PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PRISCILA BORGES ALVES

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 apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Estruturas

Prof. Dr. Antonio Anderson da Silva Segantini
Orientador

Ilha Solteira
2016

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Alves, Priscila Borges.
A474c Concreto permeável para pavimentação urbana com uso de resíduos de construção e demolição produzidos na usina de reciclagem de São José do Rio Preto / Priscila Borges Alves. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
90 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2016

Orientador: Antonio Anderson da Silva Segantini
Inclui bibliografia

1. Concreto permeável. 2. Pavimentação urbana. 3. Resíduos de construção e demolição. 4. Concreto permeável com o resíduo.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Concreto permeável para pavimentação urbana com uso de resíduos de construção e demolição produzido na Usina de Reciclagem de São José do Rio Preto

AUTORA: PRISCILA BORGES ALVES

ORIENTADOR: Prof. Dr. ANTONIO ANDERSON S SEGANTINI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL , Área: ESTRUTURAS, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ANTONIO ANDERSON S SEGANTINI
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JEFFERSON NASCIMENTO DE OLIVEIRA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MARCIO BENEDITO BAPTISTA
Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos / Universidade Federal de Minas Gerais

Data da realização: 13 de novembro de 2015.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, sem o qual nada disso seria possível. Aos meus pais Dilson e Sonia e meu noivo Vinicius, pelo incentivo, compreensão e auxílio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me guiado durante toda a minha vida e ter me proporcionado mais essa conquista, é por Ele estar sempre iluminando meus passos e me conduzindo que pude finalizar mais uma etapa em minha vida.

À minha família, por me mostrar que o saber é o bem mais precioso, e por estar sempre ao meu lado para suprir as ausências e ansiedades. Em especial aos meus pais e irmãos, aos quais dedico este trabalho.

Aos meus amigos Lucas, Nayra, João Victor, João Claudio e Cicera, que também acreditaram na realização deste projeto e me auxiliaram em diversas etapas.

Também sou eternamente grata ao meu Orientador Prof. Dr. Antonio Anderson da Silva Segantini, que me levou a entender o quão importante se faz trabalhar com seriedade e competência, além da amizade e profissionalismo compartilhado. Agradeço pelas valiosas contribuições que permitiram ampliar meus conhecimentos na área de materiais de construção civil.

Ao Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima e o Prof. Dr. Marco Antonio de M. Alcântara por todas as contribuições a este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro através da bolsa de estudo.

À Usina de Reciclagem de São José do Rio Preto, pela doação dos resíduos de construção e demolição. À Lajes Artcon, na pessoa do engenheiro Antonio Anderson da Silva Segantini, por fornecer os cimentos CPII-Z utilizados neste trabalho.

À Pedreira Três Fronteiras, pelo fornecimento do agregado graúdo.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual Paulista Gilson, Mário e Flavio, pela amizade, apoio e disposição para a realização dos ensaios.

Ao Paulo pelo auxilio e tempo disponibilizados para a confecção do permeâmetro.

Por fim, quero deixar meu agradecimento especial ao meu noivo Vinicius, por todo compreensão, auxílio e suporte em todos os momentos deste projeto.

"Eu, a sabedoria, fiz correr os rios
(...) e eis que meu curso de água
tornou-se abundante, e meu rio
tornou-se um mar. Pois a luz da
ciência que eu derramo sobre todos
é como a luz da manhã, e de longe
eu me torno conhecida."

Eclesiástico 24

RESUMO

No presente trabalho foram utilizados resíduos de construção e demolição oriundos de uma central de reciclagem, visando a confecção de concretos permeáveis. Objetivou-se avaliar a influência da utilização destes resíduos no comportamento mecânico do concreto permeável, tendo em vista a sua utilização na pavimentação de espaços urbanos, com enfoque na permeabilidade do pavimento. O trabalho consistiu de pesquisa experimental, com realização das seguintes etapas: caracterização dos materiais utilizados, segundo as normas específicas; realização de ensaios para determinação do traço adequado do concreto; realização de ensaios de permeabilidade com o uso de um permeâmetro de carga variável; realização de ensaios para determinação do coeficiente de porosidade e realização de ensaios de resistência à compressão. Foram moldados quatro modelos, sendo um de referência e os demais com 5%, 10% e 15% de substituição de brita por RCD e os ensaios foram feitos nas idades de 7, 28 e 56 dias. O concreto permeável produzido com os resíduos de construção apresentaram resultados satisfatórios, em termos de drenagem e resistência, alcançando parâmetros adequados para este tipo de concreto.

Palavras-chave: Concreto permeável. Pavimentação urbana. Resíduos de construção e demolição. Concreto permeável com o resíduo.

ABSTRACT

In this paper we used construction and demolition waste originating from a central recycling, aiming to elaborate permeable concrete. The objective was to evaluate the influence of the use of these wastes in the mechanical behavior of permeable concrete, with a view to their use in paving urban spaces, focusing on the permeability of the pavement. The work consisted of experimental research, performed the following steps: characterization of the materials used according to specific rules; performing tests to determine the appropriate dash of concrete; performing permeability test using a variable load permeameter; performing tests to determine the coefficient of porosity and performing compressive strength tests. Four models were molded, being a reference and the other with 5%, 10% and 15% of gravel replacement for RCD and the tests were made at the ages of 7, 28 and 56 days. The permeable concrete produced with the construction waste showed satisfactory results, in terms of drainage and compressive strength, achieving appropriate parameters for this type of concrete.

***Keywords*:** Pervious concrete. *Urban paving*. Waste from construction and demolition. Pervious concrete with waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Impacto devido à urbanização 18
Figura 2 – Cenário sem urbanização 19
Figura 3 – Cenário urbanizado 19
Figura 4 – Alteração do escoamento devido a urbanização 19
Figura 5 – Conceito de Canalização x Reservação 23
Figura 6 – Plano de infiltração 25
Figura 7 – Superfície de infiltração 25
Figura 8 – Vala de infiltração 25
Figura 9 – Valeta de infiltração complementada com trincheira de percolação 26
Figura 10 – Bacia de percolação 26
Figura 11 – Bacia de percolação 27
Figura 12 – Pavimentos porosos 27
Figura 13 – Pavimentos porosos 28
Figura 14 – Poço de infiltração 28
Figura 15 – Pavimentos estudados 31
Figura 16 – Resultados do estudo – Escoamento superficial observado 32
Figura 17 – Pavimento Poroso 34
Figura 18 – Desempenho de um pavimento poroso definido analiticamente 35
Figura 19 – Pavimento poroso experimental 36
Figura 20 - Caracterização do agregado graúdo – Classificação: Brita 0 42
Figura 21 - Caracterização do agregado graúdo – Classificação: Brita 1 44
Figura 22 - Resíduos de construção e demolição 45
Figura 23 - Resíduo de construção e demolição – Granulometria 46
Figura 24 - Caracterização do resíduo de construção e demolição – Classificação: RCD .. 48
Figura 25 - Comparação entre as granulometrias 49
Figura 26 - Resíduos de construção e demolição #9,5 50
Figura 27 - Resíduos de construção e demolição #12,5 50
Figura 28 - Absorção RCD #9,5 52
Figura 29 - Absorção Brita 0 53
Figura 30 - Mistura dos componentes do concreto permeável 58
Figura 31 - Concreto fresco com agregado reciclado 59

Figura 32 - Amostra de concreto com pouca água 61
Figura 33 - Amostra de concreto com quantidade ideal de água 61
Figura 34 - Amostra de concreto com muita água 61
Figura 35 – Ensaio de abatimento de tronco de cone 62
Figura 36 - Equipamento para medição do peso submerso 65
Figura 37 - Montagem do conjunto 65
Figura 38 - Permeâmetro de carga variável 66
Figura 39 – Porosidade média (%) 69
Figura 40 – Coeficiente de permeabilidade média (m/s) 70
Figura 41 – Comparação entre a permeabilidade e a porosidade 72
Figura 42 - Resistência à compressão: Concreto Referência 73
Figura 43 - Resistência à compressão: Concreto com 5% de substituição 73
Figura 44 - Resistência à compressão: Concreto com 10% de substituição 74
Figura 45 - Resistência à compressão: Concreto com 15% de substituição 74
Figura 46 – Resistência à compressão média 75
Figura 47 – Resistência à compressão aos 7 dias 76
Figura 48 – Resistência à compressão aos 28 dias 76
Figura 49 – Resistência à compressão aos 56 dias 77
Figura 50 – Resistência à compressão média x substituição no tempo 78
Figura 51 – Valores médios de resistência à compressão versus permeabilidade 79
Figura 52 – Valores médios de resistência à compressão versus porosidade 80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dispositivos de infiltração[1] 29
Tabela 2 – Resultados do estudo – Simulação de chuva nas superfícies 32
Tabela 3 – Custo de implantação dos pavimentos 33
Tabela 4 - Resultados obtidos 34
Tabela 5 - Caracterização do cimento CP II Z 32 40
Tabela 6 - Caracterização do agregado graúdo – Classificação: Brita 0 41
Tabela 7 - Caracterização do agregado graúdo – Classificação: Brita 1 43
Tabela 8 - Caracterização do resíduo de construção e demolição – Classificação: RCD ... 47
Tabela 9 - Peso Retido das britas 0 e 1 e do RCD 49
Tabela 10 - Caracterização do agregado graúdo - Classificação: Brita 0 51
Tabela 11 - Caracterização do resíduo de construção e demolição - Classificação: RCD .. 52
Tabela 12 - Taxas de absorção de agregados reciclados em função do componente e da granulometria 54
Tabela 13 - Dosagem para concreto permeável 55
Tabela 14 - Composição dos traços 57
Tabela 15 - Valores típicos de coeficiente de permeabilidade de solos 67
Tabela 16 – Dados dos ensaios de porosidade 68
Tabela 17 – Dados dos ensaios de permeabilidade 70
Tabela 18 – Coeficiente de permeabilidade 71
Tabela 19 – Valores médios de resistência à compressão, porosidade e permeabilidade ... 79
Tabela 25 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão e médias 89
Tabela 26 – Resultados dos ensaios de porosidade 90
Tabela 27 – Resultados dos ensaios de permeabilidade 90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação causa e efeito do processo de urbanização sobre as inundações urbanas 21
Quadro 2 – Estudos de concretos com resíduos de construção e/ou demolição..... 37
Quadro 3 – Normas para Resíduos de Construção Civil 38
Quadro 4 – Estudos realizados com pavimentos permeáveis..... 38
Quadro 5 - Procedimento de mistura dos materiais..... 58
Quadro 6 - Quadro de sequência das misturas dos componentes do concreto 59
Quadro 7 - Sequência da mistura..... 60
Quadro 8 - Procedimento experimental para ensaio de porosidade 64
Quadro 9 – Sugestões para pesquisas futuras 83

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....15
1.1 Considerações Iniciais.....15
1.2 Importância do Tema.....15
1.3 Objetivo Geral.....16
1.4 Objetivos Específicos.....16
1.5 Apresentação do Trabalho.....16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....18
2.1 Drenagem Urbana.....18
2.2 Métodos Dipersivos.....24
2.2.1 Considerações iniciais.....24
2.2.2 Dispositivos de Infiltração.....24
2.3 Análises de Casos.....29
2.3.2 Pavimento Poroso.....29
2.3.3 Pavimento permeável x redução do escoamento superficial.....30
2.3.4 Desempenho do pavimento poroso.....33
2.3.5 Pavimento Permeável com agregado reciclado.....36
2.3.5.1 Considerações iniciais.....36
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....39
3.1 Caracterização dos Materiais.....39
3.1.1 Cimento.....39
3.1.2 Agregado Graúdo.....41
3.2 Resíduo de Construção e Demolição.....44
3.2.1 Requisitos para resíduo de construção e demolição sem função estrutural.....44
3.2.2 Classificação do RCD.....45
3.2.3 Resíduo de Construção e Demolição x Brita.....48
3.2.4 Demais Ensaios de Caracterização dos Materiais.....51
3.3 Água.....54
3.4 Aditivo Quimico.....54
3.5 Metodologia de dosagem de concreto permeável com resíduo de construção e demolição.....55
3.5.1 Dosagem do concreto.....55
3.5.2 Definição das porcentagens de substituição.....55

3.5.3 Definição dos limites de resistência à compressão.....56
3.5.4 Definição dos traços dos concretos.....56
3.5.4.1 Definição de cada composição.....56
3.6 Mistura.....57
3.7 Moldagens dos corpos de prova.....62
3.7.1 *Slump Test*.....62
3.7.2 Moldagem.....63
3.8 Ensaios.....63
3.8.1 Ensaio de Porosidade.....64
3.8.2 Coeficiente de Permeabilidade.....65
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....68
4.1 Análise da Porosidade x Teor de Substituição.....68
4.6 Análise dos Resultados de Resistência à Compressão.....72
4.6.1 Análise dos Resultados de Resistência a Compressão x Substituição.....76
4.6.2 Análise dos Resultados de Resistência a Compressão x Substituição no Tempo..77
4.2.7 Análise Comparativa dos Resultados.....78
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....81
6 REFERÊNCIAS.....84
APÊNDICE A – RESULTADO DOS ENSAIOS.....89

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A impermeabilização de diversas áreas nas cidades, onde originalmente eram áreas permeáveis; causa, durante os dias de chuva intensa, aumento no escoamento superficial. Em consequência, há um aumento do volume de água que vai para a rede de drenagem. Pelo fato dessa não comportar todo este volume, ocorre problemas de inundações e alagamentos.

Segundo Tucci (2006), a urbanização gera alterações no ciclo hidrológico como: redução da infiltração no solo; acumulo de água na superfície, aumentando escoamento superficial; aumento das vazões máximas; e aumento da velocidade de escoamento superficial, a vazão máxima de inundação pode aumentar de seis a sete vezes, quando comparada com a vazão média de cheia das condições rurais para urbanizadas.

A utilização de concretos permeáveis é uma forma de contribuir para a redução desses problemas. Sua utilização em calçadas, estacionamentos e ciclovias pode auxiliar na diminuição dos impactos gerados pelo processo de impermeabilização. Paralelamente, procurou-se neste trabalho avaliar o aproveitamento dos resíduos gerados pela construção civil, utilizando-o na composição do concreto permeável em estudo, de modo a promover uma destinação adequada para esses materiais, em conformidade com a Resolução 307 (CONAMA, 2002).

1.2 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Segundo Tucci (2006), o pavimento permeável apresenta as seguintes vantagens: redução do escoamento superficial, redução dos condutos da drenagem pluvial; consequentemente, redução dos custos do sistema de drenagem e diminuição da lâmina de água nos estacionamentos e passeios.

Além disso, pode-se utilizar um sistema de drenagem com o intuito de armazenar em um reservatório, a água infiltrada no pavimento. Outro fator é a possibilidade de utilização de resíduos de construção na fabricação deste pavimento, atendendo a Resolução 307

(CONAMA, 2002), que determina: “Os geradores de resíduos da construção civil devem ser responsáveis pelos resíduos das atividades de construção, reforma, reparos e demolições de estruturas”.

A utilização de resíduos de construção civil, segundo Safiuddin et al. (2011), resolve problema de descarte, reduz o espaço do aterro, conserva os recursos naturais, diminui os custos de transporte, diminui a poluição ambiental, e protege o equilíbrio ecológico.

1.3 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo estudar o emprego de resíduos de construção e demolição, da Usina de Reciclagem de São José do Rio Preto, na produção de novos concretos destinados à aplicação em calçadas, com enfoque na permeabilidade do pavimento.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho foram os seguintes:

- Utilização de resíduo de construção em substituição do agregado graúdo.
- Avaliação de concreto permeável visando a confecção de peças de pavimento intertravado para utilização urbana.
- Produção de concreto permeável sem utilização de aditivos.
- Avaliação do uso do cimento composto CP II Z 32 na composição do concreto permeável

1.5 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Dividiu-se a pesquisa em seis capítulos, sendo o primeiro capítulo uma introdução à temática abordada, apresentando os objetivos gerais e específicos. Enquanto no segundo capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica, com enfoque na drenagem urbana e no reaproveitamento de resíduos de construção e demolição para produção de concretos

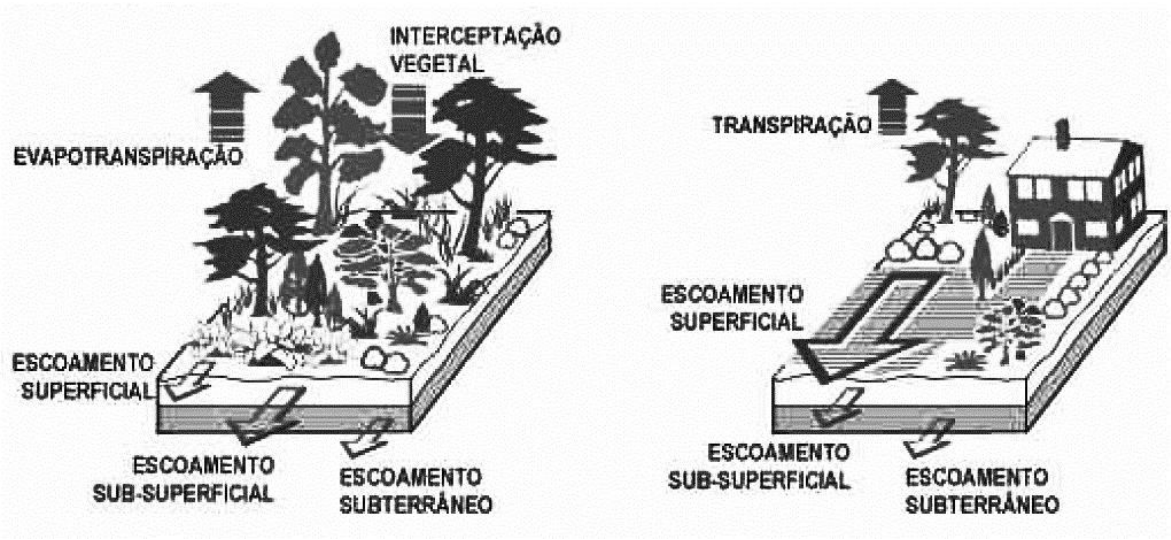
permeáveis como solução para problemas de drenagem urbana. Já no terceiro capítulo são apresentadas a caracterização dos materiais empregados e a metodologia experimental utilizada. As análises dos dados e os resultados experimentais obtidos são apresentados no quarto capítulo. As conclusões e considerações finais são apresentadas no quinto capítulo. No sexto capítulo são apresentadas as referências e no Anexo são apresentados todos os dados dos ensaios realizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DRENAGEM URBANA

O avanço dos espaços urbanos causa um aumento das áreas impermeáveis, onde antes havia infiltração, agora se transforma quase completamente em escoamento superficial, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Impacto devido à urbanização

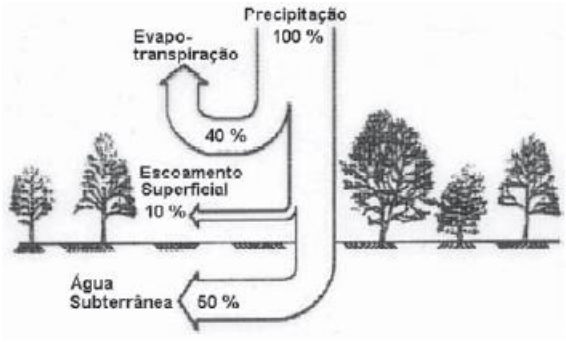


Fonte: Schueler (1987), citado por Tucci (2006)

Conforme Tucci (2006) a impermeabilização do solo causada pelos telhados, ruas, calçadas e pátios, fazem com que o volume de água, que antes era retido pelas plantas, infiltrava pelo solo e escoava pelo subterrâneo, passe a escoar superficialmente e por condutos e canais.

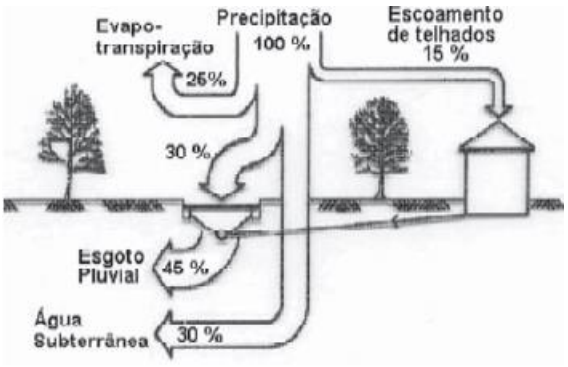
Ainda segundo Tucci (2006) isso gera uma necessidade de aumento da capacidade de escoamento dos condutos e canais, além de afetar o ciclo hidrológico, conforme apresentado nas Figura 2 e Figura 3.

Figura 2 – Cenário sem urbanização



Fonte: OECD (1986), citado por Tucci (2006)

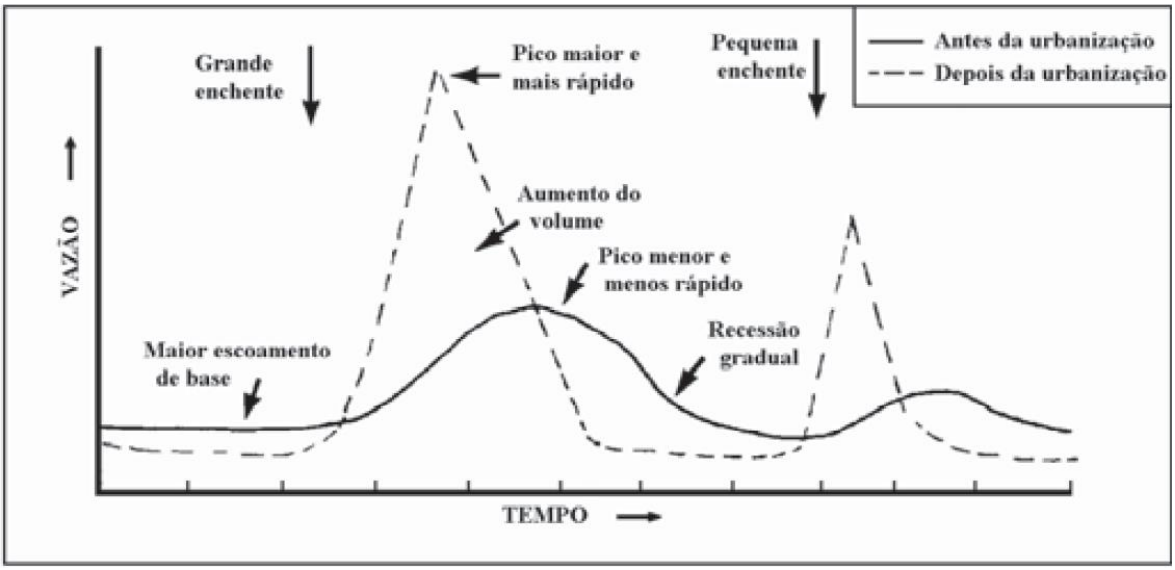
Figura 3 – Cenário urbanizado



Fonte: OECD (1986), citado por Tucci (2006)

Um menor volume de água passa a infiltrar, o que afeta a recarga dos aquíferos, também ocorre um aumento do escoamento superficial que por ser conduzido pelo sistema de drenagem, passa a ter um menor tempo e uma maior velocidade de escoamento. Como consequência as vazões máximas aumentam e antecipam os picos no tempo (Figura 4).

Figura 4 – Alteração do escoamento devido a urbanização



Fonte: Schueler (1987), citado por Tucci (2006)

Segundo Tucci et al (2009) esse aumento no pico da cheia numa bacia urbanizada, comparada com uma bacia em condições naturais, pode chegar a ser 6 vezes maior, em condições extremas.

Como tentativa de controlar as inundações decorrentes do processo de urbanização, buscam-se por soluções imediatas, indo na contramão das recomendações encontradas na literatura. Segundo Tucci (2006), os projetos de drenagem urbana utilizam como base o falso principio da transferência do excedente de água pluvial para um local mais afastado do seu ponto de origem, de maneira mais rápida possível.

Ainda segundo Tucci (2006) os projetos de micro drenagem aumentam a vazão e transferem seu volume para jusante do local, enquanto na macrodrenagem são canalizados os trechos críticos.

Tais procedimentos não visualizam as consequências para o restante da bacia, causando inundações a jusante dos trechos canalizados e a volta dessas aos trechos anteriormente canalizados, consequência de uma gestão inadequada na macrodrenagem. A partir de então as soluções tornam-se extremamente onerosas.

Tucci et al (2009) entendem que para se criar soluções eficazes para a drenagem urbana deve-se ter uma visão mais abrangente, pois essas dependem de um melhor entendimento da integração entre o ambiente urbano e de suas relações, além da necessidade de envolver aspectos legais, institucionais, tecnológicos e sociológicos.

Porém o que tem ocorrido é um processo de urbanização desordenada, segundo SUDERHSA (2002) esse processo, sem a preocupação com a drenagem, acaba por criar um ciclo de tentativa de combate às inundações sem uma efetiva solução, sendo cada vez mais custoso interrompe-lo.

Pode-se entender a importância do planejamento da urbanização, já que a falta desse afeta diretamente o ciclo hidrológico e possui consequências indesejadas. No Quadro 1 são apresentadas as relações de causa e efeito do processo de urbanização sobre as inundações urbanas.

Quadro 1 – Relação causa e efeito do processo de urbanização sobre as inundações urbanas

Causas	Efeitos
Impermeabilização	Maiores picos e vazões
Redes de Drenagem	Maiores picos a jusante
Lixo	Degradação da qualidade da água; Entupimento de bueiros e galerias.
Redes de esgotos deficientes	Degradação da qualidade da água; Moléstias de veiculação hídrica; Inundações: consequências mais sérias.
Desmatamento e Desenvolvimento Indisciplinado	Maiores picos e volumes; Mais erosão; Assoreamento em canais e galerias.
Ocupação das várzeas	Maiores prejuízos; Maiores picos; Maiores custos de utilidades públicas.

Fonte: Tucci et al (2009)

Segundo SUDERHSA (2002) as medidas de controle de inundações podem ser divididas em estruturais e não estruturais. Por medidas estruturais entende-se que são medidas que modificam o sistema, como barragens, diques e canalizações. Essas medidas buscam reduzir os riscos de enchentes, porém possuem custos inviáveis para a maioria das cidades. As medidas não estruturais são de caráter preventivo como o zoneamento de áreas de inundações associado ao Plano Diretor Urbano, a previsão de cheias e legislações diversas.

Deve-se entender que as medidas de controle devem atuar em conjunto a outras práticas, conforme citado anteriormente, de forma a se ter uma gestão sustentável.

Tucci (2006) cita três tipos de medidas de controle estruturais do escoamento:

- distribuída ou na fonte: onde o controle ocorre no lote, praças e passeios;

- na micro drenagem: onde o controle atua sobre o hidrograma resultante de um ou mais loteamentos;
- na macrodrenagem: onde o controle ocorre sobre os principais riachos urbanos.

Ainda segundo Tucci (2006), essas medidas de controle podem ser organizadas, de acordo com a sua ação sobre o hidrograma, em:

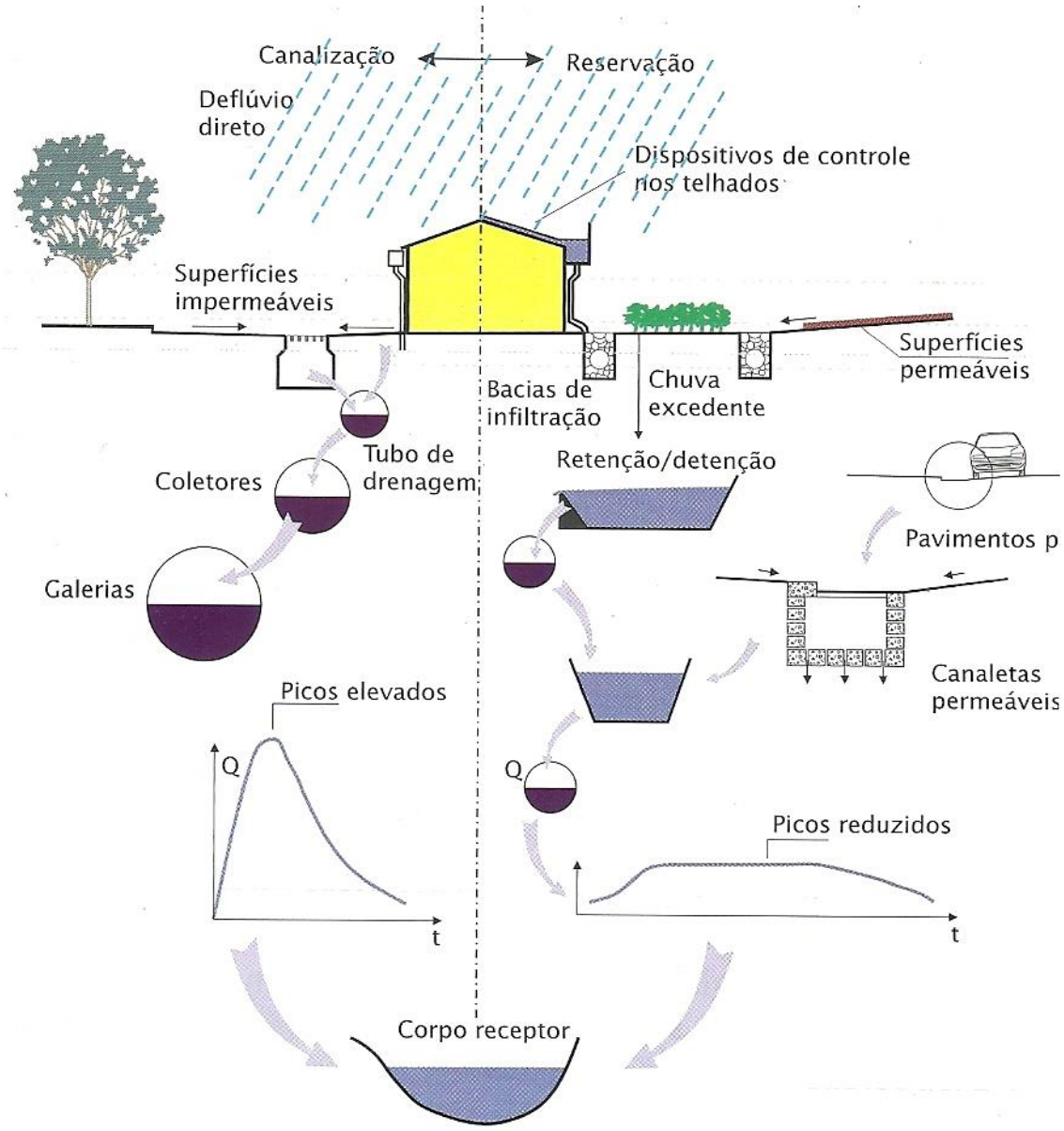
- infiltração e percolação: onde o escoamento é encaminhado para áreas de infiltração e percolação no solo, utilizando o armazenamento e o escoamento subterrâneo para desacelerar o escoamento superficial;
- armazenamento: uso de reservatórios para reter parte do volume escoado superficialmente, reduzindo o pico de cheia e distribuindo a vazão no tempo;
- aumento da eficiência do escoamento: uso de condutos e canais para drenar áreas inundadas, de forma a transferir as enchentes de um lugar para o outro. Podendo ser benéfico quando associado a reservatórios de detenção;
- diques e estações de bombeamento: solução tradicional de controle localizado de enchentes em áreas urbanas que não possuam espaço para amortecimento da inundação.

Essas medidas podem ser classificadas em contenção na fonte ou contenção a jusante. As medidas de contenção na fonte visam a redução dos picos das vazões nos lotes, possibilitam a recarga de aquíferos e o reaproveitamento das águas reservadas para fins diversos. Essas contenções devem ocorre em estacionamento, telhados, reservatórios residenciais e parques por exemplo.

As medidas de contenção a jusante envolvem o controle da micro drenagem e da macrodrenagem, onde a água é coletada por condutos pluviais e levada ao coletor principal, o amortecimento do pico de vazão ocorre devido a utilização de dispositivos de retenção e detenção como reservatórios e taques.

Na Figura 5 é apresentada a comparação entre os conceitos de reservação e canalização, apresentando as diferenças, deixando evidente que obras de contenção atuam de forma significativa nos picos de vazão enquanto apenas obras de canalização afetam negativamente o controle da drenagem urbana.

Figura 5 – Conceito de Canalização x Reservação



Fonte: Braga(1994), citado por Canholi (2005)

2.2 MÉTODOS DISPERSIVOS

2.2.1 Considerações iniciais

Como discutido anteriormente, o processo de urbanização aumenta as áreas impermeáveis e gera um aumento no escoamento, esse aumento causa picos elevados de vazão e gera problemas de inundações e alagamentos.

De acordo com Tucci (2006), uma das formas de controle que pode reduzir os custos com dispositivos hidráulicos e minimizar os impactos gerados a jusante é permitir maior infiltração da precipitação, de forma a criar situações mais próximas às condições naturais.

É importante compreender o significado de infiltração, percolação e capacidade de infiltração para entender melhor os dispositivos de aumento da infiltração.

A infiltração trata do processo de transferência da água pelas camadas superficiais do solo, em um sentido descendente. A percolação é o processo de movimentação da água na zona não saturada e saturada do solo e a capacidade de infiltração é a quantidade máxima de água que pode infiltrar em um solo, sendo apenas atingida quando ocorre excesso de precipitação.

2.2.2 Dispositivos de Infiltração

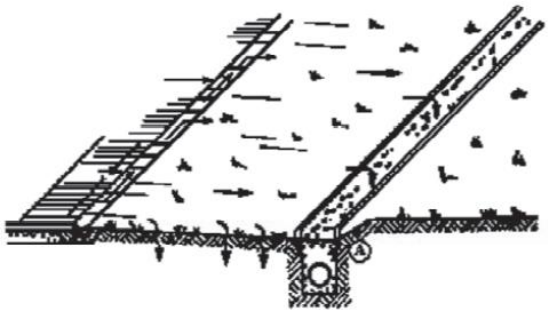
2.2.2.1 Métodos dispersivos

São métodos indicados para locais onde há espaços disponíveis e propiciam a infiltração da água no solo, mas enfrentam o problema da colmatação ao longo da vida útil, necessitando de manutenções.

Os dispositivos de infiltração são apresentados abaixo e suas definições foram apresentadas por Tucci (2006) e Canholi (2005):

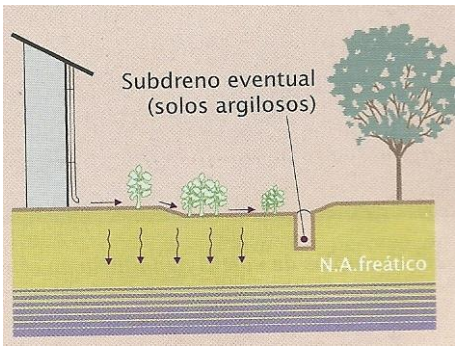
a) Superfícies ou planos de infiltração: constituído de uma área com cobertura vegetal que recebe as precipitações e as conduzem pelo terreno, podendo ter ou não subdrenos em regiões onde tem água parada (Figura 6 e Figura 7);

Figura 6 – Plano de infiltração



Fonte: Tucci (2006)

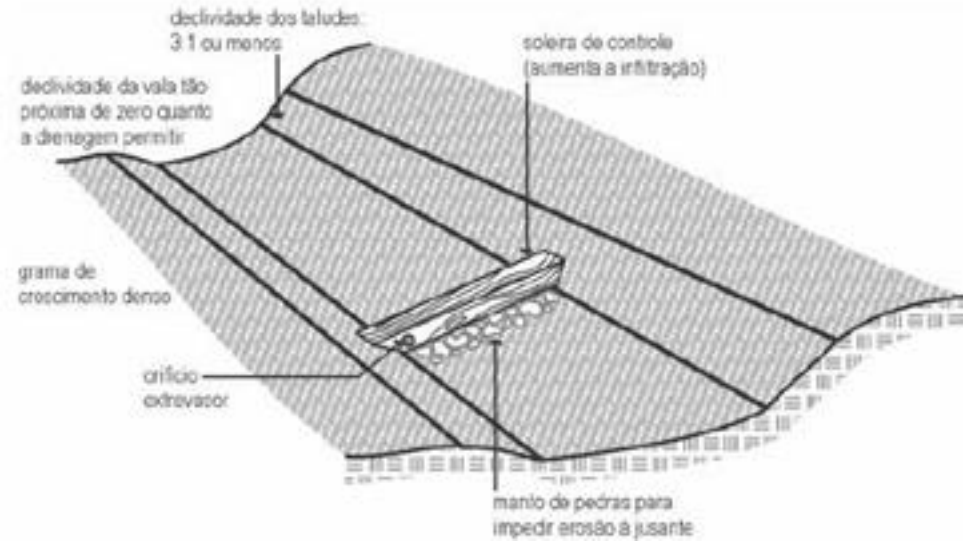
Figura 7 – Superfície de infiltração



Fonte: Canholi (2005)

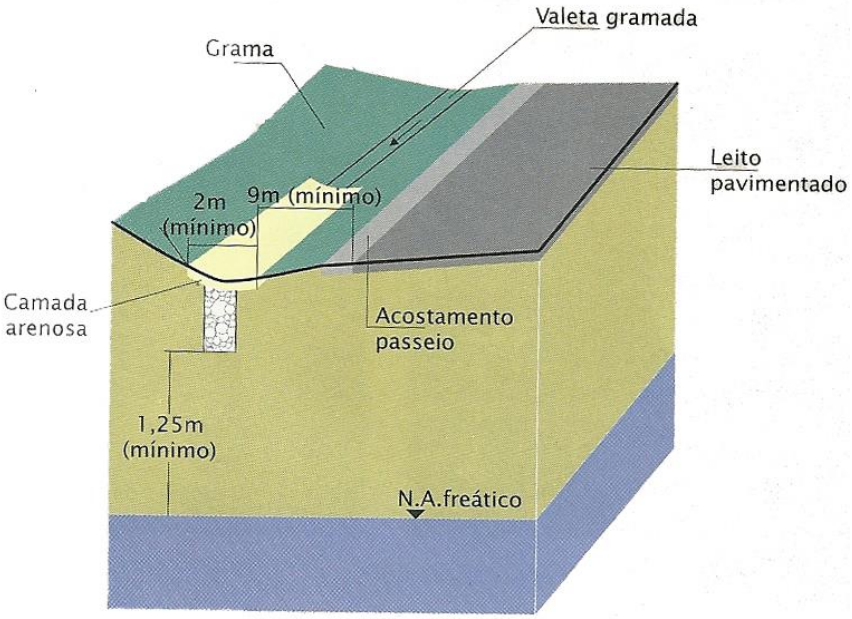
b) Valas ou valetas de infiltração: são dispositivos de drenagem lateral, revestidas com vegetação, utilizadas em ruas, estradas ou estacionamentos (Figura 8 e Figura 9)

Figura 8 – Vala de infiltração



Fonte: Schueler (1987), citado por SUDERSHA (2002)

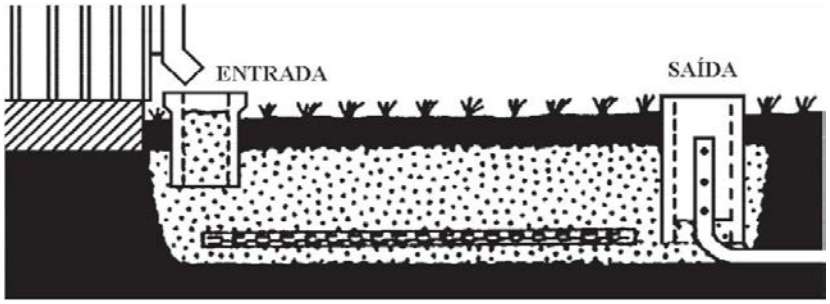
Figura 9 – Valeta de infiltração complementada com trincheira de percolação



Fonte: Urbonas (1992), citado por Canholi (2005)

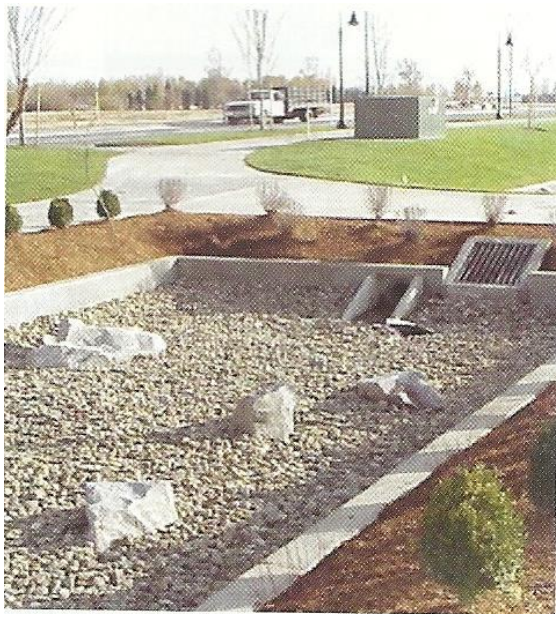
c) Bacias de percolação: dispositivo de percolação dentro dos lotes que aumenta a recarga e reduz o escoamento superficial, composta por brita ou cascalho que preenche uma vala e depois é reaterrada (Figura 10 e Figura 11).

Figura 10 – Bacia de percolação



Fonte: Holmstrand (1984), citado por Tucci (2006)

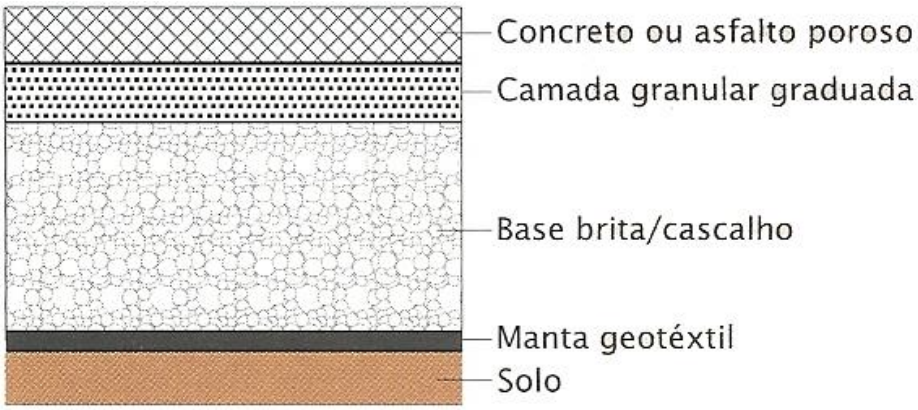
Figura 11 – Bacia de percolação



Fonte: Portland (2002), citado por Canholi (2005)

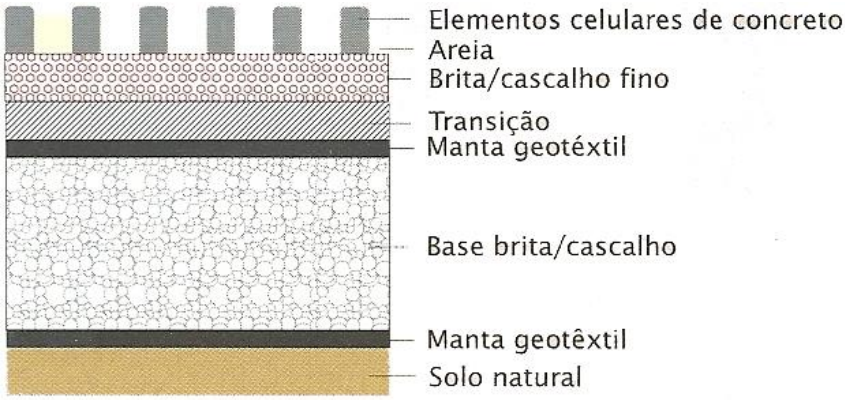
d) Pavimentos porosos ou permeáveis: são constituídos de concreto ou asfalto convencionais produzidos sem agregados miúdos. Comumente utilizados em passeios, estacionamentos, quadras de esporte e ruas de tráfego leve (Figura 12 e Figura 13).

Figura 12 – Pavimentos porosos



Fonte: Portland (2002), citado por Canholi (2005)

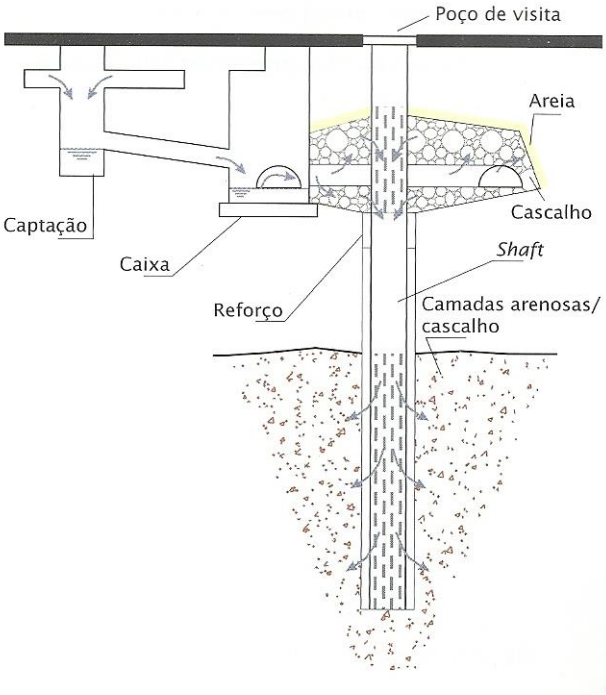
Figura 13 – Pavimentos porosos



Fonte: Portland (2002), citado por Canholi (2005)

e) Poços de infiltração: utilizadas quando não existem espaços disponíveis ou quando a urbanização inviabiliza a implantação de outras medidas. Deve-se ter cuidado com a qualidade da água infiltrada e atenção ao nível freático que deve estar suficientemente baixo em relação à superfície do terreno e com subsolo com camadas arenosas (Figura 14).

Figura 14 – Poço de infiltração



Fonte: Nakamura (1998), citado por Canholi (2005)

Na Tabela 1, extraída de Tucci (2006), são apresentados os dispositivos de infiltração, suas características, vantagens e desvantagens, para facilitar a compreensão.

Tabela 1 – Dispositivos de infiltração[1]

Dispositivo	Características	Vantagens	Desvantagens
Planos e valos de infiltração com drenagem	Gramados, áreas com seixos ou outro material que permita a infiltração natural	Permite infiltração de parte da água para o sub-solo	Planos com declividade > 0,1% não devem ser usados; o material sólido para a área de infiltração pode reduzir sua capacidade de infiltração.
Planos e valos de infiltração sem drenagem	Gramados, áreas com seixos ou outro material que permita a infiltração natural	Permite infiltração da água para o subsolo	O acúmulo de água no plano durante o período chuvoso não permite trânsito sobre a área. Planos com declividade que permita escoamento.
Pavimentos permeáveis	Concreto, asfalto ou bloco vazado com alta capacidade de infiltração	Permite infiltração da água	Não deve ser utilizado para ruas com tráfego intenso e/ou de carga pesada, pois a sua eficiência pode diminuir
Poços de infiltração, trincheiras de infiltração e bacias de percolação	Volume gerado no interior do solo que permite armazenar a água e infiltrar	Redução do escoamento superficial e amortecimento em função do armazenamento.	Pode reduzir a eficiência ao longo do tempo, dependendo da quantidade de material sólido que drena para a área

[1] Condicionantes físicos: Profundidade do lençol freático no período chuvoso > 1,20 m. A camada impermeável deve ser > 1,20 m de profundidade. A taxa de infiltração de solo saturado > 7,60 mm/h. Bacias de percolação: a condutividade hidráulica saturada > 2.10-5 m/s.

Fonte: Tucci (2006)

2.3 ANÁLISES DE CASOS

2.3.2 Pavimento Poroso

Como apresentado anteriormente, o pavimento permeável ou poroso é uma das medidas de contenção na fonte, com enfoque na infiltração do escoamento superficial. Pode ser construído sobre camadas permeáveis e pode ser de bloco vazado, concreto ou asfalto.

No caso do concreto e do asfalto, o pavimento poroso é composto de agregados graúdos, cimento, água e aditivos, possuindo baixa porcentagem ou nenhuma porcentagem de agregado miúdo em sua composição.

Segundo Tucci (2006) esse tipo de controle apresenta vantagens, tais como: redução do escoamento superficial; redução dos condutos da drenagem pluvial; redução da lâmina de água dos estacionamentos e redução de custos do sistema de drenagem.

Ainda segundo Tucci (2006) esse tipo de pavimento apresenta algumas desvantagens, como: necessidade de manutenção para evitar a colmatação; maior custo direto de construção e contaminação dos aquíferos.

O pavimento poroso pode ser construído sobre camadas permeáveis e possuir um dreno para coleta da água e posterior condução para um reservatório para reutilização ou para condução ao coletor principal, como exemplo um rio.

Urbonas e Stahre (1993) citado por Araújo et al (2000), classifica os pavimentos permeáveis em três tipos:

- pavimento de concreto poroso;
- pavimento de asfalto poroso;
- pavimento de blocos de concreto vazados preenchidos com material granular, como areia ou vegetação rasteira, como grama.

Ainda segundo Urbonas e Stahre (1993) citado por Araújo et al (2000), existem limitações de uso para os pavimentos permeáveis:

- solos de baixa permeabilidade;
- nível do lençol freático alto;
- existência de camada impermeável que impeça a infiltração.

Segundo Araújo et al (2000) o pavimento permeável pode proporcionar uma redução do volume escoado no tempo de resposta da bacia para condições similares ou até condições melhores que as de início do desenvolvimento, dependendo do subsolo. Para isto deve ser utilizado racionalmente, devem-se respeitar os limites físicos e realizar manutenções preventivas trimestralmente.

2.3.3 Pavimento permeável x redução do escoamento superficial

Araújo et al (2000) realizaram um estudo para avaliar a eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial e estudaram as seguintes superfícies (Figura 15), utilizando um simulador de chuvas:

- solo compactado com declividade de 1 a 3%;
- pavimentos impermeáveis: uma parcela de concreto convencional de cimento, areia e brita, com declividade de 4%;

- pavimentos semipermeáveis: uma parcela de superfície com pedras regulares de granito com juntas de areia, conhecidas por paralelepípedos, com declividade de 4%; e outra parcela revestida com pedras de concreto industrializado tipo "pavi S" igualmente com juntas de areia, conhecida por blocket, com declividade de 2%;
- pavimentos permeáveis: uma parcela de blocos de concreto com orifícios verticais preenchidos com material granular (areia) com declividade de 2% e uma parcela de concreto poroso com declividade de 2%.

Figura 15 – Pavimentos estudados

Fonte: Araújo et al (2000)

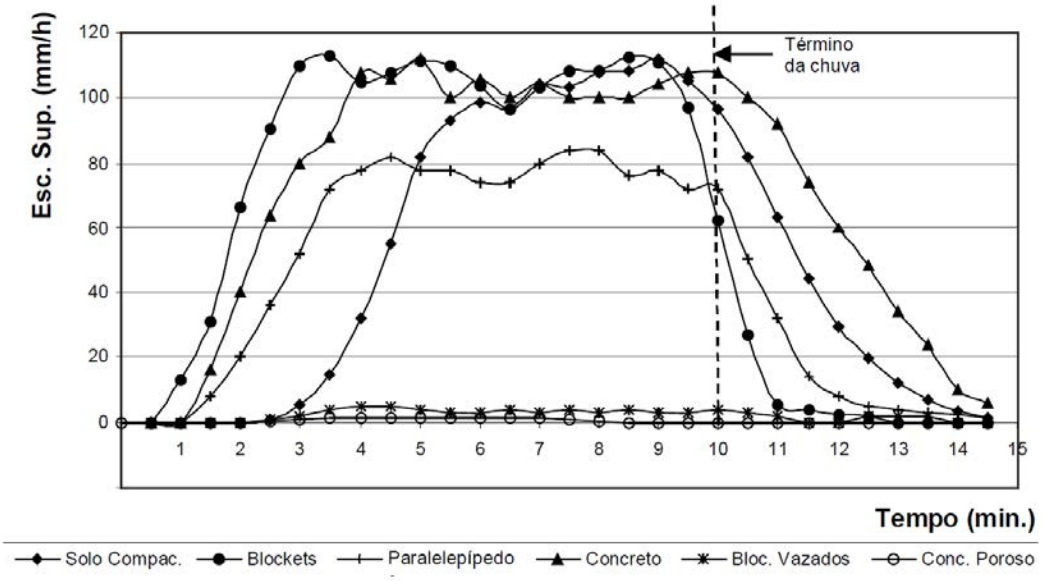
A chuva de projeto utilizada no estudo de Araújo et al (2000), foi de 10 minutos de duração, com período de retorno de 5 anos e intensidade de 111,9 mm/h e obtiveram como resultados o apresentado na Tabela 2 e na Figura 16.

Tabela 2 – Resultados do estudo – Simulação de chuva nas superfícies

	Solo Compactado	Concreto	Bloco de Concreto	Paralele-pípedo	Concreto Poroso	Blocos Vazados
Data	03/06/98	28/10/98	29/07/98	13/10/98	13/04/99	27/01/99
Hora Início	14h06min	15h15min	15h20min	11h20min	14h55min	10h08min
Intensidade simulada (mm/h)	112	110	116	110	120	110
Chuva total (mm)	18,66	18,33	19,33	18,33	20,00	18,33
Escoamento total (mm)	12,32	17,45	15,00	10,99	0,01	0,5
Coeficiente de escoamento	0,66	0,95	0,78	0,60	0,005	0,03
Umidade inicial do solo (cm^3/cm^3)	32,81	32,73	32,71	32,72	0,329	32,24

Fonte: Araújo et al (2000)

Figura 16 – Resultados do estudo – Escoamento superficial observado



Fonte: Araújo et al (2000)

Do estudo Araújo et al (2000) concluíram que no pavimento impermeável praticamente toda a chuva gerou escoamento superficial, também observaram um acréscimo de 44% no coeficiente de escoamento, comparando com o solo compactado.

Também observaram que as superfícies semipermeáveis tiveram escoamento superficial inferior ao do concreto, quanto ao coeficiente de escoamento, os blocos de concreto tiveram crescimento de 22% e os paralelepípedos uma queda de 11% ao se comprar com o solo compactado.

E o pavimento permeável não teve escoamento superficial mostrando ser de grande utilidade no controle dos volumes escoados, podendo ser utilizado em estacionamentos diversos. Ainda, Araújo et al (2000) ressaltaram que esse tipo de pavimento é importante

para controle de inundações frequentes ou de alto risco, observando que quando os reservatórios estiverem na capacidade máxima pode haver uma menor eficiência se comparada ao estudo realizado.

Araújo et al (2000) levantaram o custo para a implantação dos pavimentos estudados, porém não incluíram os custos de manutenção, devido a inexistência de empresas especializadas no país na manutenção desse tipo de pavimento. Mas ressaltaram que nos Estados Unidos seu custo médio e da ordem de 1 a 2% do custo da implantação do dispositivo.

Na Tabela 3 são apresentados os custos obtidos por m².

Tabela 3 – Custo de implantação dos pavimentos

Tipo de pavimento	Custo unitário (m^2)
Blocos de concreto	10,10
Paralelepípedo	16,74
Concreto impermeável	13,14
Blocos vazados	18,22
Concreto poroso	19,06

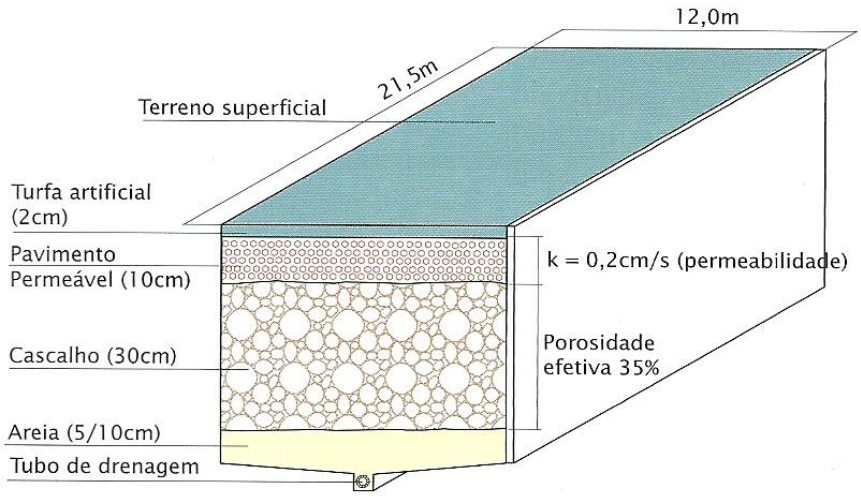
Fonte: Araújo et al (2000)

2.3.4 Desempenho do pavimento poroso

Canholi (2005) apresentou dois estudos realizados sobre o desempenho do pavimento poroso, o primeiro estudo foi realizado por Harada e Ichikawa (1994) e o segundo por Pratt, Mantle e Schofield (1998).

O estudo de Harada e Ichikawa (1998) foi realizado com um pavimento poroso proposto por eles, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Pavimento Poroso



Fonte: Harada e Ichikawa (1994), citado por Canholi (2005)

O experimento foi realizado entre 1984 e 1988 com 60 eventos de chuva. Foram analisados três casos com diferentes subcamadas de cascalho, 30 cm, 45 cm e 75 cm, respectivamente, mantendo as demais conforme a Figura 18.

Desse estudo obtiveram como resultado o apresentado na Tabela 4.

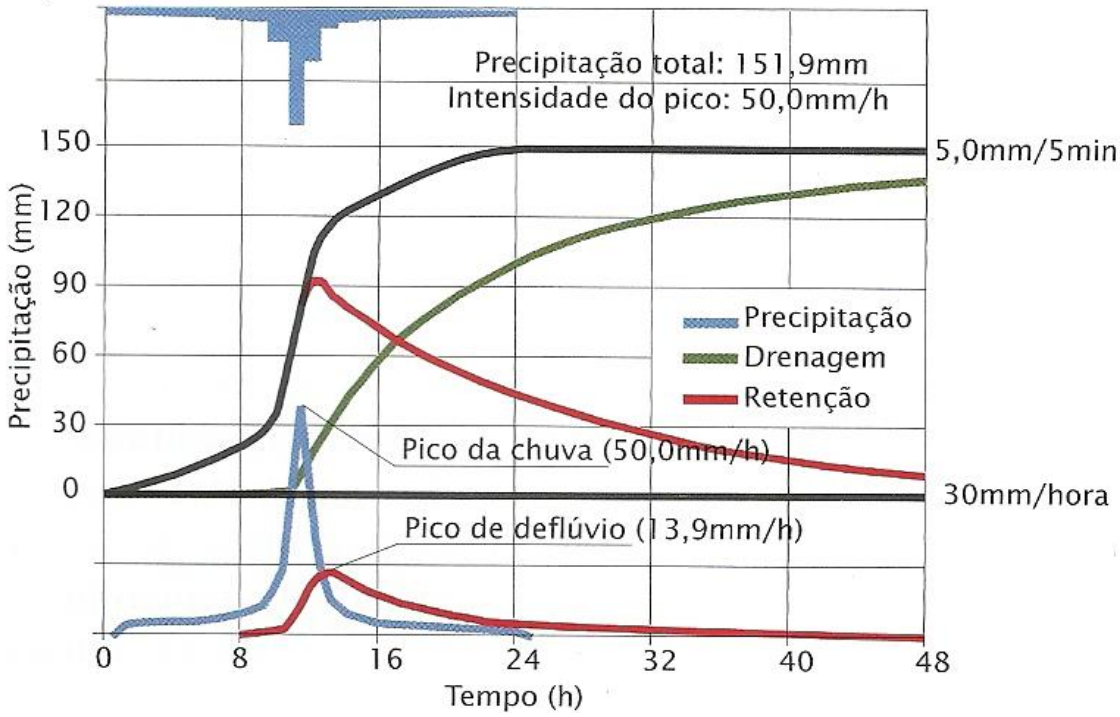
Tabela 4 - Resultados obtidos

Caso	Observado	Valores
A	Retardamento inicial do escoamento	1,0 h
	Redução no pico do deflúvio para	17,0 mm/h
B	Retardamento inicial do escoamento	2,0 h
	Redução no pico do deflúvio para	13,9 mm/h
C	Retardamento inicial do escoamento	2,0 h
	Redução no pico do deflúvio para	12,0 mm/h

Fonte: Harada e Ichikawa (1994), citado por Canholi (2005)

Segundo Canholi (2005), isso mostrou a grande possibilidade de redução nos picos de deflúvios e ampliação nos tempos de concentração devido ao aumento da camada de cascalho. E na Figura 18 são apresentados os hidrogramas típicos para o Caso B com a simulação numérica.

Figura 18 – Desempenho de um pavimento poroso definido analiticamente

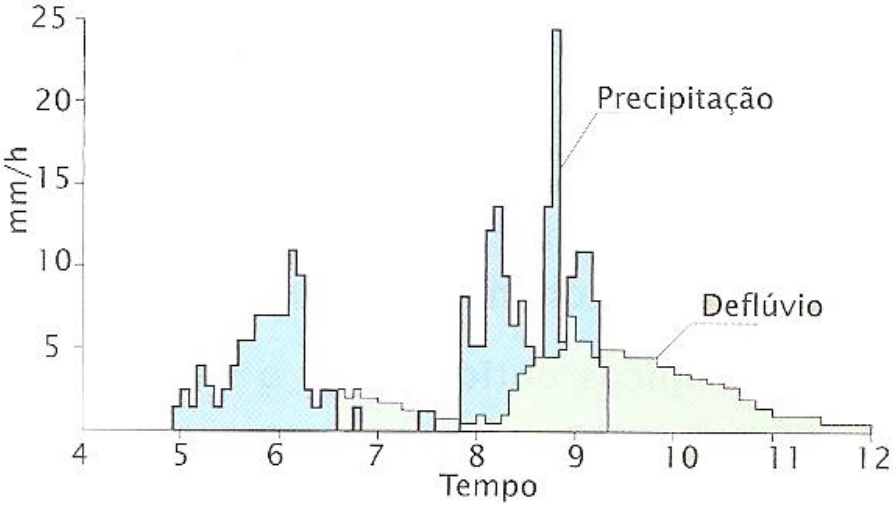


Fonte: Harada e Ichikawa (1994), citado por Canholi (2005)

Para o segundo estudo apresentado, realizado por Pratt, Mantle e Schofield (1998) foi estudado um pavimento construído por eles para uma série de experimentos que avaliaram a capacidade de armazenamento de deflúvios.

Segundo Canholi (2005), desse estudo obtiveram como resposta uma redução de 30% nos picos de vazão e uma ampliação no tempo de concentração, de 2-3 minutos para 5-10 minutos. Na Figura 19 é apresentada a relação entre precipitação e deflúvio obtida em um dos eventos.

Figura 19 – Pavimento poroso experimental



Fonte: Pratt, Mantle e Shofield (1998), citado por Canholi (2005)

2.3.5 Pavimento Permeável com agregado reciclado

2.3.5.1 Considerações iniciais

Diversos países fazem utilização dos resíduos de construção e demolição na produção de concretos, dentre eles: Japão, Rússia, Alemanha e Dinamarca. De acordo com Leite (2001) a primeira utilização significativa dos resíduos ocorreu no final da Segunda Guerra Mundial.

Sugiram diversos estudos com enfoque no reaproveitamento dos resíduos de construção e demolição aplicando-os das mais diversas formas, no Quadro 2 são apresentados alguns dos estudos realizados nos últimos anos.

Quadro 2 – Estudos de concretos com resíduos de construção e/ou demolição

Título da pesquisa	Autores
Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição	Leite (2001)
Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete	Rao, A.; Jha, K. N.; Misra, S. (2007)
Evaluating the Use of Recycled Concrete Aggregate in Pervious Concrete Pavement	Rizvi et al (2009)
Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates	Evangelista, L.; Brito, J. de (2010)
Aproveitamento de Resíduos de Concreto na Confecção de Peças para Pavimento Intertravado de Concreto	Simiele (2010)
Properties of Pervious Concrete Incorporating Recycled Concrete Aggregate	Berry et al (2012)
Combined effects of recycled aggregate and fly ash towards concrete sustainability	Kim, K.; Shin, M.; Cha, S. (2013)
Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production	Silva, R.V.; Birto, J. de; Dhir, R.K. (2014)

Fonte: Próprio Autor

Observa-se que como cada resíduo possui uma origem diferenciada, são necessários diversos estudos para compreender as peculiaridades que cada um apresenta. No Brasil existem algumas normas que tratam sobre os resíduos sólidos de construção civil. No Quadro 3 são apresentas as normas da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT para resíduos de construção civil.

Quadro 3 – Normas para Resíduos de Construção Civil

Normas da ABNT
NBR 15112:2004 - Resíduos da construção civil e resíduos volumosos. Áreas de transbordo e triagem. Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15113:2004 - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15114:2004 - Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15115:2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos
NBR 15116:2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos

Fonte: Próprio Autor

No Quadro 4 são apresentados alguns dos estudos já realizados com pavimentos permeáveis.

Quadro 4 – Estudos realizados com pavimentos permeáveis

Título da pesquisa	Autores
Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial	Araújo et al (2000)
Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements	Neithalath et al (2006)
Sustainable design of pervious concrete pavements	Hager (2009)
Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities	Deo, O.; Neithalath, N. (2011)
Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental	Höltz (2011)
Caracterização de concreto permeável produzido com agregados reciclados de construção e demolição para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano.	Vidal (2014)
Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate)	Bhutta et al (2013)
Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves	Batezini (2013)

Fonte: Próprio Autor

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Cimento

No desenvolvimento desse projeto foi utilizada a estrutura do Laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, onde foram realizadas as moldagens dos corpos-de-prova, os ensaios de caracterização dos materiais, resistência à compressão, permeabilidade, absorção e porosidade.

Foram realizados ensaios de caracterização para a Brita e para o RCD no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP. Baseado nos materiais de estudo, decidiu-se por não fazer uso da areia, uma vez que influencia diretamente na permeabilidade do concreto. Dessa forma, apenas os agregados graúdos, o cimento e o RCD foram utilizados.

O cimento utilizado foi o CP II Z 32 (Cimento Portland Composto) para a moldagem dos corpos-de-prova. Estudos apontam que os cimentos com adições pozolânicas, em até 20%, aumentam a resistência à compressão sem prejudicar a porcentagem de poros do concreto, como mostrado por Hager (2009). Além da facilidade de obtenção desse cimento na região noroeste do Estado de São Paulo.

O cimento utilizado na composição dos concretos possui as seguintes características físicas e químicas apresentadas na Tabela 5 cujos dados devem atender os requisitos especificados pelas normas da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), sendo:

- determinação da finura pelo Método de Blaine segundo a NBRNM 76 (ABNT, 1998);
- determinação do tempo de pega pela NBRNM 65 (ABNT, 2003);

- massa específica pela NBRNM 23 (ABNT, 2001);
- resistência à compressão do cimento pela NBR 7215 (ABNT, 1997);
- análise química segundo a NBR 11578 (ABNT, 1997).

Tabela 5 - Caracterização do cimento CP II Z 32

Referência			C-011.2010	Especificações	
Amostra			---	NBR 5736/NBR 11578	
Carta			---		
Data da coleta			08.04.10	min.	máx.
Finura Peneira 200 (% retida)			0,53	-	12,0
Finura Peneira 325 (% retida)			3,98	-	-
Superfície específica Blaine (cm²/g)			4298	2600	-
Densidade aparente (g/cm³)			1,09	-	-
Densidade absoluta (g/cm³)			3,12	-	-
Água de consistência da pasta		gramas	140	-	-
		(%)	28,00	-	-
Início de pega (h:min)			02:34	01:00	-
Fim de pega (h:min)			03:34	-	10:00
Expansão em autoclave (%)			0,577	-	
Resistência à Compressão Axial	Consistência da argamassa	gramas	150	-	-
		a / c	0,48	-	-
	Data de moldagem		12.04.10	-	-
	Tensão (MPa)	03 dias	18,8	10,0	-
		07 dias	23,7	20,0	-
		28 dias	32,3	32,0	-
Análise Química (%)	Perda ao fogo		5,79	-	6,5
	Insolúveis		5,48	-	16,0
	SiO_2		20,10	-	-
	Fe_2O_3		3,07	-	-
	Al_2O_3		5,18	-	-
	CaO		56,88	-	-
	MgO		5,81	-	6,5
	SO_3		3,16	-	4,0
	Na_2O		0,13	-	-
	K_2O		0,76	-	-
	Equivalente Alcalino		0,62	-	-
	Cal livre em CaO		2,31	-	-

Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DO ESTADO DE SÃO PAULO – CESP

3.1.2 Agregado Graúdo

Para o agregado graúdo foi analisado a brita que melhor se aproximava da granulometria do resíduo de construção e demolição, para tanto se realizou os ensaios de composição granulométrica das britas disponíveis, de acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT):

- Composição granulométrica segundo a NBRNM 248 (ABNT, 2003).

A seguir na Tabela 6 e na Figura 20 são apresentados os dados da brita comercial de origem basáltica, brita 0.

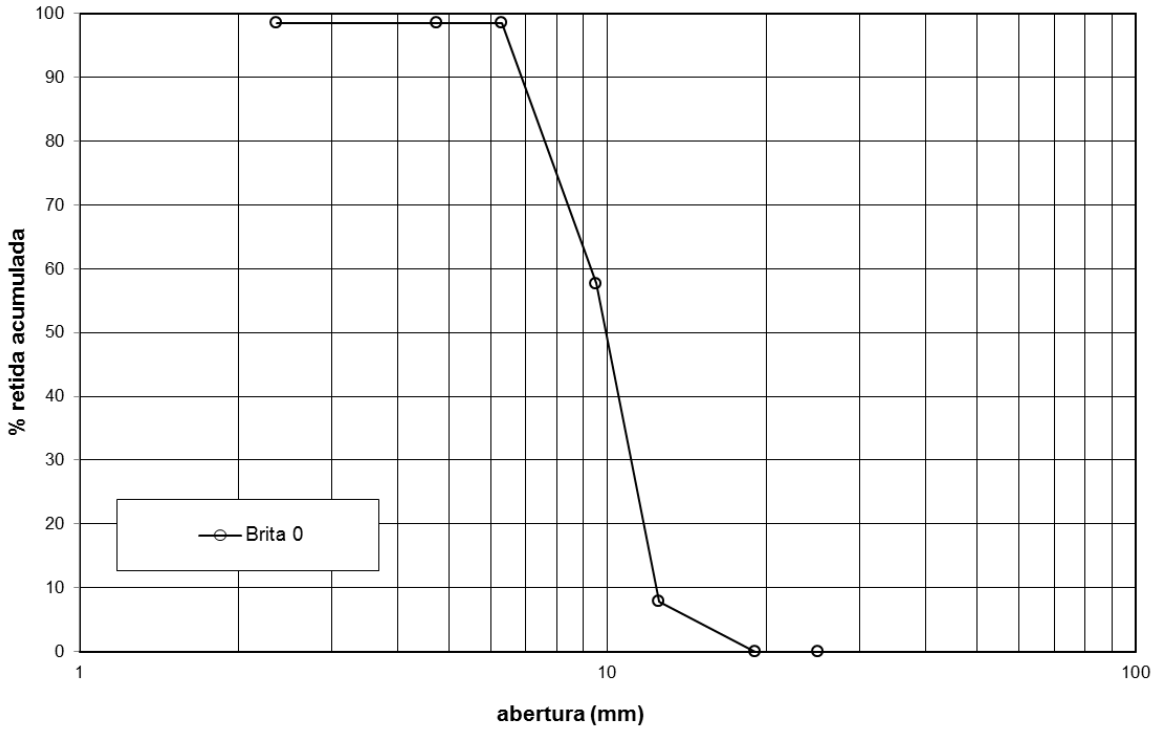
Tabela 6 - Caracterização do agregado graúdo – Classificação: Brita 0

PENEIRAS		Abertura	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada	
Normal	Auxil.					
3"	-	75 mm		0,0	0,0	
-	2 1/2"	63 mm		0,0		0,0
-	2"	50 mm		0,0		0,0
1 1/2"	-	37,5 mm		0,0	0,0	
-	1 1/4"	31,5 mm		0,0		0,0
-	1"	25 mm	0	0,0		0,0
3/4"	-	19 mm	0	0,0	0,0	
-	1/2"	12,5 mm	395	7,9		7,9
3/8"	-	9,5 mm	2490	49,8	57,7	
-	1/4"	6,3 mm	2040	40,8		98,5
N.º 4	-	4,75 mm		0,0	98,5	
N.º 8	-	2,36 mm		0,0	98,5	
N.º 16	-	1,18 mm		0,0	98,5	
N.º 30	-	600 mm		0,0	98,5	
N.º 50	-	300 mm		0,0	98,5	
N.º 100	-	150 mm		0,0	98,5	
Fundo	-	75 mm	75	1,5		100,0
Total			5000	100,00	648,70	

Fonte: Próprio Autor

Figura 20 - Caracterização do agregado graúdo – Classificação: Brita 0

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm)	0,150	0,300	0,600	1,180	2,36	4,75	6,30	9,50	12,50	19,0	25,0	31,5
Brita	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	57,7	7,9	0,0	0,0	0,0



Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 7 e na Figura 21 são apresentados os dados da brita comercial de origem basáltica, brita 1.

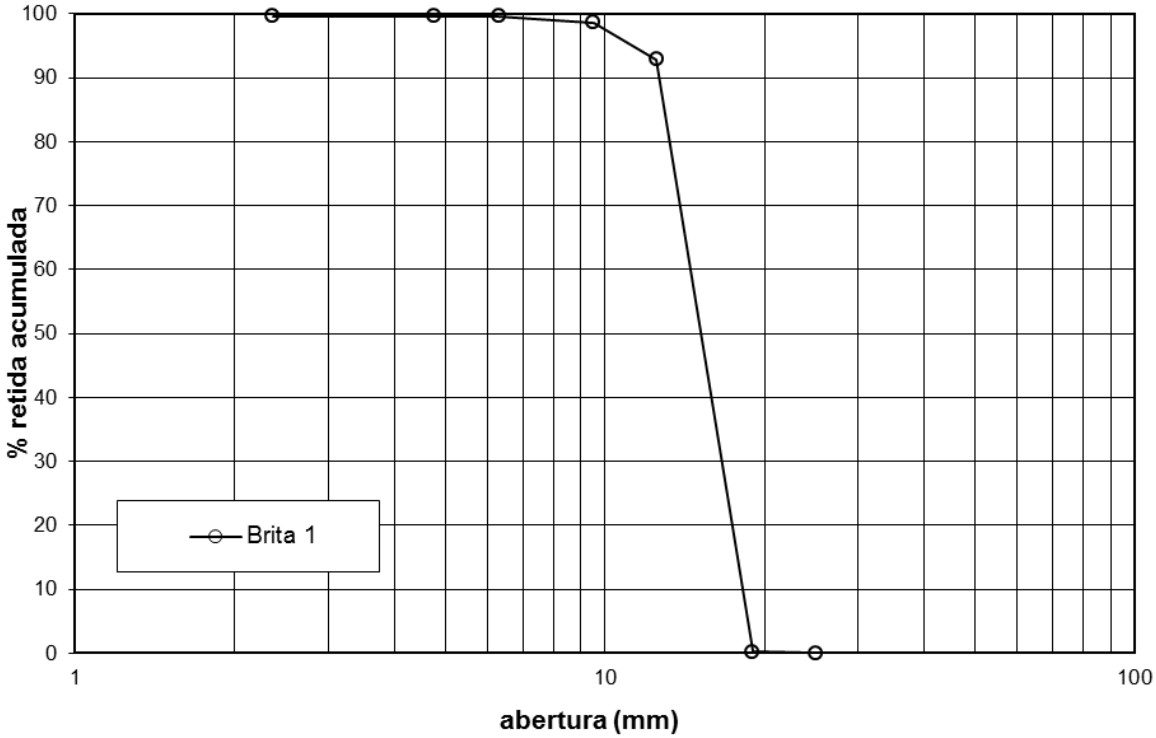
Tabela 7 - Caracterização do agregado graúdo – Classificação: Brita 1

PENEIRAS		Abertura	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada	
Normal	Auxil.					
3"	-	75 mm		0,0	0,0	
-	2 1/2"	63 mm		0,0		0,0
-	2"	50 mm		0,0		0,0
1 1/2"	-	37,5 mm		0,0	0,0	
-	1 1/4"	31,5 mm		0,0		0,0
-	1"	25 mm	0	0,0		0,0
3/4"	-	19 mm	10	0,2	0,2	
-	1/2"	12,5 mm	4630	92,6		92,8
3/8"	-	9,5 mm	290	5,8	98,6	
-	1/4"	6,3 mm	50	1,0		99,6
N.º 4	-	4,75 mm		0,0	99,6	
N.º 8	-	2,36 mm		0,0	99,6	
N.º 16	-	1,18 mm		0,0	99,6	
N.º 30	-	600 mm		0,0	99,6	
N.º 50	-	300 mm		0,0	99,6	
N.º 100	-	150 mm		0,0	99,6	
fundo	-	75 mm	20	0,4		0,4
Total			5000	100,00	696,4	

Fonte: Próprio Autor

Figura 21 - Caracterização do agregado graúdo – Classificação: Brita 1

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm)	0,150	0,300	0,600	1,180	2,36	4,75	6,30	9,50	12,50	19,0	25,0	31,5
Brita	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	99,6	98,6	92,8	0,2	0,0	0,0



Fonte: Próprio Autor

3.2 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

3.2.1 Requisitos para resíduo de construção e demolição sem função estrutural

De acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004) classifica-se como resíduos classe A resíduos reutilizáveis ou recicláveis, resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de edificações tais como: componentes cerâmicos provenientes de tijolos, blocos, telhas, placas de revestimentos e outros, argamassas e concreto.

Ainda segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004) o resíduo sólido de construção civil classificado segundo o parágrafo anterior, proveniente de áreas de reciclagem conforme NBR 15114 (ABNT, 2004) destinados a obras de pavimentação viária são classificados em agregados de resíduos de concreto (ARC) e agregado de resíduo misto (ARM).

O resíduo utilizado neste trabalho classificado como classe A, foi definido como sendo ARC conforme os procedimentos de classificação do anexo A da norma NBR 15116 (ABNT, 2004).

Observou-se que resíduo também atende os requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação conforme a norma NBR 15116 (ABNT, 2004).

3.2.2 Classificação do RCD

Foram empregados resíduos de construção e demolição fornecidos pela Usina de Reciclagem de São José do Rio Preto - SP. Após o recebimento do material, foi realizada uma análise visual em busca de impurezas, em sequência realizou-se o ensaio de composição granulométrica de acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT):

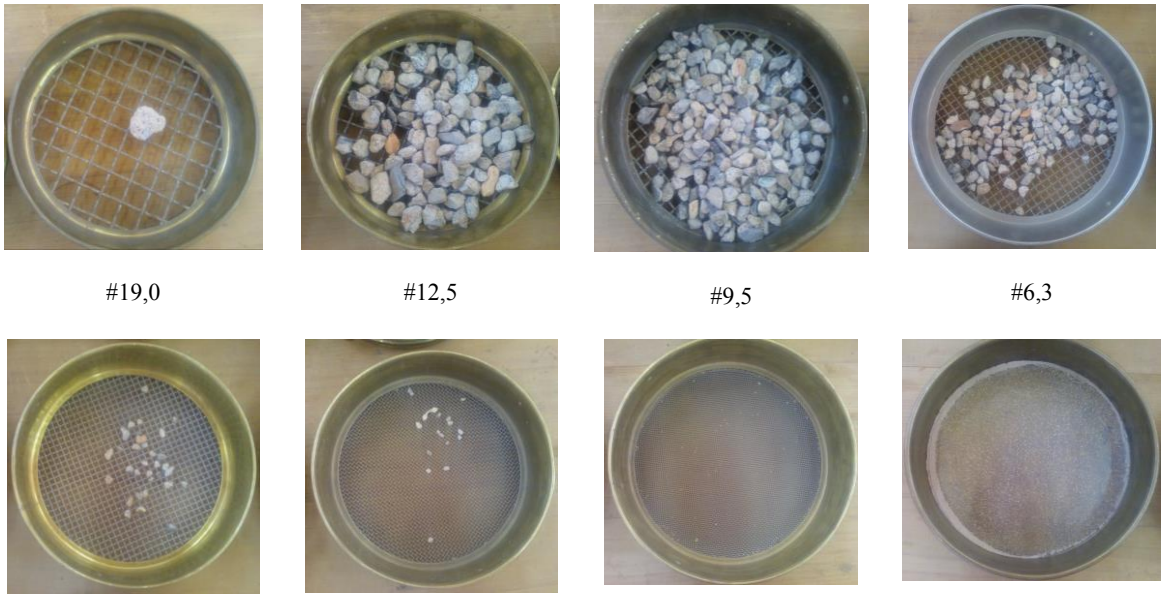
- Composição granulométrica segundo a NBRNM 248 (ABNT, 2003).

Assim, determinou-se um jogo de peneiras de modo a separar os resíduos de construção e demolição (Figura 22), em faixas granulométricas bem definidas, apresentando fácil distinção visual (Figura 23).

Figura 22 - Resíduos de construção e demolição

Fonte: Próprio Autor

Figura 23 - Resíduo de construção e demolição – Granulometria



#19,0 #12,5 #9,5 #6,3

#4,75 #2,36 #1,18 Fundo

Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 8 e na Figura 24, apresentam-se os dados do ensaio do ensaio de granulometria realizados com o RCD.

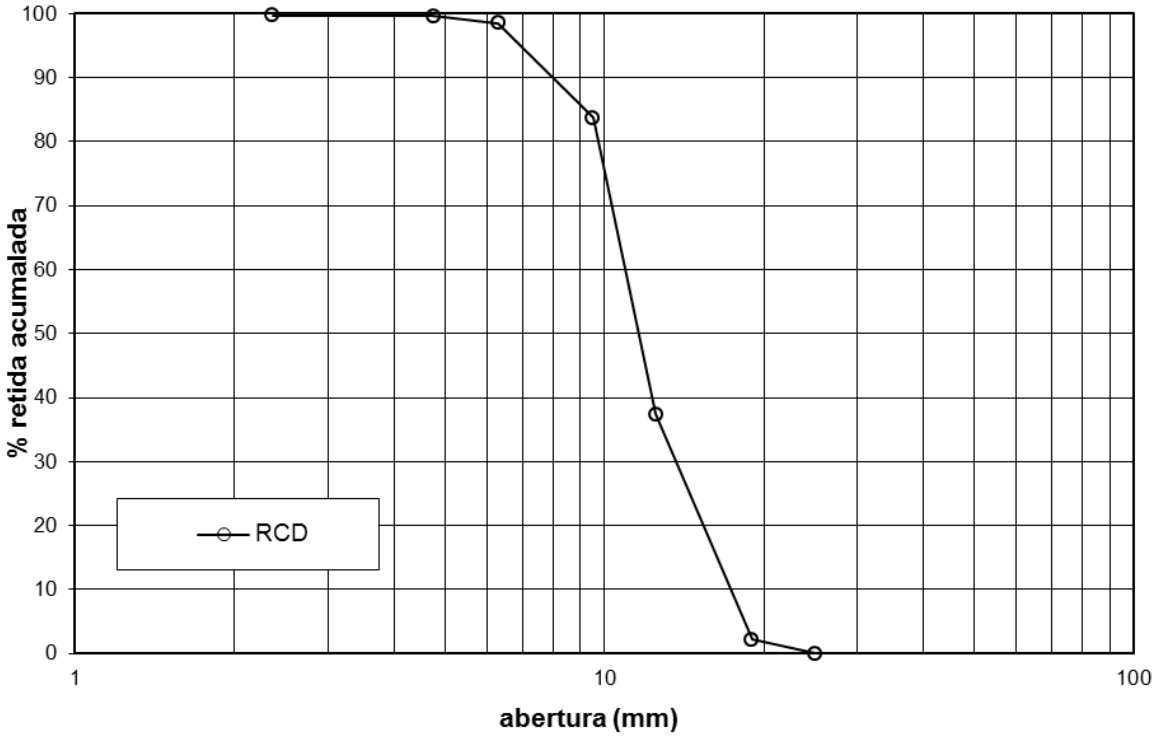
Tabela 8 - Caracterização do resíduo de construção e demolição – Classificação: RCD

PENEIRAS		Abertura	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada	
Normal	Auxil.					
3"	-	75 mm		0,0	0,0	
-	2 1/2"	63 mm		0,0		0,0
-	2"	50 mm		0,0		0,0
1 1/2"	-	37,5 mm		0,0	0,0	
-	1 1/4"	31,5 mm		0,0		0,0
-	1"	25 mm		0,0		0,0
3/4"	-	19 mm	85	2,1	2,1	
-	1/2"	12,5 mm	1411	35,3		37,4
3/8"	-	9,5 mm	1855	46,4	83,8	
-	1/4"	6,3 mm	590	14,8		98,5
N.º 4	-	4,75 mm	43,5	1,1	99,6	
N.º 8	-	2,36 mm	6,6	0,2	99,8	
N.º 16	-	1,18 mm	2,7	0,1	99,8	
N.º 30	-	600 mm		0,0	99,8	
N.º 50	-	300 mm		0,0	99,8	
N.º 100	-	150 mm		0,0	99,8	
fundo	-	75 mm	6,2	0,2		100,0
Total			4000	100,00	684,67	

Fonte: Próprio Autor

Figura 24 - Caracterização do resíduo de construção e demolição – Classificação: RCD

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm)	0,150	0,300	0,600	1,180	2,36	4,75	6,30	9,50	12,50	19,0	25,0	31,5
Brita	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,6	98,5	83,8	37,4	2,1	0,0	0,0



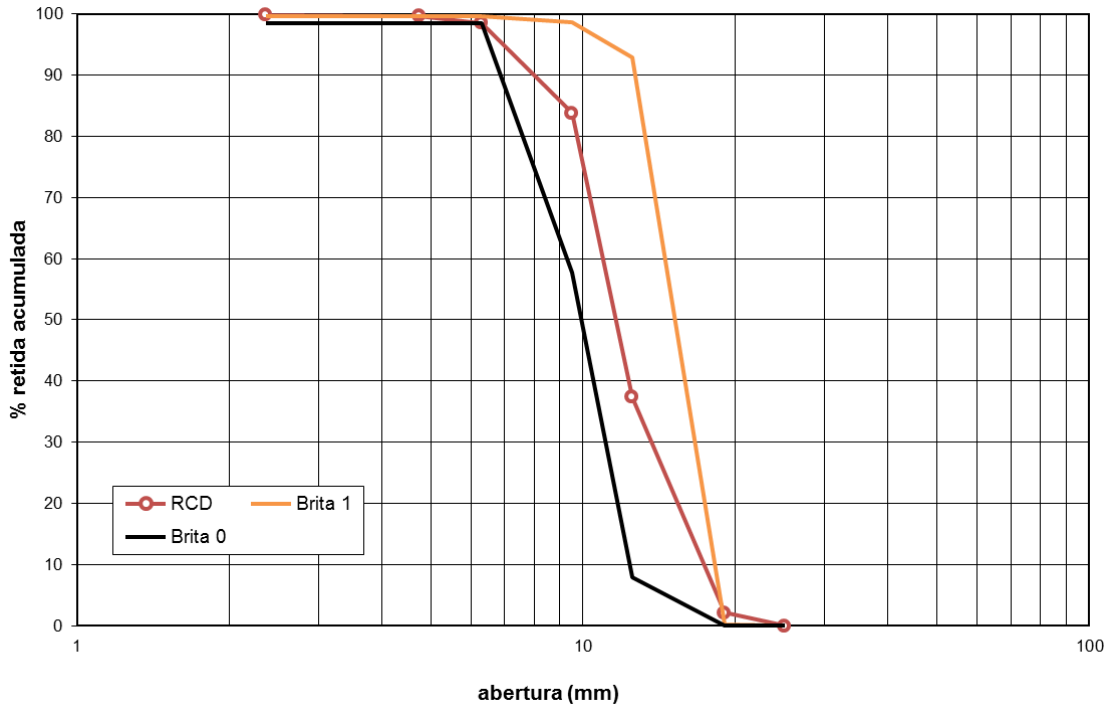
Fonte: Próprio Autor

3.2.3 Resíduo de Construção e Demolição x Brita

Para a escolha da brita utilizada realizou-se uma comparação entre as granulometrias das britas e do RCD de forma a escolher a que melhor se aproximava da granulometria do resíduo.

A Figura 25 apresenta a comparação entre as granulometrias do RCD com a Brita 0 e Brita 1.

Figura 25 - Comparação entre as granulometrias



Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 9 apresenta-se uma comparação com os pesos retidos das Britas 0 e 1 e do RCD.

Tabela 9 - Peso Retido das britas 0 e 1 e do RCD

	Peso Retido (g)		
Abertura (mm)	Brita 0	Brita 1	RCD
25 mm	0	0	0
19 mm	0	10	85
12,5 mm	395	4630	1411
9,5 mm	2490	290	1855
6,3 mm	2040	50	590
4,75 mm	0	0	43,5
2,36 mm	0	0	6,6
1,18 mm	0	0	2,7

Fonte: Próprio Autor

Da análise da Figura 25 e da Tabela 9 conclui-se que a Brita 0 é a que melhor se assemelha ao RCD, sendo assim foi decidido pelo seu uso.

Alguns autores optam pela separação do resíduo em faixas granulométricas para posterior composição de misturas, enquanto outros optam pela utilização de apenas uma faixa granulométrica, como Rizvi et al (2010) e Berry et al (2012). Para este trabalho foi decidido a utilização de apenas uma faixa granulométrica, para posterior substituição do agregado natural.

Para isto se utilizou um jogo de peneiras de modo a separar 60 quilos de RCD, utilizados no estudo, em faixas granulométricas bem definidas, apresentando fácil distinção visual. Após a separação do material, constatou-se que sua composição contém aproximadamente 95% de concreto e brita e 5% de outros materiais. Esses valores, no entanto, podem variar em função da amostra coletada.

Descartaram-se os resíduos que se apresentavam nas peneiras com aberturas menores que 9,5 mm e acima de 12,5 mm. Após separação dos resíduos retidos nas peneiras de abertura 9,5 mm (Figura 26) e 12,5 mm (Figura 27), optou-se pela utilização dos resíduos retidos na peneira de abertura 9,5 mm.

Figura 26 - Resíduos de construção e demolição #9,5

Fonte: Próprio Autor

Figura 27 - Resíduos de construção e demolição #12,5

Fonte: Próprio Autor

3.2.4 Demais Ensaios de Caracterização dos Materiais

Após os ensaios de composição granulométrica realizaram-se os demais ensaios de caracterização de acordo com as normas da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) como seguem:

- Massa unitária pela NBRNM 45 (ABNT, 2006).
- Massa específica, massa específica aparente, massa específica saturada superfície seca e absorção de água seguindo as recomendações da NBRNM 53 (ABNT, 2009).
- Umidade total pela NBR 9939 (ABNT, 2011).
- Quantidade de materiais pulverulentos, segundo NBR 7218 (ABNT, 2010).
- Módulo de finura e dimensão máxima do agregado pela NBRNM 248 (ABNT, 2003).

Na Tabela 10 apresentam-se as informações dos ensaios de caracterização da Brita 0 e na Tabela 11 apresentam-se as informações dos ensaios de caracterização do RCD.

Tabela 10 - Caracterização do agregado graúdo - Classificação: Brita 0

Características (unidade)	Valor
Ø máximo do agregado (mm)	12,5
Módulo de finura	6,49
Massa específica saturada superfície seca (g/cm³)	3,143
Massa específica seca (g/cm³)	3,323
Massa específica aparente (g/cm³)	3,065
Massa unitária (g/cm³)	1,558
Absorção (%)	2,531
Teor de material pulverulento (%)	0,480
Umidade (%)	0,843

Fonte: Próprio Autor

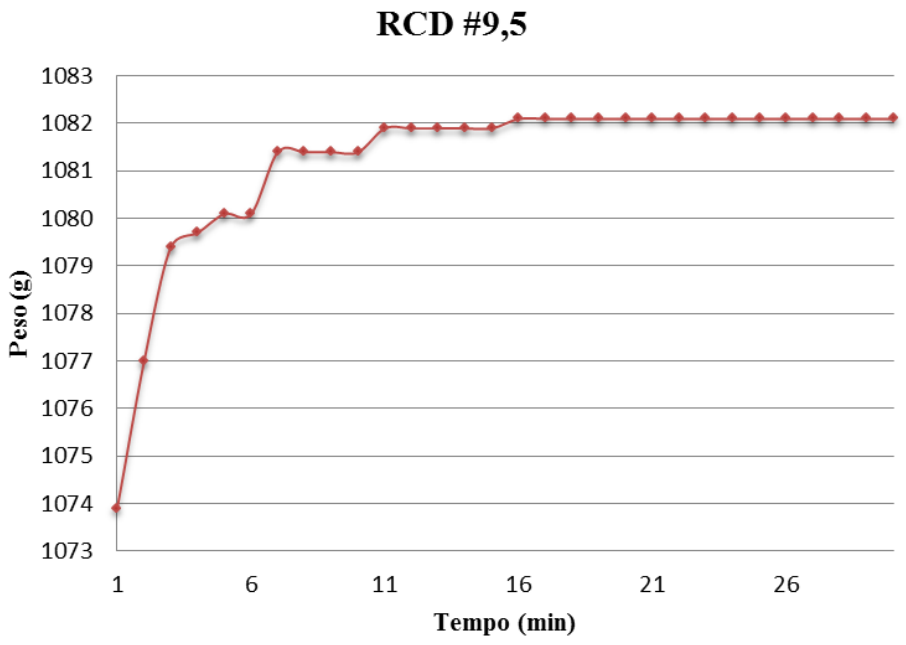
Tabela 11 - Caracterização do resíduo de construção e demolição - Classificação: RCD

Características (unidade)	Valor
Ø máximo do agregado (mm)	9,5
Módulo de finura	6,85
Massa específica saturada superfície seca (g/cm³)	2,656
Massa específica seca (g/cm³)	2,997
Massa específica aparente (g/cm³)	2,485
Massa unitária (g/cm³)	1,211
Absorção (%)	6,867
Teor de material pulverulento (%)	0,193
Umidade (%)	1,398

Fonte: Próprio Autor

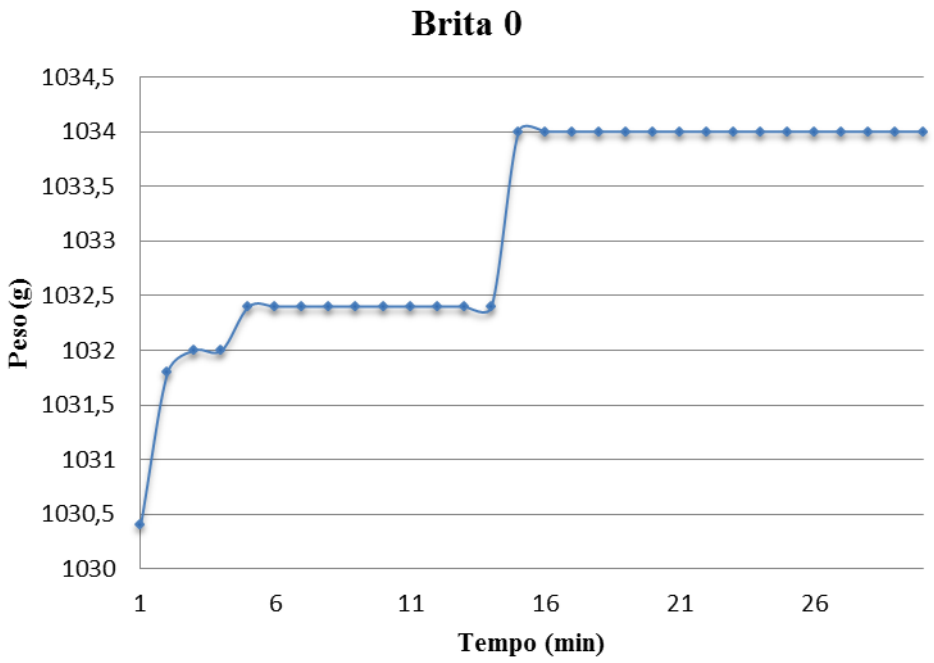
Na Figura 28 e Figura 29, apresentam-se os dados do ensaio de absorção para o RCD #9,5 e para Brita 0, respectivamente.

Figura 28 - Absorção RCD #9,5



Fonte: Próprio Autor

Figura 29 - Absorção Brita 0



Fonte: Próprio Autor

Foi observado que o resíduo de construção e demolição apresenta teor de absorção bem acima do agregado natural. Analisando a Figura 28 pode-se observar que o resíduo não possui constância na absorção nos primeiros 11 minutos, enquanto o agregado natural possui patamares de absorção (Figura 29). Essa diferença de comportamento poderia ocasionar uma perda da água de amassamento para o resíduo.

Vidal (2014) destaca essa variação na absorção de água entre o agregado natural e o reciclado, conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Taxas de absorção de agregados reciclados em função do componente e da granulometria

Componentes Reciclados	Frações	Absorção[1] (%)
Concreto	12 – 20 mm	6,85
	6 – 12 mm	7,49
Material Cerâmico	12 – 20 mm	14,50
	6 – 12 mm	14,40
1 - Capacidade de absorção do material em função da massa do material seco em estufa		

Fonte: Leite (2001), citado por Vidal (2014)

Ainda conforme Vidal (2014), como solução, seria necessário um aumento da quantidade de água ou um preparo do resíduo, realizando uma pré-umidificação do mesmo antes da concretagem. Conforme Leite (2001) essa pré-umidificação deve ser de 10 minutos antes do inicio da concretagem.

Nos estudos de Rizvi et al (2010) o resíduo foi submerso em água por 24 h antes da realização da concretagem, para que não fosse absorvida grande quantidade da água de amassamento.

Entende-se que ao realizar a saturação do resíduo pode-se alterar a relação entre o fator A/C. Assim foi adotada uma ordem diferenciada, de mistura dos componentes do concreto, conforme apresentado no Quadro 7.

Esta ordem visou minimizar os efeitos que poderiam ser causados pela maior absorção de água do resíduo em relação à brita.

3.3 Água

Utilizou-se água de abastecimento público da cidade de Ilha Solteira-SP.

3.4 Aditivo Químico

Como uma das propostas do trabalho optou-se pela não utilização de aditivos, para que se pudesse compreender o comportamento do concreto permeável sem adições químicas.

3.5 METODOLOGIA DE DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

3.5.1 Dosagem do concreto

Na literatura são encontradas diversas dosagens para o concreto permeável, porém ainda se consiste de um método empírico. Segundo Tennis et al (2004) as dosagens típicas do concreto permeável utiliza como base o disposto na Tabela 13.

Tabela 13 - Dosagem para concreto permeável

Materiais	**Consumo / Proporção (kg/m³)**
Cimento	270 – 415
Agregado graúdo	1190 – 1480
Relação água/cimento (em massa)	0,27 - 0,34
Relação cimento/agregado (em massa)	1:4 - 1:4,5
Relação agregado miúdo/agregado graúdo (em massa)	0 - 1:1

Fonte: Tennis et al (2004)

3.5.2 Definição das porcentagens de substituição

Iniciou-se pela analise dos teores de substituição do agregado natural, brita 0, pelo agregado reciclado, RCD. Diversos estudos apontam que substituições de 100% do agregado natural pelo reciclado resultam em resistências à compressão extremamente baixas, quando comparadas com concretos sem substituição.

Berry et al (2012) fez estudos com porcentagens de substituição de 0 a 100%, chegando a conclusão que valores entre 0 e 20% apresentam boa resistência à compressão.

O mesmo ocorre com Rizvi et al (2010), com teores de substituição entre 0 e 100% concluindo que valores até 15% não afetam significativamente a resistência à compressão, porém valores iguais ou superiores a 30% têm redução significativa dessa resistência.

Assim o presente trabalho decidiu por realizar substituições dentro de uma faixa que variou de 0 a 15%.

3.5.3 Definição dos limites de resistência à compressão

Entende-se que concretos dessa natureza possuem baixa resistência à compressão, como apontam diversos estudos presentes neste trabalho.

Hager (2009) ressalta que de acordo com o Departamento de Transporte do Colorado (CDOT), misturas de concreto usadas para calçadas e estacionamentos de veículos leves têm resistência à compressão de 20.684 kPa. Em seu trabalho, considerou aceitável valores de resistência à compressão de 13.790 kPa aos 28 dias, pois a superfície de contato das rodas com o pavimento de um veículo, de aproximadamente 9000 kg, gera uma pressão de 919,3 kPa, sendo então suficiente o valor de 13.790 kPa.

Segundo Batezini (2013) a resistência à compressão dos concretos permeáveis varia entre 4,1 MPa e 55,8 MPa e em seu trabalho houve uma variação entre 6,02 MPa a 10,17 MPa.

Para este trabalho, foi considerado aceitável valores de resistência à compressão entre 10 a 20 Mpa aos 56 dias, tanto para os concretos referência, 0% de substituição, quanto para os concretos com RCD.

3.5.4 Definição dos traços dos concretos

3.5.4.1 Definição de cada composição

Após os estudos realizados se prosseguiu o desenvolvimento da metodologia de dosagem, para os concretos convencionais e com adição de RCD, as seguintes características:

- resistência à compressão, aos 56 dias de idade, entre 10 a 20 MPa;
- substituição de 5, 10 e 15 % de RCD em relação ao volume do agregado graúdo.

Assim ficam definidos os traços finais de concreto para a confecção dos modelos, elaborados com cimento CP II Z 32, como segue:

- **R**: Traço **sem resíduo** de construção e demolição;
- **T5**: Traço **com 5% de resíduo** de construção e demolição;
- **T10**: Traço **com 10% de resíduo** de construção e demolição;
- **T15**: Traço **com 15% de resíduo** de construção e demolição;

Onde R é o traço referência para os modelos estudados neste trabalho.

Neste presente trabalho foi realizada uma variação das informações presentes na Tabela 13, pois as composições variam de acordo com os tipos de materiais utilizados, conforme apresentado por Tennis et al (2004). Assim os traços do concreto não devem se restringir ao disposto nessa tabela, apenas a utilizar como base.

Sendo assim, como o presente trabalho é uma pesquisa experimental, decidiram-se pela confecção dos corpos de prova com as seguintes composições apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Composição dos traços

Materiais	**% em relação à massa do cimento**			
	R	**T10**	**T15**	**T15**
Água	0,35	0,35	0,35	0,35
Cimento	1	1	1	1
Areia	0	0	0	0
Brita 0	3	2,85	2,70	2,55
RCD	0	0,15	0,30	0,45

Fonte: Próprio Autor

3.6 MISTURA

Neste trabalho foram realizadas misturas com ordem diferenciada dos trabalhos utilizados como base. Batezini (2013) faz uso da seguinte sequência de preparo do concreto permeável, conforme Quadro 5 e obteve um concreto com a aparência apresentada na Figura 30.

Quadro 5 - Procedimento de mistura dos materiais

ITEM	PROCEDIMENTO DE MISTURA DOS MATERIAIS
1	Adicionar todo o agregado na betoneira com mais 5% do peso total de cimento.
2	Misturar por 01 minuto.
3	Adicionar o restante dos materiais.
4	Misturar por 3 minutos.
5	Deixar a mistura em repouso por 3 minutos.
6	Misturar por mais 02 minutos.

Fonte: Batezini (2013)

Figura 30 - Mistura dos componentes do concreto permeável

Fonte: Batezini (2013)

Vidal (2014) segue uma ordem de colocação dos componentes do concreto conforme Quadro 6 e obteve um concreto com a aparência apresentada na Figura 31.

Quadro 6 - Quadro de sequência das misturas dos componentes do concreto

ITEM	SEQUÊNCIA DA MISTURA DOS COMPONENTES DO CONCRETO
1	Adicionar todo o agregado graúdo
2	Adicionar 40% de água da taxa média de absorção do agregado, misturar por 01 minuto, findo este tempo aguardar 10 minutos.
3	Adicionar o cimento e misturar por mais 01 minuto.
4	Adicionar os 60% restantes da água e misturar por mais 03 minutos. A mistura está pronta para moldar os corpos de provas, estabelecido no estudo experimental. (Figura 3.8)

Fonte: Vidal (2014)

Figura 31 - Concreto fresco com agregado reciclado

Fonte: Vidal (2014)

Para o presente trabalho ficaram definidas as etapas de mistura conforme o Quadro 7.

.

Quadro 7 - Sequência da mistura

Item	Sequência da mistura
1	Adição de todo agregado graúdo.
2	Adição do cimento; Misturar por 1 minuto.
3	Adição de 50% de água; Misturar por 1 minuto.
4	Adição dos 50% restantes de água; Misturar por 3 minutos.
5	Conferência visual do concreto permeável.

Fonte: Próprio Autor

Para o início da confecção dos corpos-de-prova, primeiramente foram inseridos na betoneira os agregados graúdos. Após um minuto de mistura, a betoneira foi desligada e foi inserido o cimento, prosseguindo para mais um minuto de mistura dos materiais. Desligou-se novamente a betoneira e adicionou-se 50% da água de amassamento, prosseguindo para mais um minuto de mistura. Por fim, adicionaram-se os 50% restantes da água de amassamento e ligou-se a betoneira por 3 minutos. Finalizado esse processo foi realizado o teste visual para conferência do concreto permeável.

A sequência apresentada foi utilizada para o traço controle. Para os traços com substituição do agregado natural pelo RCD, esses foram adicionados no inicio, juntamente com o agregado natural seguindo para um minuto de mistura. Após esse processo seguiu-se a ordem apresentada no Quadro 7.

Para a conferência visual foi observado se o concreto apresentava aspecto metálico e se quando moldado em forma de esfera, permanecia com esse formato, sem desmanchar. Na Figura 34, Figura 33 e Figura 34, apresentam-se as possíveis situações após preparo das misturas.

Figura 32 - Amostra de concreto com pouca água

Fonte: Tennis et al (2004)

Figura 33 - Amostra de concreto com quantidade ideal de água

Fonte: Tennis et al (2004)

Figura 34 - Amostra de concreto com muita água

Fonte: Tennis et al (2004)

3.7 MOLDAGENS DOS CORPOS-DE-PROVA

3.7.1 *Slump Test*

Após conferência visual do concreto, foi realizado o ensaio de Abatimento do Tronco de Cone, conforme as recomendações da NBRNM 67 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1998).

Mariano (2014) realizou os ensaios de Abatimento do Tronco de Cone (Figura 35) e observou que concretos com mesma relação A/C apresentam valores iguais ou aproximados para o *Slump*, independente da granulometria adotada. Apenas uma variação da relação A/C, que altera a trabalhabilidade do concreto, apresentaria uma resposta diferente para o *Slump*.

O mesmo efeito foi observado por Rizvi et al (2010), independente da porcentagem de substituição do agregado natural pelo resíduo, a resposta para o *Slump* permaneceu a mesma, ou seja, zero. Rizvi et al (2010) ressalta que isso era esperado, uma vez que os concretos permeáveis apresentam baixa relação A/C, isso permite que os vazios do concreto permaneçam abertos, o que resulta no resultado visualizado.

Sendo assim, o mesmo se esperava do concreto estudado, embora com materiais diferentes, permaneceu a mesma relação A/C e observou-se a mesma resposta.

Figura 35 – Ensaio de abatimento de tronco de cone

Fonte: Mariano (2014)

3.7.2 Moldagem

Dando sequência, foram moldados os corpos-de-prova referentes a cada um dos traços estudados. Para a moldagem foram utilizados corpos cilíndricos com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, sendo os moldes fabricados em material PVC (Cloreto de Polivinila), seguindo as recomendações da NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2008).

Para a moldagem dos corpos-de-prova seguiu-se o procedimento adotado por Rizvi et al (2009), foi utilizado o martelo de Proctor padrão, acrescentou-se parte do concreto ao molde, em seguida foram aplicados cinco golpes do martelo de Proctor. Após isso, mais uma camada de concreto e mais cinco golpes, realizando em seguida o arrasamento da superfície.

Não foi realizada a vibração do concreto, pois poderia ocasionar um adensamento da pasta de cimento, além do preenchimento de vazios. Ambas as situações não são ideais para esse tipo de concreto.

Em seguida foram colocados plásticos de proteção sobre os corpos-de-prova, para evitar a perda de água, pois concretos permeáveis tendem a perder água rapidamente. Após 24 horas, os corpos-de-prova foram desmoldados e levados para câmara úmida, onde foram curados até os dias agendados para cada um dos ensaios realizados.

Foram moldados quatro corpos-de-prova, por traço e por idade, totalizando 48 corpos-de-prova. Para analise dos resultados de resistência à compressão e porosidade foram consideradas as médias aritméticas de três valores obtidos. Para os ensaios de permeabilidade foi considerada a média aritmética de nove valores obtidos.

3.8 ENSAIOS

Os ensaios foram realizados conforme a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT):

- ensaio de Resistência à Compressão axial, aos 7, 28 e 56 dias, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007);

3.8.1 Ensaio de Porosidade

Para o ensaio de porosidade foi seguido a sequência apresentada por Ahn et. al (2014), conforme apresentado no Quadro 8.

Quadro 8 - Procedimento experimental para ensaio de porosidade

Procedimento Experimental
Submergir o corpo-de-prova em água até sua saturação por 3 horas, realizando pequenos golpes a cada 30 minutos para acelerar a saturação.
Realizar a medição do peso submerso.
Retirar o corpo-de-prova da água e deixar por secando ao ar por 24 horas.
Realizar a pesagem do corpo-de-prova após as 24 horas.

Fonte: Ahn et al (2014)

Para o cálculo da porosidade foi utilizado a Equação 1, utilizada por Ahn et al (2014) em seu trabalho.

$$P = 1 - ((W_D - W_S)/\gamma_w)/V_T \qquad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

P – porosidade;

W_D – peso saturado superfície seca;

W_S – peso submerso;

γ_w – peso específico da água;

V_T – volume total da amostra.

Para a realização do ensaio foi utilizado uma balança de precisão de 0,001 g com espaço para fixação de um gancho, um recipiente para submersão do corpo-de-prova em

água e uma cesta metálica com espaço para fixação do gancho, conforme apresentado na Figura 36 e Figura 37.

Figura 36 - Equipamento para medição do peso submerso

Fonte: Ahn et al (2014)

Figura 37 - Montagem do conjunto

Fonte: Ahn et al (2014)

Segundo Batezini (2013), um índice de vazios abaixo de 15% caracteriza um material de baixa porosidade, enquanto que um índice de vazios acima de 30% caracteriza um material de alta porosidade. Tennis et al (2004) considera que um valor em torno de 20% de índices de vazios garante boa resistência à compressão e boa permeabilidade ao concreto.

3.8.2 Coeficiente de Permeabilidade

Para os ensaios de permeabilidade utilizou-se um permeâmetro de carga variável (Figura 38), tomando-se o cuidado para a água apenas percolar pelo corpo-de-prova, sem vazamentos pelas laterais, ou seja, passando apenas pela face superior e inferior do corpo-de-prova.

Saturou-se o corpo-de-prova, antes do inicio do ensaio, e após isto, foram cronometrados os tempos para uma coluna de água descer da marca de 290 mm até 70 mm

da superfície da amostra. O procedimento foi repetido três vezes e considerado o tempo médio. Tal procedimento teve como base a norma ACI 522 R-06 (2006) do *American Concrete Institute* e o modelo de permeâmetro elaborado por Neithalath et al (2006).

Figura 38 - Permeâmetro de carga variável

Fonte: Próprio Autor

O coeficiente de permeabilidade foi determinado pela Lei de Darcy com emprego da Equação 2:

$$K = \frac{A_1 L}{A_2 t} \log\left(\frac{h_i}{h_f}\right) \qquad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

K – coeficiente de permeabilidade;

A_1 – área da sessão da amostra (m^2);

A_2 – área do tubo (m^2);

L – comprimento da amostra (m);

t – tempo (s);

h_i – altura inicial (m);

h_f – altura final (m).

De acordo com a norma ACI 522 R-06 (2006) o valor para o coeficiente de permeabilidade deve ser igual ou superior a 1, 40.10^{-3} m/s.

Para uma análise do grau de permeabilidade, utilizou-se como medida de comparação o disposto na Tabela 15, extraída do trabalho de Jabur et al (2013).

Tabela 15 - Valores típicos de coeficiente de permeabilidade de solos

Tipo de Solo	**Coeficiente de Permeabilidade K (m/s)**	**Grau de permeabilidade**
Brita	$>10^{-3}$	Alta
Areia de brita, areia limpa, areia fina	10^{-3} a 10^{-5}	Média
Areia, areia suja e silte arenoso	10^{-5} a 10^{-7}	Baixa
Silte, silte argiloso	10^{-7} a 10^{-9}	Muito Baixa
Argila	$< 10^{-9}$	Praticamente Impermeável

Fonte: Terzagui; Peck (1967), citado por Jabur et al (2013)

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISES DA POROSIDADE X TEOR DE SUBSTITUIÇÃO

Para o concreto utilizado como referência, não houve adição de RCD conforme apresentado na Tabela 14. Esse traço foi considerado referência para os ensaios de resistência à compressão, permeabilidade e porosidade.

Para o concreto com adição de RCD foram considerados os traços apresentados na Tabela 14. Para esses traços, conforme mencionado anteriormente, houve o cuidado na ordem de colocação dos componentes do concreto, de forma a evitar uma perda da água de amassamento para o resíduo.

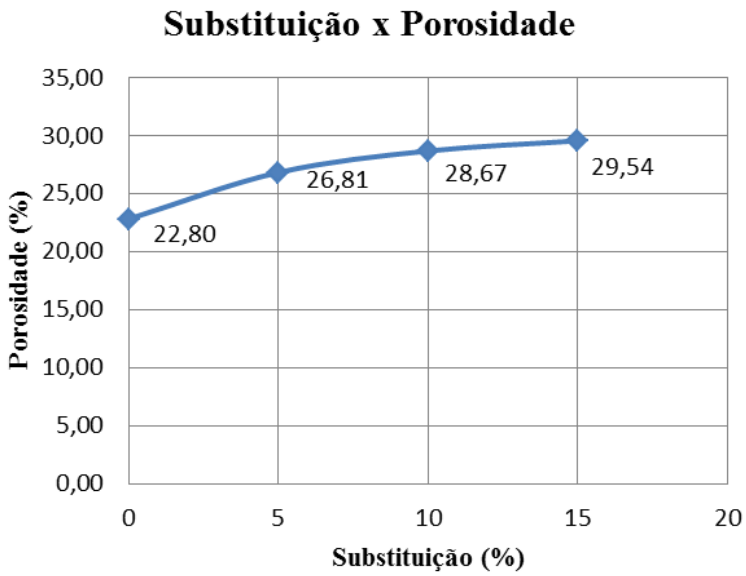
Na Tabela 16 e na Figura 39 são apresentados os valores dos ensaios de porosidade.

Tabela 16 – Dados dos ensaios de porosidade

Substituição	Série 1	Série 2	Série 3
0%	0,225	0,230	0,229
5%	0,278	0,254	0,272
10%	0,282	0,269	0,309
15%	0,289	0,282	0,316

Fonte: Próprio Autor

Figura 39 – Porosidade média (%)



Fonte: Próprio Autor

Segundo Tennis et al (2004) o concreto permeável possui um índice de vazios de 15 a 25%. Para Batezini (2013), os concretos permeáveis possuem um índice de vazios que varia de 15 a 30 %. Valores muito acima de 30% resultariam em resistências a compressão muito baixas conforme Rizvi et al (2010).

Observou-se que os valores obtidos nos ensaios de porosidade condizem com os valores observados na literatura e da análise dos dados apresentados foi observado que existe um aumento de 6,74% da porosidade ao se comparar o concreto referência com o concreto com 15% de resíduo.

Isso ocorreu, provavelmente, devido ao resíduo possuir uma maior permeabilidade que o agregado natural, aumentando a porosidade do concreto, uma vez que o resíduo possui uma taxa de absorção acima do agregado natural.

Outro fator seria uma acomodação diferenciada do resíduo reciclado em relação ao agregado natural, o que poderia ter criado uma maior quantidade de vazios e consequentemente um aumento da porosidade.

4.4 ANÁLISES DA PERMEABILIDADE X TEOR DE SUBSTITUIÇÃO

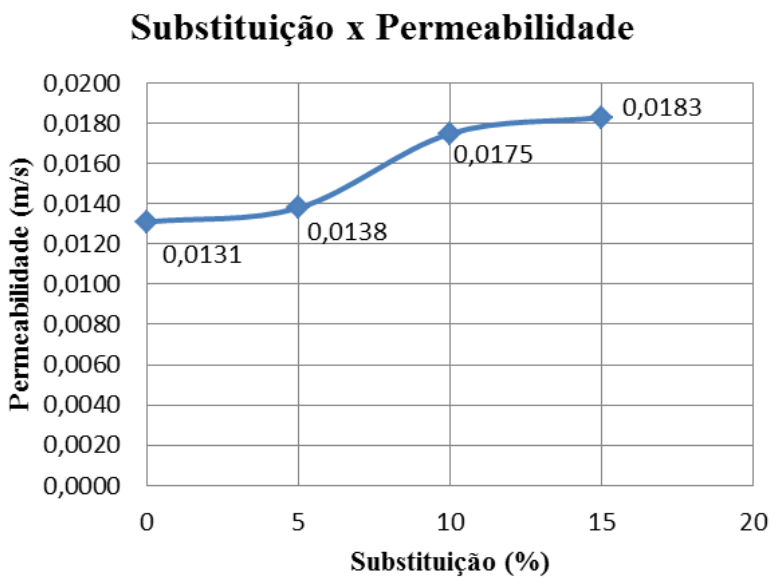
Na Tabela 17 e na Figura 40 são apresentados os valores do ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade.

Tabela 17 – Dados dos ensaios de permeabilidade

Coeficiente de Permeabilidade (m/s)			
Referência	**5%**	**10%**	**15%**
0,0146	0,0156	0,0193	0,0224
0,0146	0,0157	0,0197	0,0220
0,0144	0,0156	0,0195	0,0223
0,0127	0,0134	0,0165	0,0179
0,0128	0,0133	0,0165	0,0179
0,0129	0,0132	0,0166	0,0178
0,0120	0,0126	0,0167	0,0148
0,0119	0,0124	0,0164	0,0149
0,0120	0,0125	0,0161	0,0147

Fonte: Próprio Autor

Figura 40 – Coeficiente de permeabilidade média (m/s)



Fonte: Próprio Autor

Observa-se que os valores apresentados encontram-se dentro dos valores presentes na literatura. Segundo Tennis et al (2004) os valores do coeficiente de permeabilidade dependem do material utilizado, porém os valores típicos encontrados para o concreto permeável vão de 0,2 cm/s até 1,2 cm/s.

A Tabela 18 apresenta os valores obtidos por Höltz (2011) com concreto permeável com agregado natural, Brita 0.

Tabela 18 – Coeficiente de permeabilidade

Processo de produção dos corpos de prova	Coeficiente de Permeabilidade (m/s)
Extração	0,01365
	0,01384
	0,01431
Moldagem	0,01303
	0,01185

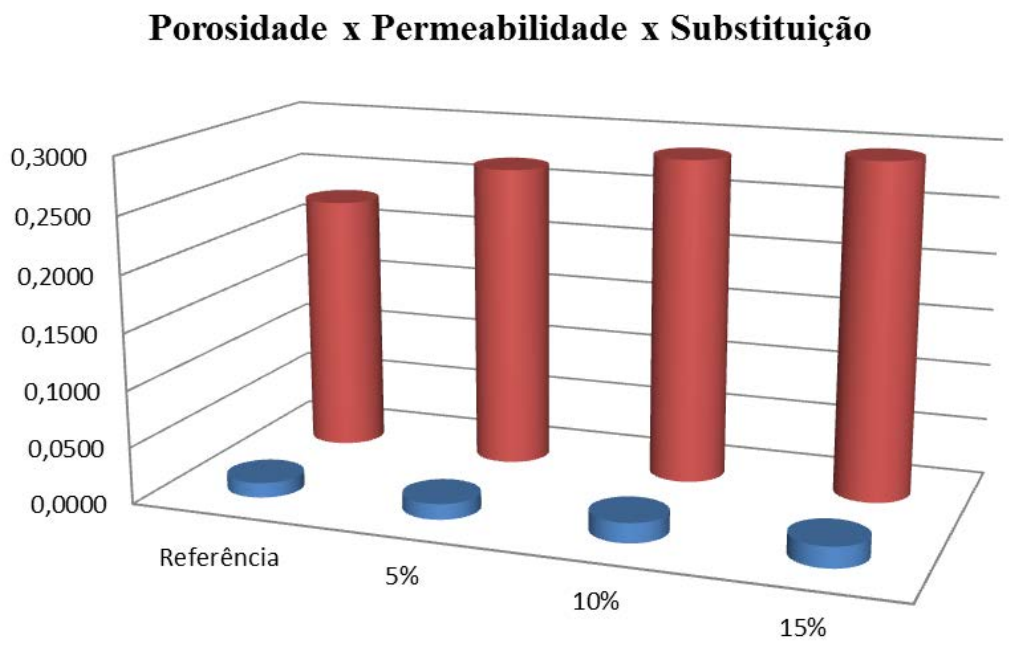
Fonte: Höltz (2011)

Da análise dos dados pode-se observar um aumento da permeabilidade do concreto à medida que ocorre um aumento da porcentagem de substituição. Para o resíduo de construção e demolição utilizado, os valores do coeficiente de permeabilidade (K) apresentaram-se entre 0,0119 a 0,0224 m/s. Esses que estão diretamente relacionados à porosidade do concreto.

4.5 COMPARATIVOS ENTRE A POROSIDADE E O COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

Na Figura 41 são apresentados os valores médios dos ensaios de permeabilidade e porosidade versus a porcentagem de substituição.

Figura 41 – Comparação entre a permeabilidade e a porosidade



	Referência	5%	10%	15%
Coeficiente de Permeabilidade (m/s)	0,0131	0,0138	0,0175	0,0183
Porosidade	0,2280	0,2681	0,2867	0,2954

Fonte: Próprio Autor

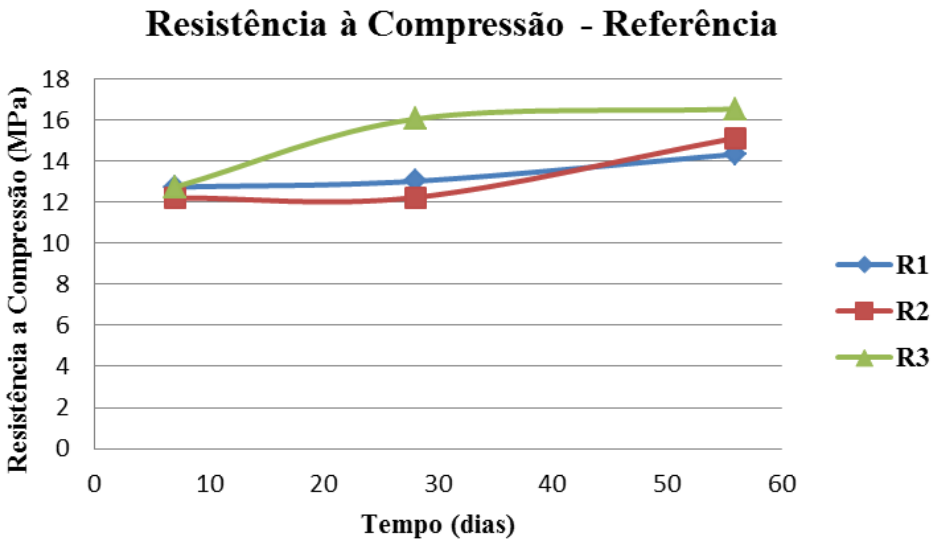
Conforme discutido anteriormente, à medida que aumenta o teor de substituição também aumenta a porosidade e o valor do coeficiente de permeabilidade.

Como não houve adição de agregado miúdo, nem de aditivos durante a concretagem, entende-se que esse aumento deve-se unicamente à substituição do agregado natural pelo reciclado.

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

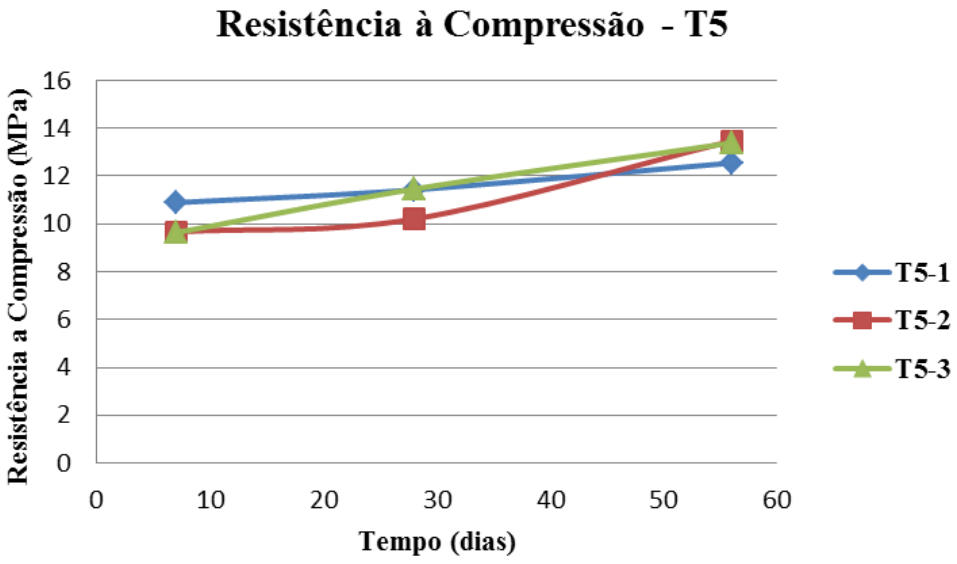
No Figura 42, Figura 43, Figura 44 e Figura 45 apresentam-se os resultados dos ensaios de Resistência à Compressão.

Figura 42 - Resistência à compressão: Concreto Referência



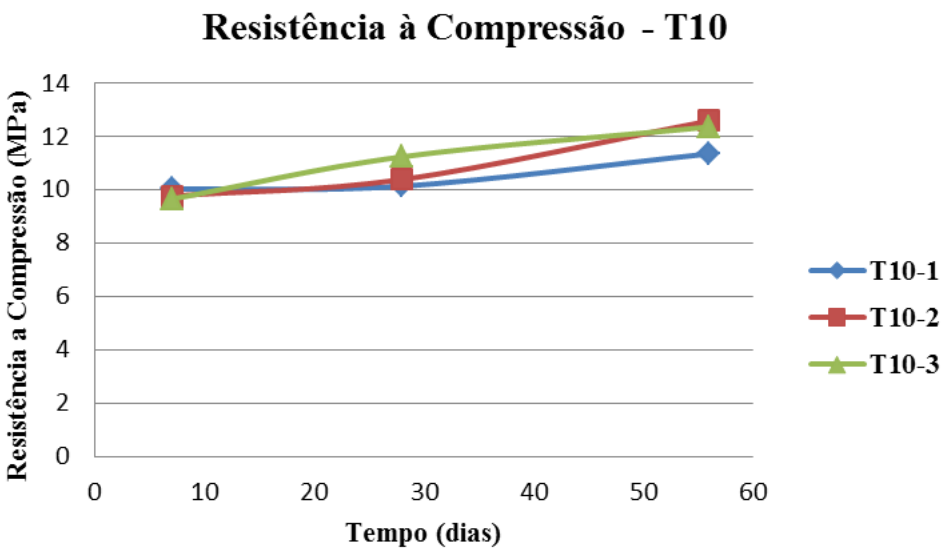
Fonte: Próprio Autor

Figura 43 - Resistência à compressão: Concreto com 5% de substituição



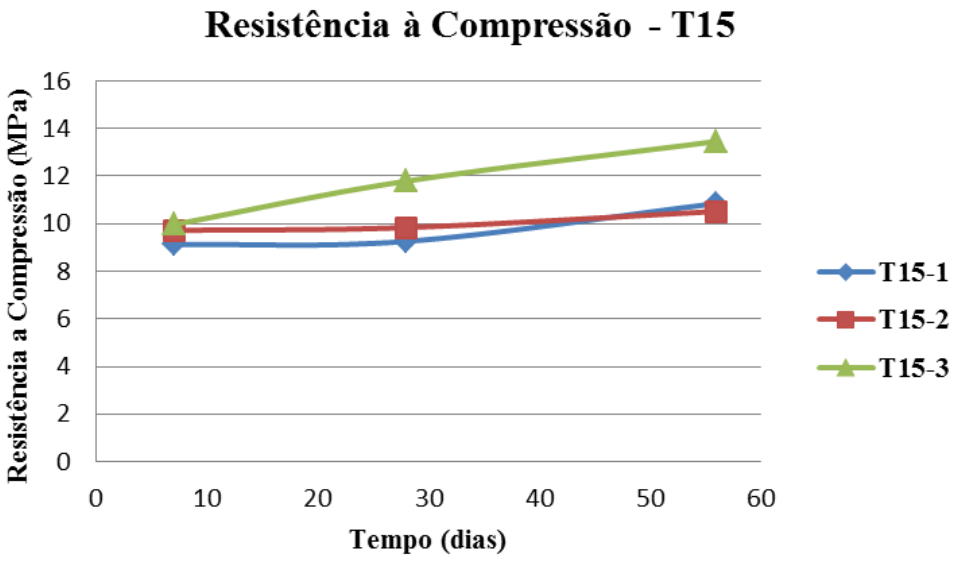
Fonte: Próprio Autor

Figura 44 - Resistência à compressão: Concreto com 10% de substituição



Fonte: Próprio Autor

Figura 45 - Resistência à compressão: Concreto com 15% de substituição



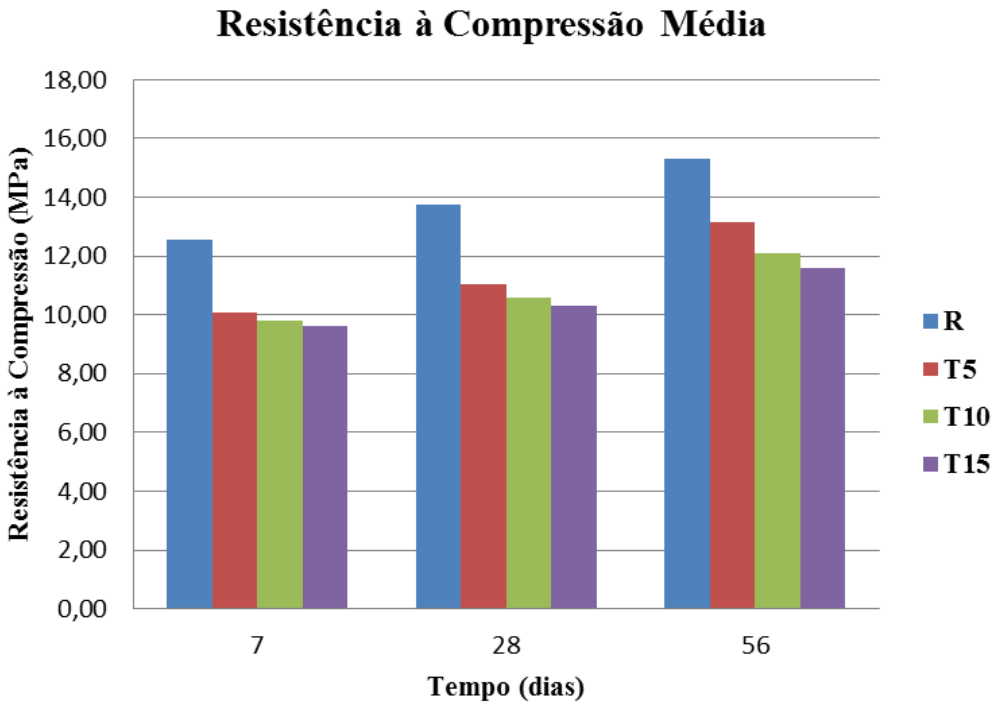
Fonte: Próprio Autor

Os resultados obtidos apresentaram-se dentro do que fora esperado, com valores entre 9,1 e 16,6 MPa. Resultados considerados aceitáveis para concretos desse tipo, uma

vez que a alta porosidade acarreta em baixa resistência à compressão. Valores baixos de resistência à compressão são observados em diversos trabalhos, Batezini (2013) obteve valores entre 6 e 10,2 MPa, enquanto Vidal (2014) obteve valores entre 7 e 10,8 MPa.

Realizando uma análise comparativa entre as médias observadas nos ensaios (Figura 46) pode-se observar uma queda da resistência quando comparados os concretos com substituição ao concreto referência.

Figura 46 – Resistência à compressão média



Fonte: Próprio Autor

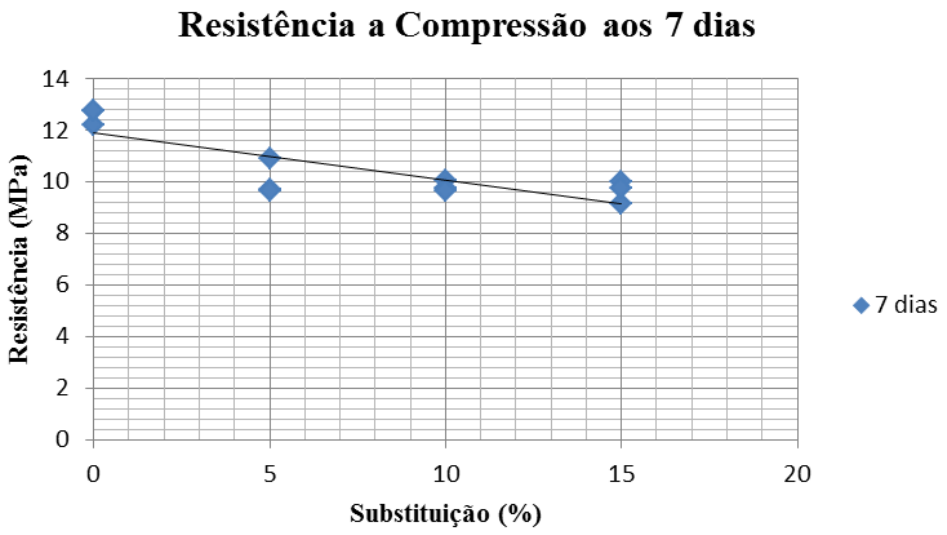
Bhutta et al (2013) realizou um estudo comparativo entre o concreto permeável com agregado natural e com agregado reciclado e observou o mesmo efeito, uma diminuição da resistência. Tal efeito foi entendido como consequência do aumento do número de vazios do concreto e uma provável redução da interface entre o cimento e o agregado reciclado.

Apesar do observado, o concreto permeável com RCD ainda apresentou valores dentro do esperado, o que permite seu uso no proposto neste trabalho.

4.6.1 Análise dos Resultados de Resistência a Compressão x Substituição

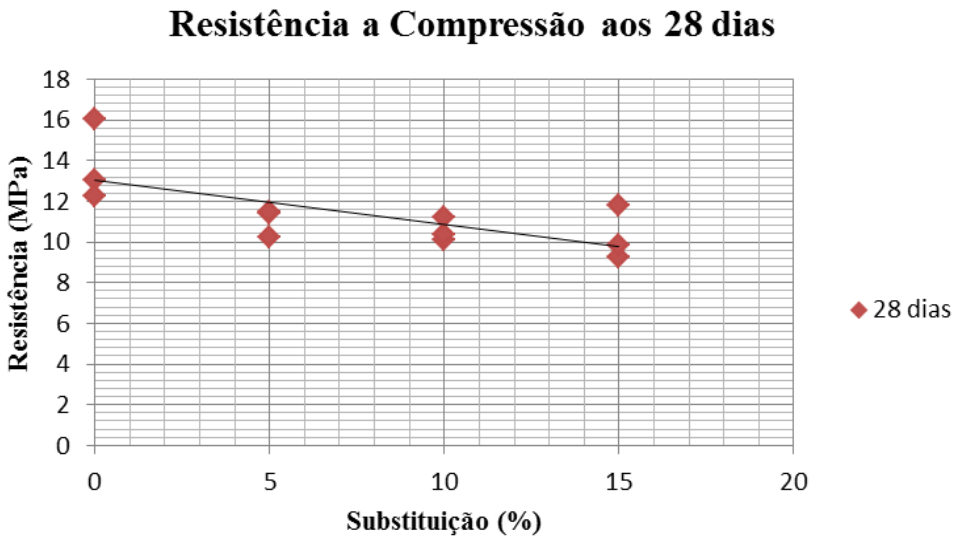
Realizou-se uma análise da perda de resistência em relação à porcentagem de substituição e foi observado que os valores seguem uma linha de tendência, conforme apresentado na Figura 47, Figura 48 e Figura 49..

Figura 47 – Resistência à compressão aos 7 dias



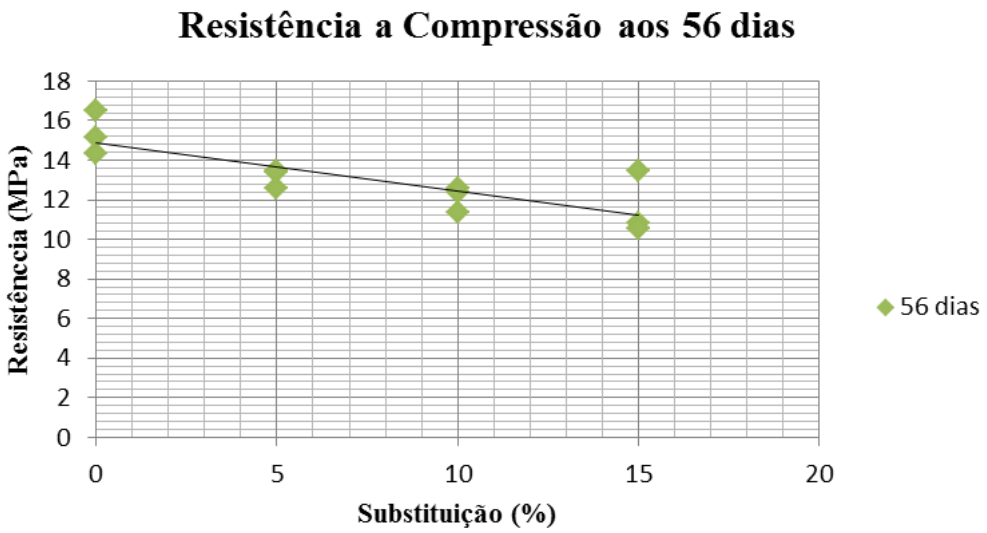
Fonte: Próprio Autor

Figura 48 – Resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Próprio Autor

Figura 49 – Resistência à compressão aos 56 dias



Fonte: Próprio Autor

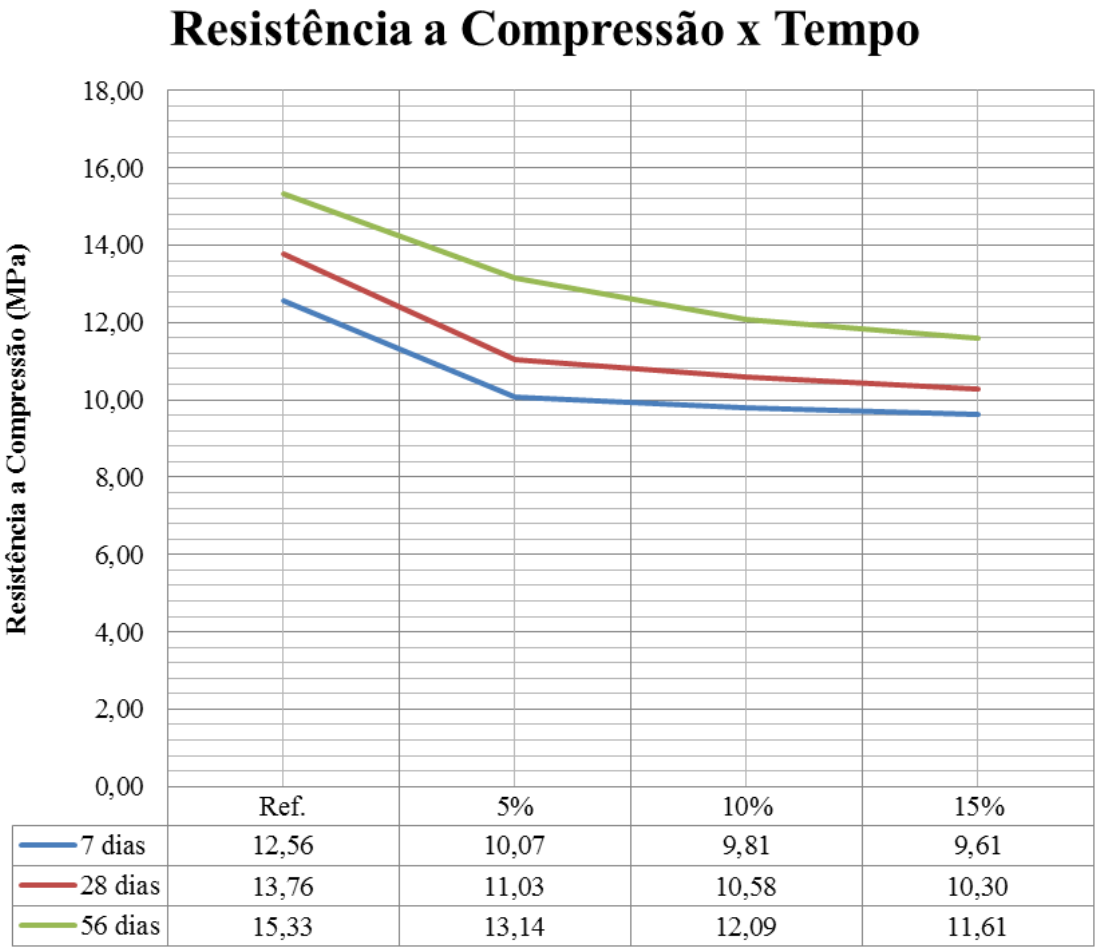
Sendo assim, conforme Capítulo 3 subitem 3.2.2 onde se define as porcentagens de substituição, observa-se que valores acima de 15%, resultam em perdas significativas da resistência à compressão dos concretos permeáveis, o que poderia inviabilizar sua utilização como pavimento urbano.

Ao se acompanhar as linhas de tendências pode-se observar o disposto acima, de forma que as resistências à compressão dos concretos com porcentagens iguais ou superiores a 20% seriam bem inferiores ao referência.

4.6.2 Análise dos Resultados de Resistência a Compressão x Substituição no Tempo

Na Figura 50 são apresentados os desenvolvimentos das resistências médias ao longo do tempo para as diversas porcentagens de substituição. Apresenta-se também a perda de resistência à compressão de acordo com as porcentagens de substituição.

Figura 50 – Resistência à compressão média x substituição no tempo



Fonte: Próprio Autor

Observa-se que o ganho de resistência ao longo do tempo para os quatro traços é de aproximadamente 18%, porém ao se comparar as resistências finais existe uma perda de 24,3% entre o referência e o concreto com 15% de substituição.

Vidal (2014) observou que substituições de 50% e 100% resultam em perda de 26% da resistência. Essas perdas são resultados do aumento da porosidade, o que fica evidenciado quando se compara as resistências e a porosidade.

4.2.7 Análise Comparativa dos Resultados

Conforme observado anteriormente, o resíduo de construção e demolição tem influência direta no aumento da porosidade, consequentemente gera um aumento da permeabilidade, porém isso causa uma diminuição da resistência à compressão.

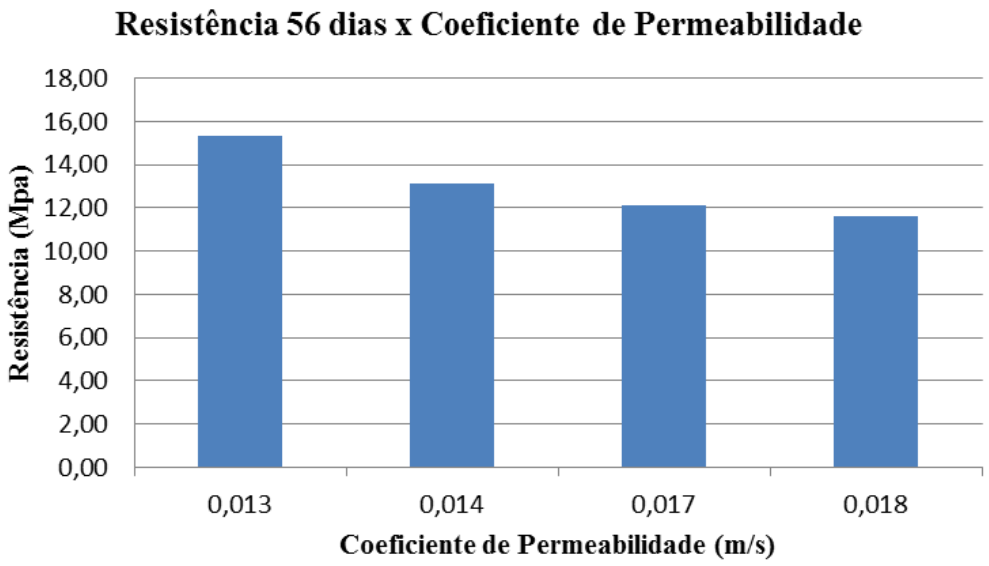
Na Tabela 19 e na Figura 51 e Figura 52 são apresentados os comparativos entre os valores de resistência à compressão, permeabilidade e porosidade.

Tabela 19 – Valores médios de resistência à compressão, porosidade e permeabilidade

Porcentagem de Substituição	Resistência 56 dias (MPa)	Porosidade (%)	Permeabilidade (m/s)
Referência	15,327	22,80	0,013
5%	13,137	26,81	0,014
10%	12,087	28,67	0,017
15%	11,610	29,54	0,018

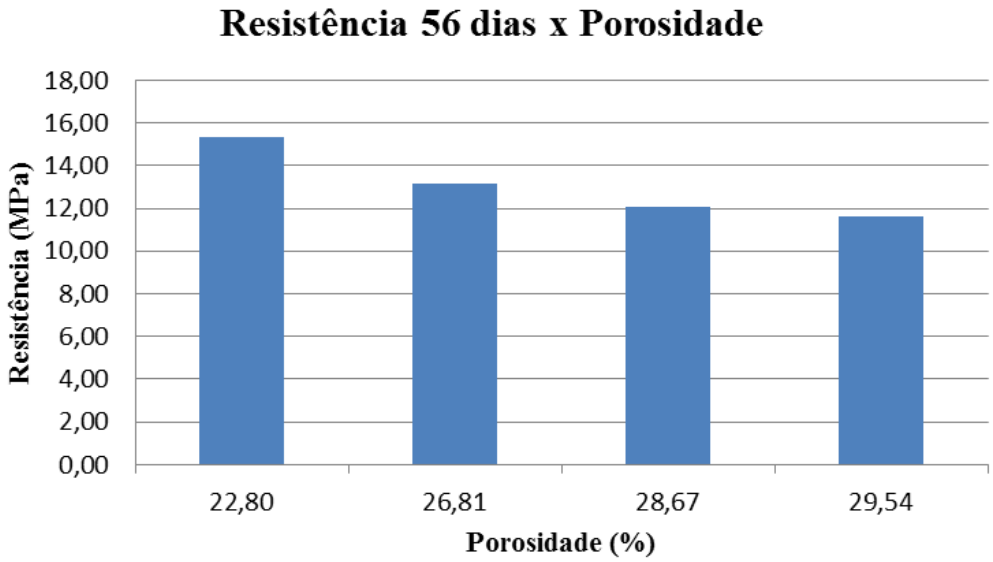
Fonte: Próprio Autor

Figura 51 – Valores médios de resistência à compressão versus permeabilidade



Fonte: Próprio Autor

Figura 52 – Valores médios de resistência à compressão versus porosidade



Fonte: Próprio Autor

Observa-se que as resistências à compressão, dos concretos com resíduo de construção e demolição, possuem valores próximos. O mesmo ocorre para as porcentagens de porosidade e permeabilidade.

Enquanto a uma perda da resistência de até 24,25%, existe um aumento da permeabilidade de 27,78% e da porosidade de 22,82%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Com o objetivo de estudar o emprego de resíduos de construção e demolição na produção de concretos permeáveis destinados à aplicação em calçadas, o presente trabalho teve como enfoque o estuda do comportamento desse concreto. Foram produzidos concretos com diferentes quantidades de resíduos e avaliadas algumas propriedades físicas e mecânicas.

Estudaram-se quatro tipos diferentes de misturas: I - 100% de agregado natural – brita 0; II – 95% de agregado natural e 5% de agregado reciclado; III – 90% de agregado natural e 10% de agregado reciclado; IV – 85% de agregado natural e 15% de agregado reciclado.

Para essas misturas foram realizados ensaios de resistência à compressão, porosidade e permeabilidade, para determinar a influência da adição dos agregados reciclados em substituição do agregado natural.

Foi observado que houve uma perda de resistência, aproximadamente, linear, à medida que as substituições aumentavam, sendo que os valores médios obtidos para as misturas I, II, III e IV foram de 15,33; 13,14; 12,09 e 11,61 MPa respectivamente.

Com relação à porosidade, observou-se que à medida que se aumentava o teor de agregado reciclado, também aumentava a porcentagem de porosidade. O mesmo foi observado com relação ao coeficiente de permeabilidade.

Para os ensaios de permeabilidade mencionados anteriormente, os três traços com substituição apresentaram valores de permeabilidade acima do preconizado na norma ACI 522 R-06 (2006), cujo valor para o coeficiente de permeabilidade deve ser igual ou superior a $1,40.10^{-3}$ m/s para esse tipo de concreto.

Com relação à porosidade, conforme mencionado por Tennis et al (2004), valores em torno de 20% garantem boa resistência à compressão e boa permeabilidade. Para as misturas estudadas, os valores de porosidade estavam acima de 20%, porém abaixo de 30%, assim sendo, se observaram valores de resistência à compressão dentro do esperado e

para os valores de permeabilidade, esses foram considerados altos de acordo com o apresentado na Tabela 15.

Com esses estudos comprovou-se que o agregado reciclado utilizado neste trabalho, apesar de diminuir a resistência à compressão, ainda atendia a faixa de 10 a 20 MPa considerada aceitável para esse concreto.

Porém, conforme observado, substituições acima de 15% resultariam em uma diminuição maior da resistência, o que estaria fora da margem estabelecida.

Dentro do que foram observados, os concretos estudados neste trabalho apresentaram-se adequados para a utilização na pavimentação urbana, além de contribuírem para a redução do escoamento superficial nas cidades.

No Quadro 9 são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

Quadro 9 – Sugestões para pesquisas futuras

Item	Sugestões
1	Estudar a influência da utilização de agregado reciclado miúdo em conjunto com o agregado reciclado graúdo no concreto permeável
2	Determinar a qualidade da água que infiltra pela camada de concreto permeável com agregado reciclado
3	Estudar a utilização de diferentes concretos permeáveis em camadas para auxiliar na filtragem da água oriunda do escoamento superficial
4	Analisar a influência da energia de compactação sobre as propriedades do concreto permeável com agregado reciclado
5	Aprofundar os estudos da influência nas propriedades físicas dos concretos permeáveis, confeccionados com diferentes tipos de agregados reciclados, sem adição de plastificantes ou superplastificantes
6	Estudar, na escala de protótipo, o desempenho mecânico e hidráulico no pavimento
7	Analisar da influência da utilização da água do poço de Ilha Solteira ao invés da água utilizada na confecção dos corpos de prova

Fonte: Próprio Autor

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9780**: Peças de concreto para pavimentação: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação: especificação. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736:** Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991, versão corrigida de 1999.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos concreto. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218:** agregados – determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578:** cimento portland composto: especificação. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 23:** cimento portland e outros materiais em pó – determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 45:** agregados - determinação da massa unitária, massa unitária compactada e seca e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 53:** agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - SSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 65:** cimento portland – determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 67:** concreto – determinação da consistência pelo abatimento o tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 76:** cimento portland – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de blaine). Rio de Janeiro, 1998.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 248:** agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15112:** Resíduos da construção civil e resíduos volumosos. Áreas de transbordo e triagem. Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15113:** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114:** Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116:** Agregados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9939:** Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-06:** Pervious Concrete. Michigan, 2006.

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

AHN, Jaehun; JUNG, Jinwoo; KIM, Seungbae; HAN, Shin-In. X-ray image analysis of porosity of pervious concretes. **International journal of GEOMATE**: geotechnique, construction materials and environment, Tsu City, v. 6, n. 1, p. 796-799, 2014.

DE ARAÚJO, Paulo Roberto; TUCCI, Carlos EM; GOLDENFUM, Joel A. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 21-29, 2000.

BATEZINI, R. **Estudo Preliminar de Concretos Permeáveis como Revestimento de Pavimentos para Áreas de Veículos Leves.** São Paulo: [s. n.], 2013.

BERRY, B. M. et al. **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. et al. **Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate).** Construction and building materials, Amsterdam, v. 47, p. 1243-1248, 2013.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes.** 2. ed. Oficina de Textos. São Paulo, 2005.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - **Resolução nº307.** Brasília, DF, 2002.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP. **Laboratório CESP de engenharia civil.** Ilha Solteira: LCEC, 2009.

DEO, O.; NEITHALATH, N. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. **Construction and Building Materials.** Amsterdam, v. 25, n. 11, p. 4181-4189, 2011.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington, v. 29, n. 5, p. 397-401, 2007.

EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington, v. 32, n. 1, p. 9-14, 2010.

HAGER, A. S. **Sustainable design of pervious concrete pavements.** Denver: University of Colorado, 2009.

HASELBACH, L. M. et al. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. **Journal of Environmental Management**, London, v. 81, p. 42–49, 2006.

HESAMI, S.; AHMADI, S.; NEMATZADEH, M. Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. **Construction and Building Materials,** Amsterdam, v. 53, p. 680-691, 2014.

HÖLTZ, F. C. **Uso de Concreto Permeável na Drenagem Urbana: Análise da Viabilidade Técnica e do Impacto Ambiental.** Porto Alegre: [s. n.], 2011.

IBRAHIM, A. et al. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties**. Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 50, p. 524-529, 2014.

JABUR, A. S. et al. Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos vol. 20 no.4 Porto Alegre, 2015. p. 937-945.

KEVERN, J. T. et al. **Mix design development for pervious concrete in cold weather climates.** Mid-Continent Transportation Research Symposium. Iowa: Iowa State University, 2005.

KEVERN, J. T. et al. **Advancements in pervious concrete technology.** Iowa: Iowa State University: 2008.

KIM, K.; SHIN, M.; CHA, S. Combined effects of recycled aggregate and fly ash towards concrete sustainability. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 48, p. 499-507, 2013.

KUO, Wen-Ten; LIU, Chih-Chien; SU, De-Sin. Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in pervious concrete. **Cement and Concrete Composites**, Kidlington, v. 37, p. 328-335, 2013.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Porto Alegre: [s. n.], 2001.

MARIANO, R. H. **Influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e nas resistências à compressão e à abrasão de concretos permeáveis.** Goiânia:[s. n.], 2014.

MIRANDA, L. F. R., ANGULO, S. C., CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, 2009.

NEITHALATH, N. et al. **Predicting the permeability of pervious concrete (enhanced porosity concrete) from non-destructive electrical measurements.** United States: Purdue University, 2006.

NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M. S.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials characterization,** Philadelphia, v. 61, n. 8, p. 802-813, 2010.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources Conservation & Recycling**, Amsterdam v, 50, p. 71-81, 2007.

RIZVI, R. et al. Incorporating recycled concrete aggregate in pervious concrete pavements. ANNUAL CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA-TRANSPORTATION IN A CLIMATE OF CHANGE, 2009, Canada, 2009. 18 p.

RIZVI, R. et al. 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.

SALES, T. L. **Pavimento Permeável com Superfície em Blocos de Concreto de Alta Porosidade.** Florianópolis: [s. n.], 2008.

SAFIUDDIN, Md. et al. Comparison of ASTM saturation techniques for measuring the permeable porosity of concrete. **Cement and Concrete Research**, Amsterdam, v.35, p. 1008-1013, 2005.

SAFIUDDIN, Md. et al. Properties of High-Workability Concrete with Recycled Concrete Aggregate. **Materials Research,** Amsterdam, v. 14, n. 2, p. 248-255, 2011.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 65, p. 201-217, 2014.

SIMIELE, D. **Aproveitamento de Resíduos de Concreto na Confecção de Peças para Pavimento Intertravado de Concreto.** Ilha Solteira: [s. n.], 2010.

SUDERSHA - Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. **Manual de Drenagem Urbana.** Curitiba, 2002.

TENNIS, P. D. et al. **Pervious concrete pavements.** Skokie, IL: Portland Cement Association, 2004.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas:** saneamento para todos. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2006.

TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia ciência e aplicação.** 4. ed. Porto Alegre: ABRH - Editora da Universidade - UFRGS, 2009.

VIDAL, A. S. **Caracterização de Concreto Permeável Produzido com Agregados Reciclados de Construção e Demolição para Utilização em Pavimentação Permeável em Ambiente Urbano.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2014.

APÊNDICE A – RESULTADO DOS ENSAIOS

Resultados dos ensaios de resistência à compressão

Na Tabela 25 são apresentados os dados dos resultados dos ensaios de resistência à compressão e as médias.

Tabela 20 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão e médias

	Tensão (MPa)		
Traço / dias	**7**	**28**	**56**
R1	12,73	13,02	14,33
R2	12,21	12,23	15,12
R3	12,73	16,04	16,53
Média	12,56	13,76	15,33
T5-1	10,89	11,43	12,55
T5-2	9,67	10,21	13,47
T5-3	9,64	11,46	13,39
Média	10,07	11,03	13,14
T10-1	10,02	10,13	11,34
T10-2	9,76	10,38	12,57
T10-3	9,65	11,23	12,35
Média	9,81	10,58	12,09
T15-1	9,13	9,26	10,85
T15-2	9,72	9,84	10,52
T15-3	9,97	11,79	13,46
Média	9,61	10,30	11,61

Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 26 são apresentados os resultados dos ensaios de porosidade e as médias dos resultados.

Tabela 21 – Resultados dos ensaios de porosidade

Traço	Série 1	Série 2	Série 3	Média	(%)
Ref.	0,225	0,230	0,229	0,228	22,80
T5	0,278	0,254	0,272	0,268	26,81
T10	0,282	0,269	0,309	0,287	28,67
T	0,289	0,282	0,316	0,295	29,54

Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 27 são apresentados os resultados dos ensaios de permeabilidade e as médias dos resultados.

Tabela 22 – Resultados dos ensaios de permeabilidade

	Coeficiente de permeabilidade (m/s)			
Traço	Referência	5%	10%	15%
	0,0146	0,0156	0,0193	0,0224
	0,0146	0,0157	0,0197	0,0220
	0,0144	0,0156	0,0195	0,0223
	0,0127	0,0134	0,0165	0,0179
	0,0128	0,0133	0,0165	0,0179
	0,0129	0,0132	0,0166	0,0178
	0,0120	0,0126	0,0167	0,0148
	0,0119	0,0124	0,0164	0,0149
	0,0120	0,0125	0,0161	0,0147
Média	0,01310	0,0138	0,0175	0,0183

Fonte: Próprio Autor