado ao consequente aumento na geração de empregos, fomentando a economia do país. Outro fator que também reflete na economia, principalmente por parte do poder público, consiste na redução do preço de produtos reciclados que representa uma grande diminuição das despesas com a remediação de áreas de deposição irregular (EPA, 1998).

Entretanto, de acordo com Kartam *et al.* (2004), não obstante o crescente desenvolvimento das vantagens associadas à reciclagem dos materiais de construção no país, ainda há muitos entraves que atrapalham esta inserção no mercado brasileiro. Esses empecilhos se baseiam na depreciação dos produtos oriundos de RCC, o que requer um crescimento no desenvolvimento do setor até se atingir um amadurecimento frente ao mercado. Além disso, o país enfrenta uma limitação de incentivos fiscais que, associada à desvalorização dos resíduos como matéria prima, deprecia os produtos reciclados frente aos confeccionados a partir de recursos naturais.

Dentro do contexto histórico, segundo Leite (2001), a primeira utilização significativa dos resíduos ocorreu ao final da Segunda Guerra Mundial. Rocha *et al.* (2013) argumentam que, para se analisar as possíveis formas de reaproveitamento dos resíduos de construção e demolição, é essencial considerar as questões socioeconômicas e culturais de cada região.

Levy (2001) expõe que, na Alemanha, até a década de 60, todo o entulho oriundo da Segunda Guerra Mundial havia sido reciclado, tornando-se um marco no desenvolvimento dos processos de reciclagem de RCD. Ainda na Europa, Dorsthost e Hendriks (2003) releva que, a partir do ano 2000, o envio de resíduo com potencial de reutilização para aterros sanitários tornou-se proibido na Holanda. Dessa forma, 95% de todo RCD produzido no país tornou-se reutilizado ou reciclado.

O aterramento, por exemplo, se caracteriza como um dos mais notáveis tipos de reaproveitamento dos RCC, mesmo sendo aplicado sem nenhum beneficiamento. De fato, este é o fator que o torna o mais utilizado dentre as técnicas de reaproveitamento, seguido pela utilização dos resíduos nas camadas de base e sub-base de pavimentos. Conforme Pinto (1999), os resíduos aplicados nessas condições oferecem excelente capacidade de suporte, reduzindo o emprego de agregados naturais.

## 2.3.10 Aplicação dos Resíduos da Construção Civil

### 2.3.10.1 Em Pavimentos

O RCC reciclado pode ser utilizado na pavimentação como base, sub-base ou pavimento primário na forma de brita corrida, ou ainda em misturas de resíduos com solo. O entulho pode ser utilizado sozinho ou misturado ao solo e deve ser processado por britador até a obtenção da granulometria desejada (PINTO e GONZÁLEZ, 2005).

Conforme Zordan (2003), o emprego dos resíduos com essa funcionalidade permite:

- reduzir os custos de processo, uma vez que as formas de reciclagem exigem uma menor tecnologia;
- utilizar todos os componentes minerais do entulho (tijolos, argamassas, materiais cerâmicos, areia, pedras, etc.) sem a necessidade de separação de nenhum deles;
- reutilizar o entulho em maior escala, inclusive aquele proveniente de demolições e pequenas obras que não suportam o investimento em equipamentos de moagem/trituração.

Entretanto, Ângulo *et al.* (2002) afirmam que a inserção do RCC como agregado em bases de pavimentos não garante uma reciclagem massiva deste resíduo. As dificuldades quanto ao envolvimento das empresas privadas e ao consumo do mercado, que só consegue consumir apenas metade desse material, representam um grande empecilho a essa atividade.

Neste sentido, as pesquisas acerca da ampliação do consumo de resíduos dessa natureza na pavimentação vêm se desenvolvendo. Segundo Brasileiro (2013) e Sinisterra (2014), apesar de ainda ser incipiente no país, a aplicação dos resíduos de construção e demolição como agregados alternativos em misturas asfálticas representa, de fato, uma prática técnica e economicamente viável na produção de pavimentos flexíveis.

### 2.3.10.2 Como Agregados na Construção Civil

Estudos envolvendo o aproveitamento de resíduos sólidos como agregados na construção civil vêm progredindo acentuadamente nas últimas décadas. A análise do emprego de resíduos da indústria de papel na produção de materiais para a construção civil estabelecida por Nolasco (1993) corroborou quanto à viabilidade da utilização do resíduo em sua forma *in natura* como agregado em diversas ocorrências:

- na fabricação de blocos cerâmicos, seguindo os processos de produção dos blocos convencionais, atribuindo-lhes melhor acabamento e maior resistência ao impacto;
- como preenchimento de blocos vazados, aprimorando as propriedades termoacústicas destes componentes, podendo ser empregado inclusive em lajes nervuradas com o objetivo de absorver o ruído em edificações de múltiplos pavimentos;
- misturado ao cimento formando um compósito que pode ser aplicado em forros e divisórias, tendo em vista o seu comportamento plástico, derivado da presença de fibras, elevando conseqüentemente seu desempenho termoacústico e suas propriedades acerca da perda de massa e propagação superficial de chama.

Ainda segundo Nolasco (1993), o aproveitamento de tais resíduos minimiza os problemas associados à disposição, reduzindo os custos e os riscos ambientais para as indústrias de papel, além de permitir a diminuição do tempo de queima e, conseqüentemente, do consumo de energia.

Chamie (1994) em seus estudos, evidenciou a eficiência do processo de encapsulamento de resíduos galvânicos em matriz cimentícia, permitindo a reclassificação desses resíduos de classe I para classe II segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004a). Entretanto, para utilização enquanto argamassa, esse processo não se mostrou tão efetivo, uma vez que apresentou, no seu melhor traço, uma queda de resistência substancial ao longo do tempo.

Pablos (1995) apresentou a viabilidade de utilização do resíduo sólido gerado pelo descarte das areias de fundição aglomeradas com argila, estabilizado quimicamente através do processo de encapsulamento, na confecção de tijolos e blocos vazados. Contudo, de acordo com o próprio autor, devido à presença de certas substâncias químicas, seu trabalho carecia de mais estudos acerca das propriedades físicas e mecânicas dos produtos obtidos, para avaliar o comportamento destes a longo do tempo.

Savastano Júnior e Agopyan (1997), avaliaram a aplicação de diversos resíduos e subprodutos da extração e processamento de fibras vegetais como reforço de matrizes cimentícias para a construção civil, destacando-se, entre aqueles com mais potencial de aproveitamento, os resíduos do sisal, do coco e do algodão, além dos rejeitos de celulose de eucalipto.

Cheriat *et al.* (2000), analisaram a utilização de lodo da indústria têxtil juntamente à cinza pesada oriunda de termoelétricas em mistura com o cimento Portland. Neste mesmo ano foram

realizados estudos acerca do uso de escória de aciaria em concreto. Os autores (MASUERO *et al.*, 2000) observaram que a adição de 20% desse resíduo otimiza certas propriedades do concreto, tornando-o superior ao concreto convencional quanto a durabilidade e resistência.

Battistelle (2002) estudando a viabilidade técnica da inserção do resíduo oriundo da indústria de papel e celulose em tijolos de adobe, abriu precedentes para a utilização desse produto de baixo custo e de fácil produção na construção de casas populares. Além de auxiliar na redução do impacto ambiental, esse processo, segundo o autor, possibilita uma economia de até 11kg de cimento por m<sup>3</sup> construído.

Também em 2002, foi analisado o emprego de escória de alumínio na produção de concretos celulares autoclavados e concretos moldados em blocos (tijolos de concreto, painéis pré-moldados, contrapisos e outros tipos de revestimento). A escória atua como agente expensor, incorporando porosidade à massa, o que permite uma economia de até 30% de redução de areia, cimento e cal (ARAÚJO, 2002).

Agopyan e Savastano Júnior (2003) produziram uma argamassa adicionada de fibras de coco, constituída por aglomerantes alternativos baseados em escória granulada de alto forno e cinza de casca de arroz. Os ensaios demonstraram que o acréscimo de fibras eleva a resistência ao impacto e o teor de ar incorporado, reduzindo levemente a resistência à tração, à flexão e à compressão. Contudo, a forma de ruptura torna-se dúctil, seguida de fissuração generalizada.

De acordo com Paula (2010), a utilização do RCC reciclado como agregado de argamassa, a partir da moagem do entulho na granulometria da areia, apresenta diversas vantagens:

- o material produzido pode ser aplicado no próprio local onde foi gerado, eliminando custos com transporte;
- o resíduo moído é capaz de promover um efeito pozolânico;
- proporciona uma redução do consumo de cimento e cal;
- promove acréscimo nos valores de resistência à compressão das argamassas.

Ainda segundo o autor, estudos acerca do desempenho de argamassas feitas com resíduo reciclado evidenciaram que o produto resultante apresenta resistência até três vezes maior que a argamassa tradicional. Ainda demonstra uma resistência ao arrancamento 10% maior, além de apresentar um módulo de elasticidade superior, devido, principalmente, à retenção de água. Estas propriedades se devem à recuperação das características originais dos materiais que

viraram entulho, além da geração da pozolana, obtida por intermédio da moagem de blocos cerâmicos.

Grigoli (2001), apresenta em seu trabalho a utilização de resíduos gerados no próprio canteiro de obras em argamassas, as quais foram aplicadas: no assentamento de batentes, esquadrias e blocos cerâmicos; no preenchimento de aberturas na parede e nos degraus de escadas; em chumbamentos de tubulações elétrico-hidráulicas e caixas elétricas; na execução de embonecamento de tubulações; em remendos e emendas em alvenarias; e no enchimento de rebocos internos. No entanto, devido à grande quantidade de finos gerados no processo de moagem do entulho, a argamassa composta pelos resíduos moídos tende a apresentar problemas de fissuração.

Zordan (2003) relata que os processos de reciclagem vêm evoluindo amplamente e sendo empregados em várias construtoras do país, que se esforçam para solucionar, através do custeio de pesquisas, os inconvenientes relacionados a essa técnica. Um desses empecilhos quanto ao uso de argamassas à base de entulho, relaciona-se à sua natureza porosa, desaconselhando sua utilização como impermeabilizante (CORCUERA, 2003, *apud* PAULA, 2010).

A utilização de resíduo reciclado como agregado em concreto vem se tornando, cada vez mais, uma alternativa viável em prol da sustentabilidade na indústria da construção. Os processos evoluem gradativamente, aumentando a expectativa por uma reciclagem massiva desses RCC. Entretanto, sua aplicação ainda é preconizada apenas para concreto não estrutural. Diante da problemática que envolve a deposição do chamado entulho, a caracterização desse material que substituirá os agregados convencionais (areia e brita), se torna primordial na escolha do processo de beneficiamento (ÂNGULO *et al.*, 2002).

Neste contexto, são necessárias mudanças acerca da gestão e do processamento do RCC, envolvendo ações que otimizem a utilização do resíduo reciclado: redução de contaminantes; alterações no *layout* das instalações de reciclagem; homogeneização; processamento a úmido do RCC; emprego de equipamentos de concentração e de britagem mais modernos; e adoção da demolição seletiva. Zordan (2003) elenca algumas vantagens dessa abordagem construtiva:

- uso dos componentes minerais do entulho, sem a necessidade de separação;
- economia de energia no processo de moagem;
- maior amplitude de utilização do resíduo;
- desenvolvimento de melhorias no desempenho do concreto reciclado.

No entanto, vale ressaltar, como fator limitante, a presença de faces polidas em materiais cerâmicos (pisos, azulejos, etc.), as quais interferem negativamente na resistência à compressão do concreto produzido. De acordo com o autor, blocos de concreto produzidos com entulho já são empregados por algumas prefeituras. O traço é o tradicional, considerando-se apenas a necessidade por uma quantidade mais elevada de água, em virtude da alta absorção do resíduo. Esse processo, embora eficiente, segundo apontam as pesquisas, precisam de estudos mais aprofundados acerca de alguns aspectos relacionados à durabilidade do concreto produzido.

Brito *et al.* (2001) recomendam a utilização do agregado reciclado na condição Saturado com Superfície Seca (SSS), para que o concreto produzido apresente resultados satisfatórios. Acerca da resistência à compressão, concretos com entulho são aproximadamente 20% menos resistentes que o concreto convencional, em certos traços adotados. Segundo os autores, apenas metade dos resíduos analisados demonstraram potencial de uso como agregados em concreto, mesmo assim sem função estrutural. O restante é preterido, uma vez que se constitui de uma fração de alvenaria (blocos cerâmicos e argamassas) superior a 50% da massa total, inviabilizando seu uso em grandes proporções.

De fato, as características do solo e dos resíduos se diferem de acordo com o local de origem. Neves *et al.* (2001) demonstraram a possibilidade de utilizar o agregado reciclado de entulho em tijolos de solo cimento na indústria da construção. A proporção adequada de substituição do solo saprolítico analisado por agregado reciclado para a fabricação desses tijolos com prensa manual se concentra na faixa de 50% a 75%. Deste modo, o estudo sugere que as proporções adequadas de RCC em relação ao solo empregado devem ser analisadas distintamente diante de cada caso.

Carneiro (2005) desenvolveu estudos que podem corroborar com a viabilidade da aplicação dos agregados provenientes da reciclagem dos RCC na confecção de blocos de concreto. Embora não seja preconizada sua utilização com função estrutural, as peças produzidas a partir dessa técnica tornam-se viável se forem fabricadas com um percentual de substituição de agregado natural por agregado reciclado em torno de 60% e submetidas à vibração por 30 segundos. Essas circunstâncias são impostas, principalmente, devido à presença de materiais cerâmicos no RCC, bem como pela incorporação de água na mistura, que surge quando o tempo de vibração é reduzido.

A incorporação de agregados reciclados de concreto também foi avaliada por Buttler *et al.* (2006), mais especificamente nas propriedades físicas e mecânicas de unidades e elementos de

alvenaria estrutural. O estudo consistia na comparação das peças obtidas com aquelas produzidas a partir de agregados naturais. Os elementos compostos por blocos com agregados reciclados não demonstraram diferenças representativas quanto às suas propriedades mecânicas em relação aos elementos produzidos com blocos comerciais.

Bastos *et al.* (2016) fabricaram blocos de concreto reciclados para vedação, avaliando além da viabilidade econômica e ambiental que a alternativa proporciona, a interferência do RCC nas propriedades do bloco. Foram encontrados resultados satisfatórios quanto à resistência à compressão e ao índice de umidade. No entanto, a absorção encontrada está acima dos parâmetros normativos, o que indica seu melhor aproveitamento para vedação de áreas internas.

### 2.3.10.3 Pavimento Permeável com Agregados Reciclados

A implementação do pavimento permeável como artifício de combate ao fenômeno de impermeabilização urbana vem ganhando destaque nas últimas décadas em todo o mundo. No Brasil, diversos estudos recentes envolvendo a utilização de resíduos reciclados em substituição a agregados de origem natural na fabricação de pavimentos permeáveis vêm sendo realizados (PINTO, 2011).

Pereira e Barbosa (2015) realizaram um estudo de composição de concreto permeável para fins de pavimentação urbana de tráfego leve, onde o agregado graúdo natural foi substituído por RCC. Foi demonstrado, portanto, que a utilização de agregado reciclado em concretos permeáveis para pavimentos de concreto de tráfego leve representa uma alternativa viável em substituição aos agregados naturais, sendo a mistura com 20% de RCC a que apresentou o melhor desempenho quanto aos parâmetros de resistência à compressão e condutividade hidráulica.

Tavares e Kazmierczak (2016) também estudaram a influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis. Entretanto, verificou-se que houve uma redução significativa na resistência à compressão nos locais onde foi realizada a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto. Isso se deve, possivelmente, ao surgimento de microfissuras na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento dos concretos com agregado reciclado, visualizadas por intermédio de microscopia eletrônica de varredura (Figura 18).

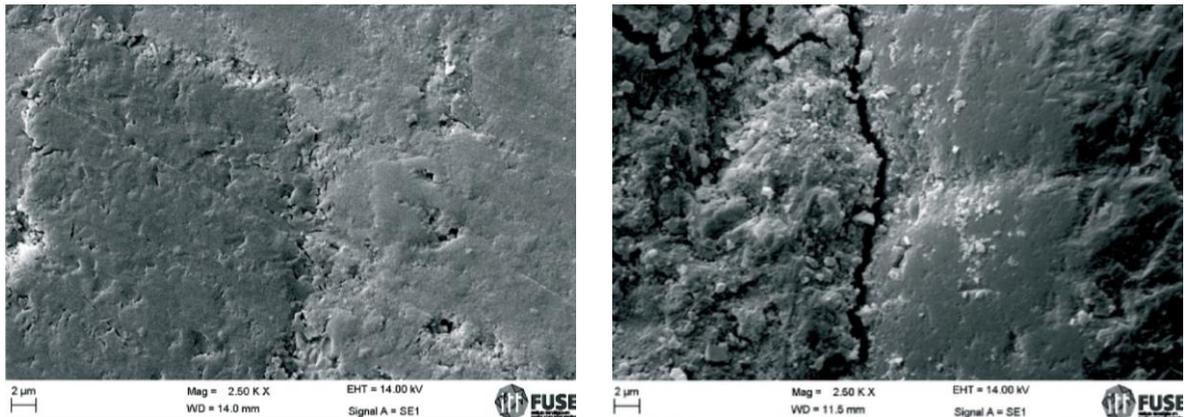


Figura 18 – Comparação da zona de transição entre a pasta de cimento nova e o agregado natural (esquerda) com a zona de transição entre a antiga matriz cimentícia e o agregado reciclado (direita). Mag. 2.500x.

(Fonte: Tavares e Kazmierczak, 2016)

O concreto, por via de regra, compõe-se de três fases: os agregados, a matriz cimentícia e as zonas de transição entre os agregados e a pasta. Segundo os autores, assim como ocorre com outros compósitos, a ligação entre dois ou mais componentes define as propriedades mecânicas do material, de modo que as zonas de transição (ou de interface) representam os locais de maior fragilidade do concreto. A incidência de quaisquer variações como o surgimento de fissuras ou o aumento da porosidade é capaz de provocar a perda de aderência entre as fases, afetando as propriedades mecânicas do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Ademais, Cabral (2007) elucida que a estrutura dos compósitos constituídos por agregados reciclados é mais complexa que o agregado natural, uma vez que dispõe de duas zonas de transição: uma entre o agregado e a nova matriz cimentícia e a outra entre o agregado e a matriz cimentícia anterior (Figura 19).

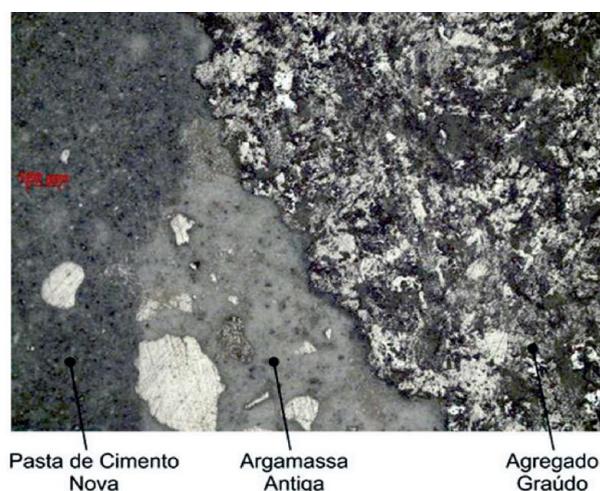


Figura 19 – Zonas de transição entre o agregado reciclado e as matrizes cimentícias. Mag. 5x.  
(Fonte: Tavares e Kazmierczak, 2016)

Conforme Tam *et al.* (2005), a antiga matriz cimentícia permanece na zona de transição do agregado reciclado formando uma ligação frágil, mais porosa e com pequenas fissuras, o que limita a resistência final do agregado reciclado. Esses poros e fissuras, por sua vez, tendem a intensificar o consumo de água na mistura, aumentando, portanto, a quantidade de água na zona de interface entre a nova matriz e o agregado reciclado.

Analisando as diferentes zonas de transição entre as fases – interfaces agregado/argamassa antiga, agregado/pasta de cimento nova e argamassa antiga/pasta de cimento nova – a nível microestrutural, Tavares e Kazmierczak (2016) constataram que, diferentemente das fissuras presentes entre a argamassa e o agregado, a zona de transição entre a argamassa antiga e a pasta de cimento nova apresenta boa aderência, em virtude, provavelmente, da penetração da pasta cimentícia nos “vazios” da argamassa pré-existente, caracterizados pelos poros e fissuras.

Alves (2016), comparando o comportamento do concreto permeável com diferentes percentuais de substituição do agregado gráudo natural por RCC, observou que o índice de vazios das amostras com resíduo é superior às amostras produzidas com agregado natural. De acordo com o autor, isso se deve à maior permeabilidade associada ao agregado reciclado, haja vista a superior taxa de absorção apresentada pelos resíduos, o que aumenta a porosidade do concreto. Esse fenômeno também se justifica pela acomodação diferenciada do resíduo reciclado relativamente ao agregado natural, o que proporcionaria a formação de maior quantidade de vazios e o conseqüente acréscimo da porosidade.

Finocchiaro e Girardi (2017) buscaram avaliar a utilização de agregado reciclado para a produção de concreto permeável comparando seus resultados aos obtidos a partir de agregado basáltico, utilizando-se de mesmo traço e distribuição granulométrica para ambos. Analisando seus comportamentos mecânicos e hidráulicos por meio de ensaios normatizados, foi ratificado o potencial de aplicação de resíduo reciclado na produção de concretos permeáveis devido à sua grande porosidade, mesmo com limitações quanto a resistência mecânica.

### 3 Materiais e Métodos de Ensaio

O programa experimental do presente trabalho utilizou como base as recomendações da NBR 16416 (ABNT, 2015c), a qual regulamenta o emprego de pavimentos permeáveis de concreto. Para os estudos de caracterização mecânica do concreto permeável, objeto principal desta pesquisa, foram preparadas, além das peças para revestimento intertravado e de amostras prismáticas previstas em norma, uma série de corpos de prova cilíndricos.

Estes CPs são empregados na avaliação do estudo de dosagem, na determinação de massa específica no estado endurecido e de outros índices que não são requisitos da norma de referência: resistência à compressão axial, módulo de elasticidade dinâmico e índice de vazios. Estes parâmetros, por sua vez, foram estabelecidos apenas a nível de comparação com outros trabalhos da literatura. Já exclusivamente para os ensaios hidráulicos, fabricaram-se placas de concreto permeável que também se adequam às especificações normativas.

As moldagens dos corpos de prova utilizados neste projeto foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Construção Civil da Faculdade de Engenharia, no Campus da Universidade Federal de Juiz de Fora. As instalações do local também foram disponibilizadas para a determinação de toda a caracterização física das amostras de concreto permeável (módulo de elasticidade dinâmico e massa específica nos estados fresco e endurecido), além da realização dos ensaios de resistência e permeabilidade.

Após a verificação das características físicas, mecânicas e hidráulicas das amostras obtidas a partir do estudo de dosagem, o concreto permeável constituído por agregados reciclados foi aplicado no revestimento de uma vaga de estacionamento experimental e de um segmento do passeio, disponibilizados pela Pró-Reitoria de Infraestrutura e Gestão, a fim de determinar os coeficientes de permeabilidade *in loco*, analisando-os comparativamente aos valores obtidos em laboratório.

#### 3.1 Caracterização dos Materiais

O concreto permeável é produzido a partir dos mesmos materiais que compõem o concreto de cimento Portland convencional (CCP). Distinguem-se, essencialmente, pela redução da quantidade de agregados miúdos ou até mesmo pela sua ausência, o que exige um controle visual mais intensivo, de modo a alcançar as propriedades almejadas do produto final (ACI, 2010).

De acordo com as referências literárias analisadas, a presença de agregados miúdos influencia diretamente na permeabilidade do concreto. Portanto, para o presente estudo, não foi adicionada areia de nenhuma granulometria à mistura. Do mesmo modo, optou-se pelo não beneficiamento do traço com aditivos, em vista da já mencionada dificuldade que a universidade apresenta em adquiri-los em pregões, mesmo que a incorporação desses produtos à composição do material seja prática frequente na produção de concretos dessa categoria. Finalmente, toda água utilizada é originária do abastecimento público da cidade de Juiz de Fora-MG.

Dentro da abordagem sistêmica acerca da sustentabilidade, a qual esta pesquisa se compromete, para o seu desenvolvimento foram empregados apenas materiais de construção encontrados na microrregião de estudo. Conceitualmente, essa proposta visa reduzir o consumo de recursos associado ao transporte, seja em valores energéticos (energia embutida) ou em relação à pegada de carbono do produto final, definida por Wiedmann e Minx (2008) como o índice de mensuração do impacto das atividades do homem sobre a natureza, a partir do total de dióxido de carbono (CO<sup>2</sup>) e outros gases do efeito estufa por elas emitidos.

### **3.1.1 Cimento**

Para a confecção do concreto estudado, selecionou-se o cimento CP V-ARI, produzido pela Companhia Nacional de Cimento, como aglomerante. Por se tratar de um cimento mais puro – apresenta maior percentual de clínquer em sua composição – e fino, exige um tempo de desforma menor em detrimentos aos demais. Segundo Kihara e Centurione (2005), cimentos desse tipo apresentam uma mistura diferenciada em virtude de sua dosagem singular de calcário e argila, seguida de um processo de moagem mais intenso. Deste modo, ao reagir com a água, o compósito consegue atingir elevadas resistências em um curto intervalo de tempo.

Essa rapidez na pega também é importante pois o concreto permeável, devido à sua elevada superfície exposta ao ar, tende a perder água da mistura mais rapidamente. A sua alta reatividade nas primeiras horas de aplicação do concreto auxilia, ainda, na redução do preenchimento dos poros durante a formação do conglomerado (HÖLTZ, 2011).

Na Tabela 6 são apresentadas as principais características do cimento empregado nesta pesquisa, disponibilizadas pela fabricante. O material, denominado pela Companhia Nacional de Cimento como CP V-ARI MAX, é proveniente da fábrica de Sete Lagoas em Minas Gerais, e atende à norma brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018b).

Tabela 6 – Propriedades químicas, físicas e mecânicas do Cimento Portland CP V-ARI.

<b>ENSAIOS QUÍMICOS</b>					
<b>Ensaio</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Un.</b>	<b>Desv. Pad.</b>	<b>Resultado</b>	<b>Exigências</b>
Resíduo Insolúvel – RI	ABNT NBR NM 15	%	0,1	0,8	≤ 3,5
Perda ao Fogo - PF	ABNT NBR NM 18	%	0,5	4	≤ 6,5
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NBR 14656	%	0,2	1,4	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	ABNT NBR 14656	%	0,2	3,2	≤ 4,5
Óxido de Sódio - Na <sub>2</sub> O	ABNT NBR 14656	%	0	0,07	não aplicável
Óxido de Potássio - K <sub>2</sub> O	ABNT NBR 14656	%	0,05	0,89	não aplicável
Equivalente Alcalino - Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	Na <sub>2</sub> O + 0,658*K <sub>2</sub> O	%	0,03	0,65	não aplicável
<b>ENSAIOS FÍSICOS</b>					
<b>Ensaio</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Un.</b>	<b>Desv. Pad.</b>	<b>Resultado</b>	<b>Exigências</b>
Área Específica (Blaine)	ABNT NBR 16372	cm <sup>2</sup> /g	61	4617	não aplicável
Massa Específica	ABNT NBR 16605	g/cm <sup>3</sup>		3,09	não aplicável
Finura pela peneira 75 µm	ABNT NBR 11579	%	0,1	0,5	≤ 6,0
Finura pela peneira 45 µm	ABNT NBR 9202	%	0,6	0,4	não aplicável
Água para obtenção da pasta de consistência normal	ABNT NBR 16606	%	0,5	30	não aplicável
Início de pega	ABNT NBR 16607	min	7	157	≥ 60
Fim de pega	ABNT NBR 16607	min	9	212	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582	min		0	≤ 5
<b>ENSAIOS MECÂNICOS</b>					
<b>Ensaio</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Un.</b>	<b>Desv. Pad.</b>	<b>Resultado</b>	<b>Exigências</b>
Resist. à Compressão - 1 dia	ABNT NBR 7215	MPa	0,9	30	≥ 14,0
Resist. à Compressão - 3 dias	ABNT NBR 7215	MPa	1	41,7	≥ 24,0
Resist. à Compressão - 7 dias	ABNT NBR 7215	MPa	1,1	46,4	≥ 34,0
Resist. à Compressão - 28 dias	ABNT NBR 7215	MPa	1,9	55,4	não aplicável

Fonte: Companhia Nacional de Cimento – Certificado de ensaios em cimento, julho, 2018.

### 3.1.2 Agregado Graúdo: Resíduo de Concreto

Como visto anteriormente, os RCC possuem, geralmente, forma sólida e irregular, além de serem dotados de propriedades físicas diversas, podendo inclusive se apresentar em dimensões e geometrias já conhecidas dos materiais de construção. Carneiro *et al.* (2001) afirmam que a maioria dos resíduos de construção é inerte, podendo, portanto, ser utilizada como alternativa viável aos agregados de origem natural.

Os agregados graúdos são os responsáveis por formar um esqueleto mineral resistente e estável nos concretos destinados à pavimentação. A particularidade deste trabalho quanto à composição do concreto permeável se dá justamente pela substituição total do agregado graúdo

convencional por uma parcela específica dos RCC: resíduos de concreto (Figura 20). Resíduos dessa categoria são classificados como classe A, segundo a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), ou como classe II B, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004a).



Figura 20 – Resíduo de concreto triturado.  
(Fonte: Autor, 2018)

Esse material, proveniente de obras de construção e demolição localizadas por toda a extensão do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora, foi coletado pela ProInfra, que também se responsabilizou pelo seu beneficiamento. Sua seleção não distinguia a função da estrutura original, de modo que poderia apresentar, portanto, concretos estruturais – ou não – em sua composição. Para o processo de britagem utilizou-se um triturador de mandíbula, seguido de separação granulométrica com auxílio de peneira vibratória automática (Figura 21).



(a)



(b)

Figura 21 – (a) Triturador de mandíbula; (b) Peneira vibratória automática.  
(Fonte: Autor, 2018)

Uma alternativa adotada por alguns autores envolve a separação do resíduo em faixas granulométricas distintas para posterior composição das misturas, enquanto outros, como Rizvi *et al.* (2010) e Berry *et al.* (2012), optam pela utilização de apenas uma faixa granulométrica. Para o atual trabalho, portanto, determinou-se o emprego exclusivo da faixa granulométrica referente à brita 1, ou seja, com material passante na peneira de 25 mm e retido na peneira de 9,5 mm, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009a). Entretanto, por se tratar de RCC, a granulometria do agregado tende a variar, visto que as partículas dos materiais se desagregam com maior facilidade.

As amostras de concreto submetidas aos ensaios laboratoriais foram confeccionadas a partir de 3 diferentes remessas de resíduos de concreto, oriundos de diversos locais distribuídos por todo o Campus da UFJF. A Tabela 7 descreve a análise granulométrica do material, realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003a). Considera-se que os resíduos possuem a mesma granulometria, visto que foram obtidos através dos mesmos processos de beneficiamento.

Tabela 7 – Análise granulométrica do resíduo de concreto estudado.

<b>ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (ABNT NBR NM 248:2003)</b>	
<b>Peneiras (mm)</b>	<b>% Retida Acumulada</b>
75	0
38	0
32	0
25	1
19	4
12,5	55
9,5	90
6,3	98
4,8	99
2,36	99
1,18	99
0,6	100
0,3	100
0,15	100
Fundo	100
Diâmetro máximo característico (mm)	19
Módulo de Finura	6,91

Fonte: Autor, 2018.

Por intermédio da curva e da distribuição granulométricas expostas nas Figuras 22 e 23, respectivamente, é possível observar a graduação uniforme apresentada pelo agregado reciclado, com diâmetro dos grãos predominantemente entre a faixa granulométrica selecionada (9,5 mm a 25 mm).

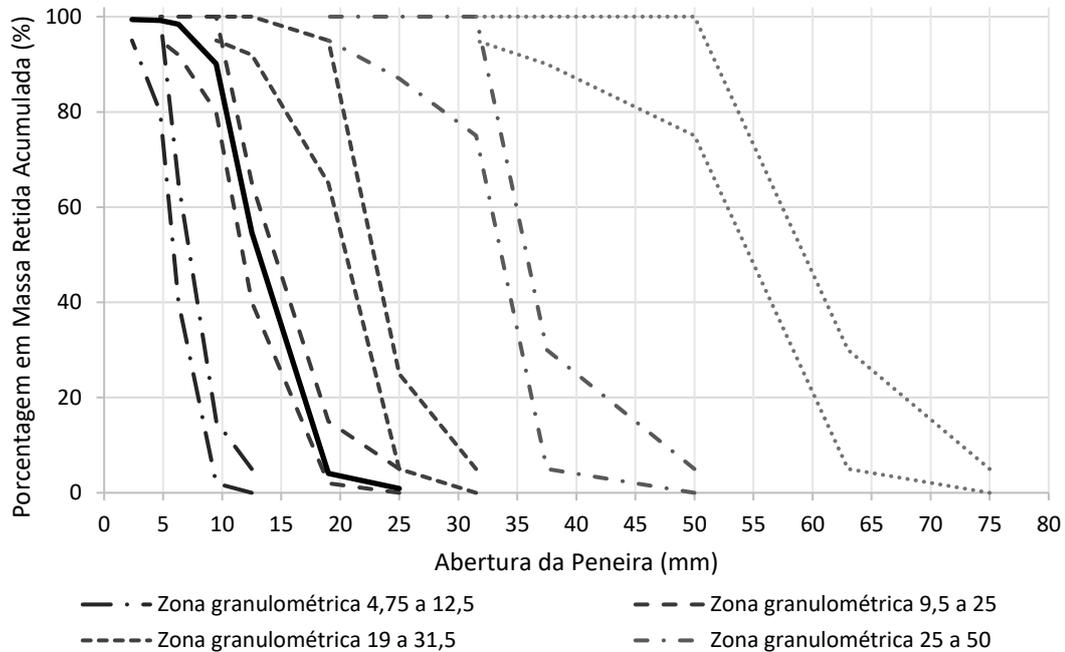


Figura 22 – Curva granulométrica do resíduo de concreto (ABNT NBR 7211:2009)  
(Fonte: Autor, 2018)

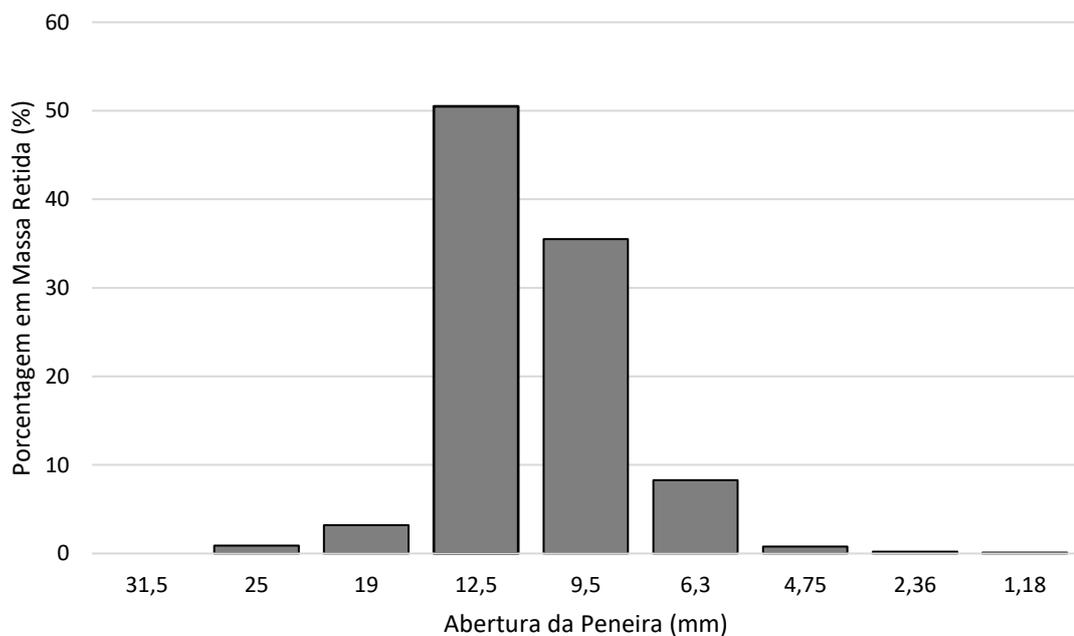


Figura 23 – Distribuição granulométrica do resíduo de concreto.  
(Fonte: Autor, 2018)

Os resultados encontrados a partir da realização dos ensaios complementares para caracterização física do material, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades físicas das amostras de resíduos.

<b>Caracterização Física</b>				
<b>Propriedade</b>	<b>Norma Utilizada</b>	<b>Amostra de Resíduo</b>		
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	ABNT NBR NM 53:2009	3,01	2,68	2,59
Absorção de água (%)	ABNT NBR NM 53:2009	3,9	3,8	4,9
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	ABNT NBR NM 45:2006	1,19	1,31	1,24
Teor de material pulverulento (%)	ABNT NBR NM 46:2003	0,3	0,6	0,4
Abrasão <i>Los Angeles</i> (%)	ABNT NBR NM 51:2001	38,8	48,5	46,4

Fonte: Autor, 2018.

Contudo, a elevada absorção apresentada pelos RCC, como avaliado anteriormente nesta pesquisa, representa um dos empecilhos associados à aplicação de resíduos na confecção do concreto, uma vez que intensifica a perda da água de amassamento do traço para o agregado reciclado. Vidal (2014) apresenta alternativas que minimizam esse fenômeno: o aumento da quantidade de água na mistura ou a realização da pré-umidificação do resíduo anterior à concretagem. De acordo com Leite (2001), essa pré-umidificação deve ocorrer no máximo até 10 minutos antes do início da concretagem.

Já a solução adotada por Rizvi *et al.* (2010) em seus estudos envolve a imersão do resíduo em água pelas 24 horas precedentes à concretagem, a fim de reduzir a ampla absorção da água de amassamento pelo material reciclado.

Compreende-se que a relação entre o fator *a/c* pode ser alterada à medida que se realiza a pré-saturação do resíduo (ALVES, 2016). Deste modo, visando mitigar os efeitos associados à maior absorção de água do resíduo em detrimento a brita e outros agregados convencionais, adotou-se uma ordem de mistura dos componentes do concreto permeável específica, baseada na revisão bibliográfica realizada, respeitando, porém, as particularidades do presente trabalho.

### **3.2 Metodologia de Dosagem**

A proporção dos materiais que compõe o concreto é definida por meio de experimentos e procedimentos de dosagem em laboratório, nos quais devem ser considerados os tipos de insumo disponíveis no local de produção. A razão cimento/agregado e o procedimento de compactação ou adensamento empregado na produção de concretos permeáveis representam

fatores de fundamental importância à mistura, já que possuem influência direta sobre as características mecânicas do material (ACI, 2010).

Como não há metodologias específicas para dosagem de concreto permeável normatizadas, este trabalho fundamentou-se, primeiramente, no desenvolvimento de um estudo de dosagem experimental, visando determinar, de modo racional, a melhor proporção dos constituintes do compósito. O estudo é resultado de análises compreendendo experiências anteriores, as quais atendem às recomendações da norma americana ACI 522R-10 (ACI, 2010) quanto aos parâmetros adequados à elaboração de traços para concretos permeáveis.

Essa metodologia de dosagem consiste, fundamentalmente, na determinação de um valor de massa específica para o concreto permeável baseado nas definições da NBR 8953 (ABNT, 2015b), que classifica como concreto leve aqueles que apresentam valores inferiores a  $2000 \text{ kg/m}^3$ , e, por conseguinte, encontrar a quantidade de massa de agregado graúdo e o consumo de cimento necessários à mistura. A ausência do agregado miúdo – que apresenta elevada superfície específica – na composição do material confere ao concreto uma redução acentuada da água necessária ao amassamento, fato que também influencia na densidade final do produto.

O presente estudo de dosagem, na realidade, teve seu início durante a década de 90, na própria UFJF, antes mesmo de se estabelecer o conceito de concreto permeável. Refere-se ao período em que o professor Antônio Eduardo Polisseni, coorientador deste trabalho, desenvolveu uma metodologia para construção de túmulos no cemitério municipal “Parque da Saudade” a partir de concreto sem finos, para drenagem do necrochorume. Contudo, não houve nenhuma divulgação técnica a respeito do estudo na época, de modo que se atribui tal responsabilidade a este trabalho.

As análises dimensionais e os ensaios realizados permitiram estabelecer um valor de referência para a massa específica do concreto:  $1600 \text{ kg/m}^3$ . Esse valor representa também o limite mínimo a ser especificado em projeto, segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015c). Já quanto ao fator água/cimento, adotou-se o valor de 0,35, estimado com base no elevado teor de absorção d'água esperado do resíduo a ser empregado na produção do compósito.

O último parâmetro fundamental considerado no cálculo do consumo de cimento trata-se da quantidade de vazios, cujo índice no concreto convencional gira em torno de 1% a 2% e no concreto permeável, que essencialmente é um material com maior porosidade, estima-se teores entre 15% e 35%, segundo estudos de Olek *et al.* (2003). No entanto, é importante considerar

no desenvolvimento da dosagem que quanto mais vazios houver em sua estrutura, menor será a resistência do concreto.

Depois de analisados todos os conceitos relevantes ao vigente trabalho, são utilizadas as fórmulas já consagradas quanto ao estudo de dosagem de concreto, apresentadas pelas Equações 2 e 3, adaptando-as à produção do concreto permeável, de acordo com as experiências advindas dos estudos prévios realizados pelo professor Polisseni.

$$C = \frac{1000 - \alpha}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{r}{\gamma_r} + x} \quad (2)$$

$$C = \frac{\gamma_{cp}}{r + (1 + x)} \quad (3)$$

Onde:

$C$  = consumo de cimento ( $\text{kg/m}^3$ );

$\gamma_c$  = massa específica do cimento ( $\text{g/cm}^3$ );

$\gamma_r$  = massa específica do agregado graúdo ( $\text{g/cm}^3$ );

$\alpha$  = volume de ar considerado (l);

$r$  = quantidade de agregado graúdo (kg);

$x$  = fator água/cimento (a/c);

$\gamma_{cp}$  = massa específica do concreto permeável ( $\text{kg/m}^3$ ).

Finalmente, considerando-se os parâmetros alusivos ao cimento CP V-ARI empregado e à primeira amostra de resíduo estudada como agregado graúdo ( $\gamma_c = 3,09 \text{ g/cm}^3$  e  $\gamma_r = 2,68 \text{ g/cm}^3$ ) e adotando-se o valor de 350 litros como volume de vazios, definiu-se o traço utilizado na confecção do concreto permeável: **1:3,780:0,35**, para um consumo de cimento ( $C$ ) de aproximadamente **312  $\text{kg/m}^3$** .

Quanto à resistência mecânica, definiu-se como critério de aceitação do concreto a resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) mínima de 15 MPa, avaliada através do ensaio de resistência à compressão axial, segundo as especificações da NBR 5739 (ABNT, 2018a). Adotou-se esse parâmetro a pedido da própria ProInfra, como forma de se estabelecer um controle interno simplificado, a partir de processos exequíveis diante do panorama apresentado pela instituição.

### 3.3 Procedimento de Mistura dos Materiais

Schaefer *et al.* (2006), analisando diferentes metodologias de mistura do concreto permeável para posterior confecção dos corpos de prova em laboratório, depreenderam que a ordem de mistura dos componentes tem grande influência sobre as características do produto final. Estabeleceram, portanto, uma metodologia que permitia ao material otimizar suas propriedades hidráulicas e mecânicas. Batezini (2013), em sua pesquisa, buscando beneficiar seu objeto de estudo, também adotou esse procedimento, o qual consistia, essencialmente, em adicionar todo o agregado na betoneira juntamente a uma pequena parcela do cimento, misturando-os por pouco tempo antes de inserir o restante do material à mistura. Essa metodologia envolvia, ainda, períodos intercalados entre mistura e repouso do concreto precedentes à moldagem dos corpos de prova.

Já Vidal (2014), com o intuito de reduzir os efeitos da absorção excessiva associada à parcela de agregado constituída por resíduos, valeu-se de uma sequência de mistura distinta. Após a inserção de todo o agregado graúdo, mistura-se, aproximadamente, 40% da água referente à taxa média de absorção do resíduo antes da adição do cimento, acrescentando o restante do material em seguida.

Entretanto, ainda não foi definida uma metodologia de ensaio normatizada para mistura de concreto permeável. Destarte, para a presente pesquisa, optou-se por adaptar a metodologia de preparo do concreto de acordo com a sua particularidade, na qual o agregado utilizado é composto em sua totalidade por resíduos:

- Lubrificação da betoneira com nata de cimento retirada do traço;
- Adição de todo agregado graúdo previamente umidificado;
- Adição do cimento e de parte da água;
- Primeiro ciclo de betonada;
- Conferência tátil-visual da mistura;
- Segundo ciclo de betonada;
- Adição gradual do restante da água até a consistência adequada;
- Nova conferência tátil-visual do concreto permeável.

Inicialmente, executou-se a pré-umidificação dos agregados reciclados até próxima à condição de saturado com superfície seca (SSS), a qual é visualizada na Figura 24.



Figura 24 – Pré-umidificação do agregado reciclado.  
(Fonte: Autor, 2018)

Em seguida, com o intuito de evitar perdas de material, adicionou-se à betoneira estacionária empregada uma nata de cimento (cujos materiais foram retirados do próprio traço) que serviria como lubrificante, em processo análogo ao realizado para concretos bombeáveis (Figura 25).



Figura 25 – Lubrificação da betoneira.  
(Fonte: Autor, 2018).

Posteriormente, foi inserido na betoneira todo o agregado graúdo, juntamente com o restante do cimento e da água, com exceção de 1 litro previamente separado para controle visual do fator  $a/c$ . Após alguns minutos de mistura, definidos empiricamente, a betoneira foi desligada para execução de análise tátil-visual, prosseguindo-se, em sequência, para mais um ciclo de betonada. O restante da água é, então, acrescentado paulatinamente até uma condição considerada satisfatória da mistura (Figura 26).



Figura 26 – Mistura dos materiais na betoneira.  
(Fonte: Autor, 2018)

Após esse período, desliga-se a betoneira, executando-se uma nova conferência tátil-visual, seguida da realização do ensaio de massa específica aparente no estado fresco, de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2008b) para controle tecnológico do concreto.

Segundo a literatura revisada, o concreto deve apresentar um aspecto brilhoso de maneira que as partículas estejam integralmente revestidas pela pasta de cimento. O teste tátil-visual, apresentado na Figura 27, também envolve a análise quanto à desagregação: ao se comprimir manualmente uma amostra da mistura em formato próximo ao esférico, as partículas devem se aglomerar, permanecendo-se dessa forma. Já acerca da massa específica aparente no estado fresco, dentre os concretos estudados encontram-se valores muito discrepantes, entre 1.300 kg/m<sup>3</sup>, para misturas com índices de vazios mais elevados, e 2.000 kg/m<sup>3</sup>, para misturas com menores índices de vazios. (BATEZINI, 2013).

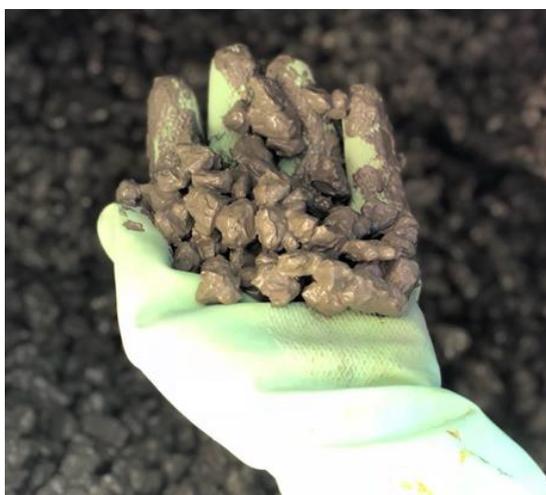


Figura 27 – Análise tátil-visual do concreto.  
(Fonte: Autor, 2018)

### 3.4 Moldagem dos Corpos de Prova

Para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos foram utilizados moldes fabricados em aço inoxidável, conforme as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015a). Também de aço inoxidável são os moldes empregados na produção das amostras prismáticas – também identificadas como “prismas” no presente estudo – de acordo com a NBR 12142 (ABNT, 2010) (Figura 28).



Figura 28 – Moldes para moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos.  
(Fonte: Autor, 2018)

Já as peças de concreto permeável para revestimento de pavimento intertravado, bem como as placas, foram produzidas a partir de formas fabricadas com compensado de madeira e revestidas com laminado melamínico para torná-las impermeáveis, evitando, assim, a perda de umidade da mistura (Figura 29).



Figura 29 – Formas para moldagem das peças e placas de concreto permeável.  
(Fonte: Autor, 2018)

A moldagem seguiu-se mediante adaptações de outros trabalhos às necessidades desta pesquisa. Devido à estrutura do concreto permeável, os corpos de prova foram divididos em camadas regulares, cujas espessuras foram definidas visualmente, de maneira empírica, de acordo com a altura total do CP. Com o auxílio de bastão metálico – para os CPs cilíndricos e prismáticos – e de soquete empregado em ensaios onde há moldagem de argamassa – para as peças e placas –, o concreto foi apenas acomodado na forma, de modo a garantir a aglomeração total das partículas. A Figura 30 apresenta os processos de adensamento realizados.



Figura 30 – Moldagem de prisma e placa de concreto permeável.  
(Fonte: Autor, 2018)

Essa metodologia é análoga à utilizada por Batezini (2013) que, por sua vez, baseou-se na pesquisa de Suleiman *et al.* (2006), os quais analisaram a influência da energia de compactação sobre as propriedades intrínsecas ao concreto permeável, visando majorar a resistência mecânica sem afetar a condutividade hidráulica do compósito.

Este método de adensamento foi adotado uma vez que, segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015c, p. 15), “o adensamento do concreto nos moldes deve reproduzir o adensamento previsto em campo”. Não foi realizada vibração em nenhum dos corpos de prova de concreto permeável confeccionados, a fim de evitar a segregação das partículas, além do próprio adensamento excessivo da pasta de cimento, o que ocasionaria o preenchimento indesejável dos vazios, interferindo na capacidade drenante das amostras de concreto.

Os corpos de prova foram, posteriormente, cobertos por panos úmidos e mantidos à saturação constante para impedir a perda de água da mistura, como demonstra a Figura 31. Devido à estrutura peculiar do concreto permeável, a água exsudada, essencial nas primeiras

horas após a concretagem, é escassa, o que requer atenção redobrada quanto a cura desse material.



Figura 31 – Cura inicial dos corpos de prova.  
(Fonte: Autor, 2018)

Portanto, em vista da possibilidade de as amostras não apresentarem estabilidade estrutural suficiente, estas não foram desmoldadas após 24 horas, como recomenda a NBR 5738 (ABNT, 2015a). Conservaram-se os CPs nos moldes durante os 3 dias seguintes à moldagem, antes de serem levados para a câmara úmida, onde permaneceram até os dias previamente estipulados para ensaio (Figura 32).



Figura 32 – Cura das amostras em câmara úmida: (a) peças, CPs cilíndricos e prismáticos em tanque d'água; (b) placas cobertas por panos úmidos em câmara úmida.  
(Fonte: Autor, 2018)

### 3.5 Dimensão e Amostragem dos Corpos de Prova

Tomaram-se como referência para avaliação, conforme os requisitos da NBR 16416 (ABNT, 2015c), os conjuntos constituídos por: peças de concreto permeável para pavimentação intertravada; placas de concreto permeável; além do próprio concreto permeável moldado *in loco*.

A norma determina, ainda, os valores de espessura mínima para os revestimentos permeáveis: para tráfego de pedestres, esse valor é limitado a 60 mm, independentemente do tipo; já para tráfego leve, os limites são de 80 mm, exceto para revestimentos de concreto moldado no local, onde a espessura mínima equivale a 100 mm.

Neste contexto, foram produzidas peças e placas com espessuras de 60 mm e 80 mm, referentes à utilização como revestimento de pavimento para tráfego de pedestres e tráfego leve, respectivamente. Definiu-se para as peças de concreto permeável uma dimensão nominal de 100 mm de largura por 200 mm de comprimento, seguindo as recomendações da NBR 9781 (ABNT, 2013).

Já as placas de concreto, as quais foram utilizadas no ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade, tiveram suas dimensões definidas de acordo com as restrições estabelecidas pela norma de referência deste trabalho. A NBR 16416 (ABNT, 2015c) limita a aplicação deste método de ensaio, quando da avaliação prévia em laboratório, a segmentos de pavimento com, no mínimo, 0,5 m<sup>2</sup> de área. Determinou-se, portanto, a elaboração de placas quadradas com 750 mm de lado.

A dimensão dos corpos de prova cilíndricos atende aos requisitos normativos descritos na NBR 5738 (ABNT, 2015a) e foi estipulada em 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Os CPs prismáticos ensaiados quanto à resistência à tração na flexão apresentam dimensões padrão de 150 x 150 x 500 mm, conforme preconiza a NBR 12142 (ABNT, 2010).

É importante salientar que, em função do elevado índice de vazios inerente a essa classe de concretos, associado à inserção de RCC na mistura, as amostras tendem a apresentar irregularidades superficiais, o que pode representar uma dispersão, ainda que irrelevante, dos resultados encontrados.

Quanto à amostragem adotada, foram moldados 16 corpos de prova cilíndricos, sendo 2 destes rompidos com 7 dias, 2 com 14 dias e, finalmente, os 12 restantes rompidos à idade de

28 dias. Acerca das amostras prismáticas, foram moldados 4 exemplares, os quais foram submetidos ao ensaio de determinação da resistência à tração na flexão aos 28 dias.

Dentre as peças de concreto permeável para revestimento de pavimento intertravado foram confeccionadas 15 amostras de cada espessura nominal estudada: 60 mm e 80 mm. Também foram moldados números iguais de placas de concreto para cada espessura: 3 placas, sendo todas elas submetidas a 2 ensaios de determinação de coeficiente de permeabilidade, adotando-se a média dos valores como resultado de referência de cada placa. A Tabela 9 apresenta a quantidade de corpos de prova ensaiados durante a etapa laboratorial deste estudo.

Tabela 9 – Amostragem dos corpos de prova.

Ensaio	Tipo de Corpo de prova					
	Cilíndrico	Prisma	Peça		Placa	
			6 cm	8 cm	6 cm	8 cm
Massa Específica no Estado Endurecido	12	-	15	15	-	-
Índice de Vazios	12	-	15	15	-	-
Resistência à Compressão Axial	16	-	-	-	-	-
Resistência à Tração na flexão	-	4	-	-	-	-
Resistência Característica à Compressão	-	-	15	15	-	-
Velocidade de Propagação de Ultrassom	12	-	-	-	-	-
Módulo de Elasticidade Dinâmico	12	-	-	-	-	-
Coefficiente de Permeabilidade	-	-	-	-	3	3

Fonte: Autor, 2018.

O planejamento experimental ainda envolveu o desmembramento da confecção dos artefatos em 4 dias, distintos entre si por 1 semana, de modo que todo o processo de produção perdurou por um mês. Na primeira concretagem foram produzidas as 15 peças para pavimentação intertravada com 60 mm de espessura, 1 prisma, 1 placa de 60 mm, além de 12 CPs cilíndricos, sendo 2 deles rompidos aos 14 dias e o restante aos 28 dias. A segunda concretagem deu origem a um novo prisma, às 2 placas remanescentes de 60 mm e a 4 CPs cilíndricos – 2 ensaiados aos 7 dias e 2 aos 28 dias –. Na terceira semana confeccionaram-se as 15 peças com 80 mm de altura, os outros 2 prismas faltantes e 1 placa com 80 mm de espessura. Finalmente, no último dia de concretagem, produziram-se as 2 placas de 80 mm restantes.

Toda concretagem realizada no decorrer do estudo foi sucedida da execução do ensaio de determinação da massa específica do concreto fresco, conforme designação normativa. Sobretudo as concretagens que integram os modelos reais, referentes à vaga experimental e às peças para revestimento intertravado, que vieram a ser empregadas na implantação do segmento de passeio produzido.

### 3.6 Ensaios Normativos Realizados

Conforme visto anteriormente neste capítulo, as metodologias de ensaio utilizadas para caracterização das propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto estudado foram adotadas a partir das referências normativas da NBR 16416 (ABNT, 2015c). Algumas adaptações tiveram que ser efetuadas em virtude das peculiaridades do atual trabalho associadas à presença de agregados reciclados.

Já os índices obtidos por meio de ensaios não previstos na referida norma foram realizados visando a uma análise mais abrangente acerca do concreto em si. Apesar desses critérios não representarem fatores limitantes ao emprego do material para uso em pavimentação, determiná-los permite caracterizar com maior profundidade o concreto permeável. Deste modo, tornam-se admissíveis comparações a concretos de naturezas distintas, além de conjecturas sobre eventuais empregos alternativos do produto estudado.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial obtidos, além de constituírem parâmetros para o estudo de dosagem, adequam-se, ainda, como referência para simplificar o controle tecnológico da concretagem *in loco*, estabelecendo-se uma relação estimada com os valores do ensaio de resistência à tração na flexão do concreto exigido em norma.

Calculou-se a massa específica no estado endurecido para todas as peças de concreto permeável, bem como para os corpos de prova cilíndricos, estes submetidos também ao ensaio de propagação de onda ultrassônica, cujos resultados foram empregados na determinação do módulo de elasticidade dinâmico. O coeficiente de permeabilidade de todas as placas confeccionadas foi estabelecido através do ensaio descrito na norma de referência da pesquisa. A respeito dos ensaios de resistência mecânica, definiram-se as resistências à compressão axial dos CPs cilíndricos, as resistências à compressão das peças para pavimentação intertravada e, finalmente, as resistências à tração na flexão dos prismas produzidos. Todos os ensaios pertinentes à elaboração deste trabalho foram desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construção da UFJF.

#### 3.6.1 Massa Específica no Estado Fresco

Toda concretagem realizada foi acompanhada do ensaio de determinação da massa específica do concreto no seu estado fresco. A norma de referência, NBR 16416 (ANBT,

2015c), apresenta a metodologia para execução do ensaio, a qual baseia-se nas recomendações da NBR 9833 (ABNT, 2008b).

O ensaio foi executado a partir da moldagem de um recipiente com capacidade de 5 dm<sup>3</sup> – cujas características são especificadas na NBR NM 47 (ABNT, 2002) – distribuída em duas camadas, aplicando-se 20 golpes por camada, com auxílio de soquete com peso e altura também estabelecidos pela norma. (Figura 33).



Figura 33 – Ensaio de determinação da massa específica do concreto permeável no estado fresco.

(Fonte: Autor, 2018)

Finalmente, o teste é concluído dividindo-se a massa de material obtida pelo volume do recipiente. Segundo Tennis *et al.* (2004), o concreto permeável no estado fresco exibe valores de massa específica 30% inferiores àqueles demonstrados pelos concretos convencionais.

### 3.6.2 Índice de Vazios e Massa Específica no Estado Endurecido

Os índices de vazios das amostras foram estabelecidos em laboratório através da obtenção da massa seca e da massa submersa de cada corpo de prova, com o auxílio de balança hidrostática. Os procedimentos para aferição desses parâmetros são apresentados nas Figuras 34 e 35:



Figura 34 – Determinação da massa seca das amostras.  
(Fonte: Autor, 2018)



Figura 35 – Determinação da massa submersa das amostras.  
(Fonte: Autor, 2018)

O cálculo do índice de vazios, baseado em Batezini (2013), é realizado a partir da equação que correlaciona os valores de massa de cada amostra ao seu respectivo volume (Equação 4). Estes parâmetros são também empregados na determinação da massa específica no estado endurecido, definida como a relação entre a massa de cada amostra seca e o seu volume total.

$$I_v = \left( 1 - \frac{M_{sec} - M_{sub}}{\gamma_a \cdot Vol} \right) \quad (4)$$

Onde:

$I_v$  = Índice de Vazios da amostra;

$M_{sec}$  = massa seca (Kg);

$M_{sub}$  = massa submersa (Kg);

$\gamma_a$  = massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ );

$Vol$  = volume da amostra ( $\text{m}^3$ ).

Os corpos de prova de concreto permeável, sobretudo aqueles compostos por resíduos reciclados, apresentam maior tendência de desagregação de partículas superficiais, especialmente em suas bordas. Em virtude dessa condição intrínseca a concretos dessa categoria, deve-se considerar a possibilidade de dispersão dos resultados de índices de vazios e de massa específica no estado endurecido, propriedades que relacionam o volume à massa de cada amostra.

### 3.6.3 Resistência à Compressão Axial

A aplicação deste ensaio tem por finalidade determinar a resistência à compressão axial do concreto permeável estudado de maneira análoga à técnica empregada no controle tecnológico do concreto tradicional. Para tanto, os procedimentos foram executados de acordo com o que recomenda a NBR 5739 (ABNT, 2018a).

Cada amostra, previamente pesada nas condições submersa e seca, foi posteriormente capeada (Figura 36), tendo seus topos retificados com uma fina pasta de cimento para distribuir uniformemente as tensões de compressão sobre sua superfície.



Figura 36 – Corpos de prova cilíndricos capeados.  
(Fonte: Autor, 2018)

Os ensaios foram realizados nas datas previstas em uma prensa eletro-hidráulica com capacidade de 100 T e resolução de 10 kgf, a qual pode ser conferida na Figura 37. A Figura 38 apresenta o CP cilíndrico antes e depois do seu rompimento.



Figura 37 – Prensa eletro-hidráulica utilizada nos ensaios mecânicos.  
(Fonte: Autor, 2018)

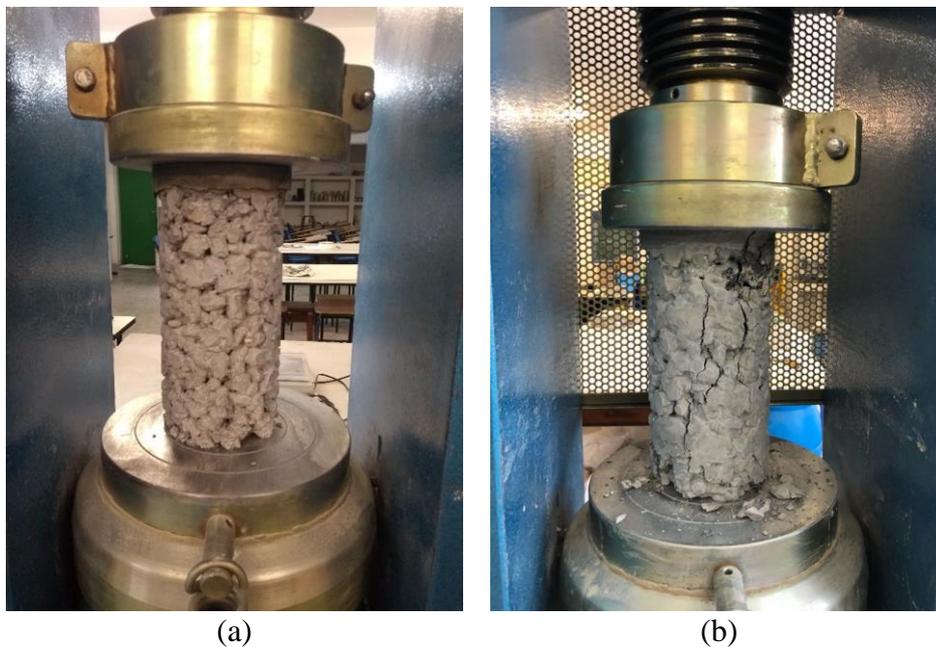


Figura 38 – Corpo de prova cilíndrico posicionado na prensa antes (a) e depois do rompimento (b).  
(Fonte: Autor, 2018)

Após a coleta dos dados e o devido descarte do material ensaiado, as tensões de ruptura à compressão foram, então, calculadas de acordo com a Equação 5:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \cdot D^2} \quad (5)$$

Onde:

$f_c$  = resistência à compressão (MPa);

$F$  = carga de ruptura (N);

$D$  = diâmetro do corpo de prova (mm).

### 3.6.4 Resistência à Tração na Flexão

Para o ensaio de determinação da resistência à tração na flexão foi utilizada a NBR 12142 (ABNT, 2010, p. 1) como referência normativa. O método de ensaio descrito nesta norma envolve o “princípio da viga simplesmente apoiada com duas forças concentradas nos terços do vão”.

Para tanto, são utilizados dois cutelos por onde a força incide nos corpos de prova prismáticos de concreto. A aplicação da força em 2 pontos equidistantes se dá pois, diferentemente dos ensaios onde se utiliza apenas um cutelo, não há uma predefinição da seção de ruptura. A amostra pode romper em qualquer posição no espaço entre os cutelos, onde o momento fletor incidido é o mesmo, indicando, portanto, a seção mais frágil do prisma. O posicionamento do conjunto para execução do ensaio é ilustrado na Figura 39:



Figura 39 – Ensaio de resistência à tração na flexão.  
(Fonte: Autor, 2018)

A fim de facilitar a visualização do terço onde ocorreu o rompimento, e ainda favorecer a centralização do corpo de prova no dispositivo de carregamento, foram traçadas linhas de referência nas faces dos CPs, como preconiza a norma aludida. O aspecto da ruptura pode ser identificado na Figura 40:



Figura 40 – Condição de corpo de prova prismático submetido ao ensaio de resistência à tração na flexão após o rompimento.  
(Fonte: Autor, 2018)

As amostras, curadas em câmara úmida, foram ensaiadas aos 28 dias, imediatamente após terem sido retiradas do tanque de água que as comportava. A prensa empregada neste procedimento é a mesma descrita no ensaio anterior.

Após a identificação da seção de rompimento da amostra, calculou-se a resistência à tração na flexão conforme a Equação 6:

$$f_{ct,f} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (6)$$

Onde:

$f_{ct,f}$  = resistência à tração na flexão (MPa);

$F$  = carga de ruptura (N);

$l$  = distância do vão entre os apoios (mm);

$b$  = largura média do corpo de prova (mm);

$d$  = altura média do corpo de prova (mm).

### 3.6.5 Resistência Característica à Compressão das Peças

As diretrizes para execução do presente ensaio são estabelecidas na NBR 9781 (ABNT, 2013), que apresenta as especificações e os métodos de ensaio relativos a peças de concreto para pavimentação.

As peças de concreto permeável foram retiradas da câmara úmida para serem pesadas nas condições submersa e seca. Assim como as demais amostras, foram capeadas com pasta de cimento para distribuir uniformemente as tensões de compressão sobre sua superfície retificada (Figura 41).



Figura 41 – Capeamento das peças de concreto permeável para pavimentação intertravada.  
(Fonte: Autor, 2018)

Em seguida, submeteram-se à saturação em tanque de água a 23 °C durante as 24 horas anteriores ao ensaio. Foram, enfim, ensaiadas aos 28 dias de idade quanto à resistência à compressão na prensa eletro-hidráulica disponível no Laboratório de Materiais de Construção, cujas características seguem as determinações exigidas pela norma.

A execução do procedimento em laboratório deve simular o esforço suportado pela peça durante o seu emprego enquanto pavimento. Basicamente, o ensaio consiste na aplicação de um carregamento contínuo sobre o corpo de prova até a ruptura completa da peça. Posiciona-se a amostra de modo que, quando estiver centrada, seu eixo coincida com o do dispositivo, fazendo com que a resultante das forças incida sobre o centro. Acoplam-se, pois, aos pratos inferior e superior da máquina de ensaio duas placas de aço auxiliares com 20 mm de espessura, para que seus eixos verticais permaneçam perfeitamente centralizados.

Por fim, obtém-se a resistência à compressão da peça, expressa em megapascals (MPa), a partir da divisão da carga de ruptura, expressa em newtons (N), pela área de carregamento, expressa em milímetros quadrados (mm<sup>2</sup>). Multiplica-se, então, o resultado encontrado pelo fator  $p$  (Tabela 10), correspondente à espessura nominal da peça. Segundo as especificações normativas, utilizou-se  $p = 0,95$  para as peças com 60 mm de espessura e  $p = 1,00$  para aquelas com espessura igual a 80 mm.

Tabela 10 – Fator multiplicativo  $p$ .

Espessura nominal da peça (mm)	$p$
60	0,95
80	1,00
100	1,05

Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013).

A norma preconiza, ainda, a determinação da resistência característica à compressão estimada ( $f_{pk, est}$ ), admitindo-se que as resistências à compressão obedecem à distribuição normal. Destarte, o resultado é obtido por intermédio da Equação 7:

$$f_{pk, est} = f_p - t \times s \quad (7)$$

Sendo  $s$  o desvio padrão (Equação 8):

$$s = \sqrt{\sum \frac{(f_p - f_{pi})^2}{n - 1}} \quad (8)$$

Onde:

$f_p$  = resistência média das peças (MPa);

$f_{pi}$  = resistência individual das peças (MPa);

$f_{pk, est}$  = resistência característica estimada à compressão (MPa);

$n$  = número de peças da amostra;

$s$  = desvio padrão da amostra (MPa);

$t$  = coeficiente de *Student*, dado em função do tamanho da amostra.

Através de interpolações entre os valores normativos descritos, obtiveram-se coeficientes de *Student*, a um nível de confiança de 80%, iguais a 0,873 e 0,868, referentes às peças de 60 mm ( $n = 13$ , desconsiderando os *outliers*, cujos critérios serão definidos no capítulo seguinte) e 80 mm de espessura ( $n = 15$ ), respectivamente.

### 3.6.6 Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica

Os parâmetros para a determinação da velocidade de propagação de ondas longitudinais obtidas por pulsos ultrassônicos atendem às orientações da NBR 8802 (ABNT, 2019). Além de correlacionada à definição das propriedades elásticas, essa característica é relevante, também, quanto à avaliação do grau de compactação do concreto e na detecção de eventuais falhas de concretagem (MALHOTRA e CARINO, 2004).

Para a sua obtenção, dispõe-se de transdutores eletroacústicos dotados de um transmissor de ondas vibratórias, com os quais mede-se o tempo de percurso do pulso pelo concreto. Segundo Malhotra e Carino (2004), o método se fundamenta a partir do princípio que relaciona a velocidade de propagação de um pulso de onda à densidade e às propriedades elásticas do meio pelo qual ela se propaga. O transdutor-emissor do instrumento emite um pulso de onda ultrassônica sobre a superfície do concreto, e à medida que o transdutor-receptor o recebe, de posse do tempo que a onda leva para percorrer o concreto e da distância entre os transdutores, determina-se a velocidade de propagação da onda.

O aparelho empregado na atual pesquisa para a realização do ensaio em questão já obtém automaticamente o valor da velocidade de propagação, bastando apenas inserir a distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores. Contudo, a Equação 9 representa o método de cálculo manual da velocidade descrito pela norma:

$$V = \frac{L}{T} \quad (9)$$

Onde:

$V$  = velocidade de propagação de onda (m/s);

$L$  = distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores (m);

$T$  = tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção (s).

Devido à sua relativa praticidade e por se tratar de um método de ensaio não destrutivo, sua aplicação é exequível em toda amostra de concreto confeccionada. Optou-se, portanto, pela execução do ensaio nos corpos de prova cilíndricos. Tendo os seus topos devidamente capeados, os CPs foram, então, submetidos ao ensaio, posicionando-se os transdutores – já com uma fina camada de acoplante – nas faces paralelas de cada amostra (transmissão direta), disposta de acordo com a Figura 42.



Figura 42 – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.  
(Fonte: Autor, 2018)

No entanto, os interstícios presentes no concreto permeável, que tornam sua estrutura descontínua, suscitam o questionamento quanto à relevância da aplicação deste ensaio na caracterização do material.

### 3.6.7 Módulo de Elasticidade Dinâmico

A análise do módulo de elasticidade dinâmico do concreto apresenta como critério a velocidade de propagação de onda ultrassônica no compósito. Sua metodologia se fundamenta no conceito básico de interdependência entre a velocidade de propagação de ondas longitudinais em um meio homogêneo e isotrópico e as constantes elásticas desse material. (BATEZINI, 2013). Essa relação é identificada pela Equação 10:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\gamma}} \quad (10)$$

Onde:

$V$  = velocidade de propagação de onda (m/s);

$E$  = módulo de elasticidade (MPa);

$\gamma$  = massa específica do material (MN/m<sup>3</sup>).

De posse da velocidade de propagação de onda ultrassônica e considerando-se as dimensões da amostra, faltaria apenas obter o coeficiente de Poisson do concreto para se estabelecer o módulo de elasticidade dinâmico. Baseando-se nos estudos de Goede (2009) sobre

concreto permeável, adotou-se, para este parâmetro, o valor de 0,22. Foi possível, portanto, calcular o módulo de elasticidade dinâmico por meio da Equação 11, apresentada por Komlos *et al.* (1996):

$$E_d = \gamma \cdot V^2 \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (11)$$

Onde:

$E_d$  = módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

$\gamma$  = massa específica do material (kg/m<sup>3</sup>);

$V$  = velocidade de propagação de onda (km/s);

$\nu$  = coeficiente de Poisson.

Essa fórmula se constitui a partir da norma americana C597 (ASTM, 2016) alusiva ao concreto, originalmente lançada em 1983. O procedimento é descrito de maneira análoga à adaptação do método à norma brasileira NBR 15630 (ABNT, 2008a), referente a argamassas.

### 3.6.8 Coeficiente de Permeabilidade

Dentre os dois métodos de ensaio admitidos pela NBR 16416 (ABNT, 2015c) para a avaliação do coeficiente de permeabilidade em laboratório, optou-se pelo descrito na própria norma. Além de sua praticidade em detrimento ao apresentado pela NBR 13292 (ABNT, 1995), a norma limita a realização de ensaios de permeabilidade em campo à técnica escolhida. Deste modo, pode-se executar o ensaio nas amostras em laboratório e diretamente nos modelos reais implementados, comparando posteriormente os resultados obtidos.

A realização deste teste envolveu a utilização de um cilindro vazado feito de aço galvanizado com 300 mm de diâmetro e 100 mm de altura, dotado de duas linhas de referência com distâncias de 10 mm e 15 mm em relação à face da inferior do anel. O pavimento deve ser limpo somente retirando-se os sedimentos que não estejam aderidos à sua estrutura.

O ensaio prossegue com o posicionamento do “anel de infiltração” no centro da placa a ser ensaiada, vedando com massa de calafetar a área de contato com o pavimento, como preconiza a norma, para evitar eventuais vazamentos superficiais e garantir a estanqueidade do procedimento. (Figura 43).

Figura 43 – Detalhe do anel de infiltração calafetado para a realização do ensaio de permeabilidade.  
(Fonte: Autor, 2018)

A partir da devida instalação do dispositivo sobre a placa, realizou-se a chamada pré-molhagem da amostra, em que são despejados 3,6 litros de água no interior do cilindro, buscando-se manter a lâmina de água constante entre as marcações de limite, enquanto o tempo decorrido de infiltração total da água é cronometrado.

Como todos os tempos obtidos foram inferiores a 30 segundos, utilizaram-se 18 litros de água na molhagem de cada placa (Figura 44), iniciada em até 2 minutos após a pré-molhagem, segundo especificação normativa. O tempo decorrido é, então, novamente cronometrado, concluindo o procedimento. Se algum tempo de pré-molhagem fosse superior a 30 segundos, a quantidade de água necessária para realização do ensaio se reduziria para 3,6 litros.



Figura 44 – Ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade.  
(Fonte: Autor, 2018)

Foi adotada, ainda, para o presente estudo, a repetição do ensaio no mesmo ponto, a qual é permitida pela norma, excetuando a necessidade de realização de novo procedimento de pré-molhagem. Para isso, o segundo procedimento de molhagem deve ser iniciado imediatamente após o primeiro, respeitando o intervalo máximo de 5 minutos. Considera-se, então, a média entre as duas determinações como resultado do ensaio.

A Figura 45 exibe o aspecto apresentado por uma das placas após a realização do ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade:



Figura 45 – Placa de concreto permeável após ensaio de determinação de coeficiente de permeabilidade.  
(Fonte: Autor, 2018)

Por fim, de posse dos tempos de infiltração aferidos adequadamente, calcula-se o coeficiente de permeabilidade conforme a Equação 12, apresentada pela NBR 16416 (ABNT, 2015c):

$$K = \frac{c_v \cdot m}{d^2 \cdot T} \quad (12)$$

Onde:

$K$  = coeficiente de permeabilidade (mm/h);

$m$  = massa de água infiltrada (kg);

$d$  = diâmetro interno do cilindro de infiltração (mm);

$T$  = tempo necessário para a percolação total da água (s);

$C_v$  = fator de conversão de unidades do sistema SI, com valor igual a 4 583 666 000.

### 3.7 Modelos Reais: Vaga e Passeio Experimentais

Para avaliação *in loco* das propriedades do material estudado, propôs-se a implantação de uma vaga experimental revestida por concreto permeável. Foi disponibilizada, portanto, uma área de 2,5 x 5,0 m do estacionamento usufruído pela ProInfra, localizada no próprio Campus da UFJF. Além da vaga destinada a tráfego leve de veículos, designou-se, também, uma área de aproximadamente 2 m<sup>2</sup> referente ao passeio desse estacionamento, reservada ao tráfego de pedestres, onde foram assentados exemplares das peças de concreto permeável elaboradas neste trabalho.

Buscou-se ao máximo atender às recomendações da NBR 16416 (ABNT, 2015c), adaptando os procedimentos às condições existentes e eventuais empecilhos. Contudo, a produção do material apresentou certo grau de empirismo, mediante as carências da instituição acerca da implementação de novos materiais.

Para tráfego leve, a norma prevê um revestimento com espessura de no mínimo 100 mm, tratando-se de concreto moldado no local. Já para tráfego de pedestres, as peças utilizadas devem apresentar espessura superior a 60 mm. Para as camadas inferiores, foram utilizados materiais pétreos de granulometria aberta, conforme especificação normativa.

De acordo com as características apresentadas pelo subleito (Tabela 11), foi adotado o sistema de drenagem parcial, onde uma pequena parte da água precipitada se infiltra pelo próprio solo. Contudo, a maior parte da água permanece temporariamente armazenada na estrutura permeável, sendo removida posteriormente pelo dreno instalado (Figura 46), ao qual foi dado um caimento de 2%.

Tabela 11 – Ensaio de Caracterização do Subleito.

ENSAIOS		
Densidade Máxima	1,557	g/dm <sup>3</sup>
Umidade Ótima	25,8	%
Índice Suporte Califórnia	3,7	%
Expansão	0,26	%

Fonte: Fundação Centro Tecnológico de Juiz de Fora, novembro, 2018.



Figura 46 – Dreno instalado na vaga experimental.  
(Fonte: Autor, 2018)

Após a retirada da amostra do solo para avaliação do material do subleito, iniciou-se a escavação da vaga para estacionamento. Além dos 10 cm definidos para a camada de revestimento, adotou-se uma espessura de 30 cm referente à camada de sub-base. Já quanto à área alusiva ao passeio, onde aplicou-se revestimento intertravado com peças de 60 mm de espessura, foi prevista uma camada de assentamento de 6 cm, como preconizado pela norma, juntamente à sub-base de 10 cm. A Figura 47 apresenta as camadas de sub-base já assentadas com o material preconizado pela norma:



Figura 47 – Assentamento das camadas de sub-base da vaga (a) e do passeio (b) experimentais.  
(Fonte: Autor, 2018)

Assentadas as camadas inferiores, procedeu-se à moldagem do revestimento de concreto permeável. A mistura dos materiais foi realizada manualmente (Figura 48), em vista da ausência de betoneira com capacidade suficiente para atender ao volume do traço.



Figura 48 – Mistura dos materiais realizada manualmente.  
(Fonte: Autor, 2018)

Visto que o concreto permeável apresenta baixa relação água/cimento e elevado índice de vazios, deve-se evitar a perda prematura de água do composto fresco, recém-aglomerado. Destarte, foi necessário que a superfície sobre a qual realizou-se a mistura dos materiais estivesse pré-umidificada (evitando-se excesso de água), para que não houvesse fuga de umidade da estrutura porosa do concreto. O que afetaria o processo de hidratação do cimento, ocasionando, por sua vez, a redução de sua resistência mecânica e durabilidade.

As peças para pavimentação intertravada foram produzidas previamente e posicionadas no mesmo dia em que se deu a concretagem da vaga. Foram utilizados os mesmos materiais estudados durante toda a pesquisa. Na Figura 49 são apresentadas a confecção das peças de concreto permeável bem como o seu assentamento no local especificado:



Figura 49 – Confecção (a) e assentamento (b) das peças de concreto permeável.  
(Fonte: Autor, 2018)

O concreto foi lançado diretamente com o carrinho de mão, espalhado pelo interior da vaga, adensado manualmente com o auxílio de colher de pedreiro e nivelado com sarrafo de madeira, de modo a apenas acomodar as partículas e regularizar a superfície (Figura 50). Não foram utilizados quaisquer equipamentos específicos para adensamento do compósito como régua vibratórias ou placas compactadoras.

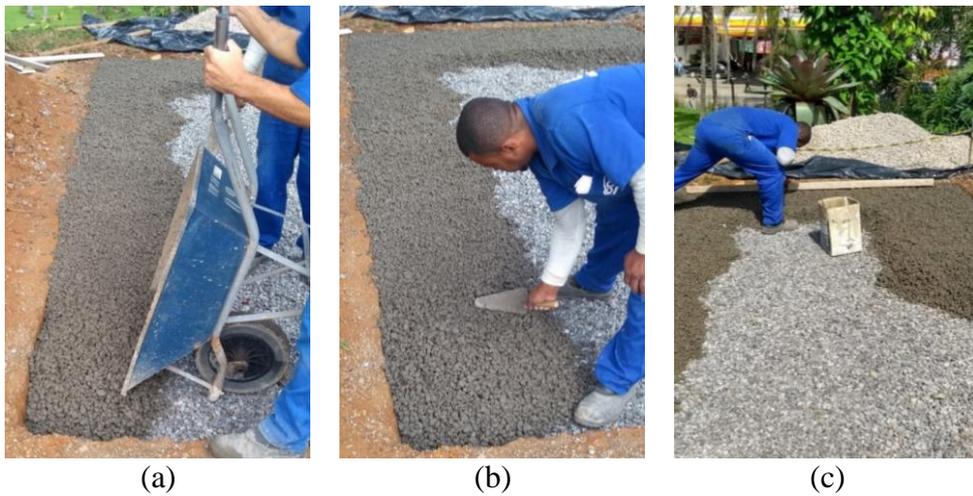


Figura 50 – Lançamento (a), adensamento (b) e nivelamento (c) do concreto permeável moldado *in loco*.  
(Fonte: Autor, 2018).

O resultado final da moldagem da vaga experimental, assim como o do segmento de passeio com pavimentação intertravada estão presentes na Figura 51:



Figura 51 – Vaga de estacionamento (a) e segmento de passeio intertravado (b) experimentais de concreto permeável produzido com agregado reciclado.  
(Fonte: Autor, 2018)

Haja vista que o concreto permeável possui retração menor que o concreto convencional, julgou-se dispensável a presença de juntas de movimentação. Batezini (2013) certifica que o

emprego de espaçamentos maiores entre as juntas representa uma prática frequente no que concerne a concretos permeáveis. Segundo Tennis *et al.* (2004), espaçamentos inferiores a treze metros já são suficientes para prevenção de trincas de retração. Considerando-se, inclusive, as especificações mais restritivas da *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA, 2004), que preconiza que as placas não excedam seis metros de comprimento, a ausência de juntas no presente trabalho é justificável.

Além dos ensaios de determinação da massa específica do concreto fresco para as peças do passeio e para a vaga do estacionamento, foram retiradas 2 amostras prismáticas para realização do ensaio de resistência à tração na flexão, conforme referência normativa. Devido à incapacidade de transportar os corpos de prova para uma câmara úmida, as amostras permaneceram no local da concretagem por 24 horas, até serem imersas em tanque d'água.

A cura do material moldado *in loco* consistiu, basicamente, no umedecimento do concreto em períodos regulares por funcionários da ProInfra, por 7 dias. Passado esse período inicial, realizaram-se, então, os ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade, tanto no concreto moldado diretamente na vaga experimental, quanto nas peças para pavimentação intertravada assentadas no passeio.

### 3.8 Resumo da Metodologia de Produção do Concreto Permeável

O fluxograma exibido na Tabela 12 sintetiza todas as etapas de produção do material elaborado neste trabalho. Contemplam-se desde o estudo de dosagem do concreto permeável exposto na Figura 52, até os ensaios realizados para caracterização do produto.

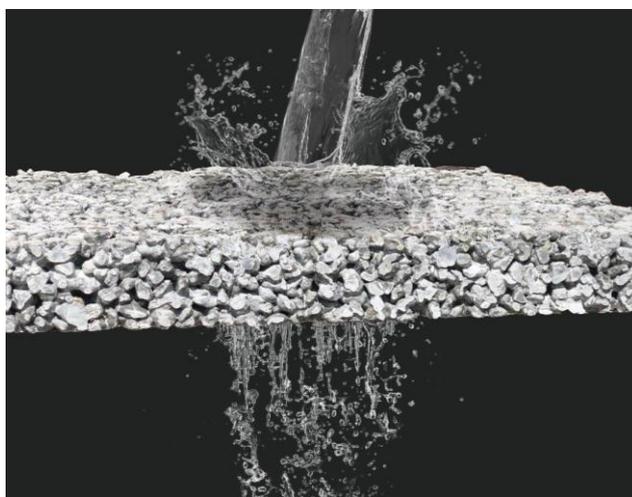


Figura 52 – Concreto permeável elaborado no estudo.  
(Fonte: Autor, 2018)

Tabela 12 – Fluxograma resumo da metodologia de produção do concreto permeável.

**1) Dosagem do concreto permeável com resíduo de concreto:**

- Equações de referência:  $C = \frac{1000-\alpha}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{r}{\gamma_r} + x}$  e  $C = \frac{\gamma_{cp}}{r+(1+x)}$ .
- Valores adotados:  $\alpha = 350$  l;  $\gamma_c = 3,09$  g/cm<sup>3</sup>;  $\gamma_r = 2,68$  g/cm<sup>3</sup>;  $x = 0,35$  e  $\gamma_{cp} = 1600$  kg/m<sup>3</sup>.
- Consumo de cimento obtido:  $C = 312$  kg/m<sup>3</sup>.
- Traço final: 1:3,780:0,35.

**2) Preparação do agregado graúdo:**

- Trituração do concreto coletado.
- Separação granulométrica (faixa granulométrica utilizada: entre 9,5 mm e 25 mm).
- Caracterização do resíduo de concreto obtido: massa específica real; absorção de água; massa unitária; teor de material pulverulento e abrasão *Los Angeles*.

**3) Mistura dos materiais:**

- Lubrificação da betoneira com nata de cimento.
- Adição do agregado graúdo previamente umidificado.
- Adição do cimento e de parte da água.
- Primeiro ciclo de betonada.
- Conferência tátil-visual da mistura.
- Segundo ciclo de betonada.
- Adição gradual do restante da água.
- Nova conferência tátil-visual do concreto permeável.
- Realização do ensaio de massa específica aparente no estado fresco.

**4) Moldagem dos artefatos:**

- Acomodação do concreto nas formas (em camadas regulares).

**5) Cura dos artefatos:**

- Durante 28 dias ou até a realização dos ensaios.

**6) Realização de ensaios normativos (para especificação do material em serviço):**

- Massa específica no estado endurecido; resistência à tração na flexão; resistência característica à compressão das peças e coeficiente de permeabilidade.

**7) (Facultativo) Realização de ensaios secundários (para caracterização técnica complementar do produto):**

- Índice de vazios; resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico.

## 4 Resultados e Análises

Neste capítulo, os resultados experimentais obtidos para cada parâmetro avaliado durante a pesquisa serão apresentados e discutidos com base na revisão bibliográfica realizada previamente. Os valores em vermelho, acompanhados de asterisco, não foram considerados no cálculo das médias apresentadas pois, segundo o método estatístico adotado, baseado na Amplitude Interquartil, descrito por Navidi (2015), esses dados consistem em “*outliers*”. Tal consideração deve-se à elevada dispersão destes dados em detrimento aos demais, o que se associa, principalmente, a prováveis equívocos na execução dos ensaios ou eventuais avarias nos corpos de prova.

Os ensaios realizados nos modelos reais (vaga e passeio experimentais) também serão analisados. Finalmente, avaliar-se-á com maior precisão a variabilidade dos resultados obtidos, juntamente às possíveis causas. Estas, por sua vez, relacionam-se, sobretudo, às diferentes amostras de resíduo adotadas, à falta de uma metodologia padrão de mistura, adensamento e moldagem, além da própria estrutura heterogênea do concreto permeável.

### 4.1 Massa Específica no Estado Fresco

Realizaram-se 6 concretagens ao longo de todo o trabalho. Além das 4 destinadas à confecção dos corpos de prova submetidos aos ensaios de caracterização do material, houve, ainda, as concretagens associadas aos modelos reais, que incluem a vaga e o segmento de passeio experimentais.

Como preconiza a NBR 16416 (ABNT, 2015c), toda concretagem foi seguida da obtenção da massa específica do concreto fresco, avaliada por método de ensaio de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2008b), cujos valores são exibidos na Tabela 13. Também são apresentados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados de massa específica do concreto fresco aferidos para todas as concretagens realizadas.

Tabela 13 – Resultados de massa específica no estado fresco, referentes à cada concretagem realizada, juntamente a média, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos.

Concretagem	Destinação	Massa Específica no Estado Fresco (kg/m <sup>3</sup> )
1	Ensaio de caracterização	1732,4
2		1702,4
3		1647,0
4		1681,8
5	Peças do passeio	1678,4
6	Vaga do estacionamento	1622,6
Média		1677,4
Desvio Padrão		38,98
Coeficiente de Variação (%)		2,32

Fonte: Autor, 2018.

Verifica-se que, à medida que a metodologia de produção do concreto permeável com resíduos foi sendo “calibrada”, ou seja, ajustada de acordo com as necessidades do presente trabalho (incluindo a variabilidade dos resíduos e dos processos de adensamento), os resultados foram se aproximando do valor especificado durante o estudo de dosagem (1600 kg/m<sup>3</sup>).

## 4.2 Massa Específica no Estado Endurecido e Índice de Vazios

Os valores individuais referentes à massa específica no estado endurecido e ao índice de vazios obtidos através dos ensaios realizados tanto nos corpos de prova cilíndricos, rompidos aos 28 dias, quanto nas peças para pavimentação intertravada com 60 e 80 mm de espessura apresentam-se, respectivamente, nas Tabelas 14, 15 e 16. Essas tabelas identificam, ainda, a amostra de resíduo de concreto da qual beneficiou-se cada CP. Já a Tabela 17 expõe a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados alusivos a cada tipo de corpo de prova ensaiado.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de massa específica no estado endurecido e índice de vazios referentes aos CPs cilíndricos.

<b>Corpos de Prova Cilíndricos</b>		
<b>Amostra de Resíduo</b>	<b>Massa Específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Índice de Vazios (%)</b>
1	1873,5	20,65
	1944,7	17,14
	1922,0	22,78
	2006,4	13,97
	1938,1	16,88
	1885,9	32,02
	1821,3	25,03
	1886,3	27,74
	1787,9	33,67
	<b>2114,1*</b>	35,19
2	1755,0	27,97
	1916,7	17,35

**Outlier\***

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 15 – Resultados dos ensaios de massa específica no estado endurecido e índice de vazios referentes às peças de 60 mm de espessura.

<b>Peças de Concreto Permeável (60 mm de espessura)</b>			
<b>Amostra de Resíduo</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Massa Específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Índice de Vazios (%)</b>
1	60	2175,3	24,83
		1893,2	31,61
		2059,8	28,04
		2070,9	11,16
		1901,4	18,85
		1933,4	18,58
		1983,5	15,26
		2020,0	13,55
		1906,4	19,61
		2059,6	14,32
		1996,1	14,76
		1818,4	29,73
		2000,8	14,57
		2101,8	10,32
		2178,0	28,30

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 16 – Resultados dos ensaios de massa específica no estado endurecido e índice de vazios referentes às peças de 80 mm de espessura.

<b>Peças de Concreto Permeável (80 mm de espessura)</b>			
<b>Amostra de Resíduo</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Massa Específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Índice de Vazios (%)</b>
3	80	1713,3	27,36
		1859,3	16,88
		1891,4	16,64
		<b>1629,8*</b>	31,19
		1703,8	26,98
		1878,7	16,56
		1794,5	19,85
		1924,4	15,08
		1918,1	14,23
		1779,3	22,71
		1820,9	20,60
		1914,8	21,56
		1973,8	13,15
		1937,5	15,03
1864,1	18,77		

*Outlier\**

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 17 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados dos ensaios de massa específica no estado endurecido e índice de vazios.

<b>Dados</b>	<b>Massa Específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>			<b>Índices de Vazios (%)</b>		
	<b>Cilíndrico</b>	<b>Peça</b>		<b>Cilíndrico</b>	<b>Peça</b>	
		<b>60 mm</b>	<b>80 mm</b>		<b>60 mm</b>	<b>80 mm</b>
Média	1885,3	2006,6	1855,3	24,20	19,56	19,77
Desvio Padrão	73,49	104,28	82,63	7,19	7,13	5,35
Coeficiente de Variação (%)	3,90	5,20	4,45	29,71	36,46	27,07

Fonte: Autor, 2018.

Verifica-se determinada congruência entre os resultados de massa específica e índice de vazios encontrados no presente estudo com os valores comumente obtidos para concretos permeáveis, avaliados previamente na revisão bibliográfica.

Analisando-se brevemente os parâmetros quanto à dosagem, primeiramente acerca da massa específica no estado endurecido, cuja literatura demonstra valores entre 1600 kg/m<sup>3</sup> e 2000 kg/m<sup>3</sup>, a média dos resultados obtida para os corpos de prova cilíndricos supera em 18% o valor estabelecido no cálculo do traço. Valor este que representa o limite inferior tanto da faixa descrita na revisão bibliográfica quanto da norma na qual esta pesquisa se baseia: 1600 kg/m<sup>3</sup>. Por sua vez, as peças para pavimentação intertravada, respectivamente às espessuras de

60 e 80 mm, apresentam médias 25% e 16% superiores ao valor estipulado como referência de dosagem.

Essa discrepância entre os diferentes tipos de corpos de prova deve-se, principalmente, à diferença entre o volume de vazios considerado na dosagem e o que foi efetivamente obtido a partir da realização dos ensaios. Cabe ressaltar a dependência dos valores de massa específica e índice de vazios aos materiais utilizados na mistura e aos procedimentos de compactação ou adensamento do concreto empregados. A variabilidade dos resultados será abordada com maior profundidade posteriormente, ainda neste capítulo.

Para verificar se de fato há uma diferença significativa entre as médias dos resultados e se os fatores abordados exercem influência sobre os valores obtidos, foi necessário estabelecer uma análise de variância da amostragem, também denominada ANOVA (Analysis of Variance). A ANOVA representa uma técnica estatística empregada na avaliação de afirmações acerca das médias de populações.

Os resultados dos ensaios foram submetidos, portanto, à uma análise de variância, conforme Navidi (2015), sendo possível identificar a existência de diferenças significativas entre os valores de massa específica no estado endurecido referentes às peças de 60 mm em detrimento às demais. Os índices de vazios encontrados, por sua vez, representam, estatisticamente, a mesma população, independentemente do tipo de corpo de prova.

Ainda acerca do índice de vazios, não obstante a divergência entre os autores sobre o limite superior deste parâmetro para concretos permeáveis, o qual pode variar entre 15% a 25% (TENNIS et al., 2004), 30% (BATEZINI, 2013) ou 35% (OLEK *et al.*, 2003), os índices encontrados se aproximam de 20%, indicado por Tennis *et al.* (2004) como valor ótimo entre resistência e permeabilidade.

Os coeficientes de variação alusivos aos ensaios de determinação de massa específica são baixos, o que denota, mesmo diante dos empecilhos encontrados durante os processos de concretagem, moldagem e adensamento dos corpos de prova, satisfatória qualidade da produção dos corpos de prova. Quanto aos coeficientes obtidos a partir da determinação do índice de vazios, já se esperavam valores elevados em virtude da descontinuidade de massa associada ao material deste estudo, o qual envolve a adoção de resíduos na confecção de concreto permeável.

Avaliaram-se, ainda, outros dois parâmetros físicos do material: a massa específica real e a absorção, de acordo com especificações da norma brasileira NBR 9778 (ABNT, 2009). Entretanto, não foram obtidos resultados relevantes à proposta do trabalho. A média dos valores

de massa específica real encontrados se aproxima a  $2400 \text{ kg/m}^3$ , que segundo Helene e Andrade (2010), representa o valor característico dos concretos convencionais. Como para tal determinação desconsidera-se o volume de vazios do compósito, é natural que sejam encontrados resultados análogos para os diferentes tipos de concreto.

A respeito da absorção de água, obtiveram-se índices em torno de 2%, muito inferiores ao limite determinado pela NBR 9781 (ABNT, 2013), onde o valor médio deve ser menor ou igual a 6%. A presença dos interstícios por efeito da escassez de material fino na composição do concreto permeável dificulta a penetração de água por capilaridade em seus poros.

### 4.3 Resistência à Compressão Axial

A Tabela 18 apresenta os resultados de resistência à compressão axial de todos os 16 corpos de prova cilíndricos moldados na pesquisa, subdivididos quanto à idade de rompimento: 7, 14 e 28 dias; e quanto à amostra de resíduo utilizada em sua produção: 1 e 2. A média dos valores pertinentes aos CPs ensaiados aos 28 dias – incluindo as duas amostras de resíduo – é apresentada na Tabela 19, juntamente aos respectivos desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 18 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial.

<b>Corpos de Prova Cilíndricos</b>		
<b>Resistência à Compressão Axial (MPa)</b>		
<b>Idade do Ensaio (dias)</b>	<b>Amostra de Resíduo</b>	
	<b>1</b>	<b>2</b>
7	—	7,43
	—	8,85
14	15,93	—
	11,85	
28	15,80	12,36
	16,49	
	17,93	
	22,95	
	17,57	
	18,39	18,90
	20,85	
	15,25	
	<b>7,39*</b>	
	<b>26,70*</b>	

**Outlier\***

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 19 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias.

<b>Dados</b>	<b>Resistência à Compressão Axial (MPa)</b>
Média	17,65
Desvio Padrão	2,96
Coeficiente de Variação (%)	16,79

Fonte: Autor, 2018.

Analisando o conteúdo das tabelas anteriores (Tabelas 18 e 19), é possível observar uma variação considerável entre os resultados advindos de amostras de resíduo distintas e até mesmo entre os CPs produzidos pelo mesmo resíduo, corroborada pelo coeficiente de variação obtido: 16,79%.

Contudo, mesmo com essa discrepância entre os valores, associada à variabilidade dos agregados reciclados e à própria natureza anisotrópica dos concretos permeáveis, os resultados de resistência à compressão alcançados se adequam satisfatoriamente à faixa de valores correspondente a concretos permeáveis: 3,5 a 28 MPa. De fato, os valores atingidos superaram as expectativas, uma vez que, além de atenderem ao  $f_{ck}$  de referência adotado no estudo (15 MPa), considerando-se a utilização de resíduos de concreto na composição do material, estão mais próximos do limite superior da faixa de resistência apurada no capítulo de revisão bibliográfica.

O desempenho do presente estudo é ainda mais notável quando comparado aos resultados de trabalhos anteriores quanto à resistência à compressão. Goede (2009), executando ensaios de resistência à compressão de amostras cilíndricas de concreto permeável com índices de vazios variando entre 26% e 28%, encontrou valores próximos a 10 MPa. Já os resultados alcançados por Batezini (2013) em sua pesquisa variavam entre 6,02 MPa e 10,17 MPa, com um índice de vazios médio de aproximadamente 25%.

Vale ressaltar que nos trabalhos citados foram utilizados apenas agregados naturais de origem pétreo. Tavares e Kazmierczak (2016), por sua vez, avaliaram a influência da utilização de diferentes composições de agregados graúdos reciclados de concreto em concretos permeáveis. Os valores médios de resistência à compressão obtidos variaram de 11,10 MPa e 23,43 MPa. Os valores mínimos são alusivos ao emprego de misturas com 50% de agregado reciclado juntamente ao natural; já os maiores valores referem-se a uma mistura com 100% de agregado reciclado, acrescida, no entanto, de fibra de vidro, com o intuito de otimizar as propriedades mecânicas do compósito.

Bhutta *et al.* (2013) e Vidal (2014) também analisaram a substituição do agregado natural por resíduos em concretos permeáveis. Enquanto o mais recente obteve valores entre 7,0 e 10,8 MPa, Bhutta *et al.* (2013), comparando o comportamento do agregado natural ao do reciclado, constatou uma redução da resistência à medida que se aumenta o percentual de substituição do agregado de origem pétreo. Esse efeito, também observado por Alves (2016), que obteve resultados entre 9,1 e 16,6 MPa, manifesta-se, sobretudo, em decorrência do aumento do número de vazios do concreto, além da provável redução da interface entre a pasta de cimento e o agregado reciclado, avaliada na revisão bibliográfica.

#### 4.4 Resistência à Tração na Flexão

Os resultados dos ensaios de determinação de resistência à tração na flexão, realizados aos 28 dias, aos quais foram submetidos os 4 corpos de prova prismáticos compostos pelas 3 diferentes amostras de resíduos utilizadas durante o estudo, são exibidos na Tabela 20. Ela também apresenta, além da média, o desvio padrão e o coeficiente de variação desses resultados.

Tabela 20 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão aos 28 dias.

<b>Corpos de Prova Prismáticos (Prismas)</b>	
<b>Amostra</b>	<b>Resistência à Tração na Flexão (MPa)</b>
1	2,24
2	2,24
3	2,14
	2,01
Média	2,08
Desvio Padrão	0,09
Coeficiente de Variação (%)	4,45

Fonte: Autor, 2018.

Apesar de terem sido produzidos com agregados distintos, que demonstraram nessa pesquisa ter grande influência sobre a variação das propriedades físicas e mecânicas do concreto, identificou-se um padrão de ruptura apresentado pelos prismas: em todas as oportunidades o rompimento ocorreu no terço médio da seção longitudinal, que representa o segmento de momento fletor máximo.

Todos os valores obtidos atendem à especificação mínima quanto à resistência mecânica característica, definida pela NBR16416 (ABNT, 2015), para revestimento de pavimento de

concreto permeável moldado no local. A norma limita a determinação da resistência à tração na flexão a valores superiores a 2 MPa para tráfego leve de veículos.

Todavia, Batezini (2013) afirma ser comum a adoção de placas de concreto convencional com resistências à tração na flexão variando entre 4,5 e 5,0 MPa em projetos rodoviários no Brasil. Essa restrição do concreto permeável quanto à intensidade do tráfego deve-se, especialmente, aos limites inferiores de resistência mecânica em detrimento àqueles alcançados pelo CCP.

Para a aplicação a níveis de tráfego mais elevados de concretos cujos índices de resistência são naturalmente reduzidos, incluindo o concreto permeável, seria necessária a implementação de revestimentos com espessuras inexequíveis, o que inviabilizaria a construção do pavimento.

#### **4.5 Resistência Característica à Compressão das Peças**

Os valores referentes às peças de concreto permeável para pavimentação intertravada, com 60 e 80 mm de espessura, ensaiadas quanto à resistência à compressão aos 28 dias, são apresentados na Tabela 21. Esta tabela traz, ainda, juntamente à média, desvio padrão e coeficiente de variação, a resistência característica à compressão estimada, determinada a partir da equação preconizada pela NBR 9781 (ABNT, 2013), que envolve o coeficiente de *Student* em função do tamanho da amostra.

Tabela 21 – Resultados dos ensaios de resistência característica à compressão aos 28 dias.

<b>Peças de Concreto Permeável</b>		
<b>Amostra de Resíduo</b>	<b>1</b>	<b>3</b>
<b>Espessura (mm)</b>	<b>60</b>	<b>80</b>
Resistência à Compressão (MPa)	<b>39,20*</b>	14,04
	17,90	19,40
	27,36	22,03
	29,16	16,49
	21,29	11,59
	23,51	19,29
	22,28	23,23
	32,17	21,24
	24,01	29,73
	<b>37,07*</b>	13,06
	21,04	15,66
	22,85	22,70
	18,74	24,91
	28,68	22,48
	22,76	17,75
Média	23,98	19,57
Desvio Padrão	4,22	4,91
Coefficiente de Variação (%)	17,60	25,07
$f_{pk, est}$	20,30	15,32

**Outlier\***

Fonte: Autor, 2018.

A NBR 16416 (ABNT, 2015c) limita a resistência à compressão a valores superiores a 20 MPa para revestimento de pavimento constituído por peças de concreto permeável, seja para tráfego de pedestres, cuja espessura mínima é de 60 mm, ou para tráfego leve, este com espessura mínima de 80 mm. Constata-se, portanto, que, mesmo apresentando maior espessura nominal, as peças de 80 mm se mostraram menos resistentes quanto à compressão, não atendendo aos requisitos especificados em norma.

Em contrapartida, as peças menores alcançaram valores satisfatórios de resistência, permanecendo dentro do limite normativo. Esse fenômeno associa-se, entre outros aspectos, à variabilidade das propriedades das diferentes amostras de resíduo de concreto que compõem as peças. Especialmente em relação ao índice de abrasão *Los Angeles* do agregado, intimamente atrelado à resistência mecânica do compósito.

Finalmente, haja vista os valores consideráveis de coeficiente de variação encontrados, verifica-se a presença de significativa dispersão nos resultados individuais obtidos para cada corpo de prova, corroborada pela análise de variância realizada. Ela demonstrou que, de fato,

os valores encontrados não correspondem ao mesmo lote. Essas divergências devem-se, sobretudo, à heterogeneidade intrínseca ao concreto permeável, intensificada pela presença dos agregados reciclados, além das eventuais variações do processo de acomodação das partículas, em virtude da ausência de metodologias padronizadas de moldagem e adensamento do concreto permeável.

#### 4.6 Módulo de Elasticidade Dinâmico

Na Tabela 22 apresentam-se os resultados de módulo de elasticidade dinâmico relativos a cada corpo de prova cilíndrico cujo rompimento se deu aos 28 dias, submetido ao ensaio de determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica. A média de todos os valores assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação obtidos para os CPs correspondentes são expostos em seguida.

Tabela 22 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico.

Corpos de Prova Cilíndricos	
Amostra de Resíduo	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	16,18
	10,99
	15,56
	15,29
	14,38
	<b>4,28*</b>
	12,78
	12,13
	12,99
	<b>21,53*</b>
2	11,71
	12,06
Média	13,41
Desvio Padrão	1,812
Coeficiente de Variação (%)	13,52

**Outlier\***

Fonte: Autor, 2018.

Devido à sua composição naturalmente porosa, espera-se que o módulo de elasticidade dinâmico do concreto permeável alcance valores inferiores aos obtidos pelos concretos convencionais que, segundo Batezini (2013), são da ordem de 28 GPa. Analisando-se, pois, os valores do presente trabalho, observa-se que a média encontrada representa menos da metade

do módulo de elasticidade definido para o CCP. Isso se deve ao maior índice de vazios inerente a materiais permeáveis que reduzem a velocidade de propagação de ultrassom, uma vez que, por se tratar de uma onda mecânica, se propaga melhor num meio mais denso. Logo, quanto maior o índice de vazios do concreto, menor será seu módulo de elasticidade dinâmico.

Já comparando-se os resultados da atual pesquisa àqueles encontrados pelo próprio Batezini (2013) em seu estudo sobre concretos permeáveis, que giram entre 23 MPa e 24 GPa, salvo eventuais variações na execução do ensaio ou diferenças técnicas entre os aparelhos utilizados, tem-se que os módulos de elasticidade obtidos para os concretos compostos por agregados reciclados correspondem a apenas 57%, aproximadamente, da média referente aos compósitos produzidos com agregados naturais. Esse comportamento é esclarecido justamente pela presença dos resíduos de concreto na composição do material, que demonstraram maior taxa de absorção de água quando comparados aos agregados convencionais, apresentando, conseqüentemente, maior porosidade.

Mesmo com a obtenção de resultados coerentes acerca deste parâmetro, em virtude da composição não homogênea do concreto permeável, onde não há continuidade de massa e os vazios não são controlados, a determinação do módulo de elasticidade dinâmico não representa um ensaio relevante quanto à caracterização do compósito. Fato corroborado pela sua própria ausência na norma 16416 (ABNT, 2015), que descreve os requisitos e especificações exclusivos para pavimentos permeáveis de concreto.

#### **4.7 Coeficiente de Permeabilidade**

Os valores obtidos através do ensaio de permeabilidade realizado nas placas de concreto permeável são exibidos na Tabela 23. Cada placa, tendo ela 60 ou 80 mm de espessura, foi submetida a dois ensaios consecutivos, respeitando as exigências normativas quanto à execução. Considerou-se, como resultado do teste, a média entre as duas determinações. Já a Tabela 24 expõe a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação abrangendo os resultados de todos os ensaios executados.

Tabela 23 – Resultados dos ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade.

<b>Placa de Concreto Permeável</b>				
<b>Espessura (mm)</b>	<b>Amostra de Resíduo</b>	<b>Placa</b>	<b>Coeficiente de Permeabilidade (cm/s)</b>	
60	1	1	1,32	
			1,38	
		Média	1,35	
	2	2		0,89
				0,92
		Média	0,90	
		3		0,44
				0,43
		Média	0,44	
	80	3	4	1,61
1,60				
Média			1,60	
5			1,25	
			1,56	
Média			1,41	
6			2,29	
			2,43	
Média	2,36			

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 24 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados dos ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade.

<b>Dados</b>	<b>Coeficiente de Permeabilidade (cm/s)</b>	
	<b>Espessura da Placa</b>	
	<b>60 mm</b>	<b>80 mm</b>
Média	0,90	1,79
Desvio Padrão	0,46	0,51
Coeficiente de Variação (%)	50,89	28,25

Fonte: Autor, 2018.

Verifica-se que todas as placas apresentaram um coeficiente de permeabilidade superior a 0,1 cm/s, que representa o mínimo especificado pela NBR 16416 (ABNT, 2015c). O que determina a conformidade técnica do conjunto a respeito das prescrições normativas. De fato, os valores médios de coeficiente de permeabilidade encontrados foram muito superiores, inclusive, aos coeficientes presentes na literatura alusivos a concretos permeáveis.

Como avaliado na revisão bibliográfica, os resultados obtidos por Schaefer *et al.* (2006) variam entre 0,04 cm/s e 1,45 cm/s, valores próximos aos estudos de Montes e Haselbach

(2006), que, por sua vez, encontraram coeficientes entre 0,01 cm/s e 1,19 cm/s. Ratificando os dados desses autores, Tennis *et al.* (2004) assinala que valores típicos de condutividade hidráulica para o concreto permeável, a qual depende dos materiais utilizados bem como dos procedimentos de mistura, moldagem e adensamento, variam entre 0,20 cm/s e 1,20 cm/s.

Os elevados resultados de coeficiente de permeabilidade alcançados por este estudo podem ser associados à utilização de resíduos de concreto na composição do material, haja vista a não aplicação de aditivos durante a concretagem. Essa conjectura é corroborada por Alves (2016) que encontrou, em seus estudos envolvendo a substituição gradual de agregado graúdo natural por resíduos de construção e demolição, coeficientes de permeabilidade entre 1,19 cm/s e 2,24 cm/s, análogos aos obtidos na presente pesquisa. Concomitantemente ao aumento da porcentagem de substituição do agregado natural pelo reciclado, observou-se um acréscimo nos índices de permeabilidade do concreto.

Analisando-se estatisticamente os resultados obtidos, os altos coeficientes de variação estão relacionados à grande dispersão dos valores encontrados entre as placas. Isso se deve, sobretudo, à variabilidade no processo de acomodação das partículas e à consequente variação do índice de vazios, propriedade intimamente associada à permeabilidade do compósito. Especialmente para as placas com 60 mm de espessura, que foram as primeiras a serem produzidas, quando os procedimentos de moldagem e adensamento ainda estavam sendo calibrados.

Esse fato é reforçado contrapondo-se os coeficientes obtidos nas placas de espessuras distintas, com o auxílio da análise de variância adotada no estudo, pela qual detectou-se a existência de diferença significativa entre as amostras. Neste contexto, o panorama é agravado, também, pela utilização de diferentes amostras de resíduos – cujas propriedades estão intimamente ligadas às do produto final – na fabricação das placas menos espessas.

## **4.8 Modelos Reais**

Os ensaios de determinação da massa específica do concreto fresco para as peças do passeio e para a vaga do estacionamento apresentaram resultados similares aos valores referentes às concretagens precedentes: 1678,4 kg/m<sup>3</sup> e 1622,6 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Já os valores de resistência à tração na flexão obtidos foram inferiores ao limite determinado pela norma: 1,95 MPa e 1,60 MPa.

Entretanto, credita-se esses resultados insatisfatórios à cura, que foi realizada, possivelmente, de maneira ineficiente durante as primeiras horas, haja vista que os prismas se mantiveram no local da concretagem por 24 horas, até serem levados ao tanque d'água. Este panorama corrobora com a proposta de controle tecnológico alternativo, substituindo CPs prismáticos impraticáveis por amostras cilíndricas com maior capacidade de manuseamento.

Quanto aos ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade, realizados tanto no concreto moldado diretamente na vaga experimental quanto nas peças para pavimentação intertravada assentadas no passeio, obtiveram-se resultados superiores até mesmo aos valores encontrados em laboratório: 2,46 cm/s e 3,03 cm/s, respectivamente. O que demonstra, mais uma vez, o enorme potencial drenante do material.

#### **4.9 Variabilidade dos Resultados**

Como constatado neste capítulo, são vários os fatores que influenciam na variabilidade dos resultados obtidos no estudo do concreto permeável. Além das propriedades inerentes ao compósito e sua estrutura heterogênea, cujos interstícios permitem a percolação de água por sua extensão, associa-se esse fenômeno de dispersão dos valores, principalmente, às diferentes amostras de resíduo adotadas e à falta de uma metodologia padronizada de mistura, adensamento e moldagem do material.

Vale ressaltar que a metodologia de dosagem adotada na atual pesquisa teve como base o índice de vazios e a massa específica do concreto permeável. Os cálculos para definição do traço foram realizados para 35% de vazios – maior valor referenciado durante a revisão bibliográfica – e para a massa específica referente à primeira amostra de resíduo.

Contudo, os valores de massa específica das amostras de resíduo seguintes apresentaram grandes variações, bem como os índices de vazios encontrados para os corpos de prova. O que representou a obtenção de valores de massa específica do concreto endurecido em torno de 20% superiores à estipulada no estudo de dosagem, correspondendo a um dos desafios associados à elaboração de dosagem de concreto permeável com resíduo a partir de índice de vazios e massa específica.

De todo modo, a metodologia de dosagem realizada já atende aos requisitos de resistência definidos para o presente estudo, onde os valores médios de resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão alcançados superam os limites estipulados: 15,0 MPa e 2,0 MPa,

respectivamente. E como a condutividade hidráulica obtida é muito superior à estipulada pela norma de referência, considerando-se o propósito deste trabalho, recomenda-se proceder à produção interna do material pela própria UFJF.

#### 4.9.1 Diferentes Amostras de Resíduo

Além deste trabalho limitar-se a empregar em seus cálculos apenas a caracterização física da primeira amostra de resíduo utilizada, o comportamento dos resíduos enquanto constituinte do concreto permeável não foi considerado no estudo de dosagem. Cada amostra de resíduo que deu prosseguimento à pesquisa apresentou, de modo arbitrário, valores de caracterização diferenciados das demais, uma vez que provinham de diferentes locais dentro do próprio Campus.

Esse fato implicou, portanto, na obtenção de resultados variáveis, quando da realização dos ensaios normativos. A Tabela 25 ilustra a diferença entre as médias obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova cilíndricos, produzidos com amostras de resíduo distintas.

Tabela 25 – Valores médios dos ensaios realizados nos CPs cilíndricos para diferentes amostras de resíduo.

<b>Corpos de Prova Cilíndricos</b>		
<b>Parâmetro</b>	<b>Valores Médios por Amostra de Resíduo</b>	
	<b>1</b>	<b>2</b>
Resistência à Compressão Axial (MPa)	18,15	15,63
Massa Específica no Estado Endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	1896,2	1835,9
Índice de Vazios (%)	24,51	22,66
Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)	13,79	11,88

Fonte: Autor, 2018.

Diante do comportamento anômalo das amostras acerca do índice de vazios, cujo maior valor médio está relacionado aos corpos de prova de maior resistência, a obtenção de valores de resistência à compressão em média 16% superiores para os CPs produzidos com a primeira amostra de resíduos é associada a fatores alheios aos próprios parâmetros calculados. Em especial, às características inerentes ao próprio resíduo:  $f_{ck}$  e condição do concreto original, além do índice de desgaste da amostra já beneficiada quando submetida ao ensaio de abrasão *Los Angeles*. Quanto menor o valor de abrasão obtido, maiores são as resistências das amostras relacionadas. Logo, a abrasão *Los Angeles* de 38,8%, referente à amostra de resíduo 1, inferior

aos 48,5% da amostra de resíduo 2 torna a resistência do concreto, que se dispõe da primeira amostra, superior.

A seguir, a Figura 53 expõe o crescimento da resistência à compressão média dos corpos de provas cilíndricos constituídos de diferentes amostras de resíduo:

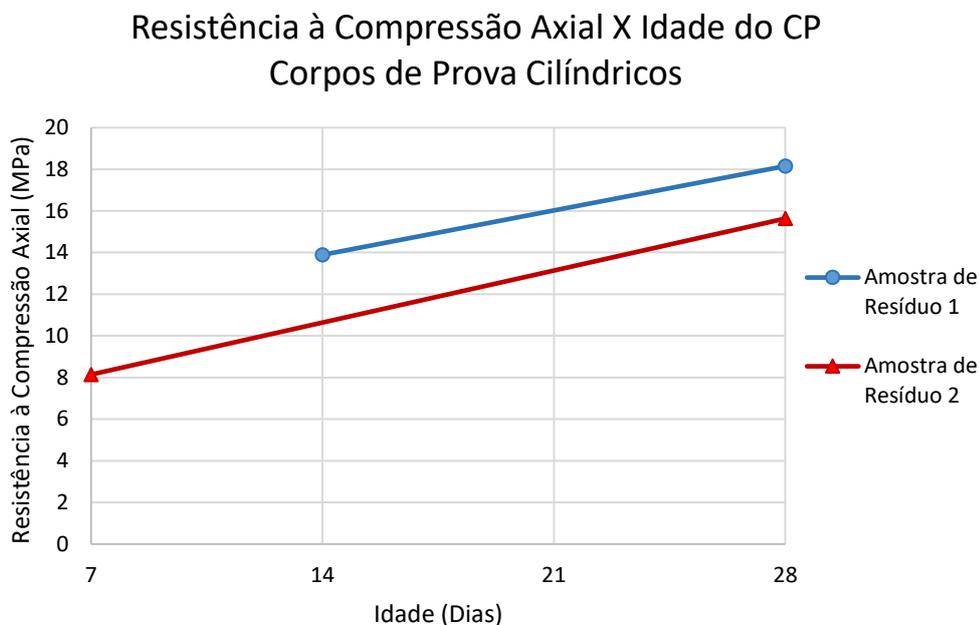


Figura 53 – Relação entre resistência à compressão axial média e a idade dos CPs para diferentes amostras de resíduo.  
(Fonte: Autor, 2018)

Também de acordo com a Tabela 25, é possível associar os maiores valores de massa específica obtidos à massa específica do agregado, ou seja, pode-se afirmar que o concreto produzido com a amostra de resíduo 1 apresenta massa específica superior porque o resíduo que o compõe possui maior massa específica em comparação à massa específica da amostra de resíduo 2.

Diante do exposto no capítulo de revisão e reiterado durante o estudo, a utilização de agregados reciclados no concreto modifica o comportamento do material, principalmente quanto à resistência mecânica. Diferentemente do fenômeno observado em concretos convencionais constituídos de agregados naturais de origem pétreo, onde a ruptura ocorre, de modo geral, na zona de interface entre a pasta de cimento e o agregado, o rompimento do concreto permeável fabricado com concreto reciclado se dá, invariavelmente, no próprio resíduo, mais especificamente entre a matriz cimentícia e o agregado antigos. Através da Figura

54 é possível verificar as condições de rompimento do concreto permeável com agregado reciclado.

Dessa forma, a intrínseca relação entre o resíduo que compõe o concreto e a sua própria resistência a esforços mecânicos também demonstra grande influência sobre a dispersão dos valores obtidos na presente pesquisa. A disposição dos resíduos de maneira irregular, associada, sobretudo, aos concretos permeáveis, corrobora com este comportamento apresentado.



Figura 54 – Corpo de prova prismático de concreto permeável produzido com resíduo de concreto após o rompimento.  
(Fonte: Autor, 2018)

#### 4.9.2 Ausência de Metodologias Padronizadas

Os procedimentos de dosagem, produção e controle tecnológico do concreto permeável enquanto revestimento de pavimentos apresentam, ainda, elevado grau de empirismo, haja vista que as definições de técnicas e metodologias para realização desses serviços se encontram em fase de pesquisa e adaptação (BATEZINI, 2013).

Portanto, neste âmbito é possível associar, também, a elevada variabilidade dos resultados apresentada neste estudo a essa carência de padronização dos procedimentos de produção e adensamento dos corpos de prova. Considera-se, ainda, as dificuldades quanto à moldagem das peças e corpos de prova pelos métodos tradicionais, intrínsecas ao concreto permeável, caracterizado por apresentar, conforme Tennis *et al.* (2004), *slump* menor que 20 mm, evidenciando sua baixa trabalhabilidade relativamente ao concreto convencional. A Figura 55

ilustra o comportamento dos diferentes corpos de prova através da aplicação simultânea de seus resultados sobre o gráfico que correlaciona índice de vazios à massa específica no estado endurecido.

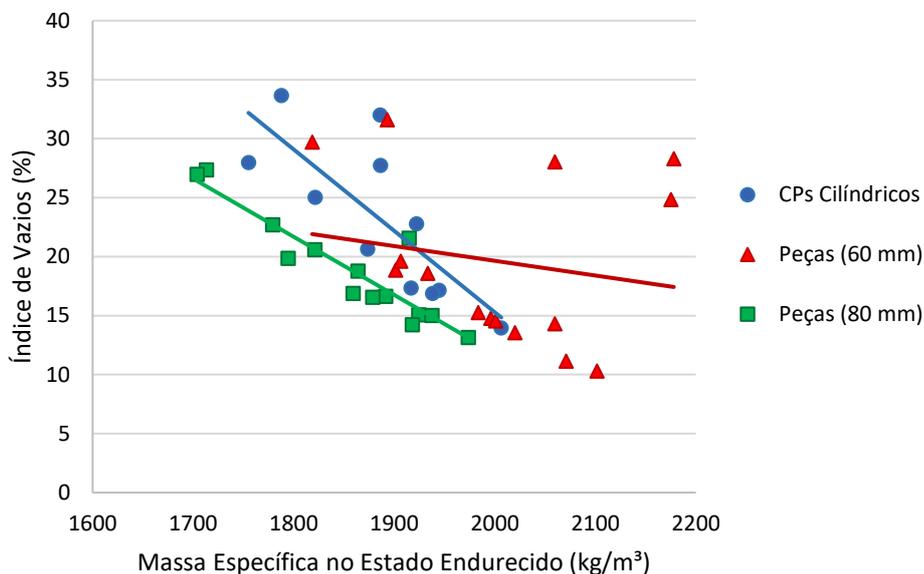


Figura 55 – Relação entre índice de vazios e massa específica no estado endurecido para diferentes corpos de prova.  
(Fonte: Autor, 2018)

Constata-se que as nuvens de pontos referentes aos CPs cilíndricos e às peças de 60 mm de espessura apresentam maior dispersão em detrimento à disposição das amostras com 80 mm de altura. Como avaliado anteriormente, esse fenômeno se deve ao fato destas peças terem sido as últimas a serem moldadas. A melhor adequação dos pontos à linha de tendência demonstra, portanto, maior precisão durante os processos de produção das peças maiores.

A respeito dos resultados referentes aos ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade, aos quais submetem-se as placas de concreto permeável, foram obtidos altos coeficientes de variação para placas de mesma dimensão, fabricadas, inclusive, com a mesma amostra de resíduos. Diante desse cenário, associa-se, também, a grande dispersão dos valores encontrados à variabilidade no processo de acomodação das partículas e consequente variação do índice de vazios das placas, propriedade diretamente relacionada à condutividade hidráulica.

Vale salientar, ainda, que essa grande variabilidade inerente ao concreto permeável e a todo o panorama que o envolve justifica a ausência do ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico na norma de referência do compósito drenante, em vista da sua invariável dependência quanto à densidade do meio material ao qual é submetido.

## 5 Conclusões e Recomendações

O estudo sobre concreto permeável com agregados reciclados surge a partir da necessidade de elaboração de um produto com viés sustentável que amenize patologias urbanas associadas à impermeabilização superficial. Analisando o comportamento mecânico e hidráulico do material concebido na vigente pesquisa, fabricado sem a aplicação de aditivos, em que 100% do seu agregado compõe-se de resíduo de concreto, foi possível estabelecer uma série de conclusões, apresentadas subsequentemente.

Identificou-se, primeiramente, que os objetivos principais do trabalho foram atendidos, à medida que se obteve um compósito em conformidade com as especificações de condutividade hidráulica e que ainda alcançou valores próximos ao limite normativo de resistência mecânica. Foi possível, inclusive, estabelecer um controle tecnológico viável para produção de artefatos de concreto permeável pela Pró-Reitoria de Infraestrutura e Gestão e posterior aplicação na manutenção das áreas do Campus.

O material desenvolvido pode, ainda, ser caracterizado como um produto de inovação tecnológica, em vista da inexistência de estudos prévios acerca do potencial de fabricação do concreto permeável com 100% de substituição do agregado por resíduo de concreto. Da mesma maneira, a elaboração de uma metodologia de dosagem própria, sem a aplicação de qualquer tipo de aditivo, também corrobora com o caráter inovador do compósito.

Contudo, o estudo evidenciou a maior variabilidade dos resultados apresentados pelo concreto permeável em detrimento às misturas convencionais de concreto, a julgar pela grande dispersão dos valores obtidos a partir dos ensaios normativos realizados. Além da constituição heterogênea do compósito permeável, onde há descontinuidade de massa e formação de vazios não controlados, o emprego de resíduos de concretos com origens distintas potencializa essa característica.

Ainda não foram estabelecidas metodologias consagradas de dosagem, mistura, moldagem e adensamento do concreto permeável. Deste modo, há uma grande variação dos procedimentos de acomodação das partículas entre os autores revisados. Todos esses processos de produção estão intimamente relacionados ao índice de vazios, que, por sua vez, representa o parâmetro que melhor caracteriza o concreto permeável.

Em vista disso, no presente trabalho foram encontrados valores condizentes com a revisão bibliográfica, apesar da grande dispersão entre os resultados de índice de vazios e os de massa

específica, verificada pelos seus coeficientes de variação. O que já era esperado, em função da variabilidade associada ao próprio material estudado.

O mesmo fenômeno ocorreu com os resultados obtidos do ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade, que demonstraram o excelente potencial drenante do compósito elaborado. Todas as placas submetidas ao teste descrito pela NBR 16416 (ABNT, 2015c) obtiveram coeficientes superiores ao limite normativo, equivalente a  $10^{-3}$  m/s. Diante desse panorama, permite-se ponderar sobre a incorporação de determinada quantidade de agregado miúdo à mistura de concreto permeável, além de outras adições que também incrementem sua resistência mecânica, enquanto a condutividade hidráulica permanecer compatível ao valor estipulado pela norma.

Os valores de resistência mecânica obtidos também estão sujeitos à variação descrita acima. Como comprovado na análise dos resultados, a resistência mecânica dos corpos de prova depende intrinsecamente das características do agregado que os compõem, em especial a abrasão *Los Angeles*. Constatou-se que os concretos confeccionados a partir de agregados com elevados índices de abrasão *Los Angeles* alcançavam valores reduzidos de resistência à compressão.

Em relação à estrutura interna do concreto permeável constituído por resíduos de concreto, foi possível identificar que o rompimento do material ocorre no próprio agregado. Haja vista que, diferentemente do comportamento observado em concretos convencionais, onde a zona de interface entre o agregado e a matriz cimentícia representa a fase mais vulnerável do concreto, o agregado passa a se tornar a região de maior fragilidade do material, mais precisamente na zona de interface antiga.

Quanto à resistência à compressão, diferentemente do que se esperava, as peças de concreto permeável com 80 mm de espessura obtiveram uma média inferior àquelas com 60 mm, sendo estas as únicas que atingiram o valor mínimo exigido pela NBR 16416 (ABNT, 2015c). Por terem sido produzidas posteriormente, as peças maiores passaram por um processo de acomodação mais uniforme, visto que o procedimento de adensamento já havia sido melhor ajustado. O que justifica a obtenção de maiores coeficientes de variação para as peças de 60 mm, juntamente à melhor adequação dos pontos referentes às peças de 80 mm à linha de tendência do gráfico “Índice de vazios x Massa específica no estado endurecido”, demonstrado no capítulo anterior.

Pode-se afirmar, portanto, que as peças de menor altura foram submetidas a um processo de adensamento mais intenso, contribuindo para o alcance de resistências à compressão superiores, as quais associam-se, também, ao menor índice de abrasão *Los Angeles* dos resíduos que compõe os artefatos de 60 mm. No fim, todos esses procedimentos permitiram desenvolver uma metodologia de adensamento que atendesse de modo mais adequado às características de resistência e permeabilidade do material.

De fato, deve-se considerar, também, que quanto maior a resistência do concreto que deu origem ao resíduo reciclado, maior a resistência do produto final. A determinação da abrasão *Los Angeles* foi a maneira encontrada por este trabalho para vincular ao agregado já beneficiado uma espécie de capacidade resistiva do concreto permeável.

A respeito da resistência à tração na flexão, os valores obtidos apresentaram pouca flutuação, mesmo com a utilização de diferentes amostras de resíduos. Apesar de serem inferiores aos valores presentes na literatura para concretos convencionais, atendem à norma que regulamenta os pavimentos permeáveis.

Já a dispersão dos valores de módulo de elasticidade encontrados evidencia o motivo pelo qual este ensaio não é determinante para a caracterização do concreto permeável com a utilização de resíduo: como as ondas sonoras se propagam em meios mais densos de maneira mais rápida e constante, a variabilidade associada aos resíduos inviabiliza a obtenção de um valor característico para a mistura.

À vista de toda essa problemática envolvendo a variabilidade dos resíduos e dos processos de adensamento, a produção de concreto permeável com utilização de agregados reciclados de concreto deve ser precedida de um controle de caracterização rigoroso dos materiais.

Quanto aos testes realizados na vaga experimental, verificou-se que a permeabilidade do sistema com toda a estrutura do pavimento já implantada é análoga à medida em laboratório. Já a respeito do ensaio de determinação de resistência à tração na flexão, os valores referentes ao material moldado *in loco* demonstram-se inferiores aos requisitos normativos. A princípio, associou-se essa queda de resistência à provável cura inicial insuficiente. Entretanto, uma avaliação mais abrangente do sistema é necessária.

Em razão disso, deu-se início à produção sistematizada de artefatos de concreto permeável, com a assistência da própria ProInfra. Ainda em fase inicial, essa etapa propõe-se a avaliar o grau de dificuldade associado aos ajustes entre as fases de laboratório e de campo, considerando-se as adversidades enfrentadas ao decorrer do processo.

De modo geral, o presente estudo evidenciou o grande potencial de utilização de agregados reciclados de concreto na produção de concretos permeáveis. Os diversos benefícios econômicos e ambientais associados à aplicação de revestimentos de concreto permeável na pavimentação urbana se potencializam a partir da utilização de RCC em sua composição.

Principalmente em relação a temas envolvendo a redução da geração desses resíduos e do consumo de recursos naturais. Portanto, é natural considerar o prosseguimento dos estudos acerca de materiais desse gênero, compreendendo uma análise mais aprofundada do seu desempenho em pista e da sua relação intrínseca à redução do escoamento superficial urbano.

Em vista dos resultados obtidos nesta pesquisa e de suas respectivas aplicações, despontam-se algumas propostas de temas futuros adequadas à continuidade do projeto:

- Avaliar a influência da inserção de agregados com uma distribuição granulométrica menos uniforme aliada à incorporação de diferentes teores de agregados miúdos à mistura, preferencialmente reciclados. A obtenção de coeficientes de permeabilidade muito superiores ao limite normativo permite considerar a inserção de agregados mais bem graduados no concreto permeável, de modo a otimizar a relação entre resistência mecânica e condutividade hidráulica do compósito;
- Estabelecer um estudo comparativo entre concretos permeáveis desenvolvidos com resíduo de concreto e os convencionais, produzidos com agregados de origem natural, confeccionados sob as mesmas condições, com o intuito de analisar a influência do emprego de agregados reciclados de concreto;
- Intensificar os estudos sobre a influência do uso de agregados reciclados nas propriedades físicas dos concretos permeáveis sem adição de aditivos, avaliando o emprego de outros tipos de resíduos da construção civil em sua composição;
- Determinar a qualidade da água infiltrada pela camada de concreto permeável com agregado reciclado e, eventualmente, avaliar a implementação de diferentes concretos permeáveis em camadas para intensificar a filtração da água proveniente do escoamento superficial urbano;
- Elaborar misturas de concreto permeável compostas por agregados reciclados com aplicação de adições e aditivos que potencializem as principais características do material. Em especial, avaliar a adição de fibras para incrementar a resistência ou aditivos plastificantes para aumentar a trabalhabilidade. Produzir, também, concretos permeáveis a partir de outros tipos de cimento;

- Analisar a viabilidade econômica do emprego de resíduos da construção civil em concretos permeáveis;
- Realizar uma análise microscópica que permita uma interpretação aprimorada do desempenho microestrutural do concreto permeável com resíduo de concreto confeccionado no presente estudo;
- Analisar o desempenho mecânico e hidráulico do concreto permeável produzido com resíduo de concreto quando submetido a carregamentos reais, avaliando a durabilidade e o comportamento do material quanto ao desgaste por fadiga.

Em suma, depreende-se que o panorama acerca do uso de RCC na produção de concreto permeável está, ainda, nos seus primórdios. Contudo, o estudo demonstra um cenário muito promissor quanto à sustentabilidade urbana. Por apresentar condutividade hidráulica satisfatória, o compósito estudado neste trabalho constitui-se em uma maneira eficiente de reverter o fenômeno de impermeabilização superficial. Além, é claro, de contribuir para a redução da problemática associada aos resíduos da construção civil.

## Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 51**: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão *Los Angeles*. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 47**: Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.

\_\_\_\_\_. **NBR 15114**: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004d.

\_\_\_\_\_. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004e.

\_\_\_\_\_. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004f.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008b.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009a.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 12142**: Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015a.

\_\_\_\_\_. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015b.

\_\_\_\_\_. **NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015c.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018b.

\_\_\_\_\_. **NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Committee 522. ACI 522R-10: **Pervious Concrete**. Farmington Hills, Michigan, 40 p. 2010.

\_\_\_\_\_. **Specification for Pervious Concrete Pavement**. 522.1-13, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 7 p. 2013.

ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 145 p. 2005.

AGOPYAN, V; SAVASTANO JÚNIOR, H. Compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais e suas aplicações. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. (Coord.) **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Editora da UNICAMP, Campinas, p. 121-144. 2003.

ALVES, P. B. **Concreto permeável para pavimentação urbana com uso de resíduos de construção e demolição produzidos na usina de reciclagem de São José do Rio Preto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 90 p. 2016.

ÂNGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 155 p. 2000.

ÂNGULO, S. C.; ULSEN, C.; KAHN, H.; JOHN, V. M. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. In: V Seminário de Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. IBRACON CT-206/IPEN. **Anais**. São Paulo. 2002.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. São Paulo, PCC – Departamento de Engenharia da construção civil da Escola Politécnica, 2007.

ARAÚJO, E. G. (Coord.) Desenvolvimento de agente expensor a base de escória de alumínio para a produção de concretos celulares auto-clavados ou moldados *in loco*. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, n. 81, p. 76-78, 2002.

ARAÚJO, P. R; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 5, n. 3. p. 21-29. Jul/Set, 2000. Disponível em: <<http://rhama.com.br/blog/wp-content/uploads/2017/01/avaliacao-da-eficiencia-dos-pavimentos-na-reducao-de-escoamento-superficial.pdf>>. Acesso em: 12 Maio 2018.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597**. Standard method for pulsevelocity through concrete. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2016.

\_\_\_\_\_. **ASTM C1701**. Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

BANIAS, G.; ACHILLAS, Ch.; VLACHOKOSTAS, Ch.; MOUSSIOPOULOS, N. **Assessing Multiple Criteria for the Optimal Location of a Construction and Demolition Waste Management Facility**. Building and Environment, v. 45, p. 2317-2326, 2010.

BASTOS, I. A.; CRUZ, L. F.; WOELFFEL, A. B. Fabricação de blocos de concreto para vedação com o uso de agregados reciclados em canteiro de obras. **Revista Científica Faesa**, Vitória, ES, v. 12, n. 1, p. 52-58, 2016. Disponível em: <<https://www.faesa.br/revistas/revistas/2016/artigo7.pdf>>. Acesso em: 18 Fev. 2018.

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

BATEZINI, R.; BALBO, J. T. Estudo da condutividade hidráulica com carga constante e variável em concretos permeáveis. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo. Junho, 2015. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952015000300002>>. Acesso em: 10 Dez. 2017.

BATTISTELLE, R. A. G. **Análise da viabilidade técnica da indústria de celulose e papel em tijolos de adobe**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 193 p. 2002.

BEAN, E. Z.; HUNT W. F.; BIDELESPACH, D. A. **Field Survey of Permeable Pavement Surface Infiltration Rates**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering 133(2), p. 247-255, 2007.

BERRY, B. M. SUOZZO, M. J.; ANDERSON, I. A.; DEWOOLKAR, M. M. **Properties of Pervious Concrete Incorporating Recycled Concrete Aggregate**. Rosemont: TRB 2012 Annual Meeting-Using Recycled Concrete in Pervious Concrete Pavements, p. 3-16, 2012.

BHUTTA, M. A. R.; HASANAH, N.; FARHAYU, N.; HUSSIN, M. W.; TAHIR, M. Md.; MIRZA, J. **Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate)**. Construction and Building Materials, Amsterdam, v. 47, p. 1243-1248, 2013.

BISPO, T. C.; LEVINO, N. A. Impactos Ambientais decorrentes do uso e ocupação desordenada do solo: Um estudo da região da periferia de Maceió/AL. In **Anais do XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Belo Horizonte/MG. Out. 2011.

BLUMENSCHNEIN, R. N. **Manual técnico: Gestão de resíduos sólidos em canteiros de obras**. Brasília: SEBRAE/DF, 48 p. 2007. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.puc-campinas.edu.br/>>. Acesso em: 06 Jan. 2018.

BOIBELMAN, L. **As perdas na construção civil: conceitos, classificações e seu papel na melhoria do setor**. Rio Grande do Sul, 2006.

BRAGA, M. C. B.; DIAS, N. C. **Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos**, v. 1, Curitiba, 40 p. 2008.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União, República Federativa do Brasil, Brasília, 03 ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 307**, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF, 2002.

\_\_\_\_\_. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 348**, de 16 de agosto de 2004. Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Brasília, DF, 2004.

\_\_\_\_\_. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 431**, de 24 de maio de 2011. Altera o artigo 3º da Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, estabelecendo nova classificação para o gesso. Brasília, DF, 2011.

BRASILEIRO, L. L. **Utilização de agregados reciclados provenientes de RCD em substituição ao agregado natural no concreto asfáltico**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 118 p. 2013.

BRITO, L. A.; CAVALCANTE, J. R.; CHERIAF, M. **Utilização de entulho de Construção Civil como agregado graúdo, para a confecção de novos concretos**. IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo. 2001.

BUTTLER, A. M.; PRADO, D. M.; CORRÊA, M. R. S.; RAMALHO, M. A. Blocos estruturais de concreto com agregados reciclados de concreto – caracterização das propriedades físicas. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, p. 3540-3549. 2006.

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 em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 254 p. 2007.

CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo.** 4ª ed. São Paulo: Humanitas, 346 p. 2003.

CAMARGO, A. **Governança para o século 21.** In: TRIQUEIRO, A. (Coord.) Meio ambiente no século 21. Rio de Janeiro: Sextante, p. 307-321. 2003.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CARDOSO, F. J. A. **Ambientes Fluviais Urbanos: Novos Paradigmas de Projeto.** Tese (Doutorado em Urbanismo) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas. São Paulo, 367 p. 2017.

CARELI, E. (colaborador), AECweb/e-Construmarket. **Resíduos da Construção Civil devem ter destinação e gestão adequada.** 2014. Disponível em: <[https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/residuos-da-construcao-civil-devem-ter-destinacao-e-gestao-adequada\\_6592\\_10\\_0](https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/residuos-da-construcao-civil-devem-ter-destinacao-e-gestao-adequada_6592_10_0)>. Acesso em: 25 Abril 2018.

CARNEIRO, A. P.; CASSA, J. C. S.; BRUM, I. A. S. **Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção.** Projeto entulho bom. EDUFBA; Caixa Econômica Federal. Salvador, 312 p. 1ª edição. 2001.

CARNEIRO, A. P.; CASSA, J. C. S.; QUADROS, B. E.; COSTA, D. B.; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. P. V. Caracterização do entulho de Salvador visando a produção de agregado reciclado. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 2000 – Modernidade e Sustentabilidade, 7., 2000, Salvador. **Anais...** Salvador, 2000.

CARNEIRO, F. P. **Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e a demolição na cidade do Recife.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, CT. João Pessoa, 131 p. 2005.

CHAMIE, S. L. **Encapsulamento de resíduos de lamas galvânicas através da solidificação em matrizes de cimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 269 p. 1994.

CHERIAF, M.; ANGLLUSKI, C.; ROSEMANN, F.; ROCHA, J. C. **Valorização do Lodo da Indústria Têxtil como Novo Material de Construção Civil**. In: FRANKENBERG, C. L. C.; RAYA-RODRIGUEZ, M. T.; CANTELLI, M. (Coord.) Gerenciamento de Resíduos - Certificação Ambiental. 1 ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2000.

CROUCH, L.; SMITH, N.; WALKER, A.; DUNN, T.; SPARKMAN, A. Pervious PCC Compressive Strength in the Laboratory and the Field: The Effects of Aggregate Properties and Compactive Effort, **Proceedings of the 2006 NRMCA Concrete Technology Forum – Focus on Pervious Concrete**, Nashville, TN, 2006.

DELATTE, N.; CLEARY, J. **Developing a Structural Design Method for Pervious Concrete Pavement**. 14th Annual International Center for Aggregates Research (ICAR) Symposium in Austin, Texas, April 25, 2006.

DORSTHORST, B.J.H; HENDRIKS, Ch. F. Re-use of construction and demolition waste in the EU. In: CIB Symposium: Construction and Environment – Theory Intopractice, São Paulo, 2003. **Proceedings**. São Paulo, EPUSP, 2003.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Characterization of bulding related construction and demolition debris in the United States**. Office of Solid Waste. Report nº EPA530-R-98-010. 100 p. 1998.

EVANGELISTA, P. P. A.; COSTA, D. B.; ZANTA, V. M. Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p. 23-40, jul./set. 2010.

FEBESTRAL. **Les revêtements drainants em pavés de betón** – Durables, Esthétiques, Ecologiques, Multifonctionnels, Drainants, Surs. Bruxelles, 2008.

FINOCCHIARO, P. S.; GIRARDI, R. Concreto permeável produzido com agregado reciclado. **Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana**, n. 5, p. 19-26, 2017. Disponível em: <[http://www.fsma.edu.br/RESA/Edicao5/FSMA\\_RESA\\_2017\\_1\\_03.pdf](http://www.fsma.edu.br/RESA/Edicao5/FSMA_RESA_2017_1_03.pdf)>. Acesso em: 14 Abril. 2018.

FRANCIS, A. M. **Early Concrete Buildings in Britain. Concrete and Constructional Engineering**. Londres, v. 60, n. 2, p. 73-75. Fev. 1965.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. **Laboratory Investigation of Compacted No-fines Concrete for Paving Materials**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 7, n. 3, p. 183-191, 1995.

GOEDE, W. G. **Pervious Concrete: Investigation into Structural Performance and Evaluation of the Applicability of Existing Thickness Design Methods**. Thesis (Master in Engineering) – Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, Washington DC, 198 p. 2009.

GONÇALVES, P. H. **Planejamento e gerenciamento do resíduo sólido de construção e demolição** – Estudo de casos goianos. Goiânia, 2013.

GRIGOLI, A. S. Reciclagem de entulho em canteiro de obras – Viabilidade econômica. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 43º, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001.

GUSMÃO, Alexandre Duarte. **Manual de Gestão dos Resíduos da Construção Civil**. Recife: Gráfica Editora, 140 p. 2008.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, v. 2, cap. 29, p. 954-988, 2010.

HENDERSON, V. **Pervious Concrete Pavement: An Integrated Laboratory and Field Study**. CivE 742. University of Waterloo, Ontário, Canadá. 2008.

HENDERSON, V.; TIGHE, S. L.; NORRIS, J. **Pervious Concrete Pavement**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. V. 2095, p. 13-21, Nov. 2009.

HENDRICKSON, C.; HARVOATH, A. **Resource use and environmental emission of U.S. Construction sectors**. J. Construct. Engineering and management, v. 126, nº 1, jan/feb 2000.

HÖLTZ, F. C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental** (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 138p. 2011.

HUFFMAN, D. **Understanding pervious concrete**. The Construction Specifier, v. 1, n. 4, p. 42–49, Dec. 2005.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 102 p. 2000.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: Seminário Resíduos Sólidos Domiciliares, 2000, São Paulo, **Anais...** São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo e Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental; Departamento de Engenharia de Construção Civil; Escola Politécnica da USP (PCC USP), 2000.

KAJIO, S.; TANAKA, S.; TOMITA, R.; NODA, E.; HASHIMOTO, S. Properties of porous concrete with high strenght, In: International Symposium on Concrete Roads, 8., Lisboa. **Proceedings...** p. 171-177. 1998.

KARPINSKI, L. A.; GUIMARÃES, J. C. B.; PANDOLFO, A.; PANDOLFO, L. M.; REINEHER, R.; KUREK, J. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: Uma abordagem ambiental.** Porto Alegre, Brasil: EdiPUCRS, 2009.

KARTAM, N.; AL-MUTAIRI, N.; AL-GHUSAIN, I.; AL-HUMOUD, J. **Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait.** Waste Management. N. 24. 2004.

KEVERN, J. T.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. **Temperature Behaviour of Pervious Concrete Systems.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. V. 2098, p. 94–101, Set. 2009.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. O Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, v. 2. p. 295-322. 2005.

KLAIBER, F. W.; LEE, D. Y. **The Effects of Air Content, Water-Cement Ratio and Aggregate Type on the Flexural Fatigue Strenght of Plain Concrete.** ACI SP-75, American Concrete Institute, Farmington Hills, p. 142-148, 1982.

KOMLOS, K.; POPOVICS, S.; NIIRNBERGEROH, T.; BABD, B.; POPOVICS, J. S. **Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete Properties as Specified in Various Standards.** Cement and Concrete Composities, v. 18, p. 357-364, 1996.

KUANG, X.; KIM, J. Y.; GNECCO I.; RAJE, S.; GAROFALO, G.; SANSALONE, J. J. **Particle Separation and Hydrologic Control by Cementiteous Permeable Pavement.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. V. 2025, p. 111–117, Jan. 2007.

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

LEITE, B. M. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 290 p. 2001.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 208 p. 2001.

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.

MALHOTRA, V. M. **No-fines Concrete – Its Properties and Applications**. ACI Journal, **Proceedings**. V. 73, n. 11, p. 628-644. Nov./1976.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on Nondestructive Testing Of Concrete**. 2 ed. Boca Raton, Florida: CRC Press. 2004.

MANAHAN, S. E. **Fundamentals of environmental chemistry**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. **Pavimento Intertravado Permeável – Melhores Práticas**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 24 p. 2011.

MARCONDES, F.C.S; CARDOSO, F. F. **Contribuição para aplicação do conceito de logística reversa na cadeia de suprimentos da construção civil**. In: Simpósio Brasileiro de economia e gestão na construção. Porto Alegre, 2005.

MARQUES NETO, J. C. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Carlos: Rima, 162 p. 2005.

MARTINS, J. Planejamento econômico. **Revista Equipe de Obras**, ano VII nº53, PINI. P. 42 e 43. Novembro, 2012.

MASUERO, A. B. VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D. **Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos**. CPGEC/NORIE – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

MAZZONETTO, C. Concreto Permeável. **Revista Infraestrutura Urbana**, ed. 13. Abril 2011. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/13/artigo254488-1.aspx>>. Acesso em: 09 mai. 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. Editora Ibracon, 2ª Edição. São Paulo, 2014.

MELO, J. R. S.; FROTA C. A. **A situação dos resíduos sólidos oriundos da construção civil vertical na cidade de Manaus**. 2009. Disponível em: <<http://congressos.ifal.edu.br/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/1233/752>>. Acesso em: 11 Fev. 2018.

MENDES, T. A.; REZENDE, L. R.; OLIVEIRA, J. C.; GUIMARÃES, R. C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; VEIGA, R. Parâmetros de uma Pista Experimental Executada com Entulho Reciclado. **Anais da 35ª Reunião Anual de Pavimentação**, 19 a 21/10/2004, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 11 p. 2004.

MILARÉ, É. Direito do ambiente: a gestão ambiental em foco. 6. ed. São Paulo: **Revista dos Tribunais**, 1680 p. 2009.

MILLER JUNIOR, G. T. **Ciência Ambiental**. 1. ed. São Paulo: Thomson, 501 p. 2007.

MIRANDA, L. F. R.; ÂNGULO, S. C.; CARELLI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71. 2009.

MONTES, F.; HASELBACH, L. **Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete**. Environmental Engineering Science, v. 23, p. 960-969, 2006.

MOTTA, S. R. F.; AGUILAR, M. T. P. Sustentabilidade e processos de projetos de edificações. **Revista Gestão & Tecnologia De Projetos**, v. 4, n. 1, p. 88-123. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.4237/gtp.v4i1.79>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

MORAIS, G. M. D. **Diagnóstico da deposição clandestina de Resíduos de Construção e Demolição em bairros periféricos de Uberlândia**: Subsídios para uma gestão sustentável. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 201 p. 2006.

MULLIGAN, A. N. **Attainable Compressive Strength of Pervious Concrete Paving Systems**. University Orlando, Florida. 145 p. 2005.

NAVIDI, W. C. **Statistics for Engineers and Scientists**. 4. ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 910 p. 2015.

NEVES, G. A.; MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Vol. 6, n. 2, p. 303-313. 2001.

NOLASCO, A. M. **Utilização do resíduo da indústria do papel na produção de materiais para a construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 156 p. 1993.

NRMCA – NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. **Freeze Thaw Resistance of Pervious Concrete**, Silver Spring, MD, 17 p. May 2004.

\_\_\_\_\_. Pervious Concrete Pavement. **Pervious Pavement**, 2011. Disponível em: <<http://www.perviouspavement.org/>>. Acesso em: 03 Dez. 2017.

OLEK, J.; WEISS, W. J.; NEITHALATH, N.; MAROLF, A.; SELL, E.; THORNTON, W. D. **Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials**. Final Report, The Institute for Safe, Quiet, and Durable Highways. SQDH 2003-5. Center of Advanced Cement Based Materials, Purdue, 179 p. 2003.

OLIVEIRA, C. V.; KER, J. C.; CURI, N.; DUARTE, M. N.; FONTES, L. E. F. Caracterização de concreções ferro-manganesas de solos de calcário no norte do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, p. 565-574. 2001.

OLIVEIRA, D. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de blocos de concreto produzidos com a utilização de entulho da construção civil**. Tese (Qualificação do Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 119 p. 2003.

PABLOS, J. M. **Utilização do resíduo sólido gerado pelo descarte das areias de fundição aglomeradas com argila no setor de Construção Civil**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 86 p. 1995.

PALIARI, J. C.; SOUZA, U. E. L.; ANDRADE, A. C.; AGOPYAN, V. Avaliação das perdas de concreto usinado nos canteiros de obras. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 9., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu. ENTAC, p. 1381-1390, 2002.

PASCHOALIN FILHO, J. A.; STOROPOLI, J. H.; DUARTE, E. B. L. Viabilidade Econômica da Utilização de Resíduos de Demolição Reciclados na Execução do Contrapiso de um Edifício Localizado na Zona Leste da cidade de São Paulo. **REGET: Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 18, n. 2, Mai/Ago, p. 928-943. 2014.

PAULA, P. R. F. **Utilização dos resíduos da construção na produção de blocos de argamassa sem função estrutural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 132 p. 2010.

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**. In: V encontro de iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, Campinas, 2015.

PINDADO, M. A.; AGUADO, A.; JOSA, A. **Fatigue Behavior of Polymer Modified Porous Concretes**. Cement and Concrete Research, Universitat Politècnica de Catalunya, School of Civil Engineering (ETESECCPB) Barcelona, Spain, v. 29, n. 7, p. 1077-1083. 1999.

PINTO, L. L. C. A. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 283 p. 2011.

PINTO, T. P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 189 p. 1999.

\_\_\_\_\_. (Coord.) **Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do Sinduscon-SP**, São Paulo: obra Limpa: I&T: Sinduscon-SP, 2005.

PINTO, T. P.; GONZÁLEZ, J. L. R. **Manejo e gestão de resíduos da construção civil: manual de orientação: como implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios**. Brasília: CEF, 2005.

POLASTRE, B.; SANTOS, L. D. **Concreto Permeável**. São Paulo: Universidade de São Paulo. 2006.

RIZVI, R. TIGHE, S.; HENDERSON, V.; NORRIS, J. Evaluating the Use of Recycled Concrete Aggregate in Pervious Concrete Pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, v. 2164, p. 132–140, 2010.

ROCHA, J. C.; PIAIA, J. C. Z; CHERIAF, M.; MUSTELIER, N. L. **Measurements of water penetration and leakage in masonry wall**: Experimental results and numerical simulation. *Building and Environment*, v. 61, p. 18-26, 2013.

ROMEIRO, A. R. Economia ou Economia Política da Sustentabilidade. In: MAY, P. H.; LUSTOSA, M. C.; VINHA, V. (Coord.) **Economia do Meio Ambiente: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 1-29. 2003.

SAFIUDDIN, Md.; ALENGARAMB, U. J. A.; SALAMB, Md.; JUMAATB, M. Z.; JAAFARB, F. F.; SAAD, H. B. Properties of High-Workability Concrete with Recycled Concrete Aggregate. **Materials Research**, Amsterdam, v. 14, n. 2, p. 248-255. 2011.

SANCHEZ, L. E. **Avaliação de Impacto Ambiental**: conceitos e métodos. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 584 p. 2013.

SANTOS, A. N. **Diagnóstico da situação dos resíduos de construção e demolição (RCD) no município de Petrolina (PE)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UNICAP. Recife-PE, 111 p. 2008.

SANTOS, C. A. **Impacto da utilização de pavimentação permeável em áreas urbanas na recuperação de bacias hidrográficas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 64 p. 2016.

SAVASTANO JÚNIOR, H; AGOPYAN, V. Microestrutura x Desempenho dos Compósitos reforçados com fibras Vegetais. In: Workshop sobre Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Material de Construção Civil, São Paulo, 1996. **Anais**. São Paulo, EPUSPI / ANTAC, p. 153-158. 1997.

SINISTERRA, F. Q. **Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas**. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília. Brasília, 193p. 2014.

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

SCHNEIDER, D. M. **Deposições irregulares de resíduos de construção civil no município de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Faculdade de Saúde Pública. Universidade de São Paulo. São Paulo, 131 p. 2003.

SCHNEIDER, D. M.; PHILIPPI JR., A. **Gestão pública de resíduos da construção civil no município de São Paulo**. Ambiente Construído, Porto Alegre, 2004.

SCHUELER, T. R. **Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Design Urban BMPs**. Washington: Metropolitan Council of Government. 1987.

SILVA, F. B. Pavimentos de concreto permeável. **Revista Técnica**, São Paulo, edição 190. Novembro, 2012. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/190/artigo288015-1.aspx>>. Acesso em: 20 Jan. 2018.

SILVEIRA, A.M. **Um asfalto antiinchente**. Jornal Zero Hora, Caderno Nosso Mundo Sustentável, Porto Alegre. Ano 1, n 41, p. 1 e 4. 6 dez. 2010.

SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; AGOPYAN, V.; ANDRADE, A. C. **Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva**. Ambiente construído. Porto Alegre., v. 4, n. 4, p. 33-46. Out/Dez 2004.

SULEIMAN, M. T.; KEVERN, J.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. Effect of Compaction Energy on Pervious Concrete Properties, **Proceedings of Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete**, Nashville, TN, May 24-25, 2006.

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

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 83-90. 2016.

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

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

\_\_\_\_\_. **Gestão das Águas Pluviais Urbanas: Saneamento para todos**. Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, Brasília, DF, 197 p. 2006.

\_\_\_\_\_. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH, 943 p. 2007.

VANCURA, M.; MACDONALD, K.; KHAZANOVICH, L. **Microscopic analysis of paste and aggregate distresses in pervious concrete in a wet, hard freeze climate**. Science Direct, 6 p. 2011.

VIDAL, A. S. **Caracterização de concreto permeável produzido com agregados reciclados de construção e demolição para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 131 p. 2014.

WIEDMANN, T.; MINX, J. C. **A definition of carbon footprint**. In C. Pertsova (ed.), Ecological Economics Research Trends, Nova Science Publishers, Hauppauge NY, chapter 1, p. 1-11. 2008. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.467.6821&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 20 Out. 2018.

ZORDAN, S. E. **Metodologia de avaliação do potencial de reciclagem de resíduos**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 464 p. 2003.