

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS  
RECICLADOS DE RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO NAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DO CONCRETO**

**LEONARDO COSTA E SILVA  
LUDMYLLA PIRES FELIX  
THIAGO MARTINS DOS SANTOS**

GOIÂNIA  
2014

LEONARDO COSTA E SILVA  
LUDMYLLA PIRES FELIX  
THIAGO MARTINS DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS  
RECICLADOS DE RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO NAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DO CONCRETO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Dr. Daniel de Lima Araújo

GOIÂNIA  
2014  
LEONARDO COSTA E SILVA

LUDMYLLA PIRES FELIX  
THIAGO MARTINS DOS SANTOS

INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO  
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de  
Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás como  
requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Aprovada em \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_.

---

Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo (Orientador)  
Universidade Federal de Goiás

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Helena Carasek Cascudo  
Universidade Federal de Goiás

---

Prof. Dr. Oswaldo Cascudo Matos  
Universidade Federal de Goiás

Atesto que as revisões solicitadas foram feitas:

---

Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo (Orientador)

Em: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, a Deus pela força e conhecimento a nós concedido.

Todos nossos familiares e amigos que nos apoiaram e encorajaram de alguma maneira, e principalmente, aos nossos pais que acreditaram em nosso futuro.

À empresa RNV Resíduos pela doação dos agregados reciclados utilizados na pesquisa, à empresa Mold – Estruturas Pré-moldadas pela doação do aditivo utilizado e à empresa EBM Incorporação S.A. pela doação dos cimentos utilizados.

À toda equipe de técnicos do LABITECC que nos auxiliaram na realização dos ensaios para este trabalho, em especial à Danielle, Valdivino e Victor.

Ao professor Dr. Daniel de Lima Araújo, pelo tempo e atenção dedicados na orientação deste trabalho, esclarecendo sobre os conceitos, trazendo ideias e experiências, demonstrando ser um grande profissional experiente na área.

## RESUMO

É notório o desperdício de materiais na construção civil, o que resulta na geração de resíduos de construção. Com a normalização ambiental recente, não se pode mais descartar esses resíduos de forma indiscriminada, porém deve-se dar aos mesmos uma destinação final adequada ou, sempre que possível, buscar a sua reutilização. Em grande parte, o resíduo gerado na indústria da construção civil é formado por concreto e argamassa, denominados de resíduos “cinzas”. Assim, esse trabalho tem como objetivo analisar a substituição dos agregados graúdos naturais por agregados graúdos oriundos da reciclagem dos resíduos “cinzas” da construção. Para isso, são analisados traços de concreto contendo vários níveis de substituição (19%, 43%, 75%, 100%) do agregado natural pelo agregado reciclado, partindo-se de um traço de concreto estrutural com resistência média em torno de 40 MPa. É verificada a influência dos agregados reciclados nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido, com destaque para a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Os resultados mostram ser possível a substituição de até 100% do agregado natural pelo agregado reciclado sem prejuízo da resistência mecânica do concreto e com redução de até 12% no módulo de elasticidade, o que indica que o mesmo pode ser utilizado na produção de concretos com fins estruturais.

**Palavras-chave:** Concreto estrutural; Agregados reciclados; Resíduos de construção.

# SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>3</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>4</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS .....	12
1.2 PESQUISAS SOBRE CONCRETO ESTRUTURAL COM AGREGADO RECICLADO.....	13
<b>2. PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>17</b>
2.1 MATERIAIS .....	17
2.1.1 Propriedades dos agregados reciclados .....	17
2.1.2 Caracterização dos agregados .....	19
2.2 MÉTODOS .....	30
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>31</b>
3.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	32
3.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	34
<b>4. CONCLUSÃO</b> .....	<b>38</b>
<b>5. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>40</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aspecto visual do agregado reciclado.....	18
Figura 2 - Equipamento abrasão "los angeles".....	19
Figura 3 - Curva granulométrica – areia natural.....	21
Figura 4 - Curva granulométrica - brita 0.....	21
Figura 5 - Curva granulométrica – brita 1 .....	22
Figura 6 - Curva granulométrica – agregado reciclado .....	22
Figura 7 - Curva granulométrica – composição para o traço c-0. Nbr 7211 (abnt, 2009).....	23
Figura 8 - Curva granulométrica – composição para o traço c-19. Nbr 7211 (abnt, 2009).....	25
Figura 9 - Curva granulométrica – composição para o traço c-43. Nbr 7211 (abnt, 2009).....	26
Figura 10 - Curva granulométrica – composição para o traço c-75. Nbr 7211 (abnt, 2009)....	26
Figura 11 - Curva granulométrica – composição para o traço c-100. Nbr 7211 (abnt, 2009)..	27
Figura 12 - Curva granulométrica do agregado reciclado tratado (parcela retida na peneira 2,36 mm). Nbr 7211 (abnt, 2009).....	28
Figura 13 – Curva granulométrica do resíduo passante na peneira 2,36 mm do agregado reciclado tratado. Nbr 7211 (abnt, 2009). .....	29
Figura 14 - Curva granulométrica – composição para o traço ct-26. Nbr 7211 (abnt, 2009). .	29
Figura 15 – Ensaio de caracterização do concreto no estado endurecido: (a) resistência à compressão; (b) resistência à tração por compressão diametral; (c) módulo de elasticidade estático.....	31
Figura 16 – Massa específica, teor de ar e teor de aditivo nos traços. ....	32
Figura 17 – Aspecto dos corpos de prova após o ensaio de compressão diametral. ....	35
Figura 18 – Diagramas de caixa: a) resistência à compressão; b) resistência à tração por compressão diametral; c) módulo de elasticidade.....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição granulométrica dos agregados .....	20
Tabela 2 - Propriedades físicas dos agregados .....	20
Tabela 3 - Traço para confecção de um metro cúbico de concreto. ....	24
Tabela 4 - Propriedades do concreto no estado fresco .....	32
Tabela 5 - Propriedades do concreto no estado endurecido .....	34



## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

RCC - Resíduos da Construção Civil

RCD- Resíduos de Construção e Demolição

UFG - Universidade Federal de Goiás

# 1. INTRODUÇÃO

O ambiente da construção civil, principalmente no Brasil, está relacionado ao desperdício de materiais, muitas vezes devido à falta de medidas de reaproveitamento de resíduos. Estudos demonstram que 40% a 70% da massa dos resíduos urbanos são gerados em canteiros de obras (PINTO, 1999; BLUMENSCHHEIN, 2007). O custo e a falta de locais adequados para descarte desses materiais são fatores que deveriam despertar interesse nas empresas em promover e patrocinar pesquisas em reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD).

A destinação inadequada dos resíduos oriundos do processo construtivo gera problemas como o esgotamento de aterros sanitários (esses resíduos chegam a mais de 50% do volume de resíduos depositados em aterros), a obstrução do sistema de drenagem urbana e a proliferação de insetos e roedores. Provoca, ainda, a contaminação de águas subterrâneas pela penetração no solo de metais de alta toxicidade e o desperdício de materiais recicláveis, com consequente prejuízo aos municípios e à saúde pública (BLUMENSCHHEIN, 2007).

Uma das políticas nacionais desenvolvidas para o gerenciamento de resíduos sólidos foi a publicação da Resolução n° 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), na qual os resíduos gerados pela construção civil são classificados em quatro diferentes classes:

Classe A – resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados (por exemplo, tijolo, concreto, etc.);

Classe B – resíduos reutilizáveis ou recicláveis para outras indústrias (por exemplo, plástico, papel, gesso, etc.);

Classe C – resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias viáveis que permitam sua reciclagem;

Classe D – resíduos perigosos (por exemplo, tintas, solventes, etc.), ou contaminados (por exemplo, provenientes de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros).

Em 2012, instituiu-se, por meio da Resolução nº 448 do CONAMA, a responsabilidade ambiental que os geradores de resíduos terão de arcar, tratando da redução na geração e ampliação da reutilização, reciclagem e tratamento e disposição dos rejeitos finais (CONAMA, 2012).

No Brasil e no mundo, de uma forma geral, tem crescido o número de pesquisas com finalidade de propor soluções para o problema de geração de resíduos na construção (BLUMENSCHHEIN, 2004). A tendência atual é que o impacto produzido pelas edificações sobre o meio ambiente seja o menor possível e que haja uma maior preocupação com a sustentabilidade do desenvolvimento. Essa sustentabilidade sugere uma escolha mais dedicada do tipo de material que será utilizado na construção, gerando reduções em custos e desperdícios em consonância com questões sociais e ambientais (REZENDE *et al.*, 2012).

Nesse sentido, muitas empresas optam pela utilização de peças pré-moldadas por atender uma das necessidades prioritárias da construção civil, que é o tempo, e, ainda, reduzir a geração de resíduos, pois o emprego de peças pré-fabricadas para execução da estrutura elimina a necessidade de fôrmas e escoramento, entre outros materiais, que geram resíduos. Entretanto, nesse sistema construtivo também se deve considerar a necessidade de cumprimento das legislações ambientais referentes ao gerenciamento dos resíduos, em especial nas indústrias de estruturas pré-moldadas. Esses resíduos são nobres e possuem um grande potencial de serem reutilizados nas próprias indústrias, desde que de maneira correta.

A reciclagem dos Resíduos da Construção Civil (RCC) é de fundamental importância ambiental, no sentido de que os referidos resíduos retornem como substituição a novas matérias-primas que seriam extraídas do meio ambiente. Entretanto, ainda é vista de maneira negativa pela construção civil as iniciativas que se referem à pesquisa de novas tecnologias que aparentemente não se traduzem em grandes vantagens financeiras, não havendo grande mobilização do setor (LIMA; LIMA, 2009).

Os resíduos que se enquadram na classe A e B, de acordo com a classificação do CONAMA, são resíduos com possibilidades de serem absorvidos por processos de reciclagem. Os resíduos classe B, ou seja, papel, papelão, metal, plástico, gesso, entre outros, podem ser absorvidos por processos de reciclagem por indústrias externas ao setor da construção civil. Já os resíduos classe A (que se apresentam em maior quantidade) podem ser absorvidos pela cadeia

principal da construção civil. Estes, uma vez reciclados, podem ser utilizados, por exemplo, na execução de bases e sub-bases de pavimentação, na confecção de blocos para vedação, entre outros (BLUMENSCHNEIN, 2007).

Tanto no Brasil como em outros países, a maior parte do mercado de agregados é voltada para o emprego em concretos e em argamassas. No Brasil, a reciclagem de toda a fração mineral dos resíduos de construção e demolição (RCD) como agregado ocuparia apenas cerca de 20% do mercado de produtos à base de cimento. Já é sabido que o emprego dos agregados de RCD reciclados em concreto é viável, no entanto, as normas para uso de agregados de RCD reciclados em concretos não são facilmente aplicáveis nas usinas de reciclagem devido a: a) heterogeneidade da composição do RCD e variabilidade das propriedades dos agregados reciclados; b) falta de controle das operações de processamento; c) quantificação de fases no material por análise visual, que é subjetiva, não garantindo homogeneidade do produto final e não apresentando uma relação clara com o desempenho dos concretos (ANGULO, 2005). Por essa razão, as normas nacionais permitem o uso dos agregados reciclados apenas em concretos de baixa resistência e responsabilidade.

Sendo assim, o objetivo dessa pesquisa é verificar a influência sobre as propriedades mecânicas do concreto da substituição dos agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados oriundos de resíduos de construção e demolição. Mais especificamente, procura-se determinar o teor ideal de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de forma a não haver redução significativa da resistência, partindo de um concreto estrutural com resistência à compressão média em torno de 40 MPa. Além disso, procura-se verificar a influência do agregado reciclado no módulo de elasticidade do concreto. De forma secundária, procura-se analisar a influência do agregado reciclado na trabalhabilidade do concreto no estado fresco. Ao final, é proposto um tratamento mecânico do agregado reciclado de modo a se obter um agregado graúdo de melhor qualidade e, assim, minimizar a influência do mesmo nas propriedades do concreto.

## **1.1 CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS**

São necessários procedimentos sistematizados para a produção de agregados reciclados e sua utilização na construção civil. Existem características físicas e químicas comuns

aos diferentes tipos de agregados reciclados aplicáveis em argamassas e concreto e a partir da identificação de algumas dessas características, e da fixação de valores e limites para cada uma delas, é possível garantir a qualidade nas aplicações (LIMA, 1999).

Para a caracterização dos agregados reciclados, alguns métodos podem ser utilizados, tais como a análise granulométrica, a análise química, a análise mineralógica, a análise termogravimétrica, a separação por densidade empregando líquidos densos e a determinação da massa específica aparente e da absorção de água dos agregados (ANGULO, 2005). Dentre essas propriedades, as que mais apresentam influência na resistência do concreto são a massa específica e a absorção de água.

Alguns resultados da literatura mostram que a separação por densidade é uma técnica eficiente para separar os agregados reciclados em subgrupos de diferentes porosidades, gerando concretos com comportamento mecânico e absorção de água similar. Esses resultados indicam uma densidade de corte em torno de 2,2 a 2,3 kg/dm<sup>3</sup>. A partir desse limite, os agregados reciclados possuem teores elevados de rochas e teores baixos de cerâmica vermelha, resultando em concretos com comportamento mecânico semelhante ao dos concretos com agregados naturais (ANGULO, 2005).

Outra forma de se obter agregados reciclados com valores de densidade acima de 2,3 kg/dm<sup>3</sup> foi proposto por Pepe *et al.* (2014). Nesse trabalho, os autores utilizaram um pequeno moinho de tambor rotativo, com velocidade de 60 rotações por minuto, no qual os agregados reciclados foram adicionados por tempos que variaram de 10 a 15 minutos. Nesse processo, a argamassa aderida aos agregados grãos naturais presentes nos agregados reciclados era retirada pelo choque entre os agregados reciclados. Com isso, ao final eram obtidos agregados grãos com morfologia e absorção próximas aos do agregado natural. Com essa metodologia, os autores realizaram a substituição total dos agregados naturais pelos agregados reciclados tratados e obtiveram concretos com resistência à compressão próxima de 30 MPa e com menos de 10% de redução de resistência quando comparado ao concreto com agregados naturais.

## **1.2 PESQUISAS SOBRE CONCRETO ESTRUTURAL COM AGREGADO RECICLADO**

Segundo Lima (1999), as características dos concretos com agregados reciclados

variam mais que as de concretos convencionais. Apesar disto, podem-se obter concretos com agregados reciclados adequados a diversos serviços de construção, inclusive alguns de responsabilidade estrutural. Isso é possível desde que se tomem cuidados com a produção do agregado e do novo concreto, tais como, a escolha do resíduo, a classificação e separação de contaminantes, o controle de qualidade, a adoção de procedimentos corretos de aplicação, a análise das condições de exposição, dentre outros.

Tenório (2007) avaliou algumas das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto produzido com agregados miúdos e graúdos reciclados de RCD para analisar a possibilidade de uso desses agregados em estruturas. Para isso, o autor concentrou-se no nível de porosidade e resistência do agregado graúdo reciclado, tomando como um dos parâmetros do estudo a massa específica do agregado reciclado. Foram produzidos quinze traços de concreto, variando a relação água/cimento (0,67 – 0,50 – 0,40) e a massa específica do agregado graúdo (2,08 e 2,27 kg/dm<sup>3</sup>). Ambos os agregados reciclados possuíam menor massa específica e maior absorção de água que o agregado natural, confirmando a presença de materiais mais porosos e menos densos nas suas composições. Em termos de propriedades mecânicas, os concretos reciclados apresentaram resistências à compressão inferiores às dos concretos convencionais em vários casos, sendo uma exceção os concretos com relação a/c igual a 0,67. Vale destacar que as resistências inferiores foram, ao mesmo tempo, próximas das dos concretos com agregados naturais e foram confirmadas na réplica do experimento. Os resultados encontrados afirmam que é possível o uso do agregado reciclado em aplicações estruturais, desde que observadas suas particularidades: sua menor resistência, maior deformabilidade e maior permeabilidade, as quais podem vir a serem fatores limitantes em alguns casos.

Com o intuito de ampliar os conhecimentos já existentes referentes aos materiais de construção reciclados, Carrijo (2005) analisou a influência da massa específica dos componentes dos RCC's no comportamento mecânico e nas propriedades físicas do concreto estrutural. Por meio da separação em diferentes faixas de densidade, o autor obteve agregados reciclados de comportamento mais homogêneo para poder possibilitar a utilização dos agregados em situações de maior controle. Para o estudo, a densidade foi considerada como o principal fator de diferenciação entre os agregados graúdos reciclados de RCD.

A separação por faixas de densidade se mostrou como um critério confiável de classificação e caracterização dos agregados para a fabricação de concretos. Quanto à viabilidade

do concreto estrutural com utilização de agregados provenientes de RCD, deve-se ponderar que para os concretos com agregados reciclados na faixa de densidade de 2,2 a 2,5 kg/dm<sup>3</sup>, em comparação ao concreto utilizando agregados naturais, não houve aumento significativo do consumo de cimento para se obter resistências semelhantes, tornando-se plenamente viáveis do ponto de vista ambiental. Já nos concretos com agregados reciclados com menores densidades, as relações consumo/resistência foram altas, tornando estes concretos economicamente menos vantajosos que os concretos tradicionais (CARRIJO, 2005).

Yang *et al.* (2008) realizaram experimentos em nove traços de concreto para avaliar a influência da substituição dos agregados naturais por agregados reciclados de RCD. Estes foram classificados em três diferentes tipos de acordo com sua massa específica e absorção de água: 1) agregado graúdo reciclado com massa específica de 2,53 kg/dm<sup>3</sup> e absorção de água de 1,9%; 2) agregado graúdo reciclado com massa específica de 2,40 kg/dm<sup>3</sup> e absorção de água de 3,2%; 3) agregado miúdo reciclado com massa específica de 2,36 kg/dm<sup>3</sup> e absorção de água de 5,4%. Os níveis de substituição de ambos os agregados reciclados, graúdo e miúdo, foram 30%, 50% e 100%. Para o concreto fresco foram determinados o abatimento e a exsudação.

Yang *et al.* (2008) chegaram a várias conclusões, sendo as mais importantes:

- O abatimento do concreto com agregados reciclados foi ligeiramente afetado pela maior absorção de água dos agregados, sendo tanto menor quanto maior a absorção do agregado;
- A quantidade total de água e a taxa de exsudação do concreto fresco decresceram com o aumento da absorção de água dos agregados reciclados;
- A resistência à compressão do concreto com agregados graúdos reciclados com baixa absorção foi similar ao do concreto de referência com agregados naturais, apresentando redução menor que 10%. No entanto, a resistência à compressão do concreto com agregados miúdos e graúdos de alta absorção, foi equivalente a 60% e 80% da resistência do concreto de referência com agregados naturais nas idades iniciais de 1 a 3 dias. Já aos 28 dias, o concreto com 100% de agregados reciclados apresentou uma redução de até 32% na resistência quando comparado ao concreto de referência;
- A resistência à tração e o módulo de elasticidade do concreto com agregados reciclados também diminuíram com o aumento da absorção de água dos agregados.

Kang *et al.* (2014) testaram 28 vigas de concreto armado à flexão, com resistência à compressão do concreto variando de 27 MPa a 54 MPa. A taxa de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados variou de 15% a 50%, sendo que estes possuíam uma massa específica semelhante a do agregado natural. Os autores observaram uma redução de até 25% na resistência à compressão do concreto e de 19% na resistência à tração indireta com a substituição de 30% ou 50% dos agregados naturais pelos agregados reciclados. Além disso, eles observaram uma redução da ductilidade das vigas com agregados reciclados, porém não observaram redução do momento resistente da viga. Com isso, os autores sugeriram limitar em 30% a taxa de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados.



## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este item apresenta o programa experimental desenvolvido, bem como as propriedades dos materiais empregados na pesquisa e os métodos utilizados para a caracterização do concreto. A principal variável da pesquisa foi o teor de substituição do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado, tendo sido adotados os teores de 19%, 43%, 75% e 100% de substituição. Além disso, é analisado um método alternativo para tratamento do agregado reciclado, buscando-se obter um agregado graúdo com maior massa específica. Neste caso, foi adotado apenas o teor de 26% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado tratado. Foi analisada a influência do teor de substituição dos agregados nas propriedades do concreto no estado fresco (massa específica e o teor de ar) e no estado endurecido (resistências à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade).

### 2.1 MATERIAIS

Na confecção dos corpos de prova de concreto foram utilizados: Cimento Portland CIPLAN CP-II Z 32. Os agregados naturais foram obtidos na região e os agregados reciclados foram preparados e fornecidos já triturados, a partir de resíduos de construção e demolição que se enquadram na Classe A da resolução 307 do CONAMA (2002), por uma empresa da região.

A água utilizada na dosagem era limpa e captada da rede pública. Foi utilizado o aditivo superplastificante Viscocrete Precast<sup>®</sup> da Sika para melhorar a trabalhabilidade da mistura. Trata-se de uma solução aquosa de policarboxilatos modificados com densidade de 1,09 ± 0,02 kg/L e pH de 4,5 ± 1,0 (SIKA, 2014).

#### 2.1.1 Propriedades dos agregados reciclados

Os agregados reciclados fornecidos tinham como origem o resíduo de concretos e argamassas de construção e demolição, também denominado resíduo “cinza”. Da inspeção visual dos mesmos, foi observada a presença de alguns agregados graúdos envolvidos por restos de concreto, argamassas e um pouco de fino. Da caracterização granulométrica desse agregado, observou-se que a parcela, em massa, que passou pela peneira com abertura de 2,36 mm foi de apenas 4%. Dessa forma, visando melhorar a trabalhabilidade do concreto, o agregado reciclado

foi previamente peneirado, descartando os finos. Apenas a parte retida na peneira de 2,36 mm foi utilizada na caracterização dos agregados e na confecção do concreto.

A seleção criteriosa da origem do resíduo de construção pela indústria, aliada a esse procedimento, permitiu um agregado reciclado de boa qualidade. Visualmente, foram observados poucos resíduos de cerâmica (Figura 1), o que foi comprovado pela massa específica real do agregado. Este apresentou um valor acima do limite recomendado de  $2,2 \text{ kg/dm}^3$  e muito próximo da massa específica real dos agregados naturais. Por outro lado, os agregados reciclados apresentaram uma absorção maior que a dos agregados naturais, chegando a quase 7% de absorção (Tabela 2).

Figura 1 – Aspecto visual do agregado reciclado.



Foi realizado um tratamento mecânico nos agregados reciclados em busca de recuperar os agregados naturais. Os resultados obtidos ao final do processo apresentaram um aumento da massa específica real, que foi praticamente igual à massa específica dos agregados naturais. Além disso, a absorção foi reduzida pela metade, alcançando um valor próximo de 3%, porém ainda acima da absorção do agregado natural. Isso mostra a eficiência do tratamento mecânico proposto no sentido de se obter um agregado reciclado de melhor qualidade.

O valor de absorção obtido após o tratamento foi semelhante ao encontrado por Pepe *et al.* (2014), porém com maior massa específica, o que pode ser devida à diferença de composição mineralógica entre os agregados. Isso demonstrando a eficiência do equipamento de

abrasão “Los Angeles” (Figura 2) como forma alternativa ao moinho de tombamento para a limpeza dos agregados reciclados.

Figura 2- Equipamento Abrasão "Los Angeles".



No caso do agregado reciclado aqui utilizado, a taxa de recuperação do agregado gráúdo foi de 53%, em massa. O restante do material obtido apresentou uma granulometria semelhante à da areia natural, com um pouco mais de finos, talvez podendo ser utilizada como uma areia artificial. Para isso, outros ensaios devem ser realizados para caracterizar as propriedades físicas e químicas desse resíduo.

### 2.1.2 Caracterização dos agregados

A composição granulométrica dos agregados naturais e dos agregados reciclados foi obtida conforme procedimento descrito na NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 1, da qual se conclui que o agregado reciclado, tal como recebido da indústria, pode ser classificado como Brita 1<sup>1</sup>. A massa específica e o índice de absorção de água dos agregados gráúdos foram obtidos pela NBR NM 53 (ABNT, 2009) e a massa específica do

---

<sup>1</sup> A NBR 7211 (2009) define os limites da composição granulométrica do agregado gráúdo em Zona granulométrica d/D, porém neste trabalho preferiu-se utilizar a nomenclatura antiga.

agregado miúdo foi determinada pela NBR 9776 (ABNT, 1987). Na Tabela 2 é apresentado o resumo das propriedades físicas dos agregados. Nas Figuras 3 a 6 são mostradas as curvas granulométricas obtidas para o agregado miúdo, para os agregados graúdos natural (Brita 0 e Brita 1) e para o agregado reciclado.

Tabela 1 – Composição granulométrica dos agregados

Peneiras	% massa retida acumulada					
	Areia Natural	Brita 0	Brita 1	Agregado reciclado	Ag. reciclado tratado	Resíduo Fino do ag. reciclado tratado
31,5	-	0%	0%	0%	0%	-
25	-	0%	0%	0%	0%	-
19	-	0%	1%	4%	0%	-
12,5	-	1%	91%	46%	13%	-
9,5	0%	38%	98%	71%	30%	0%
6,3	0%	74%	99%	89%	41%	0%
4,75	0%	88%	100%	92%	59%	0%
2,36	0%	97%	100%	96%	94%	0%
1,18	4%	-	-	-	-	10%
0,6	20%	-	-	-	-	32%
0,3	50%	-	-	-	-	49%
0,15	91%	-	-	-	-	67%

Tabela 2 - Propriedades físicas dos agregados

	Massa Específica Real (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Específica Aparente (kg/dm <sup>3</sup> )	Dimensão Máxima Característica (mm)	Módulo de Finura	Absorção de água (%)
Areia Natural	2,53	-	1,18	3,93	-
Brita 0	2,67	2,58	12,5	3,07	1,29
Brita 1	2,65	2,62	19,0	4,90	0,52
Agregado Reciclado	2,58	2,20	19,0	4,15	6,69
Agregado Reciclado Tratado	2,70	2,48	> 12,5	2,53	3,31

Figura 3 - Curva granulométrica – Areia natural

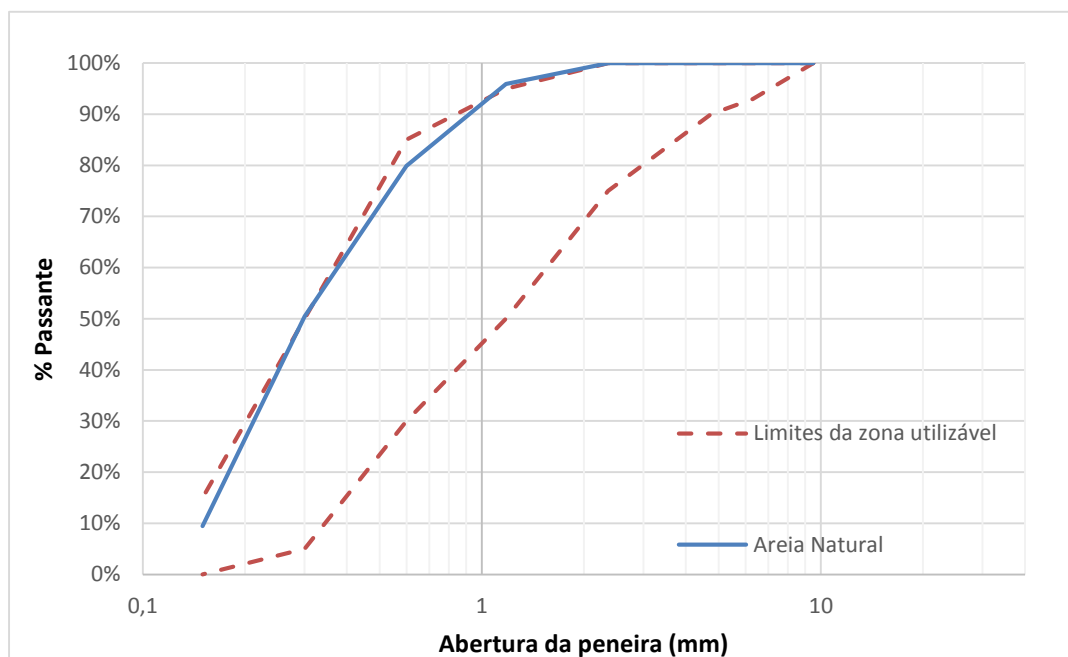


Figura 4 - Curva granulométrica - Brita 0

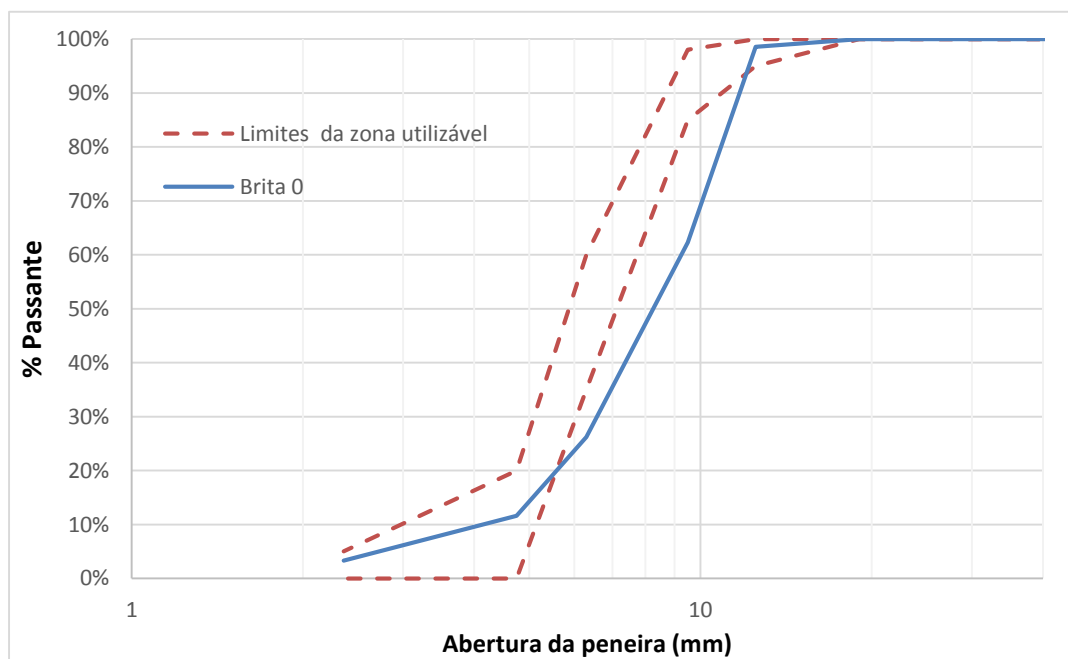


Figura 5 - Curva granulométrica – Brita 1

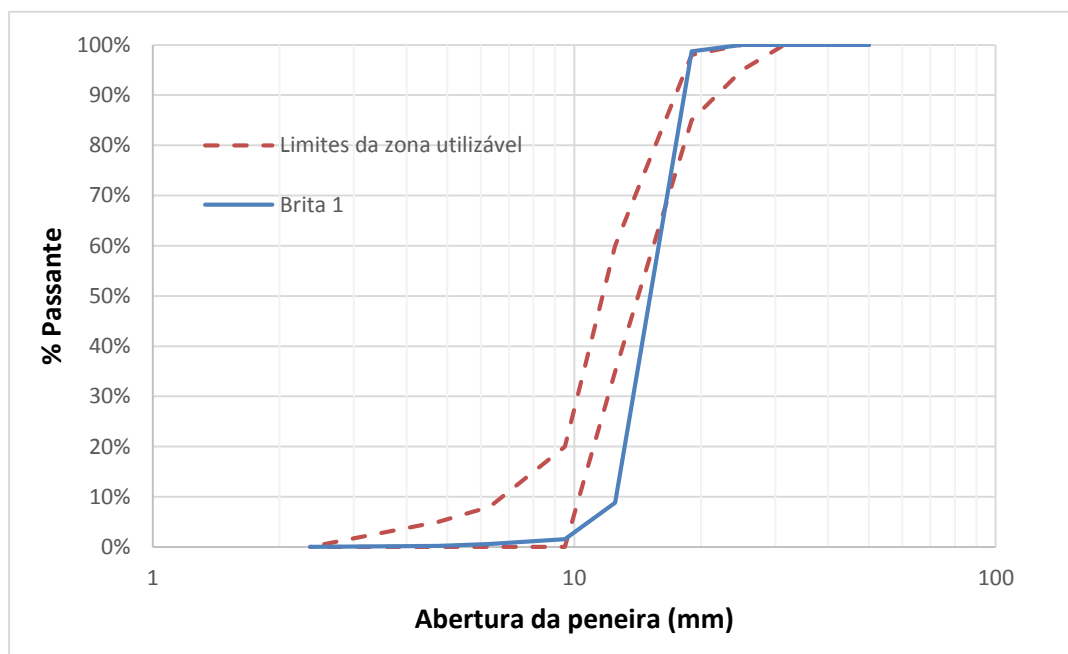
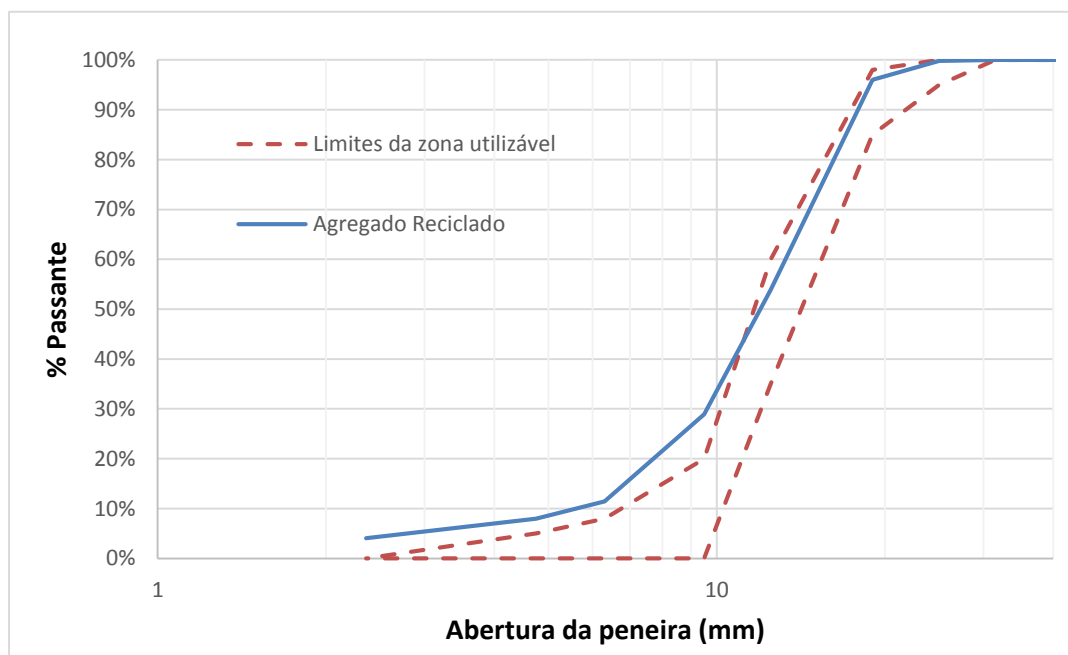
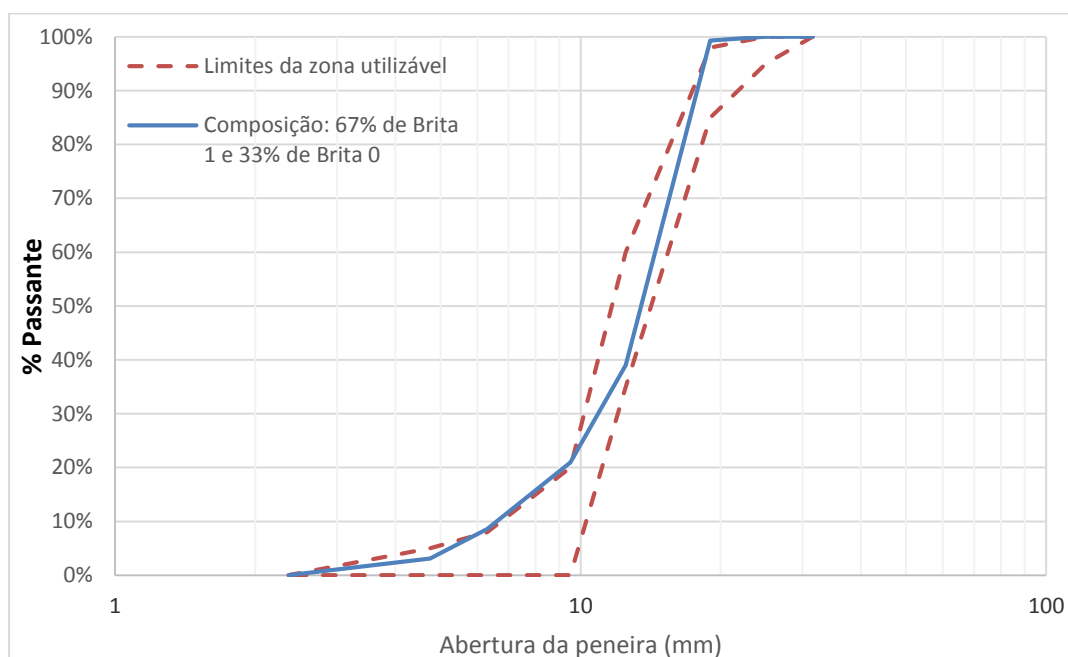


Figura 6 - Curva granulométrica – Agregado Reciclado



Nessas figuras também são mostrados os limites da zona utilizável para produção de concreto, recomendados pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Nota-se que as curvas obtidas para os agregados graúdos ficaram fora do intervalo padrão e que apenas a areia natural atendeu aos limites especificados da zona utilizável. Portanto, foi realizada a composição teórica dos agregados graúdos. Para isso, foi empregado um método baseado nos mínimos quadrados, isto é, a granulometria resultante da mistura apresentará variações com relação aos valores médios da faixa especificada, cuja soma dos quadrados dessas variações deve ser mínima (PETRUCCI, 1978). Foi, assim, obtida a curva granulométrica compensada para os agregados naturais e que está mostrada na Figura 7. Essa curva resulta da mistura de 67% de Brita 1 e 33% de Brita 0 e possui módulo de finura igual a 4,29.

Figura 7 - Curva granulométrica – Composição para o Traço C-0. NBR 7211 (ABNT, 2009).



O traço de referência com os agregados naturais (C-0) foi calculado a partir da metodologia clássica do ACI 211.1 (*Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy Weight, and Mass Concrete*) e relatada em Metha e Monteiro (2008). O método utilizado é composto por nove passos:

1. Escolha do abatimento, entre 80 mm e 100 mm;
2. Definição da dimensão máxima do agregado, que neste caso era igual a 19 mm;

3. Escolha do teor de água, igual a 216 kg/m<sup>3</sup>;
4. Definição da relação água/cimento, escolhida igual a 0,45 para se obter uma resistência à compressão média aos 28 dias de 40 MPa;
5. Cálculo do consumo de cimento;
6. Escolha do teor de agregado graúdo compactado seco, adotado igual a 60%;
7. Cálculo da quantidade de areia a partir da massa específica do concreto, adotada igual a 2345 kg/m<sup>3</sup>. De posse dessas informações, chega-se ao traço unitário 1: 1,44: 2,0: 0,45 (cimento : areia : agregado graúdo : água) ,em massa, que foi mantido constante no estudo;
8. Ajuste da quantidade de água em função da umidade dos agregados no laboratório. Esse ajuste se faz necessário porque o agregado miúdo foi utilizado com sua umidade natural. Dessa forma, a quantidade de água da mistura foi reduzida em função da quantidade de água presente no agregado miúdo por meio de secagem em estufa por 24 horas antes do início da concretagem. Os agregados graúdos (naturais e reciclados) foram utilizados secos ao ambiente. A caracterização inicial dos mesmos mostrou que o teor de umidade nos mesmos nessa condição era desprezível;
9. Ajuste do teor do aditivo superplastificante de modo a se obter o abatimento dentro de uma faixa especificada, aqui adotada como sendo 100 ± 20 mm.

Depois de realizado o ajuste experimental do traço, foi determinada a massa específica real do concreto no estado fresco. De posse dessa informação, foi realizado o ajuste final das quantidades de materiais de modo a se obter o traço por metro cúbico de concreto. O traço final de referência, em massa, é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Traço para confecção de um metro cúbico de concreto.

	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Areia Natural (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 1 (Kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado Reciclado (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )	Substituição (%)	Módulo de Finura
C-0	480,3	689,4	317,2	643,4	216,1	-	1,68	0	4,29
C-19	474,5	681,1	237,2	533,8	213,5	177,9	2,85	19	4,31
C-43	471,7	677,1	131,7	405,9	212,3	405,9	3,54	43	4,33
C-75	461,9	663,0	-	230,9	207,8	692,8	3,46	75	4,33
C-100	468,6	672,6	-	-	210,9	937,2	5,62	100	4,15
CT-26	476,5	684,0	-	704,9	214,4	248,2	1,91	26	4,29

Definido o traço de referência, foram calculados quatro traços com parte da Brita 1



natural substituída pelo agregado reciclado. Foram adotados os seguintes níveis de substituição, em massa: 25%, 50%, 75% e 100%. Porém, a composição granulométrica do agregado reciclado era diferente da Brita 1 natural. Dessa forma, optou-se por fazer a composição teórica da mistura agregado reciclado e Brita 1 com a Brita 0, de modo a se obter, aproximadamente, o mesmo módulo de finura dos agregados utilizado no traço de referência. Com isso, buscava-se manter a mesma trabalhabilidade do traço de referência nos traços com agregados reciclados. Desse cálculo, foram obtidas as porcentagens finais de substituição dos agregados naturais (Brita 1 mais Brita 0) pelo agregado reciclado e que estão mostradas na Tabela 3, bem como o módulo de finura de cada composição. Nas Figuras 8 a 11 são mostradas as curvas granulométricas da composição entre os agregados naturais e o agregado reciclado.

Figura 8 - Curva granulométrica – Composição para o Traço C-19. NBR 7211 (ABNT, 2009).

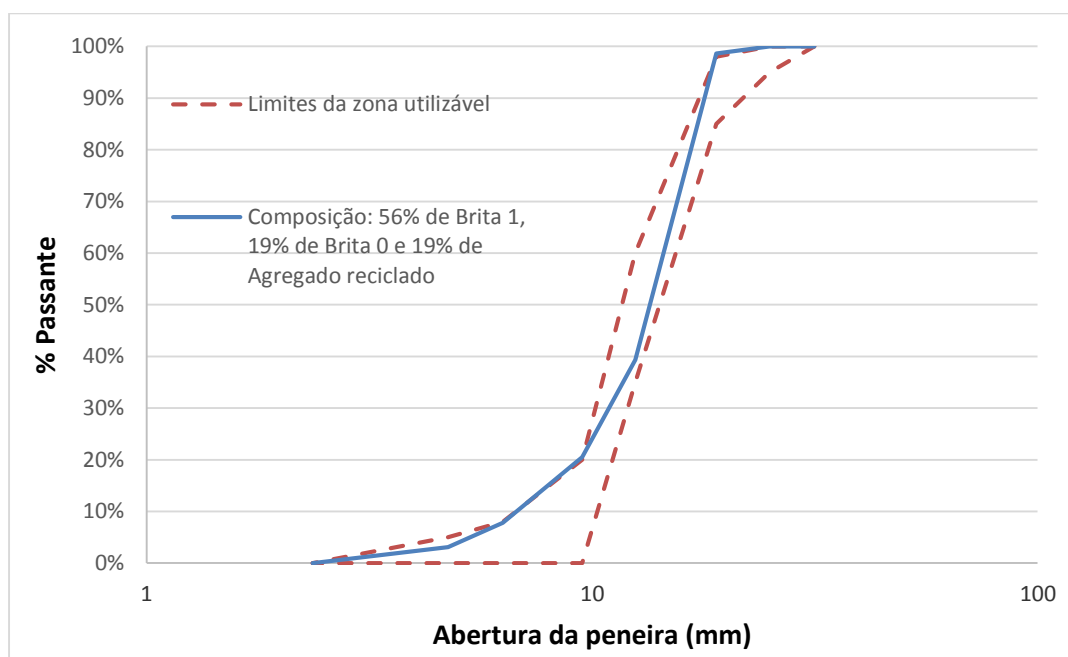


Figura 9 - Curva granulométrica – Composição para o Traço C-43. NBR 7211 (ABNT, 2009).

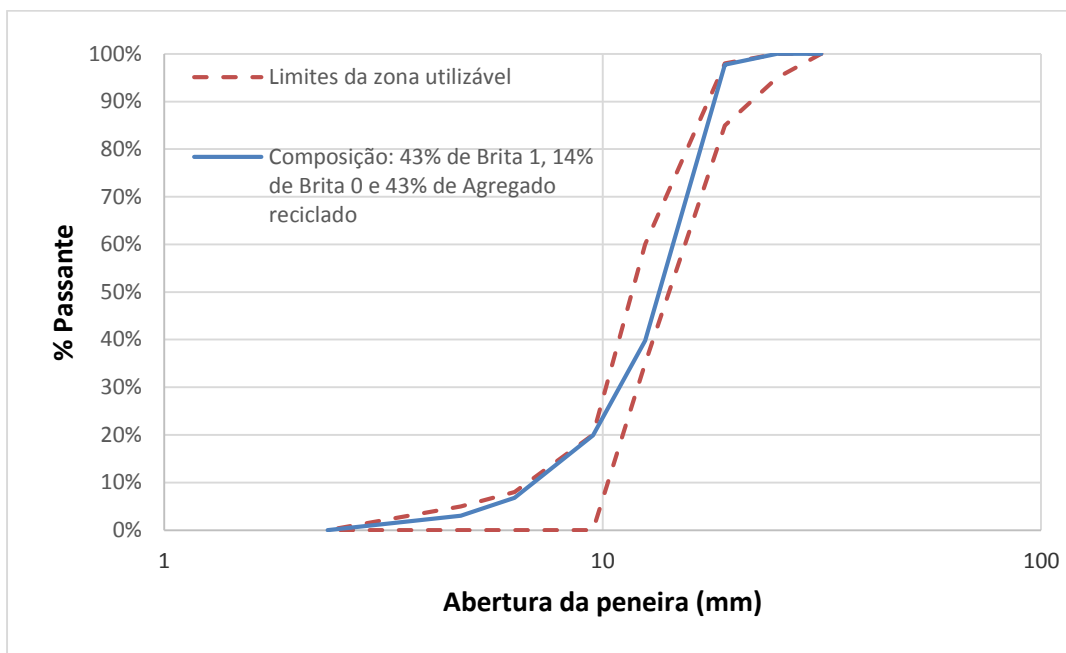


Figura 10 - Curva granulométrica – Composição para o Traço C-75. NBR 7211 (ABNT, 2009).

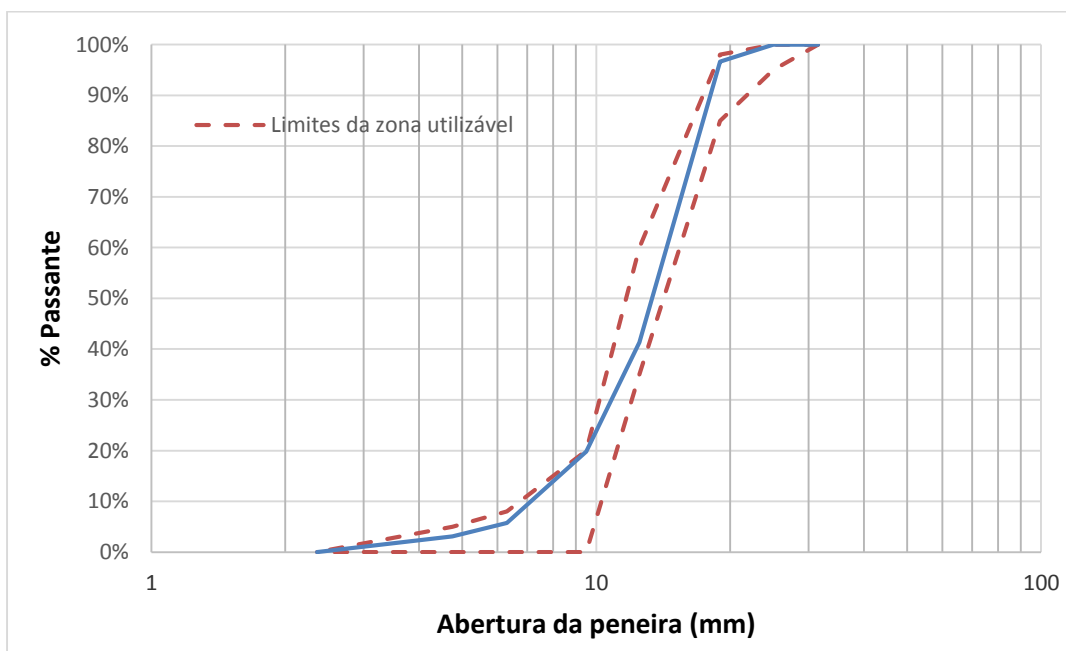
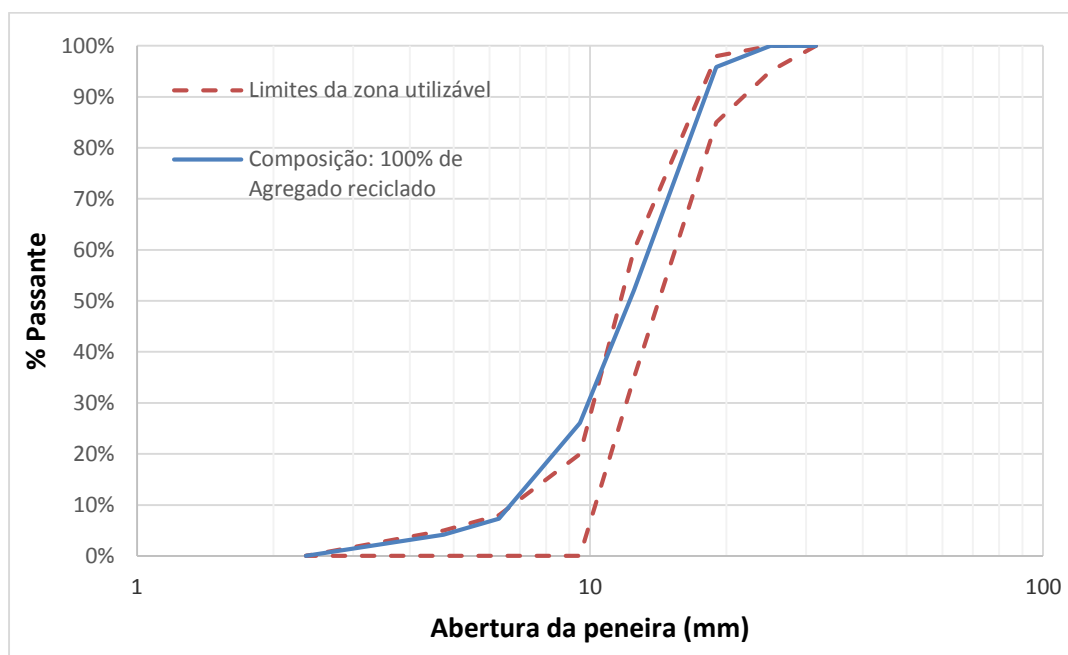


Figura 11 - Curva granulométrica – Composição para o Traço C-100. NBR 7211 (ABNT, 2009).



A quantidade de materiais nos traços com agregados reciclados também foi ajustada de modo a se obter um metro cúbico de concreto e está mostrada na Tabela 3. Esse ajuste foi realizado a partir da massa específica do concreto determinada no laboratório para cada um dos traços.

A Tabela 3 mostra um último traço com substituição parcial dos agregados naturais pelo agregado reciclado (Traço CT-26). Este traço se difere dos demais pelo agregado reciclado utilizado, o qual foi previamente tratado seguindo metodologia semelhante à sugerida por Pepe *et al.* (2014).

Com intuito de se obter agregados graúdos reciclados de maior qualidade foi utilizado o método de ensaio de abrasão de agregados graúdos utilizando a máquina “Los Angeles”, conforme NBR NM 51 (ABNT, 2001). Para este estudo, foram colocados na máquina, de cada vez, 5 kg de agregado reciclado com 11 esferas, sendo o ensaio realizado durante aproximadamente 18 minutos com 500 rotações. Após o ensaio, foi realizada a separação do material graúdo (isto é, que ficava retido na peneira 2,36 mm) do material fino. Em seguida, foi determinada a curva granulométrica desses dois materiais, que estão mostradas nas Figuras 12 e

13, respectivamente.

As curvas granulométricas mostraram que a parte graúda do agregado reciclado tratado possui dimensão máximo entre 12,5, caracterizando-o como uma Brita 0. Essa parte representou 53% da massa total do agregado reciclado. Já o resíduo fino apresentou uma curva granulométrica que pode caracterizá-lo como um agregado miúdo. Essa parte representou 47% da massa total do agregado reciclado.

Na Tabela 2 é mostrada a massa específica e a absorção obtida para a parte graúda do agregado reciclado. Já na Tabela 3 é mostrada a composição do traço de concreto com a parte graúda do agregado reciclado tratado. Neste caso, esse agregado foi composto com a Brita 1 natural de modo a se manter, aproximadamente, o mesmo módulo de finura dos agregados do traço de referência. Isso resultou na composição de 74% de Brita 1 natural e 26% de agregado reciclado tratado e na curva granulométrica mostrada na Figura 14.

Figura 12 - Curva granulométrica do agregado reciclado tratado (parcela retida na peneira 2,36 mm). NBR 7211 (ABNT, 2009).

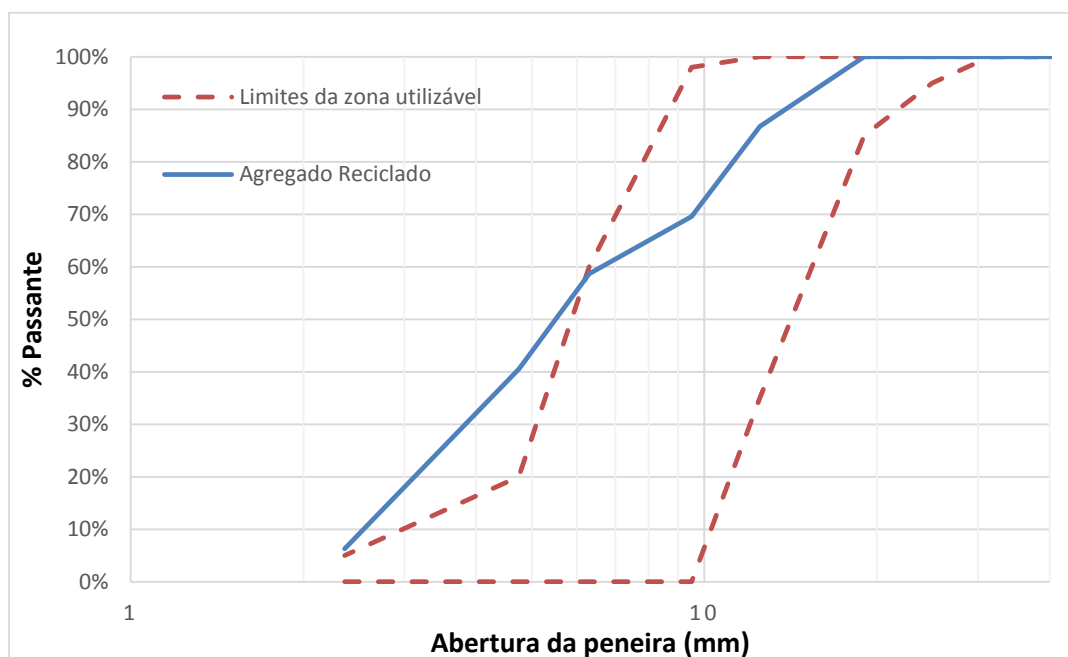


Figura 13 – Curva granulométrica do resíduo passante na peneira 2,36 mm do agregado reciclado tratado. NBR 7211 (ABNT, 2009).

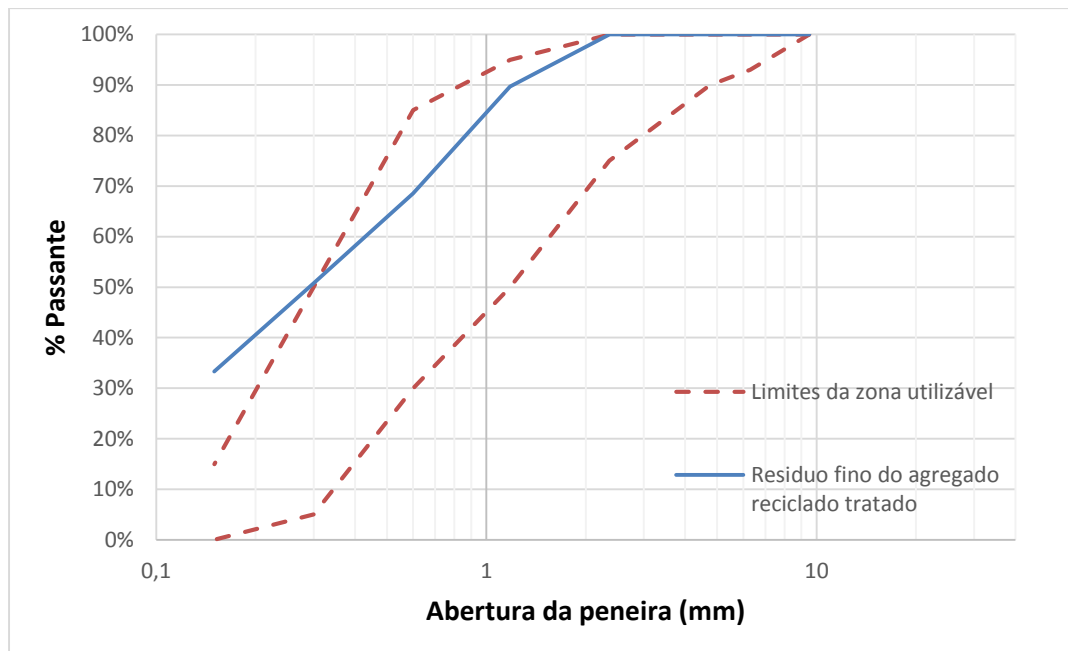
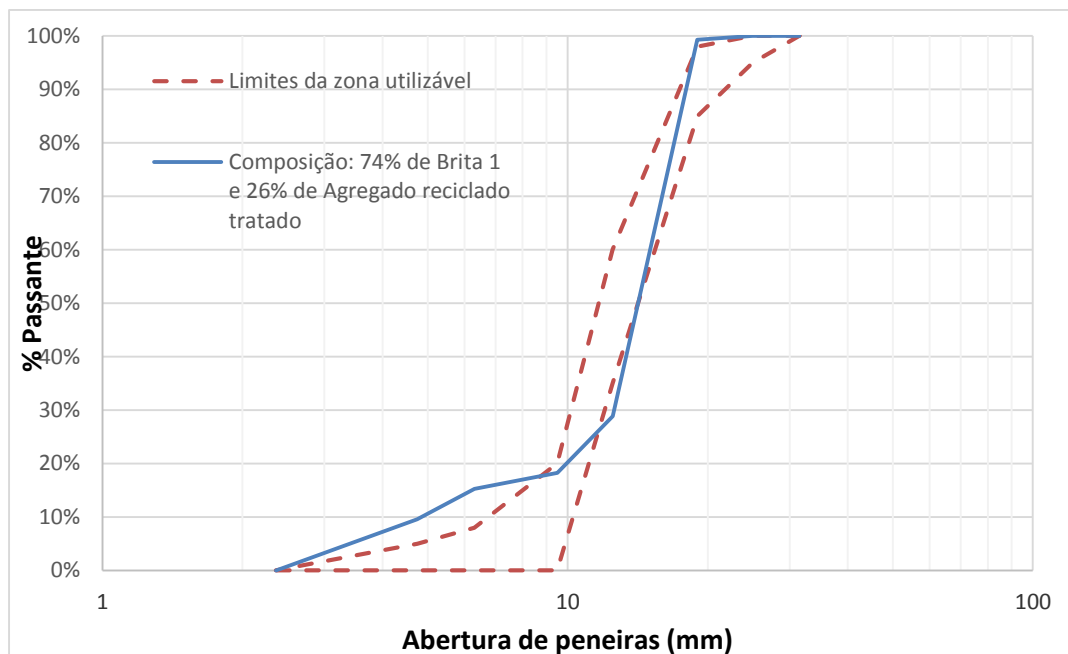


Figura 14 - Curva granulométrica – Composição para o Traço CT-26. NBR 7211 (ABNT, 2009).



## 2.2 MÉTODOS

Antes de cada concretagem, foi feita a imprimação da betoneira, simulando uma concretagem de 0,03 m<sup>3</sup>. A sequência de introdução dos materiais na betoneira foi:

1. Colocação do agregado graúdo e miúdo na betoneira com aproximadamente 50% da água de amassamento, misturando por um período de 1 minuto;
2. Adição do cimento e o restante da água e misturando por mais 1 minuto;
3. Adição do aditivo e misturando por mais 3 minutos;
4. A mistura permanece em descanso por três minutos. Findo este prazo, procede-se à mistura por mais três minutos.

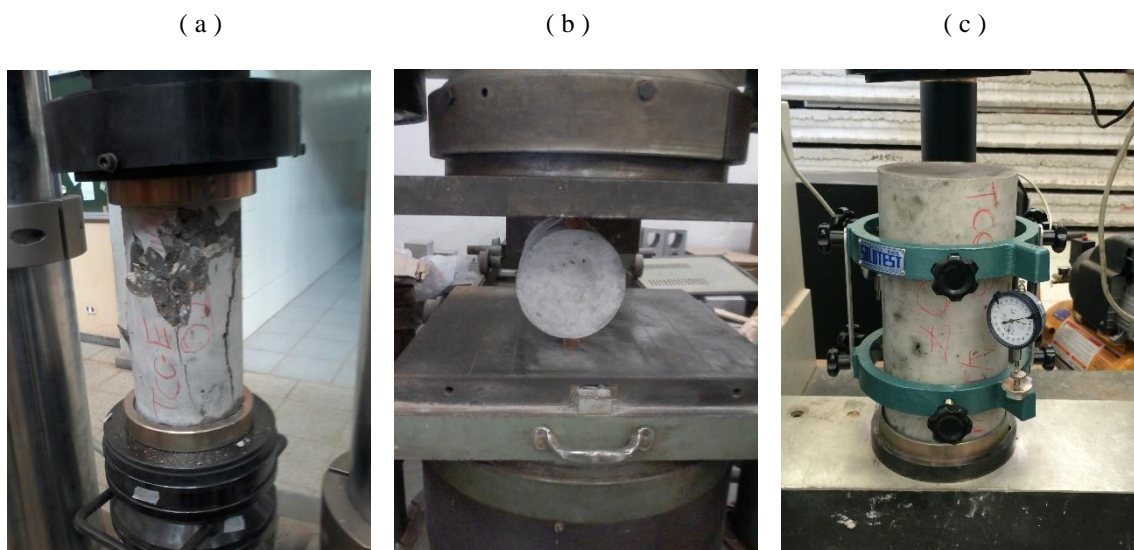
A moldagem dos corpos de prova para esse estudo foi realizada seguindo a norma ABNT NBR 5738 (ABNT, 2003).

Os corpos de prova foram desmoldados com 24 horas, aproximadamente, e mantidos sob cura em uma câmara úmida com temperatura de 20° C ± 2° C e umidade acima de 99%. Eles foram mantidos nessa condição até o momento do ensaio, quando foram retirados e secados superficialmente.

O concreto foi caracterizado em seu estado fresco e no estado endurecido. No estado fresco foram determinadas as seguintes propriedades: abatimento do tronco de cone, conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998); massa específica e teor de ar, conforme a NBR NM 47 (ABNT, 2002). No estado endurecido foram determinadas as seguintes propriedades: resistência à compressão aos 7 e 28 dias, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007); resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011); módulo de elasticidade estático aos 28 dias, conforme a NBR 8522 (ABNT, 2008), como ilustrado na figura 14.

Para determinação da resistência à compressão, foram ensaiados, para cada traço, seis corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, sendo três corpos de prova aos 7 dias e três corpos de prova aos 28 dias. Para nivelamento do corpo de prova foram utilizados dois pratos metálicos nas suas extremidades, com uma placa de neoprene intercalada entre os pratos e o corpo de prova, conforme recomendação da ASTM C1231 (ASTM, 2014). Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade estático, foram utilizados, para cada traço, três corpos de prova cilíndricos de 15 x 30 cm (Figura 15).

Figura 15 – Ensaio de caracterização do concreto no estado endurecido: (a) resistência à compressão; (b) resistência à tração por compressão diametral; (c) módulo de elasticidade estático.



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este item apresenta os detalhes dos resultados e algumas considerações feitas sobre

os mesmos.

### 3.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Em todas as dosagens, foi determinada a massa específica do concreto no estado fresco e o teor de ar da mistura, além de ser analisada a trabalhabilidade pelo abatimento do tronco de cone. Os resultados são mostrados na Tabela 4.

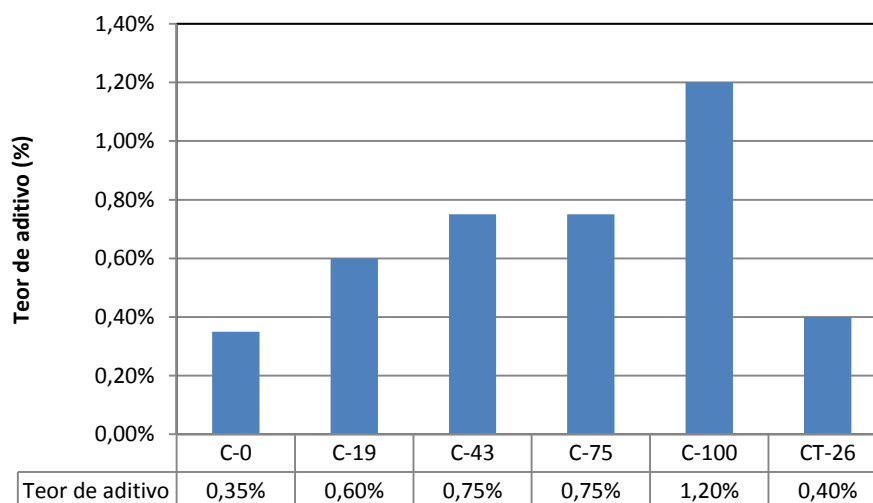
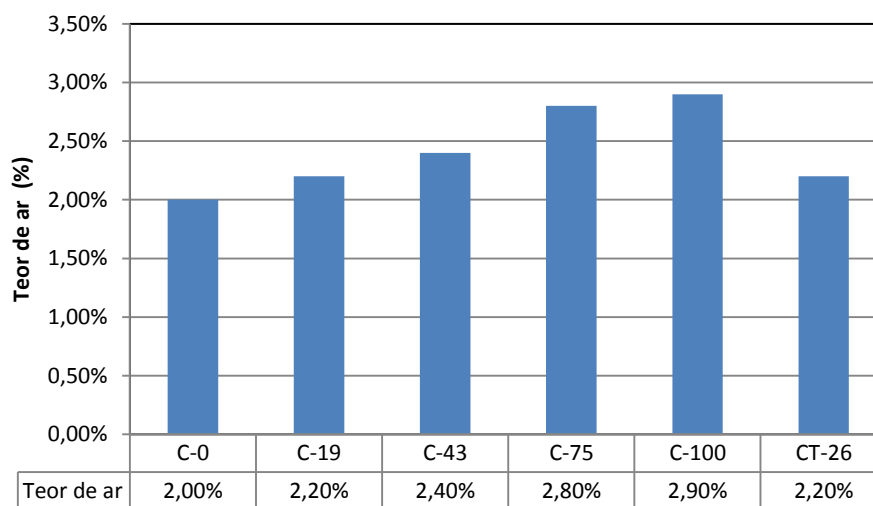
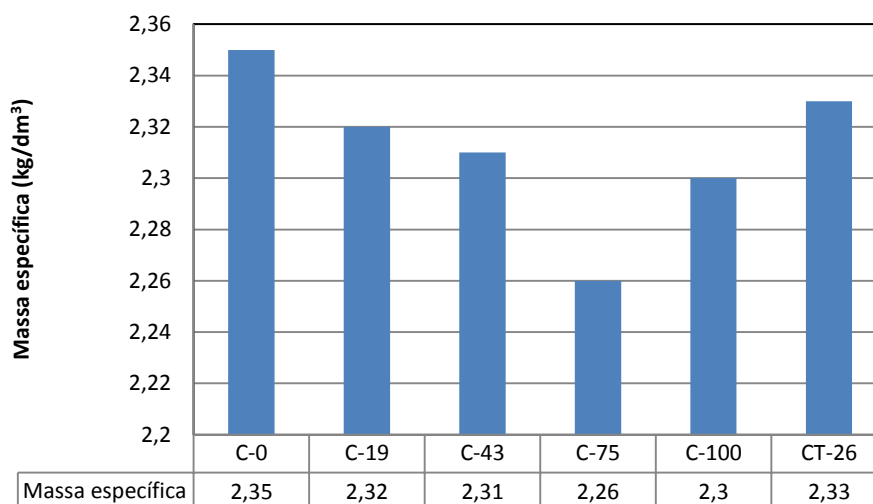
Tabela 4 - Propriedades do concreto no estado fresco

	Substituição (%)	Abatimento (mm)	Massa Específica do Concreto (kg/dm <sup>3</sup> )	Teor de ar (%)
C-0	0	100	2,35	2,0
C-19	19	85	2,32	2,2
C-43	43	95	2,31	2,4
C-75	75	215	2,26	2,8
C-100	100	70	2,30	2,9
CT-26	26	85	2,33	2,2

Observa-se que com exceção dos traços C-75 e C-100, em todos os demais o abatimento esteve dentro do limite estabelecido de  $100 \pm 20$  mm. Isso foi conseguido graças ao aumento do volume de aditivo superplastificante adicionado à mistura com o aumento do teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado. No traço de referência o volume de aditivo, em relação à massa de cimento, foi de 0,35%, enquanto no traço C-100, com 100% de substituição, esse volume chegou a 1,2% (Figura 16). Esse ajuste se torna necessário devido à maior absorção do agregado reciclado, que retira parte da água disponível durante a mistura do concreto, e ao fato de se desejar manter constante a relação água/cimento entre os traços analisados para comparação da resistência mecânica. Em nenhum dos traços foi observada exsudação do concreto, apesar do aumento do consumo do aditivo superplastificante.

Figura 16 – Massa específica, teor de ar e teor de aditivo nos traços.





A massa específica do concreto diminuiu com o aumento do teor de substituição,

apresentando redução de até 4% no seu valor (Figura 16). Isso se deve à menor massa específica do agregado reciclado quando comparado ao agregado natural e ao fato da substituição ter sido realizada em massa. Assim, houve um aumento do volume de agregados graúdos no traço com o aumento do teor de substituição. Conseqüentemente, isso resultou na diminuição, na mesma proporção, do consumo de cimento por metro cúbico.

O teor de ar da mistura aumentou com o teor de substituição, porém permaneceu abaixo de 3% (Figura 16). Novamente, isso se deve à maior porosidade dos agregados reciclados quando comparado com os agregados naturais.

O traço C-75 apresentou abatimento maior que os demais, sem uma explicação clara desse fenômeno. Conseqüentemente, ele apresentou menor massa específica, porém o teor de ar se manteve próximo ao obtido no traço com 100% de substituição.

Os traços C-19 e CT-26 apresentaram teor de substituição semelhante, porém no traço CT-26 foi utilizado o agregado reciclado tratado. Comparando as propriedades do concreto no estado fresco entre esses dois traços, observa-se comportamento semelhante, tanto do ponto de vista da massa específica quanto do abatimento e do teor de ar. A diferença entre eles está no consumo de aditivo, que no traço CT-26 foi de 0,4% e no traço C-19 foi de 0,6%. Esse menor consumo de aditivo se deve à menor absorção do agregado reciclado tratado, logo com maior quantidade de água disponível na mistura.

### **3.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO**

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de concreto nas dimensões de 10 cm x 20 cm, os quais foram ensaiados para determinação da resistência à compressão, e corpos de prova cilíndricos de concreto nas dimensões de 15 cm X 30 cm, que foram ensaiados para determinação da resistência a tração por compressão diametral e módulo de elasticidade estático. Os resultados estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades do concreto no Estado endurecido

	Substituição (%)	$f_{cm,j=7}$ (MPa)	$f_{cm,j=28}$ (MPa)	$f_{ctm,sp,j=28}$ (MPa)	$E_{c,j=28}$ (GPa)
C-0	0	26,95 ± 4,02	36,39 ± 1,56	3,88 ± 0,12	29,86 ± 1,00
C-19	19	33,97 ± 1,39	41,23 ± 0,59	3,95 ± 0,02	28,04 ± 0,06
C-43	43	32,79 ± 3,55	39,60 ± 1,98	3,63 ± 0,41	28,04 ± 0,56
C-75	75	29,34 ± 1,52	35,79 ± 0,48	3,66 ± 0,09	26,34 ± 0,91
C-100	100	28,77 ± 1,38	38,30 ± 1,07	3,60 ± 0,18	28,15 ± 0,88
CT-26	26	32,75 ± 1,70	37,82 ± 1,39	3,79 ± 0,05	27,83 ± 0,48

Analisando a resistência à compressão média aos 28 dias ( $f_{cm,j=28}$ ), observa-se da Tabela 5 que o traço de referência apresentou uma menor resistência. Com a substituição de 19% do agregado natural pelo agregado reciclado, observa-se um aumento médio de 13% na resistência à compressão quando comparado ao traço de referência. Esse aumento pode ser devido à redução da relação a/c (água e cimento), pois o agregado reciclado retém a água da mistura por ter uma maior absorção de água quando comparado ao agregado natural, e também por causa da liberação da água que fica retida no agregado graúdo reciclado durante o processo de cura do concreto. Com o aumento do teor de substituição para 75%, observa-se uma redução da resistência à compressão de apenas 13% quando comparado ao traço com 19% de substituição. Com 100% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, a resistência à compressão ainda foi, em média, maior que a do traço de referência. Esses resultados mostram, para o traço em estudo, que é possível realizar a substituição de até 100% do agregado natural pelo agregado reciclado e ainda assim obter um concreto estrutural e com resistência semelhante ao do concreto de referência. Isso se deve, em grande parte, à qualidade do agregado reciclado utilizado, que possuía poucos resíduos cerâmicos. Na Figura 17 é mostrada foto dos corpos de prova após o ensaio de compressão diametral, das quais se nota que praticamente não há resíduos cerâmicos nos corpos de prova. Além disso, é possível notar que mesmo no traço com 100% de agregados reciclados ainda se observa a presença de uma quantidade razoável de agregados graúdos.

É interessante notar da Tabela 5, que o traço CT-26, com o agregado reciclado tratado, apresentou, em média, uma resistência à compressão próxima a do traço de referência e menor que a dos traços com o agregado reciclado sem tratamento. Quando se comparam os traços C-19 e CT-26, com teor de substituição semelhante, essa redução chegou a 8%. Novamente, isso sugere a influência positiva da água que ficou retida nos agregados reciclados mais porosos.

A exceção a essa análise foi o traço C-75, que apresentou a menor resistência.

Figura 17 – Aspecto dos corpos de prova após o ensaio de compressão diametral.



Comportamento semelhante é observado quando se analisa a resistência à tração média por compressão diametral aos 28 dias ( $f_{ctm,sp,j=28}$ ). Neste caso, observa-se um aumento da resistência com a substituição de 19% do agregado natural, a qual diminuiu com o aumento do teor do agregado reciclado no traço. Apesar dessa redução, as diferenças entre os valores obtidos entre os traços são pequenas, indicando que o agregado reciclado não teve influência na resistência à tração do concreto.

Já quando se analisa o módulo de elasticidade estático aos 28 dias ( $E_{c,j=28}$ ), nota-se que o maior valor foi obtido para o traço de referência. Com a substituição de 100% dos agregados naturais pelos agregados reciclados, houve uma redução, em média, de apenas 6% do valor do módulo de elasticidade. Novamente, o menor valor foi observado para o traço C-75, porém com uma redução de apenas 12%. Esses resultados mostram, para o traço em estudo, que é possível realizar a substituição de até 100% do agregado natural pelo agregado reciclado sem reduções significativas do módulo de elasticidade do concreto. Isso se deve à qualidade do agregado reciclado utilizado, principalmente em relação ao teor de agregados naturais presentes no agregado reciclado, que neste caso era de 53%. Com isso, pode-se estimar que ainda houvesse uma quantidade suficiente de agregados graúdos que possibilitou um adequado módulo de elasticidade para o traço com o nível de resistência em estudo.

Quando se analisa o valor do módulo de elasticidade do traço CT-26, com o agregado

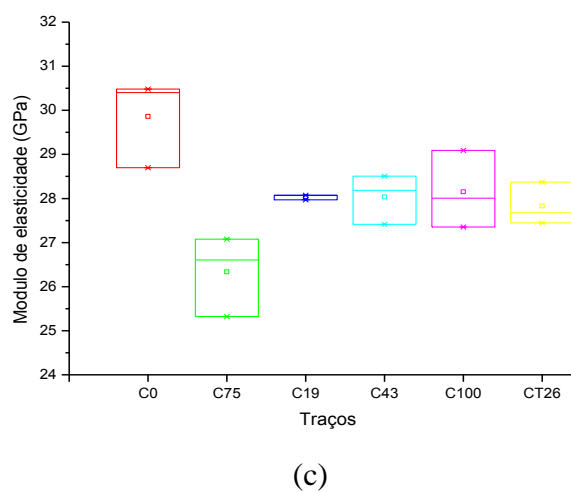
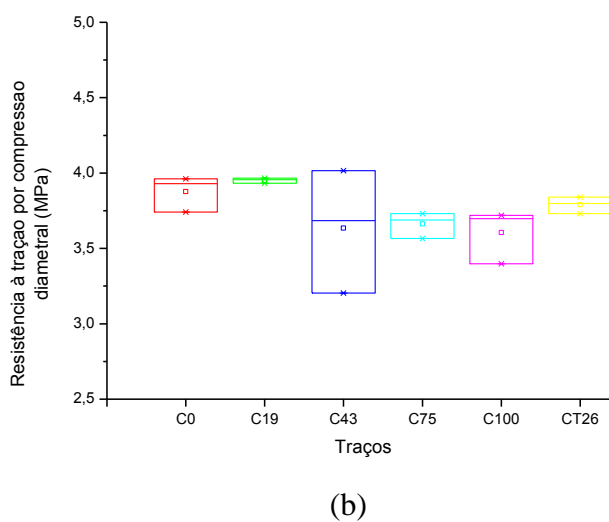
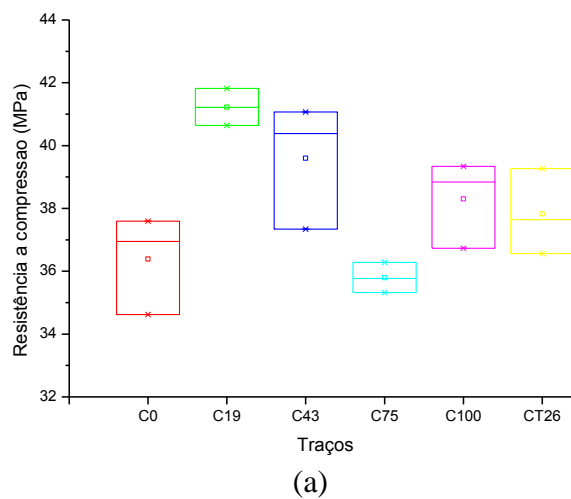
reciclado tratado, nota-se que ele apresentou um valor abaixo do módulo de elasticidade do traço de referência. Esperavam-se, neste caso, valores semelhantes, entretanto o desvio padrão do módulo de elasticidade do traço de referência apresentou-se alto. Por essa razão, para concluir se de fato o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado afetou as propriedades mecânicas do concreto, foi realizado um teste de comparações múltiplas de médias nos resultados da Tabela 4, utilizando o teste de Tukey com intervalo de confiança de 95%. Na Figura 18 são mostrados os resultados dessa análise.

Com relação ao módulo de elasticidade (Figura 18c), os resultados do teste de comparações múltiplas de médias, com o teste de Tukey, indicam a formação de três grupos distintos, isto é: traço C-0, traço C-75 e traços C-19, C-43, C-100 e CT-26. Isso comprova que de fato o módulo de elasticidade foi influenciado pela substituição do agregado natural pelo agregado reciclado. Entretanto, não é possível afirmar que o teor de substituição tenha influenciado o valor do módulo de elasticidade, sendo que apenas o traço C-75 se mostrou significativamente diferente dos demais traços com agregados reciclados. Já o traço CT-26, com o agregado reciclado tratado, tem a sua média estatisticamente no mesmo grupo dos traços com o agregado reciclado não tratado. Daí pode-se concluir que, neste trabalho, o tratamento do agregado reciclado não foi capaz de evitar a diminuição do módulo de elasticidade do traço de referência.

Analisando os resultados de resistência à compressão aos 28 dias (Figura 18a), o teste de comparação de médias indica que elas são estatisticamente diferentes, porém não se formam grupos claros. As diferenças significativas se devem aos traços C-19 e C-75 que apresentaram a maior e a menor resistência, respectivamente. Outros traços com agregados reciclados apresentaram média estatisticamente igual ao traço de referência (inclusive o traço C-75), de modo que se conclui que a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados não promoveu redução significativa da resistência à compressão.

O teste de comparação de médias dos resultados de resistência à tração por compressão diametral (Figura 18b) mostrou que todos os traços formam um único grupo. Logo, conclui-se que a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados também não promoveu redução significativa da resistência à tração do concreto.

Figura 18 – Diagramas de caixa: a) resistência à compressão; b) resistência à tração por compressão diametral; c) módulo de elasticidade.



## 4. CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo verificar a influência da substituição dos agregados

grãos naturais por agregados grãos reciclados oriundos de resíduos de construção e demolição nas propriedades mecânicas do concreto. Para isso, partiu-se de um traço típico de concreto estrutural com resistência à compressão média de 36 MPa. As principais conclusões são:

- Os resultados mostraram ser possível a substituição de 100% do agregado natural pelo agregado reciclado de construção e demolição sem prejuízo das resistências à compressão e à tração do concreto, apesar as normalização brasileira ainda não permitir. Os concretos com vários teores de substituição apresentaram valores de resistências a compressão e a tração que não se diferiram significativamente dos valores do traço de referência. Para garantir esse comportamento, é fundamental a adequada seleção dos resíduos que darão origem ao agregado reciclado. Recomendam-se agregados reciclados com baixo teor de resíduos cerâmicos e com massa específica maior que 2,5 kg/dm<sup>3</sup>.
- O módulo de elasticidade foi influenciado pela substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, porém essa influência não foi significativa. Neste caso, a redução observada no valor do módulo de elasticidade variou de 6% a 12%.
- O tratamento mecânico realizado para limpar o agregado reciclado resultou em uma recuperação de cerca de 53% de agregados de melhor qualidade. Estes apresentavam maior massa específica e menor absorção que os agregados reciclados que vieram da indústria, o que resultou em um menor consumo de aditivo quando comparado aos traços com agregado reciclado. Entretanto, eles apresentavam uma granulometria próxima de uma Brita 0 e com deficiência de distribuição entre os grãos. Por essa razão, o teor de substituição ficou em apenas 26%, uma vez que se procurou manter constante o módulo de finura dos agregados. Ao final, o traço com esse agregado apresentou resistência mecânica (compressão e tração) igual ao do traço de referência, porém apresentou uma redução de 7% no valor do módulo de elasticidade. Isso sugere que outros testes deverão ser utilizados com esse agregado, com outros teores de substituição, de modo a confirmar esses

resultados.

Finalmente, essa pesquisa alcançou o seu principal objetivo, que foi demonstrar a viabilidade do uso de agregados reciclados na confecção de concretos estruturais. Outros estudos deverão ser realizados com concretos de outros níveis de resistência de modo a confirmar os resultados dessa pesquisa.

## 5. REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987, 3 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998, 8 p.



ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 51**: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 2001, 6 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 47**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002, 23 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003, 6 p.

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

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

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008, 16 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009, 8 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009, 9 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011, 5 p.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção de demolição reciclados e a influencia de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 236 f. Tese (Doutorado em Eng. Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 2005.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C1231 / C1231M-14. **Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Concrete Cylinders**. West Conshohocken, PA, 2014.

BLUMENSCHNEIN, R. A. **Manual Técnico: Gestão de Resíduos Sólidos em Canteiro de Obras**. Brasília: SEBRAE/DF. 2007. 48 p.

BLUMENSCHNEIN, R. A. **Programa de Redução de Desperdício e Gestão de Materiais**. In: Prêmio CREA Goiás de Meio Ambiente – Compêndio dos trabalhos premiados. 2003. Goiânia: Safra Gráfica e Editora Ltda, 2004. págs 87-117.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 146 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **Resolução 307**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, 2002. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em 01 de Abril de 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **Resolução 448**. Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional

- do Meio Ambiente-CONAMA. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=672>>. Acesso em 01 de Abril de 2014.
- KANG, T. H. K.; KIM, W.; KWAK, Y. K.; HONG, S. G.. **Flexural Testing of Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Aggregates**. ACI Structural Journal, Vol. 111, No. 3, p. 607-616, 2014.
- LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 246 f. Tese (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- LIMA, R. S.; LIMA, R. R. R. **Guia para elaboração de projeto de gerenciamento de resíduos da construção civil**. 1. ed. Paran : CREA-PR, 2009. 58 p.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3 ed. S o Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.
- PEPE, M; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A. B.; MARTINELLI, E. **Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete**. *Construction and Building Materials*, V. 69, p. 124–132, 2014.
- PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 6 ed. Porto Alegre: Globo, 1978. 308 p.
- PINTO, T. P. **Metodologia para a gest o diferenciada de res duos s lidos da constru o urbana**. 1999. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Constru o Civil) - Escola Polit cnica, Universidade de S o Paulo, S o Paulo, 1999.
- REZENDE, C. L.; FARIAS, M. M.; SILVA, R. C. S. Produ o Mais Limpa, Redu o e o Reaproveitamento dos Res duos de Constru o e Demoli o (RCD). *In: VII CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVA O*, 2012, Palmas, Tocantins. **Anais...** [s.l.], [s.n.], [2012]. 8 p.
- SIKA. **Ficha do produto**. Sika ViscoCrete Precast. Disponível em <<http://bra.sika.com/dms/getdocument.get/e12cdbe6-7359-3b69-b3da-b12d63825e44/Sika%20ViscoCrete%20Precast.pdf>>. Acesso em 27 de Setembro de 2014.
- TEN RIO, J. J. L. **Avalia o de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de res duos de constru o demoli o visando aplica es estruturais**. 2007. 138 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Macei , 2007.
- YANG, K. H.; CHUNG, H. S.; ASHOUR, A. F. **Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties**. ACI Materials Journal, V. 105, No. 3, p. 289-296, 2008.