

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ELEMENTOS DE CONCRETO CONTENDO RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO (RCD) DESTINADOS À PAVIMENTAÇÃO**

MARCELA OLIVEIRA XAVIER

BARREIRAS-BA

ABRIL-2017

MARCELA OLIVEIRA XAVIER

**ELEMENTOS DE CONCRETO CONTENDO RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO (RCD) DESTINADOS À PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. D.Sc. Juarez Hoppe Filho

BARREIRAS-BA

ABRIL-2017

FICHA CATALOGRÁFICA

X3 Xavier, Marcela Oliveira.
Elementos de concreto contendo resíduos de construção e demolição (RCD)
destinados à pavimentação. – 2017
61f.il.

Orientador: Prof. DSc Juarez Hoppe Filho

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das
Tecnologias, Barreiras, BA, 2017.

1. Concreto. I. Hoppe Filho, Juarez. II. Universidade Federal do Oeste da
Bahia - Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD 691.3

UFOB – Biblioteca Universitária de Barreiras

MARCELA OLIVEIRA XAVIER

**ELEMENTOS DE CONCRETO CONTENDO RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO (RCD) DESTINADOS À PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Aprovada em 25 de abril de 2017.

Banca Examinadora

Orientador: _____

Prof. D.Sc. Juarez Hoppe Filho
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Prof. M.Sc. Elier Pavón de La Fé
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Eng. Esp. Valter Cunha Bastos Filho
Universidade Federal do Oeste da Bahia

*Aos meus pais, Maria
e Francisco, por todo amor e apoio.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Juarez Hoppe Filho pela confiança, incentivo, paciência e ajuda em todos os momentos.

Aos meus pais, Maria José e Francisco Xavier, pelo amor, apoio e educação que me trouxeram até aqui.

Às minhas irmãs, Georgia e Kate, por todo apoio ao longo do curso e, em especial, ao meu irmão Emílio por ter me ajudado em todas as etapas deste trabalho.

Aos meus queridos amigos, Mariana Brito, Júnior Sodré e Alberth Clayton, pela ajuda e incentivo no desenvolvimento deste trabalho, mas principalmente pela amizade, conselhos e risadas compartilhadas ao longo do curso.

À Peroli Tecnologia, por ter me disponibilizado suas instalações e equipamentos para que boa parte do trabalho fosse desenvolvida.

À Just Mix, por ter me doado o cimento utilizado no trabalho.

À todas as pessoas que de alguma forma me ajudaram com ações e palavras de incentivo.

Ao Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias (CCET) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), por ter proporcionado condições de desenvolver este trabalho.

RESUMO

A disposição inadequada dos resíduos de construção e demolição (RCD) geram grandes impactos ambientais e um alto custo sócio-econômico. Dessa forma, a reciclagem destes resíduos como agregados para produção de concretos se torna uma boa alternativa para redução dos efeitos colaterais causados pelo descarte inadequado, além de proporcionar diminuição da extração desordenada de recursos naturais. O trabalho analisou a influência que a incorporação de agregados reciclados de RCD exerce sobre a resistência à compressão e absorção de água de concreto para a fabricação de peças pré-moldadas destinadas à pavimentação. Os resíduos utilizados foram coletados em uma obra no centro da cidade de Barreiras e fragmentados manualmente de forma que se aproximassem da faixa granulométrica do agregado graúdo de referência (brita 01). Foram produzidos concretos com e sem incorporação de RCD, utilizando relação a/c igual a 0,40 e teor de substituição do agregado graúdo por agregado reciclado de 25%, em massa. Para realização dos ensaios foram moldados corpos de prova cilíndricos e peças pré-moldadas de concreto. A utilização destes resíduos em substituição parcial ao agregado graúdo natural no teor de 25% reduz a água livre de mistura no concreto e diminui o abatimento, sem prejudicar sua moldabilidade. Em relação à resistência à compressão dos concretos foi observada uma perda de resistência nas peças pré-moldadas, com e sem incorporação de RCD, quando comparadas aos corpos de prova cilíndricos. No entanto, os corpos de prova cilíndricos e as peças para pavimentação apresentaram valores de resistência à compressão superiores a 35,0 MPa. A absorção de água nas peças pré-moldadas contendo RCD foi muito próxima a de referência, atendendo, dessa forma, a todos os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 9.781/2013 para condição de tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

Palavras-chave: resíduos de construção e demolição, concreto, resistência à compressão, peças pré-moldadas destinadas à pavimentação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formatos típicos de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação.	13
Figura 2 - Composição do resíduo de construção e demolição de São Carlos – SP.	17
Figura 3 - Composição do resíduo de construção e demolição da cidade de Ribeirão Preto – SP.	18
Figura 4 - Composição do resíduo de construção e demolição da cidade de Salvador – BA.	18
Figura 5 - Composição do resíduo de construção e demolição coletados no Aterro de Inertes da Zona Sul de Porto Alegre – RS.	19
Figura 6 - Valores da medida de consistência dos concretos pelo abatimento do tronco de cone.	22
Figura 7 - Comportamento da resistência à compressão média dos concretos reciclados (a) em função da relação a/c e da massa específica do agregado graúdo (b) em função da relação a/c e do tipo de agregado miúdo.	25
Figura 8 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia).	27
Figura 9 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo (brita).	28
Figura 10 – Local de coleta dos resíduos de construção e demolição utilizados no presente trabalho.	29
Figura 11 – Agregados reciclados após serem fragmentados.	29
Figura 12 – Distribuição granulométrica do agregado reciclado de cerâmica vermelha. ...	30
Figura 13 – Distribuição granulométrica do agregado reciclado de placas cerâmicas.	30
Figura 14 – Distribuição granulométrica do agregado reciclado de concreto.	31
Figura 15 – Curvas de Abrams para os corpos de prova cilíndricos.	32
Figura 16 – Curva de Abrams, aos 28 dias, para as peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação.	33
Figura 17 – Agregados graúdos adicionados à betoneira durante a produção do concreto com RCD.	34

Figura 18: Corpos de prova cilíndricos e peça pré-moldada de concreto após moldagem.	36
Figura 19 – Peças pré-moldadas após desforma (esquerda: referência; direita: com incorporação de RCD).	36
Figura 20 – Corpos de prova cilíndricos retificados para realização do ensaio de resistência à compressão.	37
Figura 21 – Ensaio de resistência à compressão na peça pré-moldada.	37
Figura 22 - Porosidade dos agregados graúdos natural e reciclados de RCD.	39
Figura 23: Volume de vazios incorporado ao concreto por cada um dos tipos de agregado reciclado de RCD.	40
Figura 24 - Medida do abatimento dos concretos (a) referência e (b) com incorporação de RCD.	41
Figura 25- Resistência à compressão dos cilindros em função da resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação.	42
Figura 26- Resistência à compressão, para os corpos de prova cilíndricos, dos concretos com e sem incorporação de RCD, ao longo do tempo.	45
Figura 27 - Peças pré-moldadas rompidas no ensaio de resistência à compressão.	46
Figura 28 - Resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação, com e sem incorporação de RCD, em função das idades.	47
Figura 29 - Comparação das resistências à compressão entre os corpos de prova cilíndricos e as peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proporções de mistura dos traços auxiliares em função das relações água/cimento e consumo de materiais em quilos por metro cúbico de concreto (kg/m ³).	31
Tabela 2 - Proporções de mistura dos concretos em função das relações água/cimento e consumo de materiais em quilos por metro cúbico de concreto (kg/m ³)......	38
Tabela 3 - Resistência à compressão, para os corpos de prova cilíndricos, dos concretos com e sem incorporação de RCD.....	44
Tabela 4 - Resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação com e sem incorporação de RCD.....	46
Tabela 5 – Absorção de água das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação com e sem incorporação de RCD.	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1IMPORTÂNCIA DO TEMA	8
1.2PRINCIPAIS TRABALHOS	9
1.3OBJETIVO	10
1.4JUSTIFICATIVA.....	10
2. REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1PAVIMENTO INTERTRAVADO	11
2.1.1 FORMATOS	12
2.1.2 NORMA TÉCNICA.....	13
2.1.3 PROCESSOS DE MOLDAGEM	14
2.2RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD).....	14
2.2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS PELO RCD	15
2.2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	16
2.2.3 COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	16
2.3CONCRETO COM INCORPORAÇÃO DE RCD.....	19
2.3.1 TEOR DE SUBSTITUIÇÃO DE RCD NO CONCRETO.....	19
2.3.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS.....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1MATERIAIS.....	27
3.1.1 CIMENTO PORTLAND.....	27
3.1.2 AGREGADO MIÚDO	27
3.1.3 AGREGADO GRAÚDO	27
3.1.4 AGREGADOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD).....	28
3.2DOSAGEM DO CONCRETO	31
3.3TEOR DE SUBSTITUIÇÃO E COMPOSIÇÃO DO AGREGADO RECICLADO DE RCD NO CONCRETO	33
3.4MISTURA DO CONCRETO	34
3.5CONSISTÊNCIA	35
3.6MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA	35

3.7 ENSAIOS REALIZADOS	36
3.7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	36
3.7.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 PROPORÇÃO DE MISTURA DOS CONCRETOS COM E SEM RCD	38
4.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS.....	40
4.2.1 CONSISTÊNCIA	40
4.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	42
4.2.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA	49
4.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS	50
5. CONCLUSÕES	51
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
7. REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

1.1 Importância do Tema

A construção civil é responsável por diversos impactos ambientais, tais como o uso intenso de recursos naturais não renováveis e a grande geração de resíduos sólidos (JOHN, 2000). O gerenciamento inadequado dos resíduos propicia a disposição inadequada, o que interfere em ruas e acessos e obstrui córregos (ANGULO *et al.*, 2002), além de causar aos municípios um dispêndio elevado de recursos para limpeza dos locais onde houve descarte inadequado (PINTO,1999). Assim sendo, é necessária a busca por ações que diminuam os efeitos colaterais causados pela disposição irregular dos resíduos de construção e demolição (RCD) e a demanda por matéria prima natural.

De acordo com Leite (2001), a reciclagem é a melhor alternativa para reduzir o impacto que o ambiente pode sofrer com o consumo de matéria prima e geração desordenada de resíduos. Ainda segundo a autora, a reciclagem de RCD poderá minimizar os problemas com o gerenciamento de resíduos dos municípios, proporcionando maior ciclo de vida dos aterros, diminuição dos pontos de descarte clandestinos, redução dos custos de gerenciamento e, adicionalmente, um melhor bem estar social e ambiental.

Os RCD's representam mais de 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo 90% dessa massa composta por resíduos de origem mineral (PINTO, 1999; ANGULO, 2005). A reciclagem da fração mineral de RCD no Brasil, como em outros países, gera agregados para pavimentação e material de enchimento para aterros, no entanto esses agregados reciclados mostraram que seu emprego na fabricação de concretos também é viável, inclusive na fração miúda (ANGULO, 2005).

O emprego de RCD como agregado na produção de peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação deve obedecer os critérios estabelecidos na ABNT NBR 15.116/2004, que trata do uso de agregados reciclados em pavimentação e preparo de concretos sem função estrutural. A Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), publicada em 2002, estabelece diretrizes para gestão e manejo corretos dos resíduos da construção civil, visando reduzir, reutilizar ou reciclar esses resíduos. Assim sendo, a utilização de RCD como agregado para a produção de concreto contribui para a reciclagem deste passivo ambiental, o que insere o setor produtivo da construção civil nos preceitos de sustentabilidade. Portanto, a realização de estudos que visam agregar conhecimento tecnológico ao uso de RCD na composição do agregado

gráudo destinado à execução de concretos para a produção de elementos destinados à pavimentação apresenta relevância, haja vista contribuir para a redução do impacto ambiental corriqueiramente presente nos municípios brasileiros.

1.2 Principais Trabalhos

As pesquisas sobre reciclagem e utilização de resíduos de construção e demolição no Brasil vêm crescendo nos últimos anos, principalmente após a publicação da Resolução nº 307 do CONAMA, em 2002. Esta resolução tem como objetivo minimizar os impactos ambientais e propiciar a reutilização e reciclagem de RCD. No entanto, os estudos sobre caracterização e quantificação desses resíduos tiveram início em meados de 1980 (CARDOSO *et al.*, 2014) e já mostravam a necessidade de pesquisas e desenvolvimento de tecnologias que ampliassem o conhecimento sobre esses resíduos, visando a sua utilização como material de construção. Assim sendo, as pesquisas que apresentam destaque são:

- Zordan (1997), utilizando entulho como agregado na produção de concreto destinado à infraestrutura urbana.
- Pinto (1999), propondo uma metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.
- John (2000), contribuindo para a metodologia de pesquisa e desenvolvimento de reciclagem de resíduos na construção civil.
- Leite (2001), com a avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.
- Carrijo (2005), analisando a influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.
- Angulo (2005), com a caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e avaliando a influência de suas características no comportamento de concretos.
- Tenório (2007), avaliando as propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais.
- Silva *et al.* (2014), produzindo concretos com a incorporação de resíduos de construção e demolição destinados à pavimentação.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da substituição parcial de agregado graúdo por resíduo de construção e demolição (RCD) na resistência à compressão e absorção de água de concreto destinado à produção de peças pré-moldadas para pavimentação.

1.4 Justificativa

A justificativa para o desenvolvimento deste trabalho está fundamentada, sobretudo, pela ausência de local adequado para recebimento, beneficiamento e disposição final do RCD no município de Barreiras, Bahia. Desta forma, predomina a disposição inadequada e clandestina de RCD no município, o que causa significativo impacto ao meio ambiente, além do aumento contínuo do passivo ambiental a ser gerenciado futuramente.

A magnitude deste impacto pode ser estimada a partir de dados apresentados por Pinto (1999), o qual estimou que, no Brasil, a geração de resíduos de construção e demolição, pela mediana de algumas cidades brasileiras, é de 500 kg/hab.ano. Para alguns municípios investigados por Pinto *et al.* (2005), em parceria com o Ministério das Cidades, a taxa de geração de RCD está entre 470 e 760 kg/hab.ano. O município de Barreiras possui, de acordo com o CENSO do IBGE 2016, uma população de 155.500 habitantes, o que resulta em um montante de RCD da ordem de 78.000 ton./ano, o que equivale a 3.110 carretas com capacidade de carga de 25 toneladas. A destinação clandestina destes resíduos ocorre, normalmente, em terrenos baldios e estradas vicinais do município, o que causa degradação ambiental das áreas periféricas, assoreamento de mananciais, etc. Diante desta realidade, cabe aos profissionais da área de engenharia desenvolver tecnologia para propiciar a reciclagem de RCD, sendo a incorporação deste resíduo em elementos de concreto destinados à pavimentação uma alternativa para mitigar o passivo no município de Barreiras. Tal prerrogativa justifica a realização deste trabalho.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Pavimento intertravado

Os pavimentos intertravados têm sua origem nos pavimentos revestidos com pedras, executados na Mesopotâmia há quase 5.000 a.C., e muito utilizados durante o Império Romano. Esse tipo de pavimento evoluiu, primeiro, para o uso de pedras talhadas, resultando em pavimentos conhecidos como paralelepípedos. As dificuldades na produção artesanal dessas pedras e a falta de conforto de rolamento impulsionaram o desenvolvimento das peças de concreto pré-fabricadas (ABCP¹, 2010).

De acordo com a NBR 9781/2013, o pavimento intertravado de concreto é definido como:

Pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças pré-moldadas de concreto justapostas em uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção.

Segundo Cruz (2003), a primeira peça pré-moldada de concreto foi fabricada no final do século XIX e os primeiros avanços no desenvolvimento da utilização dessas peças como pavimentação ocorreram na Holanda e Alemanha durante o período de reconstrução após a Segunda Guerra Mundial. No Brasil, as peças pré-moldadas de concreto começaram a ser utilizadas na década de 70.

A alta capacidade de suporte do pavimento, aliada às muitas opções de formato, padrões, cores e matizes disponíveis para permitir infindáveis possibilidades estéticas, assegura à pavimentação êxito em praças, parques, jardins, calçadas, estacionamentos, vias urbanas, pátios, galpões industriais, estradas, entre outros (FIORITI *et al.*, 2006).

O piso intertravado de concreto, por sua versatilidade e facilidade de aplicação, tem sido bastante utilizado na construção de pavimentos urbanos. O pavimento intertravado é de rápida assimilação por parte dos operários da construção e não necessitam de mão de obra especializada nem equipamentos especiais, o que permite várias frentes de trabalho, economia no tempo de construção e utilização imediata (SIMIELI *et al.*, 2007). A ABCP (2002) destaca outras vantagens para o piso intertravado, tais como:

- impedem a transmissão e o aparecimento na superfície do pavimento de eventuais trincas das camadas de base;

¹ ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland.

- facilidade de acesso às instalações de serviço subterrâneas e posterior reparo sem marcas visíveis;
- permitem a reutilização das peças de concreto;
- requerem pouca ou nenhuma manutenção;
- pavimento mais permeável, propiciando microdrenagem das águas pluviais.

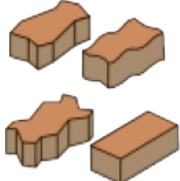
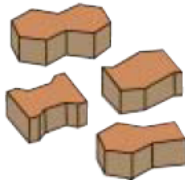
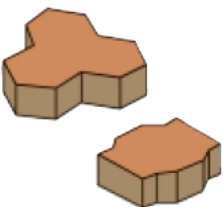
No pavimento intertravado, as peças pré-moldadas de concreto se comportam como uma camada flexível e única, devido à propriedade de intertravamento. Tal propriedade proporciona resistência a estes pavimentos e os diferem dos demais. Depois de intertravadas, as peças deste tipo de pavimento adquirem a capacidade de resistir a movimentos de deslocamento individual, seja ele vertical, horizontal ou de rotação em relação à peça vizinha (ABCP, 2002).

2.1.1 Formatos

De acordo com a ABCP (2002), o formato das peças pré-moldadas de concreto (pavers) também influencia no desempenho do pavimento intertravado, já que a distribuição de esforços depende desse fator, do arranjo e da espessura da peça. Cruz (2003) no entanto, afirma que não há um consenso entre os pesquisadores sobre a interferência do formato das peças no desempenho do pavimento, mas que há concordância quanto ao comportamento do pavimento em função da espessura e do arranjo de assentamento das peças.

Para que o processo de seleção do tipo ótimo da peça seja feito, a ABCP (2002) recomenda que a escolha do formato deve seguir as considerações de melhor capacidade de distribuição de tensões e a facilidade de assentamento. Alguns formatos típicos são mostrados na Figura 1.

Figura 1 - Formatos típicos de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação.

Formatos típicos de peças pré-moldadas de concreto	
<p>Peças de concreto segmentadas ou retangulares, com relação comprimento/largura igual a 2 (usualmente 200 mm de comprimento por 100 mm de largura), que se entrelaçam nos quatro lados. Podem ser assentadas em fileiras ou em "espinha-de-peixe". Leves, são carregadas facilmente com apenas uma mão.</p>	
<p>Peças com tamanhos e proporções similares aos da categoria anterior, mas que se entrelaçam somente em dois lados. Só podem ser assentadas em fileiras. Também são leves: carregadas com apenas uma mão, têm em geral o formato em "I".</p>	
<p>Peças de concreto com tamanhos maiores do que as categorias anteriores. Pelo seu peso e tamanho não podem ser carregadas com apenas uma mão. Têm formatos geométricos característicos (trapézios, hexágonos, triédros etc.). São assentadas seguindo-se sempre o mesmo padrão, que nem sempre conforma fileiras facilmente identificáveis.</p>	

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002, p 84.

2.1.2 Norma técnica

No Brasil, a fabricação de peças pré-moldadas de concreto é regulamentada pela NBR 9781/2013, que estabelece os requisitos e métodos de ensaio exigíveis para aceitação das peças destinadas à pavimentação sujeita ao tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produtos. A norma determina que as peças de concreto atendam às seguintes especificações:

- Possuir medida nominal do comprimento de no máximo 250 mm; medida real da largura de no mínimo 97 mm na área da peça destinada à aplicação de carga no ensaio de resistência à compressão; medida nominal de espessura de no mínimo 60 mm, especificada em múltiplos de 20 mm; tolerâncias dimensionais de ± 3 mm para o comprimento, largura e espessura e o índice de forma² (IF) para as peças utilizadas em vias com tráfego de veículos ou áreas de armazenamento deve ser menor ou igual a 4.
- Resistência característica à compressão maior ou igual a 35 MPa para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha e maior ou igual a 50 MPa para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.

² Índice de forma: relação entre o comprimento e a espessura da peça de concreto.

- A amostra de peças de concreto deve apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6%, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7%.
- Quando especificada, a resistência à abrasão deve ter como critérios cavidades menor ou igual a 23 mm para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha e menor ou igual a 20 mm para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.
- Apresentar aspecto homogêneo, arestas regulares e ângulos retos e devem ser livres de rebarbas, defeitos, delaminação e descamação.

2.1.3 Processos de moldagem

Os processos de moldagem das peças pré-moldadas de concreto são divididos em dois grupos: processo manual e processo mecânico.

No processo manual, a quantidade de moldes disponíveis e a qualidade da mão de obra determinarão a capacidade produtiva da indústria. O preenchimento dos moldes é realizado por via manual, utilizando um concreto de consistência plástica, geralmente sobre uma mesa vibratória. Neste processo, as peças pré-moldadas têm a vantagem de propiciar um excelente aspecto visual na superfície dos pisos, oriundo do tipo de molde utilizado (metal, PVC ou fibra de vidro) e da consistência plástica do concreto utilizado (ABREU, 2000 *apud* CRUZ, 2003).

De acordo com Shackel (1990) *apud* Cruz (2003), no processo mecânico, a resistência e a durabilidade das peças pré-moldadas são obtidas por meio de alta pressão e cuidadosa regulagem de vibração dos equipamentos especificamente projetados para a produção em escala, que necessariamente utiliza concreto com consistência seca. Os benefícios da produção em escala são, principalmente, o controle de homogeneidade das resistências mecânicas, textura e dimensões que pode ser exercido durante a fabricação dos produtos.

2.2 Resíduos de construção e demolição (RCD)

Segundo Angulo (2000), os resíduos de construção e demolição (RCD) são todos e quaisquer resíduos oriundos das atividades de construção, seja ela de novas construções, reformas ou demolições, que envolvam atividades de obra de arte, solos ou resíduos de vegetação presentes em limpezas de terreno.

2.2.1 Impactos ambientais gerados pelo RCD

A cadeia produtiva da construção civil é a principal consumidora de matérias primas da economia, uma das maiores geradoras de resíduo, energia e também colabora significativamente na poluição ambiental, incluindo o efeito estufa (JOHN, 2000).

A indústria da construção, apesar de ser uma das mais antigas em todo mundo, se utiliza de técnicas e materiais que não mudaram muito ao longo do tempo. O concreto, por exemplo, é produzido hoje com os mesmos materiais de anos atrás: água, cimento e agregados, podendo variar apenas com o uso de aditivos ou adições que podem levar a alguns efeitos diferenciados (LEITE, 2001). Segundo John (2000), o setor da construção civil no Brasil consome, somente para produção de concreto e argamassa, um valor estimado de 210 milhões de toneladas/ano de agregados naturais. No entanto, Santos (2007) alerta que os impactos causados pelo setor com a utilização de agregados naturais incluem a exploração descontrolada de recursos naturais não renováveis, a fabricação de cimento e suas emissões de gás carbônico na atmosfera e a poluição do ar gerada pelo transporte até os grandes centros.

John (1998a) *apud* Leite (2001) ressalta que outro ponto que deve ser considerado quando se fala em impacto ambiental causado pela indústria da construção é a geração de resíduos sólidos que pode ser até duas vezes maior que o volume de lixo urbano gerado.

A alta geração de RCD verificada nas cidades de médio e grande porte e, conseqüentemente, o grande percentual de RCD no volume total de resíduos sólidos urbanos, contribuem para acelerar a redução da vida útil dos aterros, além da possibilidade dos aterros apresentarem problemas de lixiviação, podendo contaminar o lençol freático (SANTOS, 2007).

Por fim, a disposição inadequada dos RCD's poluem o solo, comprometem o tráfego de pedestres e veículos, degradam paisagens e constituem uma séria ameaça à saúde pública. O acúmulo de RCD's em local inadequado atrai resíduos não inertes, oferecendo, simultaneamente, água, alimento e abrigo para muitas espécies de vetores patogênicos, como ratos, baratas, moscas, vermes, bactérias, fungos e vírus (SCHNEIDER, 2003).

2.2.2 Classificação dos resíduos de construção e demolição

A NBR 10.004/2004 – Resíduos sólidos – Classificação, classifica os resíduos de construção e demolição em resíduos de classe II B – Inertes e os definem como:

Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10.007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme a ABNT NBR 10.006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

De acordo com a Resolução nº 307 do CONAMA (2002), alterada pela Resolução nº 348/2004, Resolução nº 431/2011, Resolução nº 448/2012 e Resolução nº 469/2015, os resíduos da construção civil devem ser classificados como:

- I - Classe A: são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
 - c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.) produzidos nos canteiros de obras;
- II – Classe B: são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
- III – Classe C: são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- IV – Classe D: são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

2.2.3 Composição dos resíduos de construção e demolição

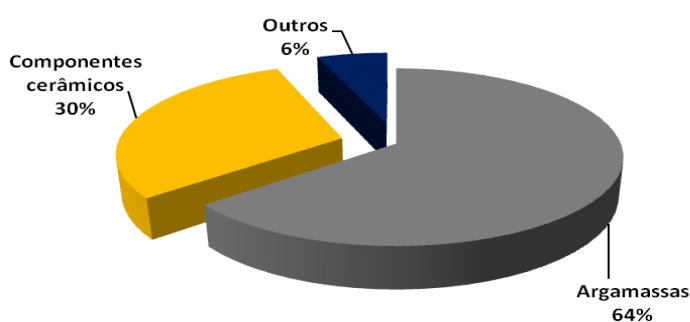
De acordo com Santos (2007), o canteiro de obras, por ser um ambiente dinâmico e sujeito a constante modificação em função do cronograma de execução de serviços e por realizar diferentes atividades concomitantemente, utilizando diferentes tecnologias e empregando materiais de diferentes naturezas, contribui para que os RCD's apresentem uma composição marcada por uma alta variabilidade e heterogeneidade.

A composição do resíduo de construção e demolição pode variar de forma significativa dependendo da região, tipo de material utilizado nas construções, técnicas construtivas empregadas, além de outros fatores. De fato, a metodologia utilizada para a

caracterização também pode influenciar significativamente nos resultados relacionados à composição do RCD (CARNEIRO *et al.*, 2000). Santos (2007) enfatiza que as características regionais como fatores históricos, condições topográficas, panorama político e nível de desenvolvimento econômico podem influenciar de forma significativa na variabilidade de composição dos RCD's entre duas cidades.

Pinto (1987) *apud* Leite (2001), ao analisar a composição dos resíduos de construção provenientes dos canteiros de obra da cidade de São Carlos – SP, constatou que cerca de 64% do resíduo é composto de argamassas, 30% de componentes cerâmicos e o restante (6%) de outros materiais, como concreto, pedra, areia, metálicos e plásticos. A composição estudada pelo autor pode ser observada na Figura 2.

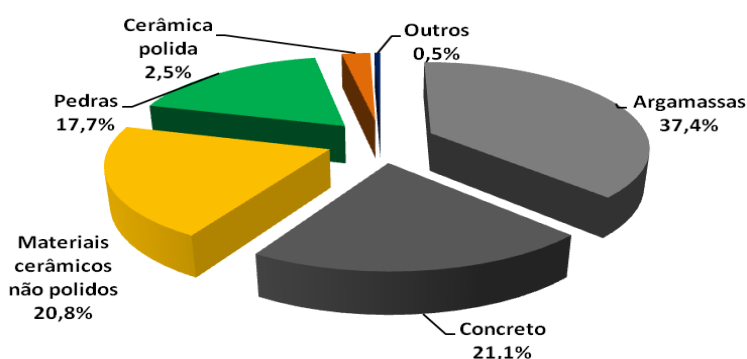
Figura 2 - Composição do resíduo de construção e demolição de São Carlos – SP.



Fonte: Adaptado de PINTO, 1987.

Zordan (1997), ao estudar amostras coletadas na usina de reciclagem de entulho do bairro Adelino Simione, em Ribeirão Preto – SP, revelou a predominância das argamassas (37,4%), sendo a complementação da composição constituída por concreto (21,1%), materiais cerâmicos não polidos (20,8%), pedras (17,7%), cerâmica polida (2,5%) e outros materiais residuais (0,5%), como pode ser observado na Figura 3.

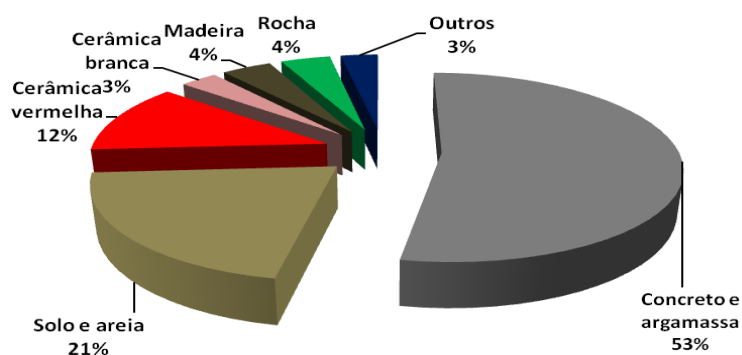
Figura 3 - Composição do resíduo de construção e demolição da cidade de Ribeirão Preto – SP.



Fonte: Adaptado de ZORDAN, 1997.

Carneiro *et al.* (2000) realizaram a caracterização do entulho gerado em Salvador (BA) e constataram que a maior parte é composta por restos de concreto e argamassa (53%). A quantidade de material cerâmico produzido na região também é significativa (15%). A representatividade destas frações (concretos e argamassas e material cerâmico), juntamente com as rochas (4%), totalizou 72% do entulho estudado. Outra parte significativa deste entulho era composta por solo e areia (21%), enquanto que a madeira de construção representava 4%. O resultado da pesquisa pode ser observado na Figura 4.

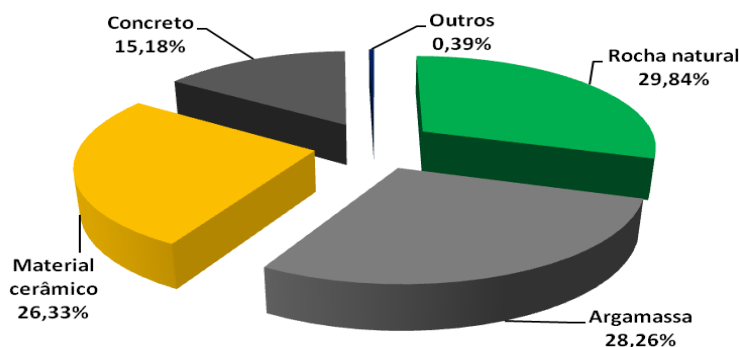
Figura 4 - Composição do resíduo de construção e demolição da cidade de Salvador – BA.



Fonte: Adaptado de CARNEIRO *et al.*, 2000.

Leite (2001) analisou a composição dos resíduos de construção e demolição coletados no Aterro de Inertes da zona sul de Porto Alegre, cujo resultado pode ser visto na Figura 5, e observou que a maior parte da composição do resíduo é de rocha natural (29,84%). Os resultados mostraram ainda uma elevada incidência de argamassa (28,26%), seguida de material cerâmico (26,33%), concreto (15,18%) e outros materiais (0,39%).

Figura 5 - Composição do resíduo de construção e demolição coletados no Aterro de Inertes da Zona Sul de Porto Alegre – RS.



Fonte: Adaptado de LEITE, 2001.

Analisando a composição dos resíduos de construção e demolição das cidades pesquisadas pelos diferentes autores fica evidente a alta variabilidade dos RCD's. A cidade de Salvador (BA) apresentou uma parcela de solo bastante significativa em sua composição, enquanto na cidade de Porto Alegre (RS), o aterro de inertes era composto predominantemente por rocha natural. Foi possível constatar também a ocorrência de uma grande porcentagem de argamassas e material cerâmico em todas as cidades estudadas, assim como a predominância de materiais com grande potencial de reaproveitamento para produção de agregados reciclados, que são descartados todos os dias na maioria das cidades brasileiras.

2.3 Concreto com incorporação de RCD

2.3.1 Teor de substituição de RCD no concreto

Segundo Leite (2001), as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido dependem, além das características intrínsecas dos materiais que constituem o agregado reciclado, do teor de substituição dos agregados naturais por agregados de RCD. Ainda segundo a autora acima citada, a substituição de 11,5% do agregado natural por agregado de RCD, contendo concreto, material cerâmico, argamassa e rochas naturais tem efeito desprezível na resistência à compressão do concreto. Silva *et al.* (2014) observaram que a substituição parcial do agregado graúdo convencional por agregado graúdo de RCD, em teor de 15%, em massa, não interfere significativamente na consistência e na resistência à compressão do concreto.

Angulo (2005) afirma que, quando inferiores a 20%, os teores dos aglomerantes (provenientes de pasta endurecida de cimento ou cal) e da fase cerâmica vermelha, que são grupos de materiais mais porosos presentes nos agregados reciclados, são adequados para uso em concretos estruturais convencionais, uma vez que concretos produzidos com esses teores apresentaram comportamento mecânico e absorção de água similares aos produzidos com agregados naturais.

De acordo com Zega *et al.* (2011), concretos produzidos com substituição de agregado gráúdo natural por agregado reciclado de concreto, para os teores de 25, 50 e 75%, apresentam valores de resistência à compressão muito similares ao concreto de referência para a faixa de resistência de 17 MPa, em todos os teores de substituição. Os concretos com resistência à compressão na faixa de 30 MPa, para os mesmos teores de substituição, apresentam resistência aproximadamente 16% menor que os concretos de referência.

2.3.2 Propriedades dos concretos produzidos com agregados reciclados

2.3.2.1 Consistência

De acordo com Leite (2001) e outros autores (LEVY, 1997; TENÓRIO, 2007), os concretos produzidos com agregado reciclado apresentam menor índice de consistência em comparação às misturas executadas com agregados naturais para uma mesma proporção de mistura. No caso dos agregados reciclados, a maior presença de grãos finos, a forma mais lamelar ou angular dos grãos, a textura superficial mais rugosa e a maior porosidade prejudicam a consistência do concreto (TENÓRIO, 2007).

Hansen (1992) *apud* Leite (2001) afirma que a utilização de agregados miúdos reciclados tende a reduzir ainda mais a trabalhabilidade do concreto. Quando somente agregado gráúdo de concreto é usado, existe apenas uma pequena diferença entre a trabalhabilidade do concreto reciclado e do concreto tradicional.

Segundo Leite (2001), para os concretos reciclados, utilizar apenas o abatimento do tronco de cone para medir a trabalhabilidade das misturas não é adequado, uma vez que esse material se apresenta mais seco que as misturas de concreto convencional. Em seu trabalho, a autora mediu a consistência dos concretos reciclados por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone e do ensaio VeBe (tempo de remoldagem) e constatou que

este último método melhor avalia a trabalhabilidade dos concretos reciclados. Dentre outros aspectos, a autora observou que:

- Os concretos reciclados, de fato, apresentaram valores de consistência mais baixos e mais variáveis que o concreto convencional;
- A determinação do índice de consistência pelo ensaio de abatimento do tronco de cone se mostrou ineficaz para concretos com agregados reciclados e para concretos convencionais com pequenas quantidades de cimento.
- Quanto maior o teor de agregado graúdo reciclado menor foi o valor do abatimento, enquanto que os concretos produzidos somente com agregados miúdos reciclados tiveram o abatimento menos prejudicado.
- Quanto maior a relação a/c, menor é o valor do abatimento do tronco de cone, devido à maior aspereza do concreto em função da menor quantidade de cimento.
- Concretos produzidos com agregado reciclado apresentaram menor exsudação que as misturas com agregados naturais devido à sua alta taxa de absorção de água, e uma menor tendência à segregação entre o agregado reciclado e a argamassa de concreto devido a sua maior coesão.

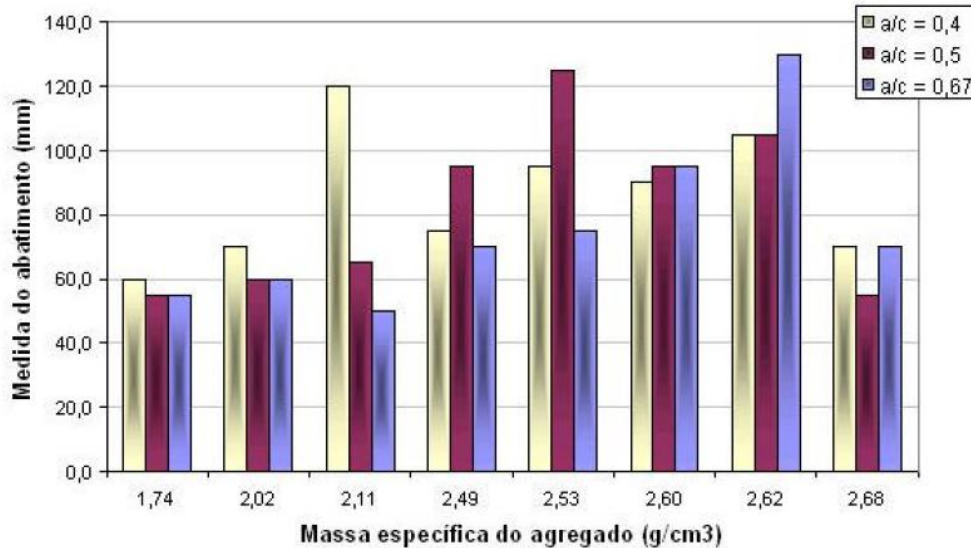
Carrijo (2005) observou que o ensaio de abatimento de tronco de cone apresentou uma variabilidade alta para os concretos reciclados, mesmo após ter compensado parte da água de absorção dos agregados reciclados. A consistência de 80 ± 10 mm de abatimento inicialmente estabelecida foi difícil de ser mantida, com isso a autora adotou o método de adicionar gradativamente o aditivo superplastificante e inspecionar o ponto de consistência plástica dos concretos de forma visual, para depois realizar o ensaio de abatimento.

A análise dos resultados apresentados na Figura 6 indica o aumento do abatimento em função da maior massa específica aparente³ do agregado graúdo, principalmente para as misturas com relação a/c igual a 0,50 e 0,67. Esse comportamento foi atribuído ao fato de que os agregados menos densos, além de possuírem uma elevada absorção, podem não ter uma massa suficientemente grande para vencer a resistência que a pasta fresca

³ Massa específica aparente: é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis.

exerce nos mesmos e, por isso, os valores de abatimento tendem a serem menores, apesar de apresentarem-se trabalháveis. Para a mudança de comportamento apresentada quando a massa específica é 2,68 g/cm³ a autora não apresentou explicação.

Figura 6 - Valores da medida de consistência dos concretos pelo abatimento do tronco de cone.



Fonte: CARRIJO, 2005.

A partir dos resultados obtidos no ensaio de abatimento do tronco de cone, Carrijo (2005) desconsiderou a medida deste como um parâmetro fixo nos concretos, atribuindo ineficiência ao método, o que corrobora o trabalho de Leite (2001). Assim sendo, o ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) não constitui um método adequado para avaliar a trabalhabilidade de concretos com a incorporação de RCD.

2.3.2.2 Resistência à compressão

A resistência mecânica dos materiais está intimamente relacionada à sua porosidade. Quanto mais porosos estes se apresentarem, menor tende a ser sua resistência (LEITE, 2001; CARRIJO, 2005). Tenório (2007) afirma que o maior limitante da resistência dos concretos reciclados é o agregado reciclado, em razão dele ser o principal responsável pela “introdução de porosidade” no sistema.

No estudo de Leite (2001), foi observado que os efeitos significativos sobre a resistência à compressão dos concretos, em ordem de importância, foram: relação água/cimento, teor de substituição do agregado gráudo por agregado reciclado, idade,

teor de substituição de agregado miúdo, as combinações de substituição de agregado graúdo com relação a/c, as interações entre idade e relação a/c, teor de agregado miúdo com idade e a combinação teor de agregado miúdo com idade e relação a/c.

Analisando os efeitos isolados do teor de substituição dos agregados reciclados graúdo e miúdo, Leite (2001) observou que o aumento do teor de substituição do agregado graúdo reciclado tende a diminuir a resistência, enquanto que o aumento do teor de agregado miúdo reciclado tende a aumentar a resistência à compressão. A autora atribui esse comportamento em relação ao agregado graúdo a sua maior porosidade e menor resistência em relação à pasta, mas salienta que é importante considerar também a influência da forma, textura e granulometria dos agregados sobre a resistência à compressão dos concretos produzidos. O aumento da resistência com o aumento de agregado miúdo reciclado talvez possa ser explicado a partir desses fatores. No caso do agregado miúdo reciclado, pelo fato do agregado reciclado apresentar maior rugosidade, o que contribui para melhorar a aderência, granulometria mais contínua e maior quantidade de finos, o que diminui a segregação, contribui no efeito de empacotamento e tamponamento de vazios, e por possuir maior absorção, o que pode melhorar a aderência entre a pasta e o agregado através da precipitação dos cristais de hidratação nos poros do agregado, há uma tendência em causar efeitos benéficos sobre a resistência à compressão do concreto, pois além da melhoria da zona de transição, o agregado miúdo contribui também para o aumento da rigidez da matriz. Tais efeitos contrapõem o efeito propiciado pela maior porosidade dos agregados reciclados e, conseqüentemente, menor resistência mecânica das partículas.

Os concretos produzidos por Leite (2001) que apresentaram maior resistência foram os que continham 100% de agregado miúdo reciclado e agregado graúdo natural para baixas relações a/c. Já para as relações a/c altas, a combinação dos agregados miúdo e graúdo reciclados se apresentou viável, com melhor desempenho quanto maior o valor da relação a/c.

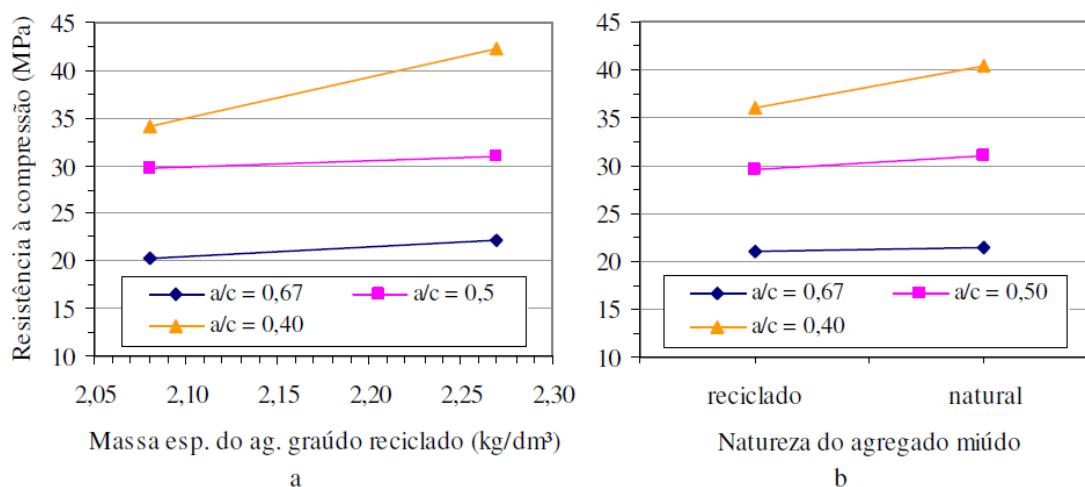
Carrijo (2005) observou que em todos os concretos estudados houve redução da resistência à compressão na medida em que se aumentou a porosidade da pasta, ou seja, aumento da relação a/c dos concretos. Outro aspecto observado foi que a resistência à compressão dos concretos reciclados tiveram valores inferiores às dos concretos de referência à medida que se reduziu a massa específica aparente dos agregados reciclados.

Os concretos produzidos com agregados reciclados de densidade entre 2,2 e 2,5 g/cm³ tiveram valores de resistência à compressão muito próximos daqueles produzidos com agregado natural, para todas as relações a/c, enquanto que concretos produzidos com agregados de densidade inferior à faixa apresentada tiveram uma maior diferença nos valores de resistência em relação à referência conforme houve a redução das relações a/c do concreto.

A comparação realizada por Carrijo (2005) entre os valores de resistência à compressão dos concretos produzidos com agregado vermelho (predominância de cerâmica vermelha) e concretos produzidos com agregado cinza (material cimentício) indicou que ambos os concretos possuem comportamentos semelhantes e que a diferença entre a natureza mineralógica dos agregados não influenciou de maneira significativa na resistência mecânica dos concretos. A influência mais importante decorreu da diferença das porosidades dos agregados. Com base nesses resultados, a autora concluiu que a classificação dos agregados pela densidade se apresenta mais confiável que a classificação visual pela natureza mineral.

Tenório (2007) verificou, assim como Leite (2001) e Carrijo (2005), que os concretos reciclados, independentemente do tipo de agregado reciclado utilizado, obedecem a Lei de Abrams, ou seja, à medida que se aumenta a relação a/c, a resistência à compressão diminuiu. Com base em seus resultados, foi possível observar que, em geral, os concretos reciclados apresentaram resistências à compressão próximas dos concretos de referência. Os casos onde aconteceram reduções acentuadas da resistência à compressão foram atribuídos à influência negativa da porosidade do agregado graúdo reciclado de RCD sobre sua própria resistência e sobre a resistência do concreto, como foi observado também por Leite (2001). Os concretos que apresentaram maiores valores de resistência à compressão foram os executados com agregados de maior massa específica aparente e, conseqüentemente, menor porosidade e maior resistência, confirmando o que foi observado por Carrijo (2005). O autor observou ainda que os concretos de menor relação a/c, a/c=0,40, por exemplo, tendem a ser mais sensíveis à alteração da massa específica/porosidade do agregado graúdo reciclado e à mudança de natureza do agregado miúdo, demonstrando que para baixas relações a/c é o agregado que passa ser a fase limitante da resistência. Os resultados encontrados pelo autor podem ser vistos na Figura 7.

Figura 7 - Comportamento da resistência à compressão média dos concretos reciclados (a) em função da relação a/c e da massa específica do agregado graúdo (b) em função da relação a/c e do tipo de agregado miúdo.



Fonte: TENÓRIO, 2007

Outro ponto analisado por Tenório (2007) foi o aspecto de ruptura dos agregados reciclados nos corpos de prova submetidos aos ensaios de resistência à compressão. De acordo com o autor, para a relação $a/c=0,67$, a ruptura aconteceu predominantemente nos agregados não rochosos (cerâmica e argamassa), o que foi atribuído à baixa resistência dos mesmos que, provavelmente, seja a mais próxima da resistência da pasta. Os agregados rochosos apenas se descolaram, comprovando a menor resistência da zona de transição⁴. Para a relação $a/c=0,40$, houve ruptura também nos agregados rochosos, evidenciando que para esta relação água/cimento a pasta é mais resistente que os agregados. Já os concretos com relação $a/c=0,50$ apresentaram comportamento intermediário.

2.3.2.3 Absorção de água

De acordo com Tenório (2007), os concretos produzidos com agregados reciclados apresentam, em geral, maior absorção de água e índice de vazios que os concretos de referência, demonstrando com isso que os agregados reciclados influenciam negativamente na porosidade do compósito. Angulo (2005) afirma que a absorção de água dos concretos, por ser uma medida direta dos poros acessíveis à água, está correlacionada com a massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD

⁴ Zona de transição: é a interface entre o agregado e a pasta, tem espessura de aproximadamente 1/20 mm.

recicladados, por ser uma variável dependente do volume de vazios, para diferentes relações a/c ou consumo de cimento.

Carrijo (2005) observou que há uma tendência crescente dos valores de absorção de água e índice de vazios em função do aumento da relação a/c e da redução da massa específica aparente dos agregados. O aumento da absorção e do índice de vazios se mostrou mais sensível à redução da massa específica aparente dos agregados do que ao aumento da relação a/c dos concretos, e assim como foi observado pela autora nos resultados de resistência à compressão, a natureza mineralógica do agregado não influencia de forma significativa essas propriedades. Sobre a relação entre resistência à compressão e absorção de água, Carrijo (2005) verificou que, para uma mesma resistência, a absorção de concretos produzidos com agregados naturais e com agregados reciclados de maior densidade se apresentam semelhantes, aumentando aproximadamente 14% para agregados menos densos.

Tenório (2007) verificou que ao se mudar o agregado miúdo reciclado pela areia e ao trocar o agregado graúdo reciclado por outro agregado reciclado de maior massa específica aparente, ou seja, quando se utilizar agregados menos porosos, a absorção de água e o índice de vazios no concreto tendem a diminuir, assim como foi observado por Carrijo (2005). Outro aspecto observado pelo autor foi que com o aumento do consumo de cimento (e diminuição da relação a/c), isto é, à medida que a porosidade da pasta diminui, a porosidade do agregado graúdo se torna menos importante, mostrando que pastas menos porosas são menos penetráveis, tornando mais difícil o acesso à água por parte dos agregados reciclados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O planejamento experimental proposto para o trabalho visa obter subsídios para a análise da influência da substituição parcial do agregado graúdo por agregado graúdo reciclado na resistência à compressão e absorção de água de elementos pré-moldados de concreto destinados à pavimentação. O agregado reciclado, constituído de resíduos de concreto, cerâmica vermelha e placas cerâmicas, foi utilizado em substituição ao agregado graúdo no teor de 25%, em massa.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento Portland

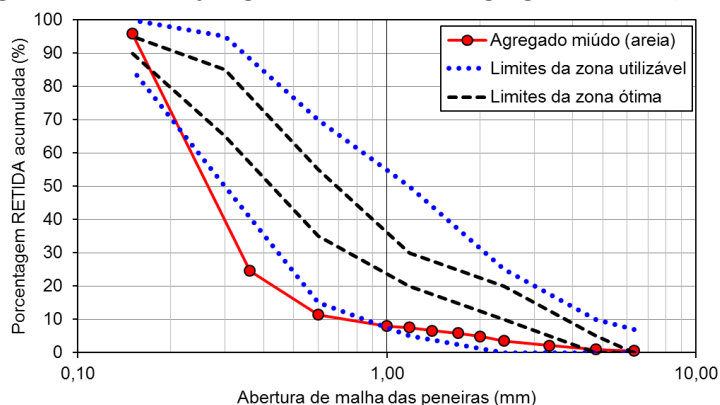
O cimento Portland utilizado no presente trabalho foi do tipo CP V – ARI, da marca Ciplan, de acordo com a norma ABNT NBR 5.733/1991. A escolha por este tipo de cimento se justifica pela rápida necessidade de desfôrma de elementos pré-moldados, o que requer alta resistência inicial em idades precoces.

A caracterização físico-química do cimento não foi realizada em virtude da falta de infraestrutura laboratorial da Instituição, o que impede a realização dos ensaios.

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para a execução dos concretos foi adquirido no comércio local e apresenta características típicas de areia extraída de leito de rio. A massa específica da areia, determinada em duplicata, foi de $2,60 \text{ g/cm}^3$. A massa unitária no estado solto, também determinada em duplicata, foi de $1,65 \text{ g/cm}^3$. Com base nestas características físicas, obtém-se a porosidade da estrutura granular, a qual é de 36,5 %. A distribuição granulométrica do agregado miúdo é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia).



Agregado miúdo:

Dimensão máxima característica: 2,00 mm

Módulo de finura: 1,44

A distribuição granulométrica não atende os limites da zona utilizável proposto pela ABNT NBR 7211/2009.

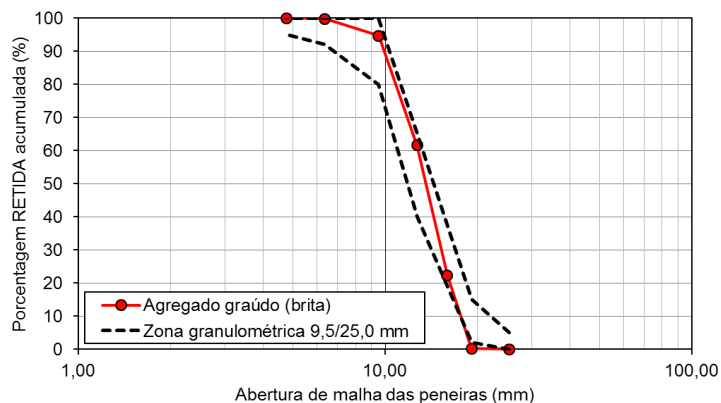
Fonte: Própria.

3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado na execução dos concretos, de origem calcária, apresentou massa específica de $2,67 \text{ g/cm}^3$ e absorção de água de 0,33 %. A massa unitária no estado solto foi de $1,42 \text{ g/cm}^3$, o que implica em uma porosidade da estrutura

granular de 46,8 %. A distribuição granulométrica do agregado graúdo, de dimensão máxima característica de 19,0 mm, é apresentada na Figura 9.

Figura 9 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo (brita).



Agregado graúdo:

Dimensão máxima característica: 19,0 mm

Módulo de finura: 6,95

A distribuição granulométrica atende os limites da zona granulométrica 9,5/25,0 mm proposto pela ABNT NBR 7211/2009.

Fonte: Própria.

3.1.4 Agregados provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD)

Os resíduos de construção e demolição utilizados foram coletados em uma obra de reforma e ampliação no centro da cidade, como pode ser observado na Figura 10. A coleta foi realizada de forma manual e foram selecionadas placas cerâmicas de revestimento e cerâmica vermelha de blocos. O resíduo de concreto consistiu em corpos de prova ensaiados que foram moldados para os traços auxiliares do presente trabalho. A escolha de utilizar os corpos de prova para obter o agregado reciclado de concreto foi feita para que se tivesse conhecimento da procedência e propriedades do agregado gerado a partir deles.

Para obtenção dos agregados reciclados, os resíduos de RCD e os corpos de prova foram fragmentados manualmente, com o auxílio de marreta e talhadeira, até se aproximarem da faixa granulométrica do agregado graúdo de referência (brita 01). O material utilizado foi o passante na peneira de malha 25 mm e que ficava retido na peneira de malha 4,75 mm. A Figura 11 apresenta os agregados reciclados após serem fragmentados.

Figura 10 – Local de coleta dos resíduos de construção e demolição utilizados no presente trabalho.



Fonte: Própria.

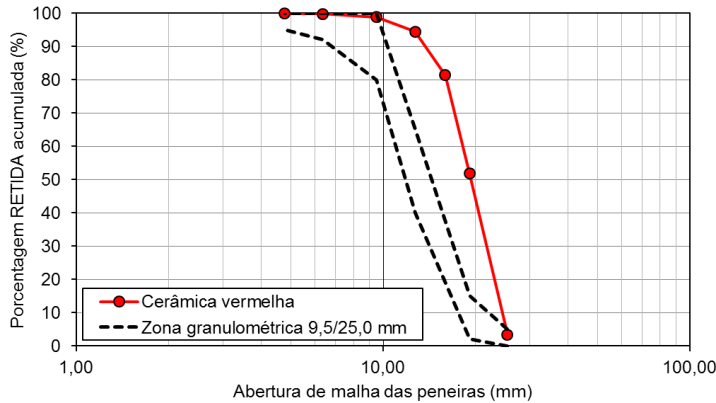
Figura 11 – Agregados reciclados após serem fragmentados



Fonte: Própria.

O agregado reciclado de cerâmica vermelha apresentou massa específica de 2,52 g/cm³, massa específica aparente de 1,97 g/cm³ e absorção de água de 10,92 %. A massa unitária no estado solto foi de 0,90 g/cm³. A distribuição granulométrica do agregado reciclado de cerâmica vermelha, de dimensão máxima característica de 25,0 mm, é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Distribuição granulométrica do agregado reciclado de cerâmica vermelha.



Resíduo de cerâmica vermelha:

Dimensão máxima característica: 25,4 mm

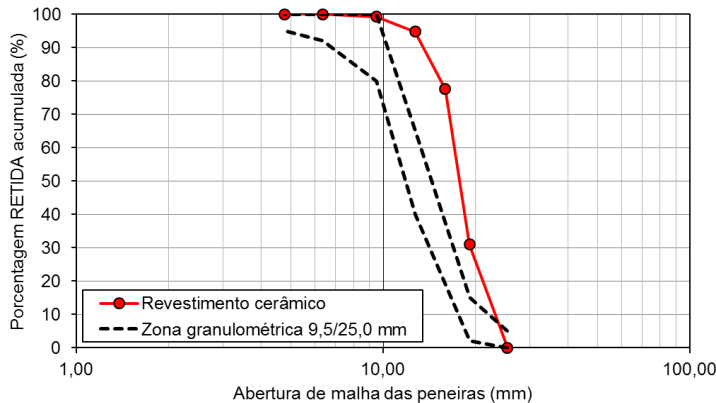
Módulo de finura: 7,50

A distribuição granulométrica não atende os limites da zona granulométrica 9,5/25,0 mm proposto pela ABNT NBR 7211/2009.

Fonte: Própria.

O agregado reciclado de placas cerâmicas apresentou massa específica de 2,41 g/cm³, massa específica aparente de 2,09 g/cm³ e absorção de água de 6,11 %. A massa unitária no estado solto foi de 1,05g/cm³. A distribuição granulométrica do agregado reciclado de placa cerâmica, de dimensão máxima característica de 25,0 mm, é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Distribuição granulométrica do agregado reciclado de placas cerâmicas.



Resíduo de placas cerâmicas:

Dimensão máxima característica: 25,4 mm

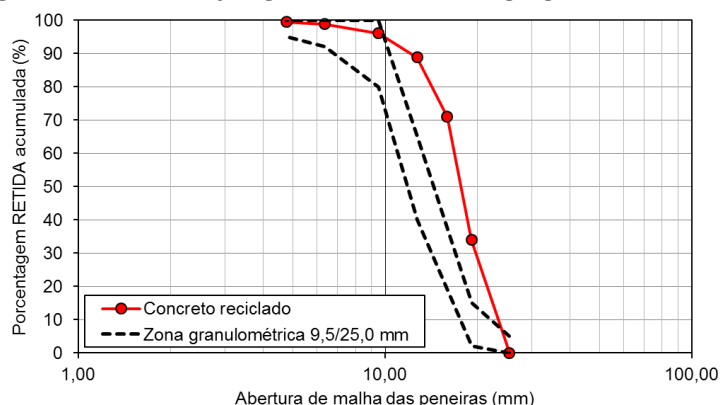
Módulo de finura: 7,30

A distribuição granulométrica não atende os limites da zona granulométrica 9,5/25,0 mm proposto pela ABNT NBR 7211/2009.

Fonte: Própria.

O agregado reciclado de concreto apresentou massa específica de 2,55 g/cm³, massa específica aparente de 2,28 g/cm³ e absorção de água de 4,64 %. A massa unitária no estado solto foi de 1,12 g/cm³. A distribuição granulométrica do agregado reciclado de concreto, de dimensão máxima característica de 25,0 mm, é apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Distribuição granulométrica do agregado reciclado de concreto.



Resíduo de concreto:

Dimensão máxima característica: 25,4 mm

Módulo de finura: 7,27

A distribuição granulométrica não atende os limites da zona granulométrica 9,5/25,0 mm proposto pela ABNT NBR 7211/2009.

Fonte: Própria.

3.2 Dosagem do Concreto

O estudo de dosagem para produção dos concretos seguiu as recomendações propostas pelo método IPT/EPUSB (HELENE E TERZIAN, 1992). Esse estudo consiste no ajuste do teor ideal de argamassa para um traço intermediário, fixando-se um valor de abatimento.

Para a produção dos concretos deste trabalho não foi realizado em laboratório a determinação do conteúdo de argamassa seca ideal, adotando-se, de acordo com Silva *et al.* (2014), os valores de 52% para o teor de argamassa seca e uma relação água/materiais secos de 8,5%. Foram pré-estabelecidas três relações água/cimento fixas: 0,40, 0,50 e 0,60 e com isso foram calculados o traço intermediário e os traços auxiliares, que resultaram, respectivamente, nas seguintes proporções cimento/agregados (miúdo + graúdo): 1:3,7; 1:4,9 e 1:6,1, como apresentado na Tabela 1.

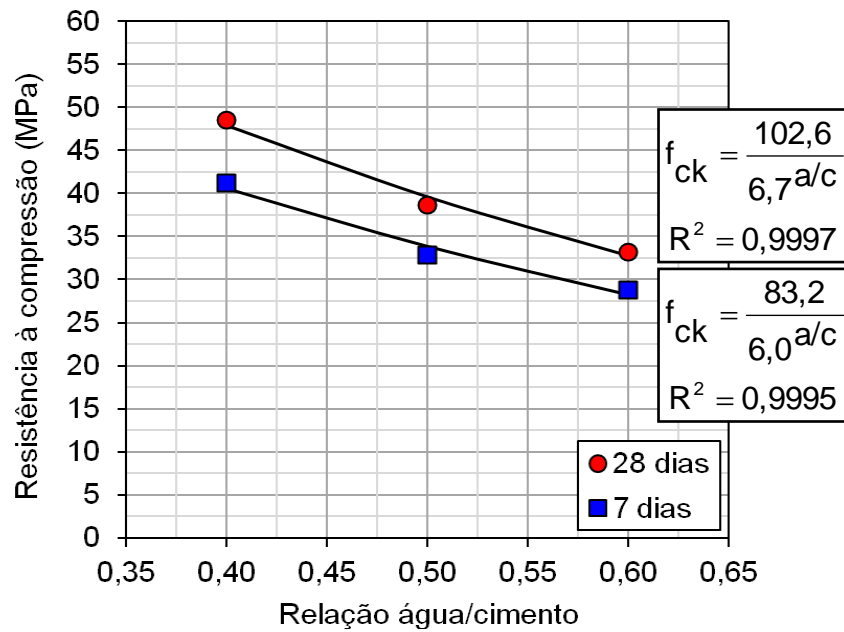
Tabela 1 - Proporções de mistura dos traços auxiliares em função das relações água/cimento e consumo de materiais em quilos por metro cúbico de concreto (kg/m³).

a/c	Agregados			Consumo de materiais			
	m (kg)	a (kg)	p (kg)	Cimento (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Água (kg/m ³)
0,40	3,7	1,4	2,3	471,2	659,7	1083,6	188,46
0,50	4,9	2,1	2,8	373,3	783,93	1045,2	186,65
0,60	6,1	2,7	3,4	309,2	834,84	1051,3	185,52

Fonte: Própria.

Depois de calculados os traços auxiliares, foram realizadas as misturas e moldagens dos corpos de prova cilíndricos, de dimensões $\varnothing 10 \times 20$ cm, e peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação para os ensaios de resistência à compressão. A partir dos resultados de resistência à compressão, foram estabelecidas, para os corpos de prova cilíndricos, as curvas de Abrams para 7 e 28 dias, como apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Curvas de Abrams para os corpos de prova cilíndricos.



Fonte: Própria.

Para as peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação foi estabelecida a curva de Abrams aos 28 dias, como apresentado na Figura 16, a qual foi utilizada para estabelecer a relação água/cimento para a obtenção da resistência à compressão de 41,6 MPa aos 28 dias, decorrente da majoração da resistência à compressão de 35,0 MPa estabelecida na ABNT NBR 9781/2013 para a condição de tráfego de pedestres, veículos leves e veículos de linha. A majoração da resistência à compressão foi realizada por meio da Equação 1.

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65.S_d \quad (1)$$

onde:

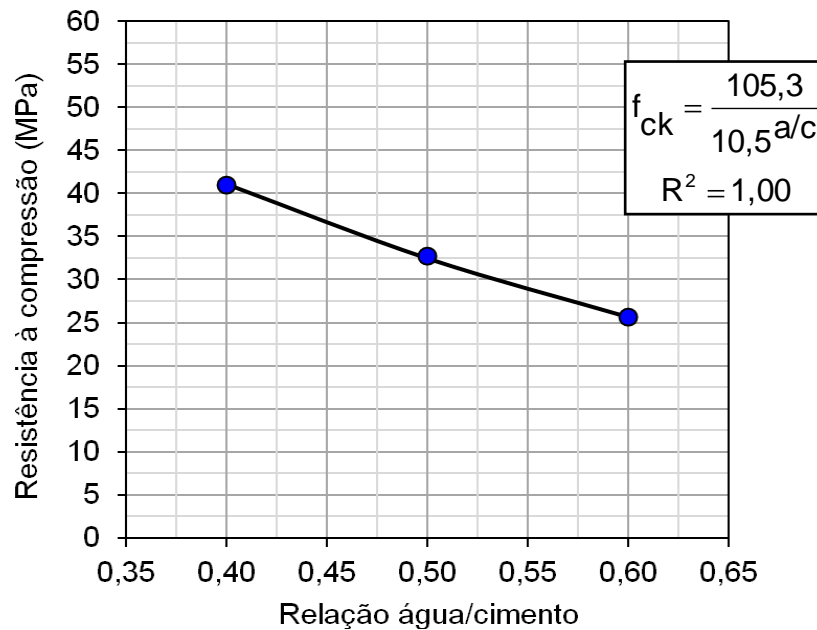
f_{cj} é a resistência média do concreto à compressão, prevista para j dias (MPa);

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão (MPa);

S_d é o desvio-padrão da dosagem (MPa).

O desvio padrão S_d adotado para o cálculo da resistência de dosagem foi 4,0 MPa, condição de preparo A, onde o cimento, agregados e água são medidos em massa.

Figura 16 – Curva de Abrams, aos 28 dias, para as peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação.



Fonte: Própria.

Estabelecida a relação água/cimento a ser utilizada nos concretos com e sem a incorporação de RCD, foram calculadas as proporções de mistura para o preparo de corpos de prova cilíndricos e de peças de concreto pré-moldadas destinadas à pavimentação. De acordo com a curva de Abrams apresentada na Figura 15, a relação água/cimento necessária para atingir a resistência à compressão de 41,6 MPa aos 28 dias é de 0,395. A execução dos concretos, com e sem a incorporação de RCD, a serem submetidos ao ensaio de resistência à compressão e absorção de água utilizou relação água/cimento = 0,40.

3.3 Teor de substituição e composição do agregado reciclado de RCD no concreto

O teor de substituição parcial de agregado graúdo adotado para produção dos concretos foi de 25%, em massa, e se baseou no trabalho de Silva *et al.* (2014), que

utilizou 15% de substituição e obteve resultados sem diferenças significativas na resistência à compressão em relação ao concreto de referência. Dessa forma, a substituição de 25% buscou incorporar um valor mais expressivo de resíduo, proporcionando uma maior reinserção dos RCD gerados no município no ciclo produtivo, além da economia de agregado graúdo natural.

O teor de substituição de 25% do RCD utilizado foi composto, aproximadamente, por 8,33% de cada um dos tipos de resíduo, sendo eles: concreto, cerâmica vermelha e placas cerâmicas de revestimento.

3.4 Mistura do concreto

A mistura dos materiais para produção do concreto foi realizada adicionando-se à betoneira o agregado graúdo, seguido de parte da água. Logo após foi adicionado o cimento e pequenas quantidades de água para que o mesmo fosse dispersado e, por fim, o agregado miúdo seguido do restante da água. O concreto produzido com RCD seguiu o mesmo procedimento para a mistura. Vale ressaltar que não foram efetuadas a pré-molhagem dos agregados reciclados e a compensação de parte da água que é absorvida pelos agregados reciclados durante a mistura. Na Figura 17 são apresentados os agregados graúdos adicionados à betoneira durante a produção do concreto com incorporação de RCD.

Figura 17 – Agregados graúdos adicionados à betoneira durante a produção do concreto com RCD.



Fonte: Própria.

3.5 Consistência

A consistência dos concretos produzidos foi determinada através da medida do abatimento do tronco de cone, que foi realizado de acordo com a NBR NM 67/1998.

3.6 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados e curados de acordo com a NBR 5738/2003. No estudo preliminar, onde não houve a utilização de RCD, foram moldados, para cada traço, 6 corpos de prova cilíndricos (\emptyset 10 x 20 cm) e uma peça pré-moldada, com formato tipo raquete, de 8 cm de altura. Para o estudo de análise comparativa referente à influência do RCD na resistência à compressão e absorção de água, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos (\emptyset 10 x 20 cm) e 8 peças pré-moldadas, com formato tipo raquete, de 8 cm de altura.

A moldagem dos corpos de prova cilíndricos foi realizada por meio do lançamento do concreto no molde, em duas camadas aproximadamente iguais, sendo cada uma delas adensada manualmente, com haste metálica, pela aplicação de 12 golpes/camada. A moldagem das peças pré-moldadas também foi feita em duas camadas e, em cada camada, os moldes foram submetidos a pequenos impactos manuais sobre uma superfície rígida de concreto. Na Figura 18 são apresentados os corpos de prova cilíndricos e a peça pré-moldada após a moldagem.

Os corpos de prova foram mantidos nas fôrmas durante 24 horas e, na sequência, foram desmoldados e submetidos à cura submersa em água saturada com cal até as idades de ensaio. A imagem da Figura 19 apresenta as peças de concreto com e sem a incorporação de RCD na composição do concreto. De fato, não é possível observar diferença significativa no acabamento superficial das peças com e sem a utilização de RCD.

Figura 18: Corpos de prova cilíndricos e peça pré-moldada de concreto após moldagem.



Fonte: Própria.

Figura 19 – Peças pré-moldadas após desforma (esquerda: referência; direita: com incorporação de RCD).



Fonte: Própria.

3.7 Ensaios realizados

3.7.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão, realizado aos 7 e 28 dias, seguiu as recomendações da NBR 5739/2007 para os corpos de prova cilíndricos e da NBR 9781/2013 para as peças pré-moldadas destinadas à pavimentação. Os corpos de prova cilíndricos foram retificados, como pode ser observado na Figura 20, já as peças pré-moldadas não receberam nenhuma forma de capeamento, sendo utilizados discos de aço (\varnothing 8,48 cm) para uniformizar a distribuição de cargas, como apresentado na Figura 21.

Figura 20 – Corpos de prova cilíndricos retificados para realização do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Própria.

Figura 21 – Ensaio de resistência à compressão na peça pré-moldada.



Fonte: Própria.

3.7.2 Absorção de água

A determinação da absorção de água nas peças pré-moldadas de concreto foi realizada de acordo com a NBR 9781/2013. O ensaio teve início aos 28 dias e foi realizado em quatro peças inteiras, duas produzidas com o concreto de referência e duas com a incorporação de RCD. O ensaio consiste, basicamente, em saturar as peças pré-moldadas de concreto durante 24 horas e, na sequência, determinar a massa saturada superfície seca. Após esta etapa, as peças são acondicionadas em estufa ventilada a 105 °C por período mínimo de 24 horas para, então, determinar as respectivas massas secas. As

leituras devem ser realizadas a cada 2 horas até que a variação entre as duas últimas leituras não apresente diferença superior a 0,5%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Proporção de mistura dos concretos com e sem RCD

A proporção de mistura dos concretos com e sem a incorporação de RCD foi estabelecida a partir de parâmetros de dosagem pré-estabelecidos no estudo inicial para a obtenção das curvas de Abrams. Assim sendo, os parâmetros utilizados foram: relação água/materiais secos = 8,5%, teor de argamassa seca = 52% e relação água/cimento = 0,40. Na Tabela 2 são apresentadas as proporções de mistura e os consumos de materiais por metro cúbico dos concretos utilizados neste estudo. Foi observado que, apesar de ter sido mantida constante a relação cimento/agregados para os concretos de referência e com incorporação de RCD, houve redução no consumo de materiais por metro cúbico de concreto devido à menor massa específica aparente dos agregados reciclados em comparação ao agregado convencional. Cabe ressaltar que os agregados reciclados possuem elevada absorção de água, ou seja, possuem porosidade interna. Esta porosidade irá, a partir do momento da mistura com a água, absorver parte desta e, conseqüentemente, o volume de pasta e a trabalhabilidade (*slump*) do concreto serão reduzidos.

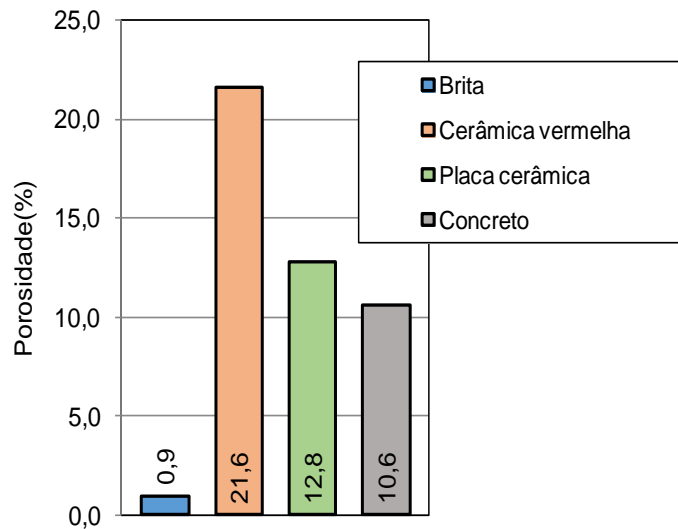
Tabela 2 - Proporções de mistura dos concretos em função das relações água/cimento e consumo de materiais em quilos por metro cúbico de concreto (kg/m³).

Concreto	a/c	Agregados			Consumo de materiais						
		m (kg)	a (kg)	p (kg)	Cimento (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Agregados reciclados de RCD's			Água (kg/m ³)
								Cerâmica Vermelha (kg/m ³)	Cerâmica Revestimento (kg/m ³)	Concreto (kg/m ³)	
REF	0,40	3,7	1,4	2,3	471,2	659,7	1083,8	-	-	-	188,5
RCD's	0,40	3,7	1,4	2,3	458,7	642,2	791,3	87,9	87,9	87,9	183,5

Fonte: Própria.

A Figura 22 apresenta a porosidade média estimada do agregado graúdo natural e dos agregados reciclados de RCD.

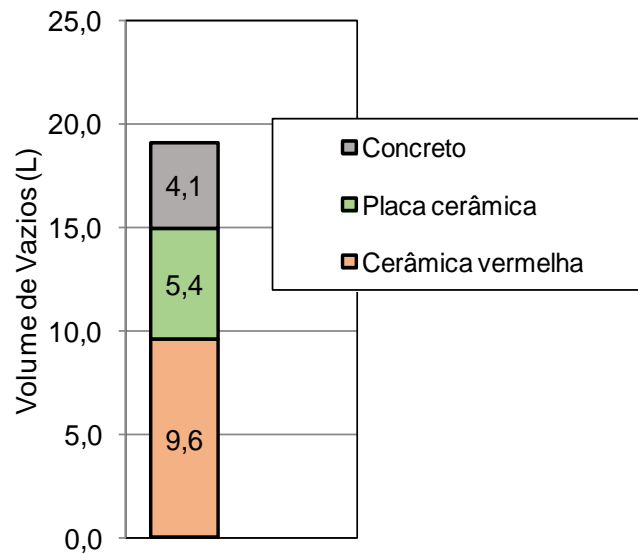
Figura 22 - Porosidade dos agregados graúdos natural e reciclados de RCD.



Fonte: Própria.

O resíduo de cerâmica vermelha apresentou uma porosidade de 21,6%, o que equivale a uma absorção de água de 10,92%. O consumo deste agregado reciclado no concreto foi de $87,9 \text{ kg/m}^3$, o qual contém um volume de vazios equivalente a 9,6 L. A placa cerâmica, com porosidade de 12,8% e absorção de água de 6,11%, contém, para um consumo de $87,9 \text{ kg/m}^3$, um volume de vazios equivalente a 5,4 L. Já o concreto reciclado, com porosidade de 10,6% e absorção de água de 4,64%, ao representar um consumo de $87,9 \text{ kg/m}^3$, insere um volume de vazios no concreto equivalente a 4,1 L. Portanto, o concreto contendo RCD dispõe de 19,0 L de vazios contidos nos agregados reciclados, os quais passam a absorver água imediatamente após o contato com a água de mistura, o que reduz a água livre responsável pela fluidez do concreto e, conseqüentemente, reduz a trabalhabilidade do mesmo. A Figura 23 apresenta o volume de vazios inseridos no concreto por cada um dos tipos de agregado reciclados.

Figura 23: Volume de vazios incorporado ao concreto por cada um dos tipos de agregado reciclado de RCD.



Fonte: Própria.

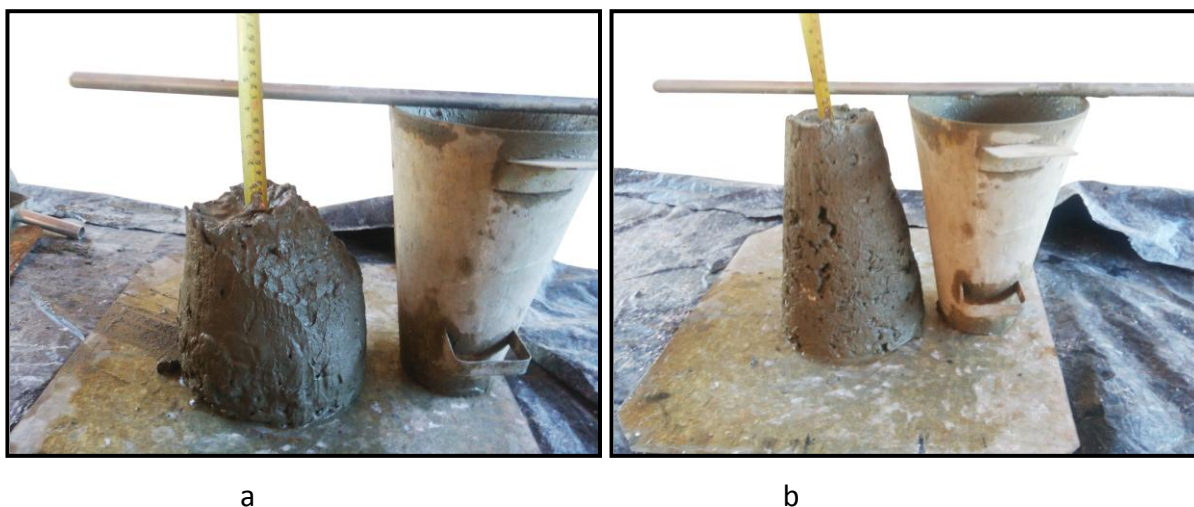
4.2 Propriedades dos concretos

4.2.1 Consistência

A consistência dos concretos foi medida por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone. O valor de abatimento de 10 ± 1 cm, estabelecido como parâmetro de trabalhabilidade, foi atingido pelo concreto de referência, o qual apresentou abatimento de 10,5 cm. A substituição parcial do agregado convencional por agregados reciclados reduziu consideravelmente a trabalhabilidade, de tal forma que o abatimento observado no concreto foi de 3,0 cm. De fato, a porosidade dos agregados de RCD, ao absorver parte da água de mistura reduziu significativamente o abatimento do concreto.

A Figura 24 apresenta os resultados de abatimento obtidos nos ensaios.

Figura 24 - Medida do abatimento dos concretos (a) referência e (b) com incorporação de RCD.



Fonte: Própria.

O resultado observado mostra que, apesar do concreto com RCD ter se apresentado trabalhável e moldável, seu abatimento foi bastante reduzido com a incorporação dos agregados reciclados, o que corrobora as constatações feitas por Leite (2001) e Carrijo (2005), de que concretos produzidos com agregado reciclado de RCD apresentam valores de consistência menores e mais variáveis que concretos convencionais. Por fim, as autoras afirmam que o ensaio de abatimento pelo tronco de cone não é um método adequado para medir a trabalhabilidade de concretos com a incorporação de RCD em virtude do reduzido abatimento observado, porém com escoamento normalmente adequado para a moldagem das peças.

A perda de abatimento observada pode ser justificada por fatores como forma mais angular dos agregados reciclados, provocando maior travamento das misturas de concreto e diminuindo a mobilidade entre as partículas, e sua maior porosidade. Portanto, para controle da absorção da água de mistura por parte dos agregados reciclados, buscando minimizar os efeitos negativos que a incorporação de RCD exerce na trabalhabilidade dos concretos, é sugerido que seja feito o controle dos teores de agregados com maior valor de absorção, como a cerâmica vermelha, e sejam realizados os cuidados de molhagem dos agregados reciclados ou compensação da água de mistura absorvida, pois, como foi observado por Leite (2001), a maior parte da absorção de água por parte dos agregados reciclados ocorre durante a mistura, fazendo com que o concreto se apresente mais seco e impactando diretamente na consistência do mesmo.

Com base nos resultados obtidos foi possível perceber que concretos produzidos com agregados reciclados de RCD requerem atenção no que se refere a sua consistência. No entanto, apesar de mostrarem algumas características desfavoráveis, os mesmos apresentam trabalhabilidade satisfatória quando analisada a moldabilidade da mistura.

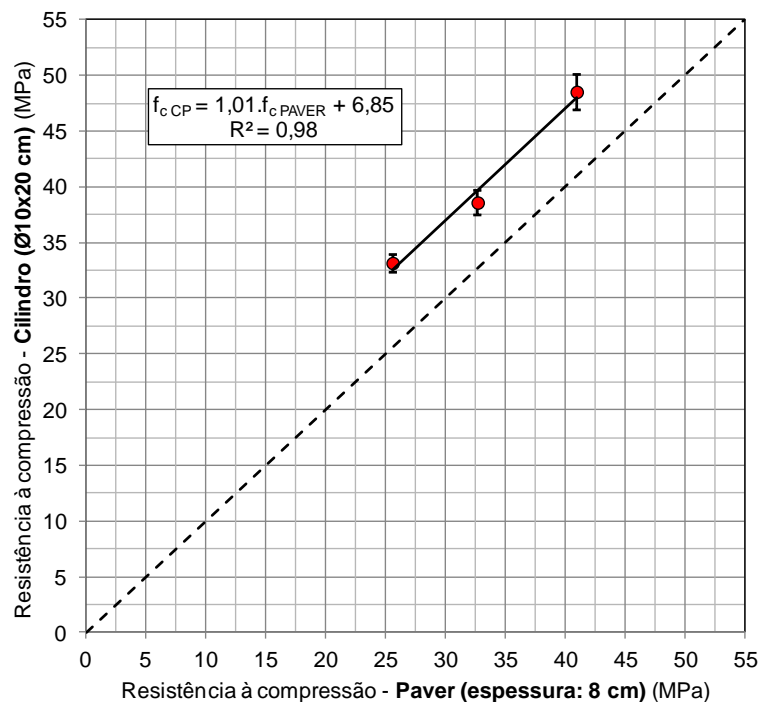
4.2.2 Resistência à compressão

4.2.2.1 Relação entre a resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos e peças de concreto para pavimentação

No estudo preliminar foram moldados, em diferentes relações água/cimento, corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões $\varnothing 10 \times 20$ cm, e peças pré-moldadas destinadas à pavimentação, com espessura de 8,0 cm, para a realização de ensaio de resistência à compressão aos 28 dias. A alteração da forma dos corpos-de-prova impacta na resistência à compressão, apesar do material utilizado na moldagem ser o mesmo. Assim sendo, é possível relacionar a resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos com a resistência das peças de concreto para pavimentação.

A Figura 25 apresenta a relação entre a resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos em função da resistência das peças de concreto para pavimentação.

Figura 25- Resistência à compressão dos cilindros em função da resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação.



Fonte: Própria.

Os resultados indicam que a resistência à compressão do corpo-de-prova cilíndrico é maior que a resistência à compressão das peças de concreto para pavimentação. O coeficiente angular da linha de tendência possui valor unitário e, portanto, o coeficiente linear, por ser uma constante, representa o acréscimo de resistência a ser considerado sobre o valor obtido para as peças de concreto para pavimentação. Assim sendo, a partir dos resultados obtidos para diferentes relações água/cimento (0,40; 0,50 e 0,60), é possível afirmar que a avaliação da resistência à compressão de peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação não pode ser realizada por meio de corpos-de-prova cilíndricos. Caso esta medida de determinação da resistência à compressão seja adotada, há que se propor um acréscimo de resistência à compressão de aproximadamente 7,0 MPa. Tal condição é válida para os materiais utilizados neste estudo e, desta forma, não pode ser generalizado para outras situações, onde há diferentes tipos de agregados e cimento Portland.

A execução de peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação, para a condição de tráfego de pedestres, veículos leves e veículos de linha requer, conforme as diretrizes da ABNT NBR 9.781/2013, uma resistência à compressão de 35,0 MPa. A fim de garantir que 95% do concreto supere esta resistência, a ABNT NBR 12.655/2006 estabelece a necessidade de majoração da resistência característica à compressão, de tal forma que a resistência à compressão de dosagem passe a ser 41,6 MPa. Esta resistência à compressão deve ser, obrigatoriamente, avaliada nas peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação e não em corpos-de-prova cilíndricos. Assim sendo, por meio dos resultados apresentados na Figura 25, a resistência à compressão a ser atingida pelos corpos-de-prova cilíndricos para atender a imposição da norma ABNT 9781/2013 no que se refere às peças pré-moldadas de concreto seria de, no mínimo, 48,9 MPa.

4.2.2.2 Resistência à compressão de concreto com e sem a incorporação de RCD

Os resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos dos concretos com e sem a incorporação de RCD, moldados na relação água/cimento = 0,40, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resistência à compressão, para os corpos de prova cilíndricos, dos concretos com e sem incorporação de RCD.

Concreto	a/c	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)				Desvio Padrão (MPa)	Coef. Variação (%)
			CP 01	CP 02	CP 03	MÉDIA		
REF	0,40	7	42,2	41,8	42,7	42,2	0,5	1,1
		28	49,7	xx	49,6	49,6	0,1	0,1
RCD	0,40	7	39,8	41,2	42,5	41,2	1,4	3,3
		28	44,9	46,6	46,6	46,0	1,0	2,2

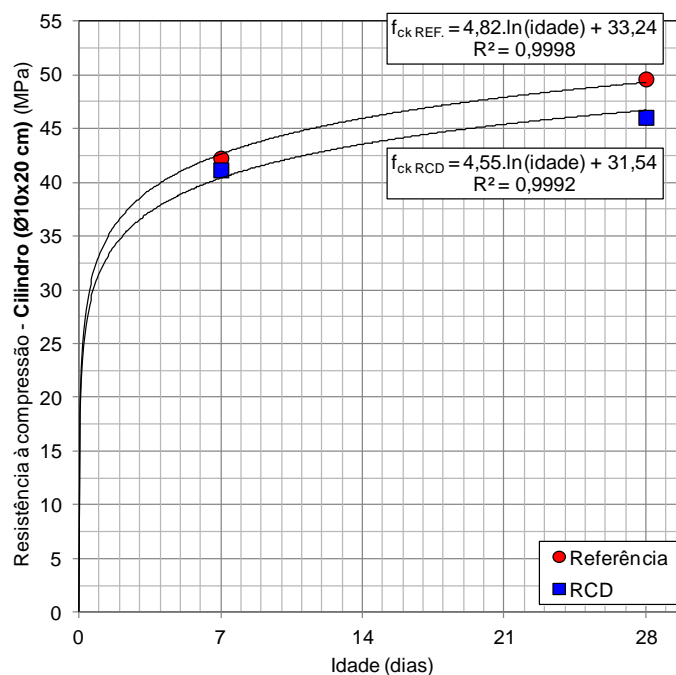
OBS.: Os valores de resistência à compressão suprimidos da tabela se justificam pela incoerência do resultado obtido, o que propiciaria um considerável desvio padrão e, conseqüentemente, um elevado coeficiente de variação.

Fonte: Própria.

Na idade de 7 dias, a resistência à compressão do concreto de referência (42,2 MPa) foi praticamente a mesma observada no concreto com a substituição de 25% do agregado graúdo convencional por agregados reciclados (41,2 MPa). Já aos 28 dias, a resistência à compressão do concreto de referência (sem RCD) foi 8,0% superior à resistência do concreto contendo agregados reciclados. Portanto, a utilização de agregados provenientes de RCD, em teor de 25% em substituição ao agregado convencional, tende a propiciar redução na resistência à compressão.

A evolução da resistência à compressão ao longo do tempo dos concretos é apresentada na Figura 26.

Figura 26- Resistência à compressão, para os corpos de prova cilíndricos, dos concretos com e sem incorporação de RCD, ao longo do tempo.



Fonte: Própria.

As linhas de tendência que representam o comportamento da resistência à compressão dos concretos ao longo do tempo evidenciam que a utilização de agregados reciclados na substituição parcial do agregado convencional, em teor de 25%, em massa, causa decréscimo nesta propriedade mecânica. O decréscimo nestes concretos, de resistência à compressão superior a 40,0 MPa aos 7 dias, pode ser justificada pela baixa resistência dos agregados reciclados em relação ao agregado convencional, o que propicia a formação e propagação de fissuras quando o material é solicitado mecanicamente.

O trabalho de Silva *et al.* (2014), ao utilizar a mesma composição de agregados reciclados, porém em teor de 15% de substituição de agregado convencional, não verificou redução na resistência à compressão para concretos misturados em relações água/cimento entre 0,35 e 0,65. Portanto, teores superiores a 15% tendem a propiciar redução na resistência à compressão do concreto.

A Tabela 4 apresenta os resultados da resistência à compressão, para as peças pré-moldadas destinadas à pavimentação, dos concretos produzidos com e sem incorporação de RCD, moldados na relação água/cimento = 0,40.

Tabela 4 - Resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação com e sem incorporação de RCD.

Concreto	a/c	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)				Desvio Padrão (MPa)	Coef. Variação (%)
			Peça 01	Peça 02	Peça 03	MÉDIA		
REF	0,40	7	34,7	34,3	39,9	36,3	3,1	8,7
		28	37,8	39,4	39,3	38,8	0,9	2,3
RCD	0,40	7	37,6	37,2	xx	37,4	0,3	0,8
		28	38,6	xx	38,2	38,4	0,3	0,8

Fonte: Própria.

As imagens da Figura 27 apresentam uma peça pré-moldada logo após o ensaio de resistência à compressão e outra peça onde é possível visualizar os agregados reciclados utilizados na composição do concreto. Fica evidente que há ruptura dos agregados reciclados quando da solicitação mecânica à compressão. Tal comportamento também foi observado no agregado convencional.

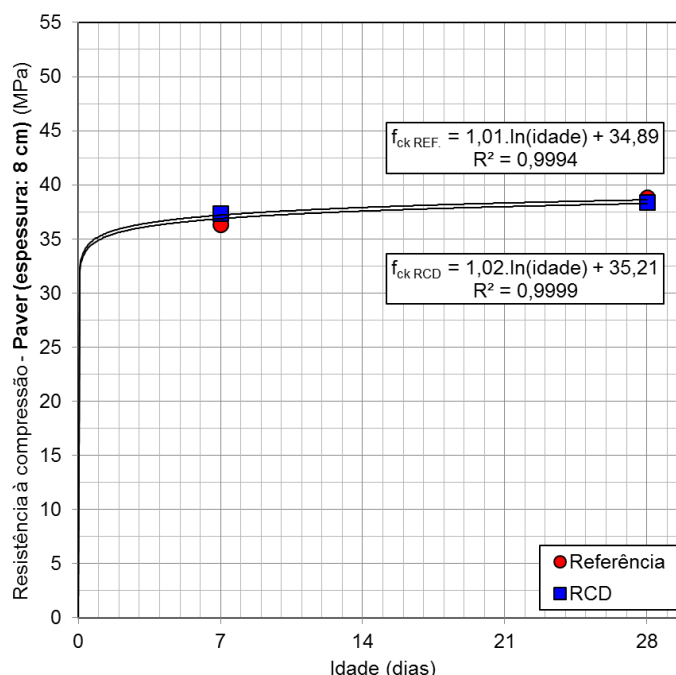
Figura 27 - Peças pré-moldadas rompidas no ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Própria.

A evolução da resistência à compressão das peças de concreto para pavimentação é apresentada na Figura 28.

Figura 28 - Resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação, com e sem incorporação de RCD, em função das idades.



Fonte: Própria.

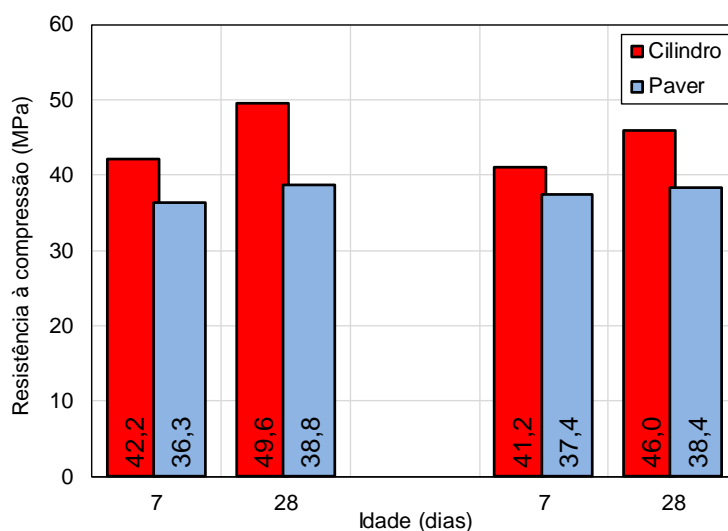
Os resultados de resistência à compressão para as peças pré-moldadas de concreto evidenciam que as peças produzidas com concreto contendo RCD apresentaram valores de resistência à compressão praticamente iguais aos observados nas peças de referência. A incorporação de RCD teve menor influência na resistência à compressão das peças pré-moldadas do que nos corpos de prova cilíndricos. É possível notar que houve um acréscimo muito pequeno na resistência à compressão entre as idades de 7 para 28 dias nas peças pré-moldadas. Tal comportamento difere do observado nos corpos-de-prova cilíndricos.

Aos 28 dias de idade, ambos os concretos utilizados na moldagem das peças de concreto para pavimentação atingiram resistência à compressão superior a 35,0 MPa, valor estabelecido por norma para a condição adotada neste estudo. Portanto, a incorporação de RCD como agregado reciclado, na composição proposta neste trabalho, ou seja, onde cada um terço do agregado reciclado foi constituído por diferentes materiais, não propicia redução na resistência à compressão das peças de concreto para pavimentação, o que atesta, em um primeiro momento, a sua viabilidade técnica. De fato, seria necessário avaliar a resistência ao desgaste por abrasão para complementar a

viabilidade técnica do uso de agregados de RCD para a produção de peças de concreto destinadas à pavimentação.

De fato, as diferentes formas dos corpos-de-prova ensaiados resultou em resistência à compressão variadas. A Figura 29 apresenta os resultados de resistência à compressão, aos 7 e 28 dias, dos corpos-de-prova cilíndricos e das peças de concreto para pavimentação.

Figura 29 - Comparação das resistências à compressão entre os corpos de prova cilíndricos e as peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação.



Fonte: Própria.

Os corpos de prova cilíndricos apresentaram resistência à compressão superior às peças pré-moldadas tanto para o concreto de referência como para o concreto com incorporação de RCD. Aos 28 dias, no concreto de referência, a resistência dos cilindros foi 27,8% superior à das peças de concreto, enquanto que, para o concreto contendo RCD, este aumento foi de 19,8%.

As hipóteses que podem justificar esse comportamento estão respaldadas na diferença geométrica entre os corpos-de-prova e o acabamento de uma das superfícies das peças de concreto para pavimentação.

A relação altura/diâmetro dos corpos-de-prova cilíndricos é igual a 2,00, enquanto para as peças de concreto para pavimentação é de aproximadamente 0,94 (altura da peça = 8,00 cm e diâmetro das placas auxiliares = 8,48 cm). A partir desta premissa, esperava-se que a resistência à compressão das peças de concreto para pavimentação fosse superior à obtida nos corpos-de-prova cilíndricos o que, de fato, não ocorreu. Portanto,

outro fator interveniente de maior influência pode ter causado a redução da resistência à compressão das peças de concreto para pavimentação. Uma possibilidade relevante seria a presença de irregularidades em uma das superfícies de ensaio das peças de concreto para pavimentação, haja vista o ensaio ter sido realizado sem qualquer tratamento da superfície irregular. Tal situação resulta, quando da realização do ensaio, em carregamento não uniforme, o que propicia distribuição não homogênea da carga sobre a área solicitada e, conseqüentemente, causa redução da resistência à compressão da peça ensaiada. Tal justificativa também foi apresentada por Fernandes (2011), a qual evidencia que o carregamento não uniforme resulta em redução da resistência à compressão.

4.2.3 Absorção de água

Os resultados de absorção de água das peças de concreto para pavimentação moldadas com e sem a incorporação de RCD são apresentados na Tabela 5

Tabela 5 – Absorção de água das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação com e sem incorporação de RCD.

Concreto	a/c	Idade (dias)	Absorção de água (%)		
			Peça 01	Peça 02	MÉDIA
REF	0,40	28	2,96	3,03	3,00
RCD	0,40	28	3,17	3,14	3,15

Fonte: Própria.

A absorção de água das peças de concreto de referência foi, em média, de 3,00%, enquanto as peças de concreto que continham agregados reciclados foi, em média, de 3,15%. A norma ABNT NBR 9.781/2013 estabelece como absorção de água máximo individual o valor de 7,00%, o que não foi atingido pelas peças de concreto com e sem a incorporação de agregados reciclados.

Os resultados obtidos corroboram as constatações feitas por Tenório (2007) de que, para baixas relações a/c e alto consumo de cimento, a porosidade dos agregados graúdos reciclados se torna menos importante, pois à medida que a porosidade da pasta diminui, mais difícil é o acesso à água por parte dos agregados reciclados.

4.3 Considerações gerais

A preocupação com o meio ambiente e a necessidade de minimizar os impactos causados pelo consumo intenso de recursos naturais, atrelado a grande geração de resíduos pela construção civil, tem sido motivação para o desenvolvimento de tecnologias que busquem inserir os RCD's na cadeia produtiva. O emprego desses resíduos em concretos tem sido objeto de estudo em várias pesquisas nos últimos anos (LEITE, 2001; ANGULO, 2005; TENÓRIO, 2007). A utilização destes resíduos na composição de concretos sem fins estruturais tem se mostrado viável em virtude do bom desempenho dos elementos produzidos, sobretudo no que se refere às propriedades mecânicas.

A reciclagem dos RCD's como agregados para concretos sem função estrutural é uma alternativa viável para a produção de peças pré-moldadas destinadas à pavimentação, o que representa uma destinação ambientalmente adequada desde que as exigências técnicas preconizadas nas normas pertinentes sejam cumpridas.

De fato, a triagem e britagem dos RCD's para a utilização como agregado graúdo em concreto requer aporte financeiro relacionado à mão de obra, aquisição de equipamentos e consumo energético. Assim sendo, há que se ponderar a vantagem econômica advinda da redução do consumo de agregado convencional e confrontá-la com o custo para a adequação do RCD às características físicas necessárias para o seu uso como agregado. Apesar da viabilidade econômica decorrente do uso de RCD como agregado graúdo para concreto ser, provavelmente, desprezível, o valor agregado no que tange a questão ambiental é significativo, sobretudo por reduzir o volume de resíduo a ser destinado adequadamente, assim como a redução do volume de agregado a ser extraído para atender a demanda social por produtos de base cimentícia.

Tecnicamente há que se realizar pesquisas de forma a minimizar as incertezas comportamentais decorrentes do uso de RCD como agregado graúdo para concreto. Também há que se estabelecer critérios e diretrizes que facilitem a caracterização e aplicação das diferentes frações de materiais que compõem o RCD.

Por fim, para atestar completamente a viabilidade do uso de RCD como agregado graúdo em concreto para a execução de peças pré-moldadas destinadas à pavimentação, há que se realizar ensaios em condições reais de utilização para avaliação do desempenho frente à abrasão decorrente do tráfego.

Os resultados deste trabalho evidenciaram que o uso de RCD como agregado graúdo em teor de substituição de 25%, em massa, cumpre as exigências normativas (NBR 9.781/2013) no que se refere à resistência à compressão e absorção de água. Estas propriedades, de cunho obrigatório, permitem atestar a utilização de RCD na produção de peças de concreto para pavimentação, porém a resistência ao desgaste superficial por abrasão é de suma importância para que o material cumpra a sua vida útil com desempenho satisfatório. Assim sendo, é necessário explorar com maior detalhamento o comportamento do concreto contendo RCD no tocante à abrasão, haja vista a exposição dos agregados reciclados na superfície de tráfego potencializar o desgaste da peça de concreto em decorrência da alta porosidade contida nos materiais que compõem normalmente o RCD.

5. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados obtidos no presente estudo foi possível fazer as seguintes conclusões:

- Os agregados reciclados de RCD apresentaram valores elevados de absorção de água, principalmente a cerâmica vermelha, causando redução da quantidade de água responsável pela fluidez da mistura, reduzindo o abatimento do tronco de cone do concreto reciclado. Desta forma, para que não haja redução significativa da água disponível para conferir fluidez ao concreto é aconselhável que seja adicionada uma parcela de água referente à absorção dos agregados reciclados.
- A avaliação da trabalhabilidade do concreto produzido com agregados reciclados de RCD, realizada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone não se mostrou eficaz, pois apesar de um abatimento reduzido, o concreto se apresentou moldável.
- A resistência à compressão do concreto produzido com incorporação de 25%, em massa, de agregado graúdo reciclado de RCD, composto por cerâmica vermelha, placa cerâmica de revestimento e concreto, foi muito próxima ao concreto de referência, mostrando que a utilização de agregado reciclado de RCD, para esse

teor de substituição, não causa redução significativa na resistência à compressão dos concretos.

- A resistência à compressão das peças pré-moldadas destinadas à pavimentação foi inferior à dos corpos de prova cilíndricos, comportamento que foi observado para as peças produzidas com e sem incorporação de RCD. Esta redução na resistência à compressão foi atribuída à presença de irregularidades em uma das superfícies de ensaio das peças de concreto para pavimentação. Previamente à realização do ensaio não foi realizado qualquer tratamento da superfície irregular, o que resultou em carregamento não uniforme sobre a área delimitada pela placa auxiliar.
- O concreto produzido com incorporação de RCD apresentou absorção de água muito semelhante ao concreto de referência, atendendo o estabelecido pela ABNT NBR 9.781/2013. Para baixas relações água/cimento, a porosidade do agregado reciclado não se tornou um fator determinante na absorção de água do concreto.
- A utilização de agregados reciclados de RCD na produção de peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação se mostrou viável, proporcionando economia de agregado natural e principalmente a reciclagem dos resíduos de construção e demolição gerados no município de Barreiras.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros são feitas as seguintes sugestões:

- Avaliar a influência que a melhoria da superfície irregular das peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação exerce sobre a resistência à compressão das peças.
- Realizar o mesmo estudo deste trabalho considerando o acréscimo da água absorvida pelos agregados reciclados de RCD durante a mistura.
- Utilizar aditivos dispersantes para avaliar o abatimento do concreto, reduzido pela absorção de água pelos agregados reciclados de RCD.

7. REFERÊNCIAS

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2000.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento dos concretos**. Doutorado em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C.; JONH, V. M. **Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade**. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, ENTAC. Foz do Iguaçu, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 10.520: Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação**. Rio de Janeiro, 2002.

____. **NBR 15.116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concretos sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004.

____. **NBR 9.781: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

____. **NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio Janeiro, 2004.

____. **NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção**. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR 7.251: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária**. 1982.

____. **NBR NM 248: Agregados Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR 7.211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio e Janeiro, 2009.

____. **NBR 12.655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento**. Rio e Janeiro, 2006.

____. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio e Janeiro, 1998.

____. **NBR 5.738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio e Janeiro, 2008.

____. **NBR 5.739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio e Janeiro, 2007.

CARDOSO, A. C. F.; GALATTO, S. L.; GUADAGNIN, M. R. **Estimativa de geração de resíduos da construção civil e estudo de viabilidade de usina de triagem e reciclagem.** Revista Brasileira de Ciências Ambientais, Nº 31, p. 01 – 10, 2014.

CARNEIRO, A. P.; CASSA, J. C.; QUADROS, B. E.; COSTA, D. B.; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. P. V. **Caracterização do entulho de Salvador visando a produção de agregado reciclado.** Grupo de Estudos em Materiais de Construção. Universidade Federal da Bahia, UFBA. Salvador, 2000.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.** Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE **Resolução 307.** Brasília, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em: 2017.

____. **Resolução 348.** Brasília, 2004. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em: 2017.

____. **Resolução 431.** Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em: 2017.

____. **Resolução 448.** Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em: 2017.

____. **Resolução 469.** Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em: 2017.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto: Estudo dos elementos e métodos de dimensionamento.** Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Rio de Janeiro, 2003.

FERNANDES, M. C. **Influência da retificação de superfícies de corpos de prova na variabilidade da resistência à compressão no controle tecnológico do concreto.** Trabalho de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, 2011.

FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L.; INO, A. **Fabricação de pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de recauchutagem de pneus.** XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, ENTAC. Florianópolis, 2006.

HELENE, P. R. L., TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1 ed., São Paulo: Pini, 1992.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese de Livre Docência. Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2000.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, 2001.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Doutorado em Engenharia. Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 1999.

PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. L. R. **Manejo e gestão de resíduos da construção civil: como implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios**. v. 1. 196 p. Brasília: Caixa, 2005.

PORTLAND, Associação Brasileira de Cimento. **Manual técnico para implementação - Habitação 1.0**. Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, São Paulo, 2002. 88p.

____. **Manual de pavimento intertravado: Passeio público**. Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, São Paulo, 2010. 36p.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. Mestrado em Geotecnia. Universidade de São Paulo, USP. São Carlos, 2007.

SCHNEIDER, D. M. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo**. Mestrado em Saúde Pública. Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2003.

SILVA, B. C.; QUEIROZ, J. I. R.; CRUZ, D. C.; HOPPE FILHO, J. **Concreto com incorporação de resíduo de construção e demolição (RCD) destinado à pavimentação**. Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2014, IBRACON. Natal, 2014.

SIMIÉLI, D.; MIZUMOTO, C.; SEGANTINI, A. A. S.; SALLES, F. M. **Utilização de agregados reciclados em pavimentos intertravados**. Revista Exacta, São Paulo, vol. 5, Nº. 2, p. 231-241, 2007.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas, UFAL. Maceió, 2007.

ZEGA, C. J.; DI MAIO, A. A. **Recycled concretes made with waste ready-mix concrete as coarse aggregate**. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol 23, Nº 3, p 281– 286, 2011.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto.** Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Campinas, 1997.