



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUI
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DOS MATERIAIS

DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS EM
SUBSTITUIÇÃO AOS AGREGADOS NATURAIS

Mestrando: Amando Santos Araújo

Orientadora: Profa. Dra. Carla Eiras

Coorientador: Prof. Dr. José Milton Elias de Matos

Teresina - Piauí

2018

AMANDO SANTOS ARAÚJO

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS EM
SUBSTITUIÇÃO AOS AGREGADOS NATURAIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal do Piauí – UFPI, como requisito complementar à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais.

ORIENTADORA:

PROFA. DRA. CARLA EIRAS

CO-ORIENTADOR:

PROF. DR. JOSÉ MILTON ELIAS DE MATOS

Teresina-Piauí

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Serviço de Processamento Técnico da Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Comunitária Jornalista Carlos Castello Branco

A663d Araújo, Amando Santos.
Desenvolvimento de concretos com agregados reciclados em substituição aos agregados naturais / Amando Santos Araújo. – 2018.
92 f.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2018.
“Orientadora: Prof^a. Dr^a. Carla Eiras”.
“Coorientador: Prof. Dr. José Milton Elias de Matos”.

1. Ciência dos Materiais. 2. Concreto. 3. Agregados.
4. Resíduos. I. Título.

CDD 620.112

AMANDO SANTOS ARAÚJO

**“DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS
EM SUBSTITUIÇÃO AOS AGREGADOS NATURAIS”**

Dissertação submetida à coordenação do curso de Pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal do Piauí, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Ciência dos Materiais.

Aprovada em: 31/07/2018

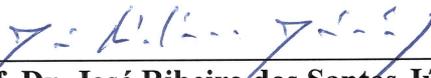
Banca Examinadora:



Profa. Dra. Carla Eiras
Universidade Federal do Piauí
Orientadora



Prof. Dr. José Milton Elias de Matos
Universidade Federal do Piauí
Coorientador / Presidente



Prof. Dr. José Ribeiro dos Santos Júnior
Universidade Federal do Piauí
Examinador Interno



Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim
Instituto Federal do Piauí
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, aos meus amados pais, Perpétua e José da Luz, à minha amada esposa, Lorena, e a meus queridos irmãos, Irla e Richardson.

AGRADECIMENTOS

À Deus em primeiro lugar, por ter me abençoado em todos os momentos da minha vida, concedendo-me amor, graça e misericórdia, além de força, saúde e bom ânimo para enfrentar as dificuldades.

Aos meus pais, Perpétua e José da Luz, pelo amor, educação e incentivo. À minha esposa, Lorena, pelo amor, compreensão, paciência, companheirismo e auxílio. Aos meus irmãos Irla e Richardson pela torcida, carinho e amizade.

Aos professores José Milton Elias de Matos e Carla Eiras pela orientação, paciência, confiança, ensinamentos e dedicação durante toda a pesquisa, tornando-se amigos.

Ao meu grande amigo Rafael Andrade pela força e auxílio imprescindível na realização dos experimentos.

Aos meus amigos, Wiarley, Dannylo e Pedro pela ajuda em momentos imprescindíveis.

À empresa BRITA pelo apoio e cortesia no beneficiamento dos resíduos de construção e demolição utilizados nesta pesquisa.

Ao 2º Batalhão de Engenharia de Construção pela disponibilização do laboratório de solos para realização dos ensaios físicos dos agregados utilizados na pesquisa.

À UFPI/CT/Laboratórios da Mecânica/Laboratório de Materiais.

Aos professores Maria de Lourdes e José Ribeiro pelas ricas contribuições através do conhecimento técnico.

Muito obrigado a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) na forma de agregados reciclados para a produção de concretos para os mais variados fins tem sido bastante estudada a fim de aumentar o potencial de utilização de tais resíduos, visando a redução dos impactos ambientais causados pelo acúmulo de grandes volumes deste tipo de resíduo em todo o mundo. Neste contexto, desenvolveu-se uma pesquisa experimental com o objetivo de avaliar a possibilidade de utilização de agregados reciclados provenientes de RCD como substituto, total ou parcial, dos agregados naturais na produção de concretos para aplicações estruturais. Foi realizada a caracterização granulométrica, química e física dos agregados reciclados utilizados, e produzidos concretos com teores iguais a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de agregados reciclados em substituição aos agregados naturais. Os concretos produzidos foram analisados com relação às propriedades de consistência, massa específica, absorção, resistência à compressão e resistência à tração. Os resultados obtidos mostram a viabilidade da utilização de agregados reciclados, em composição e proporções definidas, para a produção de concretos com fins estruturais. Os concretos com teores de até 75% de agregados reciclados exibiram resultados satisfatórios.

Palavras-chave: concreto, agregados reciclados, resíduos.

ABSTRACT

The use of construction and demolition wastes (CDW) in the form of recycled aggregates for the production of concrete for a wide range of purposes has been extensively studied in order to increase the potential for the use of such wastes in order to reduce the environmental impacts caused by accumulation of large volumes of this type of waste around the world. In this context, an experimental research was developed with the objective of evaluating the possibility of using recycled aggregates from CDW as a substitute, total or partial, of the natural aggregates in the production of concrete for structural applications. It was made the characterization granulometric, chemical and physical of the recycled aggregates used, and produced concrete with contents equal to 0%, 25%, 50%, 75% and 100% of recycled aggregates in substitution to the natural aggregates. The concretes produced were analyzed for the properties of consistency, specific mass, absorption, compressive strength and tensile strength. The results show the feasibility of the use of recycled aggregates, in composition and defined proportions, for the production of concrete with structural ends. The concretes with contents of up to 75% of recycled aggregates showed satisfactory results.

Keywords: concrete, recycled aggregates, waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma básico de produção de agregados reciclados para aplicações em concretos.....	18
Figura 2 - Agregados reciclados iniciais.	40
Figura 3 – Agregados reciclados finais: agregado graúdo reciclado (AGR); e agregado miúdo reciclado (AMR).....	40
Figura 4 - Percentual em massa dos resíduos componentes dos agregados reciclados (graúdo e miúdo).....	42
Figura 5 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos natural e reciclado e limites inferior e superior da brita 1 especificada pela NBR 7211 (2009).	55
Figura 6 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos natural e reciclado e limites inferiores e superiores das zonas utilizável e ótima especificadas pela NBR 7211 (2009).	56
Figura 7 - Resistências à compressão axial dos concretos aos 14 dias.	62
Figura 8 - Resistência à compressão axial do concreto aos 28 dias.	63
Figura 9 - Resistência à compressão axial dos concretos aos 14 dias de idade (média).	64
Figura 10 - Resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias de idade (média).	65
Figura 11 – Exemplares dos corpos-de-prova após ruptura à compressão aos 28 dias.....	66
Figura 12 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias de idade (média).....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedade químicas e físicas do Cimento Portland CP II - Classe 32.....	41
Tabela 2 - Composição percentual de agregados nas misturas de concretos (em volume).....	47
Tabela 3 - Traço unitário em massa utilizado na produção do Concreto de Referência (CR).....	47
Tabela 4 – Traços unitários em massa utilizados na produção dos concretos com agregados reciclados.....	48
Tabela 5 - Resumo da quantidade de corpos-de-prova moldados para cada tipo de ensaio por traço de concreto produzido.	49
Tabela 6 - Composição granulométrica dos agregados graúdos natural e reciclado.....	53
Tabela 7 - Composição granulométrica dos agregados miúdos natural e reciclado.....	54
Tabela 8 - Massa específica e unitária dos agregados graúdos e miúdos no estado solto.....	57
Tabela 9 - Absorção dos agregados graúdos e miúdos.....	57
Tabela 10 - Teor de matéria orgânica e material pulverulento dos agregados graúdos e miúdos.	58
Tabela 11 - Composição química dos agregados reciclados iniciais (ARC, ARCV e ARCR).	59
Tabela 12 - Composição química do agregado reciclado final.	59
Tabela 13 - Resultados dos ensaios de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.....	60
Tabela 14 - Resistência à compressão axial dos concretos (média).	64
Tabela 15 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias de idade.	68
Tabela 16 - Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos aos 28 dias de idade.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRECON = Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

ABRELPE = Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

AGN = Agregado(s) graúdo(s) natural(is)

AGR = Agregado(s) graúdo(s) reciclado(s)

AMN = Agregado(s) miúdo(s) natural(is)

AMR = Agregado(s) miúdo(s) reciclado(s)

AN = Agregado(s) natural(is)

AR = Agregado(s) reciclado(s)

ARC = Agregado de resíduo de concreto ou agregado reciclado de concreto

ARCR = Agregados reciclados de cerâmica de revestimento

ARCV = Agregados reciclados de cerâmica vermelha

ARM = Agregado de resíduo misto ou agregado reciclado misto

CAN = concreto com agregados naturais

CAR = Concreto com agregados reciclados

CONAMA = Conselho Nacional do Meio Ambiente

cm = Centímetro

fck = Resistência característica do concreto à compressão

FRX = Espectrometria de fluorescência de raios-X

g = Grama

g/cm³ = Grama por centímetro cúbico

kg = Quilograma

kg/m³ = Quilograma por metro cúbico

kg/dm^3 = Quilograma por decímetro cúbico

m = Metro

m^3 = Metro cúbico

mL = Mililitro

mm = Milímetro

MPa = Mega Pascal

NBR = Norma Brasileira

RCD = Resíduos de construção e demolição

RSU = Resíduos sólidos urbanos

% = Porcentagem

μm = Micrômetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: UTILIZAÇÃO DE RCD COMO AGREGADOS RECICLADOS NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS.....	14
2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	14
2.1.1 Geração de RCD.....	15
2.1.2 Reciclagem de RCD.....	17
2.2 AGREGADOS RECICLADOS.....	21
2.2.1 Características dos agregados reciclados.....	23
2.2.1.1 Composição granulométrica.....	23
2.2.1.2 Massa específica.....	24
2.2.1.3 Absorção de água.....	25
2.3 CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS.....	27
2.3.1 Propriedades dos concretos produzidos com agregados reciclados.....	28
2.3.1.1 Trabalhabilidade.....	28
2.3.1.2 Massa específica.....	30
2.3.1.3 Resistência à compressão.....	31
2.3.1.4 Resistência à tração.....	33
2.3.1.5 Absorção de água.....	35
3 PARTE EXPERIMENTAL.....	39
3.1 MATERIAIS.....	39
3.1.1 Agregados reciclados.....	39
3.1.2 Agregados naturais.....	41
3.1.3 Cimento.....	41
3.1.4 Água.....	41
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	42
3.2.1 Propriedades dos agregados.....	42
3.2.1.1 Composição dos agregados reciclados.....	42
3.2.1.2 Composição granulométrica dos agregados.....	42

3.2.1.3 Massa específica e massa unitária dos agregados.....	43
3.2.1.4 Absorção de água dos agregados.....	45
3.2.1.5 Teor de matéria orgânica e materiais pulverulentos dos agregados	45
3.2.1.6 Composição química dos agregados reciclados	46
3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	46
3.3.1 Dosagem dos concretos	47
3.3.2 Preparo dos concretos.....	48
3.3.3 Moldagem, adensamento e cura dos corpos de prova.....	49
3.4 ENSAIOS REALIZADOS NOS CONCRETOS	50
3.4.1 Consistência	50
3.4.2 Resistência à compressão axial	50
3.4.3 Resistência à tração por compressão diametral.....	50
3.4.4 Absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos no estado endurecido	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS	53
4.1.1 Composição granulométrica.....	53
4.1.2 Massa específica e massa unitária.....	56
4.1.3 Absorção de água	57
4.1.4 Teor de matéria orgânica e materiais pulverulentos.....	58
4.1.5 Composição química do agregado reciclado.....	59
4.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS	60
4.2.1 Consistência	60
4.2.2 Resistência à compressão axial	61
4.2.2.1 Padrões de falhas dos concretos	66
4.2.3 Resistência à tração	68
4.2.4 Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	70
5 CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, nota-se uma preocupação mundial com as questões ambientais em decorrência do surgimento de sérios danos ambientais resultante das transformações do meio ambiente, muitas vezes causadas pelo homem, o que tornam relevantes os estudos de alternativas que visam reduzir os impactos ambientais causados pela indústria.

A indústria da construção civil é um setor econômico de grande importância que tem causado grande impacto ambiental em termos de extração de recursos naturais, consumo de energia, liberação de poluentes, emissão de gases de efeito estufa e quantidade de resíduos gerados (XU et al., 2017). A sustentabilidade na indústria da construção é inevitável e isso não significa apenas o dever de redução de emissão de dióxido de carbono na atmosfera, mas também o dever de contribuir para conservar os recursos naturais que são cruciais para o crescimento contínuo (AKHTAR; SARMAH, 2018).

O consumo mundial indiscriminado dos recursos naturais existentes no planeta tem sido observado, e avalia-se que indústria da construção civil demanda anualmente de 14% a 50% desses recursos e em todo o processo gera resíduos (SCHNEIDER; PHILIPPI JR., 2004). Estima-se que os resíduos de construção e demolição (RCD) gerados pela construção civil representem cerca de 40% do total de resíduos sólidos urbanos (RSU) e, muitas vezes, correspondem a mais de 50% dos resíduos sólidos nas cidades mais desenvolvidas (CHUNG et al., 2003; SILVA; FERNANDES, 2012).

Apesar de algumas variações, a maioria dos RCD são compostos por concreto, argamassa, tijolos, cerâmica, gesso, madeira e metais, entre outros (DURAN; LENIHAN; O'REGAN, 2006). No ano de 2016, o Brasil coletou, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), cerca de 45,1 milhões de toneladas de RCD, o que corresponde a 63% das 71,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados no mesmo ano. Segundo Pinto (2003), nas cidades brasileiras de médio a grande porte o RCD tem participação de 41% a 70% na massa total de RSU gerados. O acúmulo desses resíduos tem provocado impactos ambientais que podem gerar problemas de ordem estética, ambiental e de saúde pública, necessitando assim da implementação de alternativas que visem reduzir o acúmulo de tais resíduos, incluindo a minimização, a reutilização e a reciclagem.

A reciclagem e o processamento dos resíduos de construção e demolição surgem como alternativas que visam reintroduzir tais resíduos na forma de agregados reciclados para aplicações diversas no setor da construção civil, como na confecção de tijolos, blocos pré-

moldados, meio fio, calçadas, camadas de base e sub-base, pavimentos, produção de argamassas e concreto, entre outras. O uso de RCD na forma de agregados reciclados para a produção de concretos pode promover um ambiente sustentável na construção civil, visto que o concreto é o material construtivo mais consumido no mundo, produzido em larga escala, além do fato dos agregados constituírem cerca de 60 a 80% em volume de uma mistura de concreto (XU et al., 2017).

Diversas pesquisas têm mostrado que o concreto com agregados reciclados (CAR) é inferior ao concreto com agregado naturais (CAN) em vários aspectos, como em propriedades mecânicas e durabilidade, o que tem contribuído para a restrição da ascensão da aplicação estrutural do CAR (LI et al., 2016; XU et al., 2017; PEDRO; DE BRITO; EVANGELISTA, 2017; NEPOMUCENO; ISIDORO; CATARINO, 2018; WAGIH et al., 2013; MARTÍNEZ-LAGE, 2012; FONSECA; DE BRITO; EVANGELISTA, 2011). Além disso, a falta de regulamentação técnica atualizada, a grande variabilidade dos resíduos de construção, a falta de incentivos e os baixos custos de aterro sanitário tem se apresentado como entraves que limitam a utilização de estruturas de concreto produzidas com agregados reciclados (BUI; SATOMI; TAKAHASHI, 2017). No entanto, há vários estudos concentrados na melhoria da qualidade do concreto com agregados reciclados (CAR) com o objetivo de reduzir o custo, melhorar as propriedades mecânicas e aumentar as possibilidades de aplicação deste tipo de concreto (BUI; SATOMI; TAKAHASHI, 2017; LI et al., 2016; RODRIGUES; FUCALE, 2014; THOMAS; SETIÉN; POLANCO, 2016; TENÓRIO et al., 2012).

A fim de contribuir com o conhecimento das propriedades dos concretos com agregados reciclados, este trabalho foi desenvolvido utilizando-se agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição para a produção de concretos objetivando fins estruturais. Visando a redução da heterogeneidade da composição dos agregados reciclados, foram utilizados resíduos de construção e demolição provenientes de uma obra que realiza a segregação dos diferentes tipos de resíduos gerados, possibilitando a obtenção de agregados reciclados graúdos e miúdos com composição mais precisa e propriedades menos variáveis. Foram produzidos concretos com teores de 25, 50, 75 e 100% de agregados reciclados em substituição dos agregados naturais, e avaliadas algumas das propriedades desses concretos.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a possibilidade de utilização de agregados reciclados provenientes de RCD como substituto, total ou parcial, do agregado natural em um concreto convencional com possibilidade de aplicações estruturais.

Como objetivos específicos, esta pesquisa tem:

- obter agregados reciclados provenientes de resíduos de concreto, de cerâmica vermelha e de cerâmica de revestimento, separadamente, para formação de agregados graúdos e miúdos reciclados com composição pré-determinada em massa de cada tipo de agregado obtido;
- caracterizar os agregados reciclados e naturais utilizados quanto à granulometria, massa específica, massa unitária, absorção de água e teor de matéria orgânica e materiais pulverulentos;
- caracterizar quimicamente o agregado reciclado utilizado;
- dosar misturas de concretos com teores de 0, 25, 50, 75 e 100% de agregados reciclados, e moldar os corpos-de-prova conforme as recomendações das normas brasileiras específicas;
- avaliar a trabalhabilidade das misturas de concretos produzidos com diferentes teores de substituição de agregados naturais por agregados reciclados;
- analisar a absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos produzidos com diferentes teores de substituição de agregados naturais por agregados reciclados;
- avaliar as propriedades mecânicas (resistência à compressão e resistência à tração) dos concretos produzidos com diversos teores de substituição de agregados naturais por agregados reciclados.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: UTILIZAÇÃO DE RCD COMO AGREGADOS RECICLADOS NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: UTILIZAÇÃO DE RCD COMO AGREGADOS RECICLADOS NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS

Neste capítulo será apresentada uma revisão sobre os principais conceitos e dados da literatura associada ao tema desse trabalho. Este capítulo inicia-se com a abordagem dos resíduos de construção e demolição (RCD), a qual abrange a conceituação, a geração e a reciclagem de RCD. Em seguida, será apresentado um breve comentário sobre agregados reciclados. Posteriormente, será apresentada uma breve revisão da literatura sobre concretos produzidos com agregados reciclados, objetivando facilitar a compreensão das propriedades mais comuns desse tipo de concreto.

2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Os resíduos de construção e demolição (RCD) podem ser definidos, de uma forma simplificada, como resíduos gerados no processo construtivo, de reforma, escavação, demolição ou no processo de fabricação de materiais de construção (ABRECON, 2018). O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), em sua Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, define resíduos da construção civil, em resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento, asfáltico, vidro, plástico, tubulação, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulho de obras, caliça ou metralha.

A Resolução nº 307 do CONAMA estabelece quatro classes para a classificação dos resíduos da construção civil:

I - Classe A - resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

a) Construção, demolição, renovação e pavimentação de reparos e outras obras de infraestrutura, incluindo o solo de terraplenagem;

b) de construção, demolição, renovação e reparação de edifícios: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, ladrilhos, tábuas etc.), argamassa e concreto;

c) do processo de fabricação e / ou demolição de concreto pré-moldado (blocos, tubos, bordos etc.) produzidos em locais de construção;

II - Classe B - resíduos recicláveis para outros destinos, como plásticos, papel / cartão, metal, vidro, madeira e outros;

III - Classe C - resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a reciclagem / recuperação, tais como produtos oriundos do gesso;

IV - Classe D - resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros contaminados ou prejudiciais à saúde provenientes de demolições, reformas e reparos de clínicas de radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Os RCD são classificados como resíduos da construção civil “classe A”, e são caracterizados por um alto potencial de reciclagem e reutilização devido ao fato de alguns de seus componentes serem recursos de alto valor, particularmente para o mercado de agregados reciclados (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018). Contudo, atualmente, os resíduos de construção e demolição (RCD) são considerados os maiores causadores de degradação ambiental por causa do grande volume gerado e do tratamento e disposição final inadequados.

2.1.1 Geração de RCD

O setor da construção civil é um dos maiores consumidores de recursos e produtores de resíduos da sociedade atual, utilizando até 40% do total de matérias-primas extraídas globalmente e gerando cerca de 35% dos resíduos mundiais (YUAN et al., 2012).

A crescente parcela dos resíduos de construção e demolição (RCD) no total de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem demonstrado a relevância deste tipo de resíduo (DE OLIVEIRA et al., 2011). O elevado crescimento populacional e o acelerado processo de urbanização têm contribuído para a geração de grandes volumes de RCD pelo setor da construção civil e, por conseguinte, estes fatores proporcionaram um aumento na geração dos resíduos sólidos urbanos (RSU) (COSTA et al., 2007; FERREIRA et al., 2014).

A falta de definição e detalhamento, nos projetos arquitetônicos, estruturais, instalações entre outros, a baixa qualidade dos materiais e componentes de construção disponíveis no mercado, a falta de mão-de-obra qualificada, a ausência de procedimentos operacionais e mecanismos de controle de execução e inspeção estão entre os fatores que mais contribuem para a geração de resíduos no setor da Construção Civil (BARRETO, 2005).

A geração de resíduos de construção e demolição (RCD) excede 3,5 bilhões de toneladas em todo o mundo. Os maiores contribuintes nesse cenário são a China, a Índia e os EUA, com uma produção coletiva superior a 2,5 bilhões de toneladas de RCD. A China gera

mais de 1,5 bilhão de toneladas de RDC anualmente, o qual corresponde a cerca de 30 a 40% do total de resíduos urbanos gerados no país; enquanto que os Estados Unidos cerca de 534 milhões de toneladas de RCD, as quais correspondem a cerca de 29% dos RSU gerados no país; e a Índia produz cerca de 530 milhões de toneladas por ano (AKHTAR; SARMAH, 2018; HUANG, 2018; LU, 2014; MENEGAKI; DAMIGOS, 2018; POON et al., 2013).

Na França, a geração de RCD atingiu aproximadamente 349 milhões de toneladas em 2014. Anualmente, a Alemanha produz quase 200 milhões de toneladas de RCD. O Reino Unido possui uma média de geração de 90 milhões de toneladas de RCD por ano, correspondendo a cerca de 50% do total de resíduos sólidos gerados no país. A produção de resíduos de RCD atingiu os 81 milhões de toneladas nos Países Baixos, representando cerca de 40% do total de resíduos sólidos gerados. No Japão são gerados aproximadamente 77 milhões de toneladas de RCD por ano. Em 2011, a Coreia do Sul produziu aproximadamente 68 milhões de toneladas de RCD. Na Itália, a produção de RDC foi de aproximadamente 40 milhões de toneladas. Na Áustria, foram gerados cerca de 35 milhões de toneladas de RCD em 2013. A Espanha produz anualmente cerca de 30 milhões de toneladas de RCD, o que representa aproximadamente um terço da produção total de resíduos sólidos em todo o país. A África do Sul gera mais de 21 milhões de toneladas de RCD, que corresponde a cerca de 21% do total de resíduos sólidos gerados no país. (AKHTAR; SARMAH, 2018; CALVO et al., 2014; BRAVO et al., 2015; RODRÍGUEZ et al., 2015; NAKAJIMA; FUTAKI, 2001; YANG et al., 2015; HUANG, 2018).

No Brasil, a produção de RCD, de acordo com a ABRELPE, é estimada em mais de 45 milhões de toneladas por ano, representando mais de 63% do total de RSU coletados anualmente no país.

O acúmulo de resíduos sólidos gerados pela construção civil tem causado graves impactos ambientais (COSTA et al., 2007; FERREIRA et al., 2014). Com isso, países em todo o mundo estão tentando reduzir seus volumes de resíduos de construção e demolição (RCD) introduzindo legislações diferentes e aumentando a conscientização através de diferentes meios para ajudar a preservar o meio ambiente (AKHTAR e SARMAH, 2018). A preocupação em diminuir a geração de resíduos deve-se começar na concepção do empreendimento, seguida pela execução e utilização de produtos que geram resíduos (JOHN, 2000). Outra opção é a reciclagem e aplicação desses resíduos no próprio setor da construção civil.

2.1.2 Reciclagem de RCD

Nas últimas décadas, assuntos relacionados à redução da geração de resíduos, à preservação ambiental e à reciclagem conquistaram uma posição de destaque nas discussões realizadas pela sociedade, que busca alcançar um modelo de desenvolvimento sustentável para o planeta (AKHTAR; SARMAH, 2018). Nesse contexto, a reciclagem de RCD tem se mostrado uma atividade que oferece vantagens ambientais, técnicas e econômicas para o desenvolvimento sustentável no setor da construção civil, o tem gerado uma vasta gama de investigação sobre o custo social e financeiro, produção, caracterização e reciclagem desse tipo de resíduo (CONTRERAS et al., 2016).

É geralmente aceito que as práticas de gestão de RCD devem ser guiadas pelo princípio “3R” - reduzir, reutilizar e reciclar (PENG et al., 1997, apud HUANG, 2018). A indústria tem gerado grandes volumes de resíduos de construção e demolição (RCD) no mundo inteiro, o que, se gerenciado adequadamente, pode economizar enorme quantidade de energia e ajudar a melhorar a economia (AKHTAR; SARMAH, 2018).

A reciclagem e a reutilização de RCD surgem como alternativas de sustentabilidade que visam valorizar os resíduos, atuando positivamente na preservação das florestas, reduzindo a extração de pedras naturais em pedreiras sob vegetações e grandes áreas verdes, na preservação de rios, mares e represas, evitando que o entulho seja descartado nesses locais, além de gerar trabalho e renda (SOUSA; SEGANTINI; PEREIRA, 2008; ABRECON, 2018).

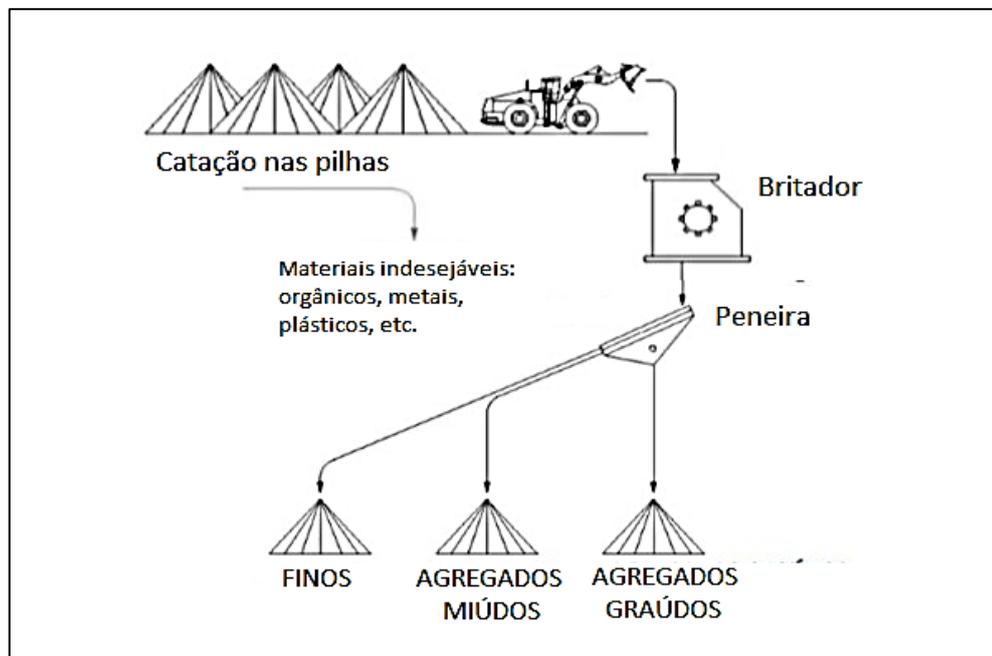
Segundo Pereira (2015), a composição dos RCD gerados varia conforme a localidade da obra, o percentual e tipo de material desperdiçado, a diversidade de tecnologia usada e a matéria prima disponível. Os RCD possuem grande variedade de materiais em sua composição, incluindo vidro, concreto, madeira, metais, bem como alguns elementos perigosos, derivados das inúmeras atividades construtivas que ocorrem concomitantemente no desenvolvimento de uma obra (AKHTAR; SARMAH, 2018; PASCHOALIN FILHO et al., 2015). No entanto, de uma forma geral, esses resíduos são compostos, basicamente, por materiais que podem ser reciclados para a obtenção de agregados, tais como: cimentícios, alvenaria, concreto, cerâmicas e rochas naturais (PASCHOALIN FILHO et al., 2015). Além disso, via de regra, os RCD têm sua geração concentrada, sendo mais fácil a sua recuperação (JHON, 2000).

A reciclagem de RCD para a obtenção de agregados reciclados é uma alternativa que contribui para a ampliação das opções de aplicações deste tipo de material. Os agregados reciclados podem ser utilizados para diversos fins, tais como: camadas de base e sub-base para

pavimentação, coberturas primárias de vias, fabricação de argamassas de assentamento, fabricação de concretos, fabricação de pré-moldados (meio fio, blocos, entre outros), camadas drenantes etc. (BRASILEIRO, 2013).

A produção de agregados reciclados consiste em operações unitárias empregadas no tratamento de minérios: a fragmentação, a separação de tamanho e a concentração (TENÓRIO, 2007). O processo inicia com a coleta dos resíduos, geralmente formado por restos de alvenaria, concreto e cerâmica; após a coleta, o material passa pela triagem; em seguida pelo processo de trituração; depois pelo processo de peneiramento (que pode ser realizado ou não de acordo com a finalidade do produto); e finalmente são obtidos os agregados reciclados de RCD (ABRECON, 2018). Geralmente, no Brasil e em outros países, os processos de reciclagem de RCD envolvem basicamente a seleção dos materiais recicláveis, a trituração em equipamentos apropriados (britador de mandíbula ou de impacto) e o peneiramento a seco. A remoção dos componentes de aço é realizada por um extrator de metais ou manualmente, assim como a separação dos materiais orgânicos (ULSEN, 2011).

Figura 1 - Fluxograma básico de produção de agregados reciclados para aplicações em concretos.



Fonte: ULSEN, Carina. Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição. [Tese de Doutorado]. São Paulo: USP; 2011. (Adaptado).

Alguns estudos estimam em que até 90% dos resíduos de demolição destinados a aterros podem ser reciclados e reutilizados (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018). Grande parte dos componentes de construção é de natureza simples, como os componentes produzidos com agregados e aglomerantes inorgânicos. Requisitos como esterilidade, purezas elevadas, etc. são dispensáveis na maioria das aplicações comuns da construção civil, simplificando os processos. Dessa forma, os processos de reciclagem mais simples podem significar que a quantidade de capital para a implantação de uma unidade de reciclagem de RCD seja reduzida (JHON, 2000).

Apesar da comprovada viabilidade técnica, a reciclagem de RCD enfrenta alguns entraves, tais como: controlar a variabilidade na composição dos resíduos, a dificuldade na separação dos componentes orgânicos presentes, a carência de informações sobre as características tecnológicas dos resíduos, a falta de políticas públicas mais contundentes, os baixos custos de aterro sanitário, e principalmente a falta de tecnologias e usinas de processamento hábeis para produzir agregados reciclados de baixa porosidade (ULSEN, 2011; BUI; SATOMI; TAKAHASHI, 2017).

Os agregados reciclados em geral possuem algumas propriedades indesejáveis, como alta absorção de água e baixa resistência à abrasão (em comparação com os agregados naturais, em geral), que podem reduzir sua utilização como material de construção (FRAJ; IDIR, 2017). Porém, a adoção de medidas de gerenciamento de RCD mais eficientes e a realização de processos de produção mais adequados proporcionam uma melhora da qualidade dos agregados reciclados, aumentando assim as possibilidades de utilização deste tipo de material, tendo em vista que as propriedades dos agregados reciclados estão diretamente ligadas com as características dos resíduos que lhe originaram e com o tipo de processo empregado na reciclagem (ULSEN, 2011).

O processo de produção dos agregados reciclados é determinante na qualidade e nas características dos agregados gerados, com destaque para as etapas relativas à triagem e fragmentação dos resíduos. A separação de componentes indesejáveis e materiais contaminantes nos RCD é uma tarefa difícil devido à complexidade e composição desses materiais. Com isso, a realização da segregação de RCD na fonte geradora (nos canteiros de obras) torna-se um processo mais eficiente, pois facilita o controle dos resíduos e favorece potencialmente à redução da variabilidade da composição dos agregados produzidos a partir desses resíduos. Além disso, o processo de fragmentação deve ser realizado com a utilização de equipamentos apropriados para a obtenção do produto com as características desejadas, já que este processo influi na granulometria, na forma e na resistência dos grãos dos agregados.

Dessa forma, para aumentar a qualidade e as possibilidades de aplicação dos agregados reciclados, torna-se fundamental a realização de bons processos de triagem e fragmentação adequada dos resíduos.

A preocupação com o gerenciamento dos resíduos, a redução da disponibilidade de matérias-primas naturais, a escassez de locais para deposição, os elevados custos de transporte dos resíduos e agregados, dentre outros fatores, possibilitaram o desenvolvimento de processos de reciclagem de maior complexidade, principalmente na Europa e Japão, para agregação de valor ao produto com foco nas aplicações em concreto (ULSEN, 2011).

As usinas europeias empregam um ou dois estágios de britagem (mandíbulas, impacto ou giratório) para adequação da granulometria dos agregados e empregam a operações de beneficiamento para separação dos materiais orgânicos e remoção das fases de maior porosidade, entre estas, a remoção das fases metálicas por extrator de sucatas, lavagem intensiva do agregado graúdo em equipamento rotativo para remoção de finos e fases mais frágeis, remoção de contaminantes orgânicos por meio de classificação pneumático ou por seleção manual em transportadores de correia em cabine pressurizada. No Japão, a produção de agregados reciclados de alta qualidade é direcionada essencialmente nos processos de remoção da pasta de cimento em resíduos de concreto, geralmente através de britador vertical de rotor excêntrico ou pela fragilização da pasta cimentícia através do aquecimento seguida de sua remoção e peneiramento (ULSEN, 2011).

A taxa de reciclagem de RCD é muito variável em todo o mundo, sendo ainda marcante, em diversos países, a despreocupação do setor da construção civil com o grande volume gerados e o destino final dos resíduos. Estudos indicam que o maior gerador de RCD do mundo, a China, possui taxa de reciclagem e reutilização de RCD média de apenas cerca de 5% (HUANG, 2018). Países como Grécia, Portugal, Hungria e Espanha possuem taxas de reciclagem abaixo de 15%. Comparativamente, a taxa de reciclagem e reutilização de RCD pode chegar a 70% a 95% em alguns países desenvolvidos, incluindo os Estados Unidos, Dinamarca, Coreia do Sul, Cingapura, Japão, Alemanha, Holanda, Bélgica e Reino Unido (XIAO et al., 2015, apud HUANG, 2018; MENEGAKI; DAMIGOS, 2018).

Na França, a taxa de reciclagem de RCD no ano de 2014 foi de aproximadamente 50% do total gerado. Na Itália, a taxa de reciclagem é de aproximadamente 75% do total de RCD gerado. Nos Países Baixos, a taxa de reciclagem de RCD é aproximadamente 80%. A Alemanha possui taxa de reciclagem de RCD superior a 80%. No Reino Unido, a taxa de reciclagem de RCD foi superior a 86% em 2012. O Japão apresenta taxa de reciclagem de mais de 90% desse tipo de resíduo. A Coreia do Sul está entre os maiores recicladores de RCD do

mundo, com quase 98% de reciclagem. (AKHTAR; SARMAH, 2018; CALVO et al., 2014; BRAVO et al., 2015; RODRÍGUEZ et al., 2015; NAKAJIMA; FUTAKI, 2001; TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018; YANG et al., 2015; HUANG, 2018).

O Brasil está entre os países que mais geram RCD no mundo, e embora o governo tenha implementado recentemente novas leis e legislações relativas à reciclagem de resíduos, a taxa de reciclagem é mínima (CONTRERAS et al., 2016; PAZ; LAFAYETTE, 2016). Estima-se que o percentual de reciclagem deste tipo de resíduo no Brasil é de apenas cerca de 21% do total coletado (ABRECON, 2015).

Em julho de 2002, no Brasil, foi lançada a resolução nº 307 do CONAMA, que obriga os geradores e prefeituras a tomarem medidas para a diminuição, a reciclagem e a disposição adequada dos resíduos de construção e demolição gerados (COSTA, 2006). A política de resíduos sólidos no Brasil tem como prioridade a redução, reutilização, reciclagem e recuperação de energia dos resíduos como um todo. Estima-se que por volta de 88 a 95% dos RCD são de interesse para a reciclagem como agregados para a construção civil (SARDÁ, 2003; ANGULO et al., 2002). No entanto, a construção civil, tem a reciclagem deste material como um desafio, pois ainda há necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias para este setor (PEREIRA, 2015).

Segundo a ABRELPE, apesar da implantação da Lei Federal Nº 12.305/2010 (institui o Política Nacional de Resíduos Sólidos), o Brasil ainda apresenta uma gestão de resíduos sólidos deficiente, que necessita de estruturação, gerenciamento e recursos financeiros. A situação dos resíduos de construção e demolição é ainda mais deficiente, já que sequer é possível obter dados abrangentes da gestão desses resíduos (PEREIRA, 2015). Nota-se a necessidade de desenvolvimento de metodologias precisas para quantificar os resíduos e da criação de estratégias mais específicas e concretas para o gerenciamento dos RCD.

Neste contexto, torna-se necessário o desenvolvimento e aplicação de políticas mais concretas, que estimulem o desenvolvimento real de uma gestão sustentável e economicamente viável, de forma que fizesse cumprir as leis de maneira efetiva, reduzindo assim a geração dos RCD e tornando a reciclagem de RCD mais eficiente.

2.2 AGREGADOS RECICLADOS

Atualmente, a produção de agregados reciclados (AR) é a prática de reciclagem mais comum para o RCD pelo fato destes poderem substituir os agregados naturais (AN) em várias aplicações (DI MARIA; EYCKMANS; VAN ACKER, 2018). Os agregados reciclados

são geralmente usados como aterro, em base, sub-base ou no material de superfície na construção de estradas, em bases de concreto pobre, em materiais ligados hidraulicamente e na fabricação de novos concretos (BRASILEIRO, 2013).

Os agregados reciclados são compostos, na maioria das vezes, por materiais cimentícios, alvenaria, concreto, cerâmicas e rochas naturais. A origem e o tipo dos resíduos de construção são determinantes na qualidade dos agregados reciclados produzidos. Por exemplo, os resíduos cerâmicos gerados no processo de demolição de paredes de tijolos cerâmicos acabam transportando algum tipo de resíduo não cerâmico, como rejunte e gesso, dificultando a previsibilidade dos resultados devido a sua natureza altamente variável. Já os agregados reciclados provenientes de resíduos de tijolos cerâmicos gerados diretamente no processo de fabricação, possuem maior homogeneidade e baixíssima quantidade de impurezas, apresentando assim, qualidade superior ao agregado reciclado proveniente de demolição de parede de tijolos cerâmicos (NEPOMUCENO; ISIDORO; CATARINO, 2018).

De acordo com a norma brasileira NBR 15.116, agregado reciclado é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura. Para aplicações em obras de pavimentação viária e no preparo de concreto sem função estrutural, os agregados reciclados são classificados como: agregado de resíduo de concreto (ARC) ou agregado reciclado de concreto, composto de no mínimo 90% de materiais à base de cimento Portland e rochas naturais; e agregado de resíduo misto (ARM), composto por menos de 90% de materiais à base de cimento Portland e rochas naturais.

A partir da literatura mencionada ao longo deste capítulo, nota-se que há diversas pesquisas voltadas para o estudo das propriedades dos concretos produzidos com agregados reciclados, sobretudo para os produzidos com utilização de agregados reciclados de concreto (ARC) ou de agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV), provenientes de resíduos de tijolos e blocos cerâmicos.

A principal diferença dos ARC com relação aos agregados naturais, em termos físicos, é a argamassa aderida à sua superfície, que é uma das principais razões para perdas de qualidade. Em particular, a presença de argamassa aderida reduz a densidade e aumenta significativamente a absorção de água dos agregados reciclados de concreto (PEDRO; DE BRITO; EVANGELISTA, 2017). Já os agregados reciclados de cerâmica vermelha (ARCV), além de possuírem uma alta absorção de água e uma baixa densidade, apresentam ainda uma grande diferença com relação à composição química, à forma e textura dos grãos, em comparação com os agregados naturais (NEPONUCEMO; ISIDORO; CATARINO, 2018).

As propriedades dos agregados reciclados são bastante variáveis devido à alta variabilidade dos resíduos que os originam, e aos diferentes tipos de processos de beneficiamento que podem ser utilizados, tornando o estudo e conhecimento das características dos agregados reciclados muito importantes para promover a utilização desse tipo de material.

2.2.1 Características dos agregados reciclados

Os agregados reciclados diferem dos agregados naturais principalmente nas seguintes características: absorção de água, massa específica, granulometria, componentes químicos, forma e textura dos grãos, além da maior heterogeneidade da composição (VERIAN; ASHRAF; CAO, 2018).

2.2.1.1 Composição granulométrica

A composição granulométrica dos agregados reciclados é influenciada pela natureza do resíduo de origem e pelo tipo de equipamento e procedimento utilizados no beneficiamento desses resíduos para a obtenção dos agregados (SOTO, 2017). A grande diversidade da natureza dos resíduos e dos equipamentos disponíveis para a produção de agregados tornam a composição granulométrica dos agregados reciclados bastante variável.

Apesar da grande variabilidade, os agregados reciclados tendem a apresentar composição granulométrica com maiores teores de finos (material de granulometria inferior a 0,15 mm) e de materiais pulverulentos (partículas finas com dimensões inferiores a 75 μm) que os agregados naturais (TENÓRIO, 2007 apud GUALBERTO, 2017). Com relação aos aspectos físicos, em geral, tendem a apresentar formas mais angulares e lamelares, e textura mais áspera e porosa do que os agregados naturais (LEITE, 2001).

Pelo fato dos agregados reciclados apresentarem grãos, em geral, maiores e mais angulares, os concretos produzidos com estes agregados apresentam-se mais ásperos e menos trabalháveis (HANSEN, 1992; JADOVSKI, 2005 apud SOTO, 2017).

Caracterizar a morfologia e a distribuição granulométrica de partículas é uma atividade importante na área de agregados e materiais cimentícios, principalmente quando se considera a produção de concretos e argamassas. Isto porque tais características físicas influenciam diretamente no comportamento no estado fluido e no estado endurecido desses materiais, sendo fundamental nos procedimentos de dosagem (ULSEN, 2011).

2.2.1.2 Massa específica

Com relação à massa específica, pelo fato de serem constituídos por fases mais porosas, os agregados reciclados em geral possuem menor massa específica que os agregados naturais (LIMA, 1999 apud GUALBERTO, 2017).

A partir de uma revisão da literatura, os autores De Verian, Ashraf e Cao (2018) relataram que a massa específica dos agregados reciclados de concreto varia de 1,91 a 2,7 g/cm³, enquanto a dos agregados naturais varia de 2,4 a 2,89 g/cm³, concluindo que a massa específica dos agregados reciclados é geralmente menor que a dos agregados naturais. Em seus estudos, Pedro, De Brito e Evangelista (2017), obtiveram resultados de massa específica de agregados reciclados de concreto iguais a 2,4 e 2,3 g/cm³, na fração graúda e na fração miúda, respectivamente; significando que estes apresentaram massa específica aproximadamente 7,7% e 14,8% menores que os agregados naturais utilizados, nas referidas frações, respectivamente.

Nos estudos de Wagih et al. (2013) foram utilizados agregados graúdos reciclados provenientes de resíduos de concreto de 15 locais diferentes. Corroborando com os dados da literatura, os agregados graúdos reciclados de concreto apresentaram massa específica menor que o agregado graúdo natural. A massa específica dos agregados graúdos reciclados de concreto das diversas fontes variou de 2,18 a 2,48 g/cm³, enquanto o agregado graúdo natural apresentou massa específica igual a 2,58 g/cm³.

Na pesquisa desenvolvida por Nepomuceno, Isidoro e Catarino (2018), foram obtidos resultados de massa específica de agregado graúdo reciclado de tijolo cerâmico igual a 1,94 g/cm³, significando que este agregado apresentou massa específica aproximadamente 25% menor que o agregado graúdo natural utilizado na mesma pesquisa. Resultados semelhantes foram observados nos estudos de De Brito, Pereira e Correia (2005) e Gomes, De Brito e Bravo (2013), nos quais foram obtidos valores de massa específica para os agregados graúdos reciclados de tijolo cerâmico iguais a 2,029 e 2,16 g/cm³, respectivamente.

Tenório et al. (2012) relataram valores de massas específicas iguais a 2,08 e 2,27 g/cm³ para dois tipos diferentes de agregados graúdos reciclados misto (provenientes de resíduos de cerâmica vermelha e concreto), significando que estes agregados apresentaram massa específica aproximadamente 21% e 13% menores, respectivamente, que a massa específica do agregado graúdo natural utilizado na mesma pesquisa. Os autores também relataram um valor de massa específica igual a 2,50 g/cm³ para a fração miúda dos agregados reciclados misto, significando que o agregado miúdo reciclado apresentou massa específica cerca de 7% menor que a do agregado miúdo natural utilizado.

A grande variabilidade dos resultados de massa específica dos agregados reciclados observada em diversas pesquisas pode ser explicada pelas diferenças na composição, tipo de beneficiamento e no método utilizado para determinação dessa propriedade (LEITE, 2001; SOTO, 2017). Apesar da grande variação dos resultados, nota-se que os valores de massa específica encontrados para os agregados reciclados são, em geral, menores que os encontrados para os agregados naturais, conforme observado nos estudos mencionados anteriormente. Também é possível concluir que os agregados reciclados de concreto, na maioria dos casos, apresentam massa específica maior que os agregados reciclados de tijolo cerâmico.

2.2.1.3 Absorção de água

A capacidade de absorção de água é uma das principais diferenças entre os agregados reciclados e os agregados naturais. Por serem compostos por materiais mais porosos, os agregados reciclados geralmente exibem taxa de absorção superior à dos agregados naturais (LIMA, 1999 apud GUALBERTO, 2017).

As propriedades de absorção de água dos agregados reciclados dependem da sua natureza, sendo geralmente menores para agregados graúdos reciclados de concreto, e no caso de agregados mistos podem alcançar taxa de 20% de absorção de água quando estes possuem uma quantidade grande de partículas cerâmicas (SAIKIA; BRITO, 2013 apud GUALBERTO, 2017).

Nos estudos de Wagih et al. (2013), os agregados graúdos reciclados de concreto de 15 locais diferentes exibiram taxas de absorção de água maiores que o agregado graúdo natural. Os agregados graúdos reciclados de concreto apresentaram taxa de absorção de água que variou de 2,15% a 7,15%, enquanto que o agregado graúdo natural apresentou absorção igual a 2,1%.

Em pesquisa realizada por Pedro, De Brito e Evangelista (2017), a qual foram avaliadas algumas propriedades de agregados naturais e reciclados, foram verificados que os agregados reciclados de concreto utilizados apresentaram taxas de absorção de água iguais a 3,9 e 6,1%, na fração graúda e na fração miúda, respectivamente; enquanto que os agregados naturais apresentaram taxas de absorção iguais a 1,3 e 0,2%, nas respectivas frações, significando que o agregado graúdo reciclado (AGR) apresentou taxa de absorção aproximadamente 3 vezes maior que o agregado graúdo natural (AGN) utilizado, e que o agregado miúdo reciclado (AMR) apresentou taxa de absorção aproximadamente 30 vezes maior que o agregado miúdo natural (AMN) utilizado.

Nepomuceno, Isidoro e Catarino (2018) obtiveram resultados de absorção de água de agregado graúdo reciclado de tijolo cerâmico igual a 11,5%, correspondendo a um valor cerca de 10 vezes maior que a apresentada pelo agregado graúdo natural utilizado na pesquisa, o qual exibiu taxa de absorção de água igual a 1,1%. Nos estudos de De Brito, Pereira e Correia (2005) e de Gomes, De Brito e Bravo (2013), foram obtidos valores de absorção de água para os agregados graúdos reciclados de tijolo cerâmico iguais a 12% e 16,3%, respectivamente.

Tenório et al. (2012) relataram valores de absorção de água iguais a 8,41% e 5,37% para dois tipos diferentes de agregados graúdos reciclados misto (provenientes de resíduos de cerâmica vermelha e concreto), significando que estes agregados apresentaram absorção cerca de 17 e 11 vezes maiores, respectivamente, que a absorção exibida pelo agregado graúdo natural utilizado na mesma pesquisa. Os autores também relataram um valor de absorção de água igual a 9,34% para a fração miúda dos agregados reciclados misto, significando que o agregado miúdo reciclado apresentou absorção cerca de 8 vezes maior que a do agregado miúdo natural utilizado.

Nos estudos de Martínez-Lage et al. (2012) foi obtido resultado de absorção de água de 11% para agregados graúdos reciclados misto (com composição apresentando maior percentual de resíduos de concreto e argamassa, seguido de resíduos de tijolos cerâmicos e similares, e de agregados naturais sem argamassa aderida).

Os agregados graúdos reciclados em geral, sobretudo os provenientes de resíduos de tijolos cerâmicos, possuem uma alta absorção de água em comparação aos agregados naturais, conforme pode ser observado nos estudos supracitados. Esta característica dos agregados reciclados pode afetar na consistência da mistura e na perda de desempenho mecânico dos concretos produzidos com estes agregados (NEPONUCEMO; ISIDORO; CATARINO, 2018). Porém, vale ressaltar que diversos estudos têm mostrado resultados satisfatórios com relação às propriedades mecânicas e de consistência da mistura dos concretos produzidos com agregados reciclados.

De uma maneira geral, as características mais notáveis nos agregados reciclados são a forma mais angulosa e textura mais rugosa dos grãos, a menor resistência, a maior absorção e a maior porosidade, quando comparadas aos agregados naturais. Contudo, comumente apresentam-se como bons agregados para uso em diversas aplicações no setor da construção civil.

A utilização de agregados reciclados no Brasil ainda é relativamente baixa. A inexistência de legislação que incentive o consumo, a falta de conhecimento do mercado, a elevada carga tributária, a baixa qualidade do resíduo e a dificuldade de acesso comercial da

empresa são as principais causas que dificultam a venda de agregados reciclados no Brasil (ABRECON, 2015).

Atualmente, apesar dos resultados satisfatórios para diversas aplicações, a utilização de agregados reciclados ainda é considerada extremamente baixa na maior parte dos países. Contudo, em geral, nota-se um crescente interesse mundial na utilização de agregados reciclados no setor da construção civil, tornando promissor o uso desse tipo de agregado.

2.3 CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS

Os agregados reciclados podem, entre outras aplicações, ser utilizados para produção de concretos e assim ajudar a promover um ambiente sustentável na construção civil, auxiliando na redução do acúmulo dos resíduos da construção civil e do consumo e extração de agregados naturais (FRAJ; IDIR, 2017; XU et al., 2017).

Para uso na produção de concretos, é imprescindível que os agregados reciclados sejam de boa qualidade, não podendo ser proveniente de resíduos que tiverem contaminantes perigosos. Contudo, vale ressaltar que em outras circunstâncias, contaminantes potencialmente prejudiciais podem não ser solúveis em água, o que os torna inofensivos em concretos com agregados reciclados (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018). Desse modo, tem sido observado que os agregados reciclados apresentam grande potencial e viabilidade para substituir os agregados naturais em concretos.

A falta de regulamentação técnica atualizada, a grande variabilidade dos resíduos de construção, a falta de incentivos e os baixos custos de aterro sanitário tem se apresentado como entraves que limitam a utilização de estruturas de concreto produzidas com agregados reciclados (BUI; SATOMI; TAKAHASHI, 2017). Além disso, o número limitado de estudos, testes e aplicações em comparação com o concreto com agregados naturais geram uma desconfiança geral que acaba reduzindo o uso de concretos com agregados reciclados, tornando as aplicações e o desenvolvimento desse tipo de concreto um pouco restritos (XU et al., 2017).

Os agregados exercem uma grande influência nas propriedades finais do concreto, e conseqüentemente no desempenho deste (CARRIJO, 2005). A incorporação de agregados reciclados em concretos podem alterar diversas propriedades deste material, como a massa específica, a trabalhabilidade da mistura, a resistência à compressão e tração, e a absorção de água, entre outras. Vários pesquisadores relatam que a utilização de agregados reciclados na produção de concretos pode reduzir o desempenho mecânico deste em comparação ao concreto convencional. Contudo, na literatura, também há diversos estudos que mostram resultados

satisfatórios para determinados teores de utilização de agregados reciclados em substituição aos agregados naturais em concretos. Dessa forma, considerando ainda a alta variabilidade dos agregados reciclados, torna-se imprescindível a ampliação dos estudos e investigação da influência dos diversos tipos de agregados reciclados nas características do concreto.

2.3.1 Propriedades dos concretos produzidos com agregados reciclados

2.3.1.1 Trabalhabilidade

Com relação à trabalhabilidade, os concretos produzidos com agregados reciclados geralmente apresentam uma redução desta característica em comparação com o concreto convencional, sendo atribuída as superfícies mais rugosas e formas mais irregulares, além do fato dos agregados reciclados apresentarem maior taxa de absorção.

Apesar das misturas de concretos reciclados, de um modo geral, apresentarem trabalhabilidade reduzida, é possível a obtenção de misturas com consistência semelhante à de concretos convencionais a partir do uso de agregados reciclados pré-molhados. Para garantir uma melhor trabalhabilidade para o concreto, recomenda-se o uso de agregados reciclados na condição saturada (VERIAN; ASHRAF; CAO, 2018). Soto (2017) menciona que o tempo de 10 minutos de pré-molhagem é o suficiente para reduzir a alta absorção dos agregados reciclados secos. Porém, apesar da pré-molhagem ser bastante difundida, ainda não há um consenso sobre a quantidade de água a ser compensada (PADOVAN, 2013 apud SOTO, 2017). De acordo com os estudos de Ferreira, De Brito e Barra (2011), o nível de 90% de saturação do agregado reciclado mostrou-se ideal, enquanto que o nível de 100% de saturação para os agregados reciclados pode gerar efeito prejudicial nas propriedades do concreto.

A resistência mecânica dos concretos está associada com a relação água / cimento da mistura, sendo estas inversamente proporcionais. A utilização de agregados reciclados completamente saturados promove a movimentação da água interna dos agregados para a pasta do concreto, aumentando assim a relação água/cimento, e influenciando na perda de resistência mecânica do concreto (SOTO, 2017). No caso do uso de agregados sem pré-molhagem há movimentação de água da pasta do concreto para o interior das partículas, reduzindo a relação água/cimento efetiva da mistura, podendo assim gerar aumento da resistência mecânica do concreto. Vários estudos, como por exemplo os de Folino; Xargay, 2014 e os de Xião et al., 2015, demonstram que a pré-molhagem dos agregados aumenta a relação água/cimento nos concretos e a resistência mecânica destes diminuem à medida que aumenta o teor de agregados

recicladados. Sem a pré-molhagem, a resistência mecânica dos concretos com agregados reciclados pode ser aumentada com o aumento do teor de agregados reciclados, conforme pode ser observado em diversas pesquisas, como por exemplo nas realizadas por Rodrigues e Fucale (2014) e por Thomas, Setién e Polanco (2016).

Zangeski et al. (2017) relataram resultado satisfatório com relação à consistência do concreto com 100% de agregados reciclados a partir da compensação do teor de água com a pré-molhagem do agregado miúdo reciclado antes de inseri-lo na mistura. O concreto com agregados reciclados apresentou resultado de abatimento de tronco de cone muito próximo ao do concreto com agregados naturais de referência.

A trabalhabilidade dos concretos com agregados reciclados não depende exclusivamente da quantidade de água existente na mistura, como no caso dos concretos convencionais, mas também da forma e da textura do agregado reciclado utilizado. A forma e a textura dos agregados reciclados podem promover um maior travamento das misturas de concreto, inibindo a mobilidade das partículas (RASHWAN; ABOURIZK, 1997 apud LEITE, 2001).

Nos estudos realizados por Martínez-Lage et al. (2012), os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados misto apresentaram misturas secas e com baixos valores de abatimento (medida através do teste de slump), mesmo sendo misturados com maiores valores de água que o concreto convencional. Apesar da alta consistência apresentada pelos concretos reciclados, os autores relataram que foi possível a moldagem dos corpos-de-prova.

O uso de aditivo plastificante ou superplastificante também é indicado para a obtenção de misturas de concretos reciclados com trabalhabilidade semelhante à do concreto convencional. Na pesquisa de Wagih et al. (2013), por exemplo, foram obtidos resultados de consistência satisfatórios, a partir do uso de aditivo superplastificante, para concretos produzidos com substituição de até 100% de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto. Tenório et al. (2012) relataram resultado de consistência do concreto com 100% de agregados reciclados muito próximo ao do concreto convencional de referência, com utilização da pré-molhagem dos agregados reciclados (por 1 minuto na betoneira, antes de iniciar a mistura) e da incorporação de aditivo superplastificante na mistura de concreto.

A pré-molhagem dos agregados e a utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes são alternativas para manter a trabalhabilidade de concretos com agregados reciclados semelhante à de concretos convencionais, todavia o uso de aditivos aumenta o custo final do concreto e pode reduzir a vantagem econômica gerada pelo uso do agregado reciclado (QUEBAUD et al., 1999).

2.3.1.2 Massa específica

A massa específica do concreto está diretamente relacionada às massas específicas dos agregados utilizados na sua composição. Devido a menor massa específica dos agregados reciclados em comparação aos agregados naturais, observa-se em geral uma redução na massa específica dos concretos à medida que o percentual de substituição de agregados naturais por agregados reciclados aumenta.

Esse efeito de redução na massa específica dos concretos a partir do aumento do teor de substituição de agregados naturais por agregados reciclados foi relatado na pesquisa realizada por Nepomuceno, Isidoro e Catarino (2018). Os autores mostraram que os concretos com agregados reciclados de tijolo cerâmico apresentaram reduções nas massas específicas que variaram de aproximadamente 1% (para 10% de substituição) a 6% (para 75% de substituição), quando comparadas ao concreto convencional.

Nos estudos de Verian (2012) apud Verian, Ashraf e Cao (2018), o concreto com 100% de agregados reciclados de concreto apresentou massa específica média cerca de 5% menor que a observada no concreto convencional.

Thomas, Setién e Polanco (2016) observaram redução na massa específica de concretos com o aumento do percentual de agregados reciclados de resíduos de concretos de estruturas pré-moldadas. Os concretos com percentual de 50% e 100% de agregados reciclados apresentaram redução da massa específica de aproximadamente 3% e 4%, respectivamente, em comparação com o concreto convencional.

Rodrigues e Fucale (2014) realizaram estudos sobre concretos produzidos com agregado miúdo reciclado misto. Os autores relataram reduções de aproximadamente 1,7% e 4,7% nas massas específicas dos concretos com substituição de 50% e 100% de agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados, respectivamente, em comparação com o concreto convencional.

Na pesquisa realizada por Martínez-Lage et al. (2012), com o aumento do percentual de substituição, foi observada uma redução aproximadamente linear na massa específica dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados misto. O concreto com 100% de agregados graúdos reciclados exibiu massa específica 7,7% menor que o concreto convencional de referência.

De uma maneira geral, a literatura aponta uma tendência linear decrescente na massa específica dos concretos com o aumento no percentual de substituição de agregados naturais por agregados reciclados. Vários estudos mostram que a perda de desempenho dos

concretos reciclados está relacionada à menor massa específica destes, quando comparados aos concretos convencionais.

Pesquisas, como as realizadas por De Brito e Robles (2008) e De Brito e Alves (2010), mostram que os concretos com agregados reciclados de menor massa específica deram origem a concretos com os piores desempenhos mecânicos. Contudo, concretos produzidos com agregados reciclados com densidade entre 2,2 e 2,5 g/cm³ apresentam valores de resistência próximos aos do concreto convencional (TENÓRIO et al., 2012).

2.3.1.3 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto é considerada a propriedade mais importante do concreto, pois esta geralmente apresenta uma visão geral da qualidade do concreto, além de estar relacionada com outras propriedades (WAGIH et al., 2013).

Devido à natureza diversificada e à alta variabilidade dos agregados reciclados, podem ser observados, em pesquisas referentes à concretos com agregados reciclados, variados resultados para as características de resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados na sua composição. Na pesquisa de Bui, Satomi e Takahashi (2017), foram obtidos concretos com agregados reciclados com resistência à compressão maior ou igual ao concreto convencional quando substituídos até o percentual de 50% de agregados graúdos reciclados de concreto. Já nos estudos de Pedro, De Brito e Evangelista (2017) foi relatada uma redução no desempenho mecânico dos concretos produzidos com agregados reciclados. Segundo os autores, os concretos com teores de substituição de 25, 50 e 100% de agregados reciclados de concretos (nas frações miúda e graúda, simultaneamente) apresentaram reduções no valor das resistências à compressão aos 28 dias de aproximadamente 5, 17 e 19%, respectivamente, comparado ao concreto com agregados naturais (concreto convencional). Porém, é importante destacar que os valores de resistência à compressão obtidos pelos concretos com agregados reciclados foram satisfatórios, tendo em vista que estes atingiram resistências à compressão próximas ou superiores a 60 MPa, sendo suficiente para uso na maioria dos elementos estruturais.

Na pesquisa realizada por Thomas, Setián e Polanco (2016) foram obtidos resultados de resistência à compressão de concretos com agregados graúdos reciclados de resíduos de concretos de estruturas pré-moldadas superiores ao do concreto convencional. Os concretos com agregados reciclados apresentaram aumento da resistência à compressão com o aumento do teor de agregados reciclados, os quais foram usados na condição seca, porém com

incorporação de aditivo superplastificante na mistura. Os concretos com percentual de 50% e 100% de agregados graúdos reciclados apresentaram aumento da resistência à compressão em aproximadamente 3,3% e 5,2%, respectivamente, em comparação com o concreto convencional. Rodrigues e Fucale (2014) também relataram incremento de resistência à compressão de aproximadamente 15% e 12% em concretos com substituição de 50% e 100% de agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados misto, respectivamente. Na pesquisa, os autores utilizaram agregados reciclados na condição seca e optaram por aumentar o volume de argamassa da mistura para a obtenção da consistência desejada, não fazendo uso de aditivos na mistura dos concretos produzidos.

Os resultados obtidos nos estudos de Wagih et al. (2013) mostraram uma redução quase insignificante (2 a 4%) na resistência à compressão de concretos com 25% de substituição de agregados naturais por agregados graúdos reciclados de concreto de diferentes fontes. Para uma substituição de 50%, foi verificado uma redução de 6 a 13% na resistência à compressão. O aumento da taxa de substituição de agregados naturais por reciclados para mais de 50% levou a uma queda não linear na resistência à compressão dos concretos reciclados, que apresentaram redução de 15 a 23%, com relação à resistência à compressão apresentada pelo concreto convencional. A substituição de 100% dos agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto causou reduções de 18 a 28% nas resistências à compressão, quando comparados ao concreto convencional.

Utilizando resíduos de tijolos cerâmicos provenientes de indústria, González et al. (2017) relataram que os concretos com substituição de até 50% de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de tijolo tiveram desempenho semelhantes ao concreto convencional. Na pesquisa de Nepomuceno, Isidoro e Catarino (2018) foram relatadas perda de resistência à compressão do concreto de aproximadamente 5% com teor de substituição de AGN por AGR de tijolo cerâmico de até 10%; em seguida, foram observadas perdas de resistência à compressão menos pronunciadas, levando a uma redução de aproximadamente 11% para 75% de substituição de AGN por AGR.

Nas pesquisas realizadas por De Brito, Pereira e Correia (2005), Gomes, De Brito e Bravo (2013) e González et al. (2017) foram relatadas tendências lineares ou quase lineares de redução na resistência à compressão dos concretos com o aumento da relação de substituição de agregados naturais por agregados graúdos reciclados de tijolo cerâmico. Nos estudos de Martínez-Lage et al. (2012) também foi observado uma redução aproximadamente linear na resistência à compressão dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados misto com o aumento do percentual de substituição. Em comparação ao concreto convencional, foram

verificadas reduções na resistência à compressão de aproximadamente 12% e 23% para concretos com 50% e 100% de agregados graúdos reciclados mistos, respectivamente.

Nassar e Soroushian (2016) pesquisaram sobre o desempenho do concreto de agregados reciclados (CAR) na construção de pavimentos para tráfego de cargas pesadas e sujeito a condições climáticas severas. Os resultados mostraram que o CAR apresentou desempenho semelhante ou até melhor que o do concreto convencional correspondente. O aumento da resistência e durabilidade do CAR sugerem que seu uso na construção de pavimentos de concreto em infraestrutura seja adequado (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018).

De um modo geral, apesar da variabilidade das propriedades dos concretos reciclados, conclui-se que este tipo de concreto pode alcançar resultados de resistência à compressão equivalentes ou até superiores aos dos concretos convencionais quando utilizados agregados reciclados de alta qualidade. Vale ressaltar que a resistência à compressão dos concretos reciclados dependem especialmente da origem e da qualidade dos agregados utilizados, lembrando que os resultados mais satisfatórios em termos de propriedades mecânicas foram obtidos por concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de concreto e de tijolo cerâmico de alta qualidade.

2.3.1.4 Resistência à tração

Com relação à resistência à tração, há diversos estudos, como os citados ao longo deste subitem, os quais relatam a menor resistência dos concretos produzidos com agregados reciclados em comparação ao concreto convencional. Alguns estudos mostram que os concretos com agregados reciclados de concreto apresentam redução de até 10% na resistência à tração, em comparação com o concreto convencional, quando utilizados apenas agregados reciclados graúdos. No caso da substituição simultânea de agregados reciclados de concreto nas frações miúda e graúda, o concreto reciclado pode apresentar redução média na resistência à tração acima de 20%, com relação ao concreto convencional.

Na pesquisa de Katz (2003) apud Verian, Ashraf e Cao (2018), foi observado que a resistência à tração do concreto com agregados reciclados de concreto é, em média, 6% menor que a do concreto convencional.

Nos estudos de Pedro, De Brito e Evangelista (2017) observou-se uma redução da resistência à tração dos concretos a partir do aumento do teor de substituição de agregados naturais por reciclados na mistura de concreto. Os autores relataram que os concretos com

teores de substituição de 25%, 50% e 100% de agregados reciclados de concretos (nas frações miúda e graúda, simultaneamente) apresentaram reduções no valor das resistências à tração de aproximadamente 19%, 24% e 38%, respectivamente, comparado ao concreto convencional.

Wagih et al. (2013) também verificaram uma tendência decrescente da resistência à tração dos concretos com o aumento do teor de agregados reciclados. Os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto apresentaram redução na resistência à tração de 9% a 24%, em relação ao concreto convencional.

Nepomuceno, Isidoro e Catarino (2018) relataram uma redução máxima de 6,4% na resistência à tração dos concretos com até 30% de substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de tijolo cerâmico. Com substituição de 30% a 75% de agregados naturais por reciclados, foi observado uma queda de linear da resistência à tração dos concretos, com redução de 22,2% no concreto com 75% de agregados graúdos reciclados de tijolos cerâmicos.

Através de uma revisão da literatura sobre o efeito da introdução de agregados reciclados na resistência à tração do concreto, Silva, De Brito e Dhir (2015) concluíram que a perda na resistência à tração dos concretos é maior com o aumento do teor de substituição de agregados reciclados de tijolos cerâmicos, quando comparados com a de concretos contendo agregados reciclados de concreto. Contudo, vale ressaltar que nos estudos realizados por González et al. (2017) foram relatados ganhos de resistência à tração em concretos com até 30% de substituição, nas frações graúda e miúda simultaneamente, de agregados naturais por agregados reciclados de tijolos cerâmicos.

Thomas, Setién e Polanco (2016) também obtiveram resultados de resistência à tração de concretos com agregados graúdos reciclados de concretos de estruturas pré-moldadas superiores ao do concreto convencional. Os concretos reciclados apresentaram aumento da resistência à tração com o aumento do teor de agregados reciclados. Os concretos com percentual de 50% e 100% de agregados graúdos reciclados apresentaram aumento da resistência à tração em aproximadamente 32,9% e 38,6%, respectivamente, em comparação com o concreto convencional.

A resistência à tração dos concretos com agregados reciclados é uma das propriedades onde a incorporação de agregados reciclados apresenta o maior efeito de dispersão quando diferentes experimentos são comparados, pois alguns estudos relatam aumentos na resistência à tração, outros relatam redução. Em geral, observa-se que a resistência à tração dos concretos com agregados reciclados é inferior à dos concretos convencionais. No entanto, vale lembrar que as propriedades mecânicas dos concretos com agregados reciclados dependem

especialmente da origem e da qualidade dos agregados utilizados, podendo assim serem obtidos concretos reciclados com valores de resistência à tração equivalentes ou superiores aos dos concretos convencionais.

2.3.1.5 Absorção de água

Com relação à taxa de absorção de água, diversos estudos apontam que os concretos com agregados reciclados, em geral, apresentam os maiores valores, quando comparados aos concretos convencionais, devido ao fato da taxa de absorção dos agregados reciclados ser geralmente maior que a dos agregados naturais.

Na pesquisa de Pedro, De Brito e Evangelista (2017), os valores médios de absorção de água (aos 28 dias) obtidos para os concretos com teores de substituição de 25%, 50% e 100% de agregados reciclados de concretos (nas frações miúda e graúda, simultaneamente) foram de aproximadamente 14%, 16% e 20%, enquanto que o concreto convencional apresentou taxa de absorção de água de 11,94%. Ainda assim, os autores afirmam que, com relação à absorção de água, todos os concretos poderiam ser classificados como de boa qualidade, apesar dos altos valores apresentados, tendo em vista que os concretos apresentaram valores absolutos de absorção capilar menores que $0,1 \text{ mg} / \text{mm}^2 \text{ min}^{0.5}$.

Tenório et al. (2012) relataram valores de absorção de água que variam de 9,34% a 15,77% para concretos produzidos com agregados reciclados misto (provenientes de resíduos de cerâmica vermelha e concreto), enquanto que o concreto convencional de referência exibiu absorção igual a 5,85%; significando que os concretos com agregados reciclados apresentaram acréscimos nas taxas de absorção que variaram de 60% a 170% (aproximadamente), com relação à taxa de absorção exibida pelo concreto convencional.

Nos estudos de Rodrigues e Fucale (2014) foram observados aumentos de aproximadamente 10% e 24,4% nas massas específicas dos concretos com substituição de 50% e 100% de agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados mistos, respectivamente, em comparação com o concreto convencional.

Thomas, Setién e Polanco (2016) obtiveram resultados de absorção de água de concretos com agregados graúdos reciclados de resíduos de concretos de estruturas pré-moldadas menores que a do concreto convencional, divergindo da maior parte dos dados registrados na literatura supracitada. Os concretos com percentual de 25%, 50% e 100% de agregados graúdos reciclados apresentaram redução da absorção de água em aproximadamente 0,4%, 3,1% e 4,3%, respectivamente, em comparação com o concreto convencional.

Em pesquisa realizada por Kikuchi et al. (1988) apud Pedro, De Brito e Evangelista (2017), foram obtidas relações satisfatórias entre absorção de água dos agregados e as propriedades do concreto, de forma que os autores concluíram que o desempenho mecânico do concreto diminui com o aumento da absorção de água dos agregados.

De maneira geral, à medida que aumenta o teor de substituição de agregados reciclados, aumenta a absorção e diminui o desempenho mecânico dos concretos. Contudo, há estudos, como por exemplo os de Tenório et al. (2012) e os de Rodrigues e Fucale (2014), em que são relatados a obtenção de concretos com agregados reciclados com desempenho mecânico igual ou superior ao do concreto convencional, mesmo apresentando taxas de absorção mais altas que o concreto convencional de referência.

A partir dos resultados observados na literatura supracitada, nota-se que a obtenção de concretos reciclados com boas propriedades mecânicas é determinada pela qualidade dos agregados reciclados utilizados na produção destes concretos.

As resistências à compressão e à tração, módulo de elasticidade e a durabilidade dos concretos com agregados reciclados são, em geral, ligeiramente inferiores às dos concretos com agregados naturais (XU et al., 2017). A menor resistência do agregado gráudo reciclado, em comparação ao agregado gráudo natural, é o principal fator que contribui para a redução do desempenho mecânico do concreto (NEPOMUCENO; ISIDORO; CATARINO, 2018). Com isso, recomenda-se o limite máximo entre 30% e 50% de agregados gráudos reciclados em substituição aos agregados gráudos naturais. Contudo, não há limites gerais sobre o uso de agregados reciclados em uma mistura de concreto; assim, caso o projeto da mistura, a metodologia de dosagem e a condição de umidade dos agregados reciclados forem adequadamente manipulados, podem ser utilizadas misturas com 100% de agregados reciclados (VERIAN; ASHRAF; CAO, 2018). Em vários estudos citados anteriormente são relatados a obtenção de concretos com agregados reciclados com propriedades mecânicas semelhantes ou superiores as dos concretos convencionais.

Apesar da falta de confiança geral que tem limitado a utilização de concretos com agregados reciclados, tem sido observado um potencial significativo para aumento do uso deste tipo de concreto. Alguns países, especialmente Alemanha, Suíça e Austrália, já estão comercializando o concreto contendo agregado reciclado (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018).

Dados de diversas pesquisas mencionadas neste capítulo mostram que é possível produzir concretos com fins estruturais incorporando grandes quantidades de agregados reciclados, tanto na fração miúda quanto na fração gráuda (desde que garantida a qualidade),

tendo em vista que os concretos reciclados resultantes alcançam resultados comparáveis aos do concreto convencional.

CAPÍTULO 3
PARTE EXPERIMENTAL

3 PARTE EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados, a metodologia para o desenvolvimento dos concretos e preparação das amostras, e os ensaios realizados na caracterização dos agregados e na avaliação do desempenho dos concretos produzidos.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Agregados reciclados

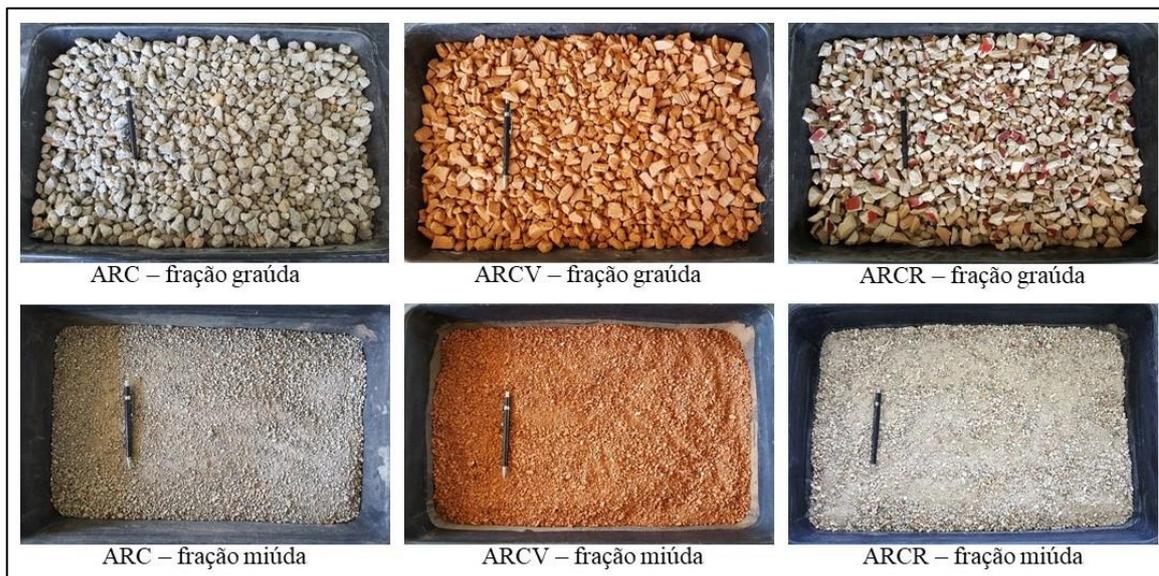
Foram utilizados agregados reciclados provenientes de RCD gerados por uma obra de construção residencial na cidade de Teresina, onde se realiza a separação dos diferentes tipos de resíduos gerados, como resíduos de concretos, de blocos cerâmicos, de cerâmicas de revestimento, metais, madeiras, plásticos e papéis. Os resíduos utilizados foram apenas aqueles provenientes de concretos, de blocos cerâmicos (cerâmica vermelha) e de cerâmicas de revestimento e argamassa, tendo em vista que a separação dos mesmos realizada ainda no canteiro de obras possibilitou a seleção na fonte dos resíduos a serem coletados e utilizados, eliminando assim, a ocorrência de resíduos indesejáveis.

Vale ressaltar que os resíduos de concreto e de cerâmica vermelha utilizados são provenientes de blocos pré-moldados de concreto para pavimentação e de blocos cerâmicos estruturais, respectivamente, que sofreram avarias e foram rejeitados durante o processo de execução, o que determinou a obtenção de agregados reciclados de boa qualidade. Os resíduos de cerâmica de revestimento e argamassa utilizados são provenientes de demolição de revestimentos cerâmicos aplicados com argamassa em paredes e fachadas.

Esses resíduos foram coletados manualmente e colocados em sacos de nylon, onde foram transportados para uma usina de beneficiamento de rochas, de propriedade particular da empresa BRITA, para a execução dos processos de britagem e peneiramento, realizados através de um britador de mandíbulas da marca METSO. Os diferentes tipos de resíduos foram britados e peneirados separadamente de acordo com a sua proveniência. Dessa forma, foram gerados os agregados reciclados (AR) iniciais de cada tipo de resíduo utilizado, os quais foram obtidos em duas frações (gráuda e miúda) análogas à dos agregados naturais. Assim, os diferentes tipos de agregados reciclados iniciais obtidos foram denominados de: agregado reciclado de concreto (ARC), agregado reciclado de cerâmica vermelha (ARCV) e agregado reciclado de cerâmica

de revestimento e argamassa (ARCR), cada um deles apresentando a fração graúda e miúda, como pode ser observado na Figura 2.

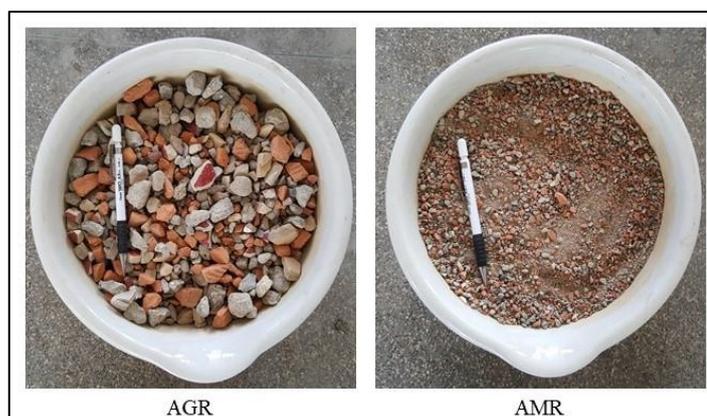
Figura 2 - Agregados reciclados iniciais.



Fonte: arquivo pessoal (2017).

A partir da mistura dos diferentes tipos de agregados reciclados graúdos iniciais e da mistura dos diferentes tipos de agregados miúdos reciclados iniciais, foram formados um único agregado graúdo reciclado (AGR) e um único agregado miúdo reciclado (AMR), respectivamente, ambos compostos em massa por 50% de ARC, 25% de ARCV e 25% de ARCR em suas respectivas frações. Dessa forma, foram obtidos os agregados reciclados graúdos e miúdos finais utilizados neste estudo, conforme pode ser observado o aspecto destes através das amostras apresentadas na Figura 3.

Figura 3 – Agregados reciclados finais: agregado graúdo reciclado (AGR) e agregado miúdo reciclado (AMR).



Fonte: arquivo pessoal (2017).

3.1.2 Agregados naturais

Foram utilizados brita e areia natural de rio, adquiridos em comércio local, como agregados graúdo natural (AGN) e agregado miúdo natural (AMN), respectivamente.

3.1.3 Cimento

Para a produção dos concretos foi utilizado o Cimento Portland CP II – 32 da marca POTY, adquirido em comércio local. Os dados referentes às propriedades químicas e físicas do cimento utilizado foram fornecidos pelo fabricante, os quais estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedade químicas e físicas do Cimento Portland CP II - Classe 32.

Propriedades químicas		Propriedades físicas		
Perda ao fogo (%)	4,48	Massa específica (g/cm ³)	2,97	
Teor de MgO (%)	3,06	Expansibilidade à quente (mm)	0,8	
Teor de SO ₃ (%)	3,19	Finura (%)	#200	2,1
Resíduos insolúveis (%)	2,23		#325	7,5
		Consistência normal (%)		26,8
		Blaine (cm ² /g)		3790
		Tempo de pega	início (min)	183
			fim (min)	236
		Resistência à compressão (MPa)	3 dias	24,3
			7 dias	30,7
			28 dias	38,2

Fonte: empresa Votoratim Cimentos – Boletim de Ensaio de Cimento (dezembro/2017).

3.1.4 Água

Para a produção dos concretos foi utilizada água potável proveniente do reservatório de abastecimento local do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Piauí.

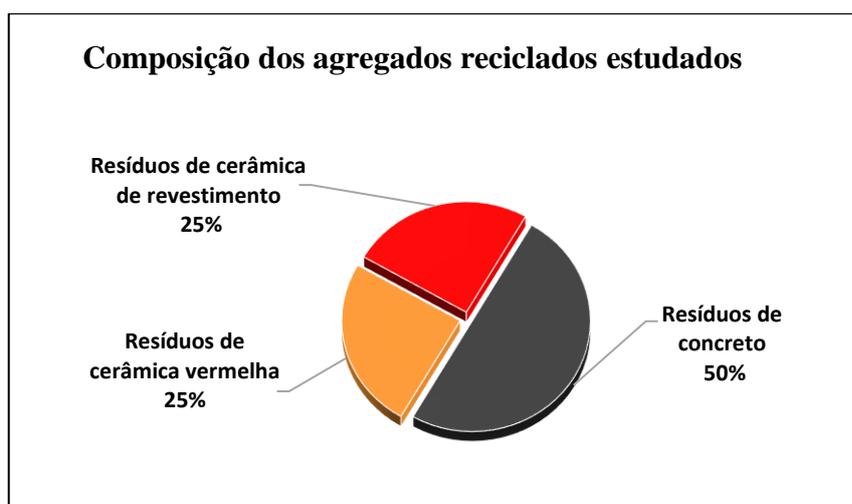
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

3.2.1 Propriedades dos agregados

3.2.1.1 Composição dos agregados reciclados

Conforme mencionado anteriormente, a obtenção separada dos diferentes tipos de agregados reciclados de acordo com a sua procedência e fração granulométrica (graúda e miúda) possibilitou a formação de agregados reciclados graúdo e miúdo finais com uma composição predefinida, ambos compostos em massa por 50% de agregados provenientes de resíduos de concreto, 25% de agregados provenientes de resíduos de cerâmica vermelha e 25% de agregados provenientes de resíduos de cerâmica de revestimento.

Figura 4 - Percentual em massa dos resíduos componentes dos agregados reciclados (graúdo e miúdo).



Fonte: arquivo pessoal (2017).

3.2.1.2 Composição granulométrica dos agregados

A composição ou distribuição granulométrica, de acordo com a NBR 9935:2011 – “Agregados – terminologia”, é definida como a distribuição percentual, em massa, das várias frações dimensionais de um agregado em relação à amostra de ensaio. É expressa pela porcentagem individual ou acumulada de material que passa ou fica retido nas peneiras da série normal e intermediária.

Nesta análise foi empregado o método de ensaio da NBR NM 248: 2003 - “Agregados – Determinação da composição granulométrica”, utilizando o conjunto de peneiras

de malhas quadradas a seguir: 25 mm; 19 mm; 12,5 mm; 9,5 mm; 6,3 mm; 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,6 mm; 0,3 mm e 0,15 mm. Para os agregados graúdos natural e reciclado (AGN e AGR) foram utilizadas amostras de 5 kg; e para os agregados miúdos natural e reciclado (AMN e AMR) foram utilizadas amostras de 1 kg, em conformidade com a massa mínima por amostra de ensaio indicada na Tabela 2, da referida norma. Como resultado para a representação granulométrica dos agregados, foram adotados os valores médios decorrentes de dois ensaios.

A partir do estudo da composição granulométrica dos agregados naturais e reciclados, miúdo e graúdo, foram calculados os módulos de finura, definido na NBR NM 248: 2003 como a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. O módulo de finura dos agregados serve para determinar o tamanho das partículas do agregado.

3.2.1.3 Massa específica e massa unitária dos agregados

As massas específicas dos agregados graúdos foram obtidas em conformidade com as recomendações da NBR 9937:87 - “Agregados – Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo – Método de ensaio”, utilizando-se o procedimento do Frasco Graduado com capacidade de 5000 mL. Para a realização dos ensaios foram empregados balança com resolução de 1 g, estufa, cesto de arame, recipiente para conter água, bandeja, peneira de malha 4,75 mm, panos e concha. Foram utilizadas amostras de 3 kg de agregados, em conformidade com a massa mínima por amostra de ensaio indicada na referida norma.

O cálculo da massa específica é realizado mediante a Equação 1:

$$\gamma_{AG} = \frac{m_a}{L_f - L_i} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

γ_{AG} = massa específica do agregado graúdo, em g/cm³;

m_a = massa da amostra seca, em gramas;

L_i = volume de água medida no frasco (inicial), em cm³;

L_f = leitura no frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo), em cm³.

Os resultados das massas específicas dos agregados graúdos (natural e reciclado) foram obtidos a partir da média de três determinações de cada tipo de agregado.

As massas específicas dos agregados miúdos foram obtidas de acordo com o método de ensaio NBR 9776:1987 - “Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman”. Este método de ensaio faz uso de balança de capacidade mínima de 1 kg e sensibilidade de 1 g ou menos, de frasco Chapman de vidro e de estufa. Foram utilizadas amostras de 500 g de material e 200 mL de água no frasco.

A massa específica do agregado miúdo é calculada pela Equação 2:

$$\gamma_{AM} = \frac{500}{L-200} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

γ_{AM} = massa específica do agregado miúdo, expressa em g/cm³;

L = leitura no frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo).

Os resultados foram obtidos a partir da média de três determinações das massas específicas de cada tipo de agregado miúdo (natural e reciclado).

As massas unitárias dos agregados miúdos e graúdos foram obtidas de acordo com o método de ensaio NBR NM 45/2006 - “Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios”. Este método de ensaio faz uso de balança com resolução de 50 g ou menos, haste de adensamento, recipiente cilíndrico fabricado com material não atacável pela umidade e suficientemente rígido, pá ou concha e placa de calibração e estufa.

A massa unitária dos agregados miúdos e graúdos é calculada pela Equação 3:

$$\rho_u = \frac{m_{ra}-m_r}{V} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

ρ_u = massa unitária do agregado, em kg/m³;

m_{ra} = massa do recipiente mais o agregado, em quilogramas;

m_r = massa do recipiente vazio, em quilogramas;

V = volume do recipiente, em m³.

Os resultados das massas unitárias dos agregados graúdos e miúdos (naturais e reciclados) foram obtidos pela média de três determinações, dividindo-se a massa do agregado pelo volume do recipiente utilizado.

3.2.1.4 Absorção de água dos agregados

As absorções dos agregados graúdos (natural e reciclado) foram obtidas em conformidade com as recomendações da NBR 9937:87 - “Agregados – Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo – Método de ensaio”, mencionada anteriormente para a determinação da massa específica dos agregados graúdos.

O cálculo da absorção é realizado mediante a Equação 4:

$$A = \frac{m_{SSS} - m}{m} \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

A = absorção de água, em porcentagem;

m_{SSS} = massa ao ar da amostra na condição saturado e superfície seca, em gramas;

m = massa da amostra seca em estufa, em gramas.

As absorções dos agregados miúdos foram obtidas de acordo com o método NBR NM 30:2001: “Agregado miúdo – Determinação da absorção de água”. Este método de ensaio faz uso de balança de capacidade mínima de 1 kg e precisão de 0,1 g, de um molde tronco-cônico metálico, haste de compactação metálica de 25 mm, estufa, bandeja metálica, espátula de aço e circulador de ar quente regulável. Foram utilizadas amostras de 1 kg de material. As absorções dos agregados miúdos (natural e reciclado) foram calculadas conforme a Equação 4.

Os resultados de absorção dos agregados foram obtidos a partir da média resultante de três determinações de cada tipo de agregado.

3.2.1.5 Teor de matéria orgânica e materiais pulverulentos dos agregados

As determinações dos teores de material pulverulento dos agregados foram realizadas de acordo com os procedimentos da norma NBR NM 46:2003 – “Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem”.

Materiais pulverulentos são considerados os materiais mais finos que a abertura da malha da peneira de 75 μm . Conforme a NBR NM 46:2003, as partículas de argila e outros materiais que se dispersam por lavagem, assim como materiais solúveis em água, serão removidos do agregado durante o ensaio.

Para a realização do procedimento por lavagem com água, utilizou-se conjunto de peneiras # 1,18 mm e # 0,075 mm, recipiente para lavagem do agregado, balança com resolução de 0,1 g, estufa e recipiente de vidro. Foram utilizadas amostras de aproximadamente 600 g de

material para os agregados miúdos, e amostras de aproximadamente 2500 g para os agregados graúdos.

O percentual de material pulverulento foi calculado pela Equação 5:

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

m = percentagem de material mais fino que a peneira de 75 μm por lavagem;

m_i = massa original da amostra seca, em gramas;

m_f = massa final da amostra seca após lavagem, em gramas.

Os resultados de teor de matéria orgânica e materiais pulverulentos foram obtidos a partir da média resultante de duas determinações de cada tipo de agregado.

3.2.1.6 Composição química dos agregados reciclados

O conhecimento das características químicas é de fundamental importância para o conhecimento do resíduo. A análise química do agregado foi realizada a partir da espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX). Nesta análise, para a realização dos ensaios, foram utilizadas amostras da fração fina de cada um dos agregados miúdos reciclados utilizados nesta pesquisa.

3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Neste trabalho foram produzidas cinco misturas de concretos. A Mistura 1 consiste em um concreto convencional de uso comum em estruturas de concreto em obras de engenharia, composta de cimento, água e agregados graúdo e miúdo naturais. O concreto resultante da Mistura 1 foi denominado de Concreto de Referência (CR), e utilizado como referência para comparação entre as propriedades dos concretos com agregados naturais e concretos com agregados reciclados. As Misturas 2, 3, 4 e 5 consistem em concretos que possuem teores iguais a 25%, 50%, 75% e 100% (em volume) de agregados reciclados em substituição dos agregados naturais, respectivamente. Os concretos resultantes das Misturas 2, 3, 4 e 5 foram denominados de Re-25, Re-50, Re-75 e Re-100, respectivamente. A substituição dos agregados naturais por agregados reciclados foi realizada nas frações graúda e miúda, simultaneamente, conforme dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição percentual de agregados nas misturas de concretos (em volume).

Composição percentual de agregados nas misturas (em volume)				
Tipo de concreto	AGN (%)	AGR (%)	AMN (%)	AMR (%)
CR	100	0	100	0
Re-25	75	25	75	25
Re-50	50	50	50	50
Re-75	25	75	25	75
Re-100	0	100	0	100

Fonte: arquivo pessoal (2017).

3.3.1 Dosagem dos concretos

Para a dosagem dos concretos foi utilizado o Método ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Este método utiliza as características do concreto requerido e as características dos materiais (cimento e agregados) para a determinação da relação água/cimento (a/c), e posteriormente determinação do consumo dos materiais e apresentação final do traço a ser utilizado. O processo consiste no uso do gráfico de curvas de Abrams do cimento para a obtenção do valor do fator água/cimento determinado a partir da relação entre a resistência média de dosagem aos 28 dias (f_{cj}) e a resistência normal do cimento aos 28 dias; posteriormente é obtido o consumo de água, determinado pela relação entre o diâmetro máximo do agregado graúdo e o abatimento do tronco de cone almejado; em seguida é determinado o consumo dos outros materiais (cimento e agregados), finalizando com a apresentação do traço.

O traço original foi desenvolvido para a obtenção do Concreto de Referência (concreto convencional) com valor de resistência característica à compressão de dosagem de 25 MPa aos 28 dias e abatimento de tronco de cone de 70 ± 10 mm. Através do método de dosagem utilizado, foi determinada a relação água/cimento no valor de 0,5 e obtido o traço final do concreto, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Traço unitário em massa utilizado na produção do Concreto de Referência (CR).

Traço unitário	Cimento	Areia	Brita	Água
1 : 1,72 : 2,83 : 0,5	1	1,72	2,83	0,5

Fonte: arquivo pessoal (2017).

A fim de analisar a influência da introdução de agregados reciclados em um concreto convencional e limitar o número de composições, foi mantido o mesmo traço do

concreto referência para o desenvolvimento dos concretos reciclados. Dessa forma, os traços para a produção dos concretos com agregados reciclados foram definidos a partir do traço unitário do concreto de referência, levando em consideração apenas o teor de substituição dos agregados naturais por agregados reciclados. Visto que os agregados reciclados possuem massas específicas inferiores aos dos agregados naturais, foi realizada a compensação de volumes através da redução da massa de agregados reciclados, calculada através da Equação 6. Assim, os traços dos concretos com agregados reciclados foram adequados para evitar que uma substituição simples de massa de agregado natural por agregado reciclado resultasse em um volume maior de mistura com material reciclado, o que resultaria na necessidade de incremento de cimento e água para produzir misturas equivalentes à do traço de referência, ou seja, àquele com agregados naturais.

Tabela 4 – Traços unitários em massa utilizados na produção dos concretos com agregados reciclados.

Tipo de concreto	Cimento	AMN (areia)	AMR	AGN (brita)	AGR	Água
Re-25	1	1,29	0,35	2,12	0,57	0,5
Re-50	1	0,86	0,70	1,42	1,14	0,5
Re-75	1	0,43	1,05	0,71	1,71	0,5
Re-100	1	0	1,40	0	2,28	0,5

Fonte: arquivo pessoal (2017).

$$M_{AR} = M_{AN} \times \frac{\gamma_{AR}}{\gamma_{AN}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

M_{AR} = Massa de agregado reciclado (kg);

M_{AN} = Massa de agregado natural (kg);

γ_{AR} = Massa específica do agregado reciclado (kg/dm³);

γ_{AN} = Massa específica do agregado natural (kg/dm³).

3.3.2 Preparo dos concretos

Após a realização da dosagem dos concretos, iniciou-se o preparo das misturas. Para compensar a alta absorção dos agregados reciclados, a qual pode reduzir a relação água/cimento efetiva das misturas e a trabalhabilidade dos concretos, optou-se por realizar a pré-molhagem do agregado graúdo reciclado por 10 minutos de imersão em água antes de

iniciar as misturas, a fim de evitar uma eventual redução da água de amassamento do concreto e auxiliar na obtenção de misturas com trabalhabilidade satisfatórias.

O procedimento utilizado para preparação do concreto referência foi o seguinte: inicialmente, colocava-se em betoneira o agregado graúdo e a água de amassamento, e misturava por um minuto; e em seguida, colocava-se o cimento e o agregado miúdo e misturava por mais três minutos na betoneira. Para a preparação dos concretos com agregados reciclados, inicialmente, colocava-se em betoneira os agregados graúdos natural e reciclado e a água de amassamento, e misturava por 1 minuto; em seguida, colocava-se o cimento e os agregados miúdos natural e reciclado e misturava por mais 4 minutos na betoneira.

Após a completa mistura dos materiais na betoneira, realizava-se a verificação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

3.3.3 Moldagem, adensamento e cura dos corpos de prova

Após a obtenção do concreto e verificação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, os corpos de prova foram moldados de acordo com as recomendações da NBR 5738:2003; Emenda 2008 – “Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova”. Para cada traço de concreto produzido, foram moldados 10 corpos-de-prova cilíndricos, utilizando formas metálicas de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, adensados manualmente em duas camadas, conforme prescrição da norma supracitada.

Durante as primeiras 24 horas, a cura dos corpos-de-prova foi realizada ao ar, e ao fim deste período, depois de desmoldados, os corpos-de-prova foram curados por imersão em água, onde permaneceram até a idade em que foram ensaiados. A Tabela 5 apresenta a quantidade de corpos-de-prova por tipo de ensaio que foram moldados para cada tipo de concreto produzido.

Tabela 5 - Resumo da quantidade de corpos-de-prova moldados para cada tipo de ensaio por traço de concreto produzido.

Ensaio	Idade do ensaio	Número de corpos de prova
Compressão axial	14 dias	2
	28 dias	3
Tração por compressão diametral	28 dias	2
Absorção	28 dias	3

Fonte: arquivo pessoal (2017).

3.4 ENSAIOS REALIZADOS NOS CONCRETOS

3.4.1 Consistência

O único ensaio realizado no concreto no estado fresco foi a medição da consistência do concreto através do abatimento do tronco de cone conforme a NBR NM 67:1998 – “Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”.

3.4.2 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial do concreto é uma das propriedades mais importantes para a avaliação do desempenho de um concreto para fins estruturais. Para a verificação da influência dos agregados reciclados na resistência à compressão axial dos concretos, foram realizados ensaios nas idades de 14 e 28 dias, de acordo com a NBR NM 5739:2007 – “Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos”.

Os resultados de resistência à compressão axial aos 14 e 28 dias foram obtidos a partir da média resultante de duas e três determinações, respectivamente.

3.4.3 Resistência à tração por compressão diametral

Para a avaliação da influência dos agregados reciclados na resistência à tração dos concretos, foram realizados ensaios aos 28 dias de idade, de acordo com a NBR NM 7222:2011 – “Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos”.

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral foram obtidos a partir da média resultante de duas determinações.

3.4.4 Absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos no estado endurecido

Para a determinação da absorção de água dos concretos, índice de vazios e massa específica dos concretos no estado endurecido, foram realizados ensaios aos 28 dias de idade, de acordo com a NBR 9778:2005 – “Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica”.

Os resultados de absorção, índice de vazios e massa específica foram obtidos a partir da média resultante de três determinações.

CAPÍTULO 4
RESULTADOS E DISCUSSÃO

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados das caracterizações e dos ensaios realizados.

4.1 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS

4.1.1 Composição granulométrica

Nas Tabelas 6 e 7, serão apresentados os resultados dos ensaios de distribuição granulométrica dos agregados utilizados neste estudo.

Tabela 6 - Composição granulométrica dos agregados graúdos natural e reciclado.

Composição granulométrica do agregado graúdo natural (AGN) - brita			Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado (AGR)		
Abertura das peneiras	Massa retida média	Massa retida acumulada	Abertura das peneiras	Massa retida média	Massa retida acumulada
(mm)	(%)	(%)	(mm)	(%)	(%)
25	0,00	0,00	25	0,00	0,00
19	0,32	0,32	19	2,88	2,88
12,5	85,56	85,88	12,5	37,60	40,48
9,5	13,08	98,96	9,5	15,04	55,52
6,3	0,96	99,92	6,3	24,44	79,96
4,75	0,04	99,96	4,75	15,84	95,80
2,36	0,00	99,96	2,36	0,00	95,80
1,18	0,00	99,96	1,18	0,00	95,80
0,6	0,00	99,96	0,6	0,00	95,80
0,3	0,00	99,96	0,3	0,00	95,80
0,15	0,00	99,96	0,15	0,00	95,80
Fundo	0,04	100,00	Fundo	4,20	100,00
Total	100,00		Total	100,00	
D. máx. (mm) =	19,0		D. máx. (mm) =	19,0	
Módulo de finura =	6,99		Módulo de finura =	6,33	

Fonte: arquivo pessoal (2017).

Tabela 7 - Composição granulométrica dos agregados miúdos natural e reciclado.

Composição granulométrica do agregado miúdo natural - areia			Composição granulométrica do agregado miúdo reciclado - AMR		
Abertura das peneiras	Massa retida média	Massa retida acumulada	Abertura das peneiras	Massa retida média	Massa retida acumulada
(mm)	(%)	(%)	(mm)	(%)	(%)
25	0,00	0,00	25	0,00	0,00
19	0,00	0,00	19	0,00	0,00
12,5	0,00	0,00	12,5	0,00	0,00
9,5	0,00	0,00	9,5	0,00	0,00
6,3	0,00	0,00	6,3	0,00	0,00
4,75	0,00	0,00	4,75	1,20	1,20
2,36	1,40	1,40	2,36	17,40	18,60
1,18	2,60	4,00	1,18	17,80	36,40
0,6	12,80	16,80	0,6	15,60	52,00
0,3	62,20	79,00	0,3	13,80	65,80
0,15	19,80	98,80	0,15	23,40	89,20
Fundo	1,20	100,00	Fundo	10,80	100,00
Total	100,00		Total	100,00	
D. máx. (mm) =	2,4		D. máx. (mm) =	4,8	
Módulo de finura =	2,00		Módulo de finura =	2,63	

Fonte: arquivo pessoal (2017).

Através da composição granulométrica dos agregados apresentados nas Tabelas 6 e 7, observou-se que o agregado gráudo natural (AGN) apresentou maior percentual passando na peneira # 19 mm e retida na peneira # 12,5 mm, sendo classificado como brita 1; e o agregado miúdo natural (AMN) apresentou maior percentual passando na peneira # 0,6 mm e retida na peneira # 0,3 mm, sendo classificado como areia muito fina.

De forma análoga aos agregados naturais, o agregado gráudo reciclado (AGR) foi classificado como AGR 1 (apresenta maior percentual passando na peneira # 19 mm e retida na peneira # 12,5 mm); e o agregado miúdo reciclado (AMR), foi classificado como AMR médio (apresenta grãos distribuído relativamente uniformes em todas as faixas da série normal entre as peneiras # 4,75 mm e a # 0,15 mm).

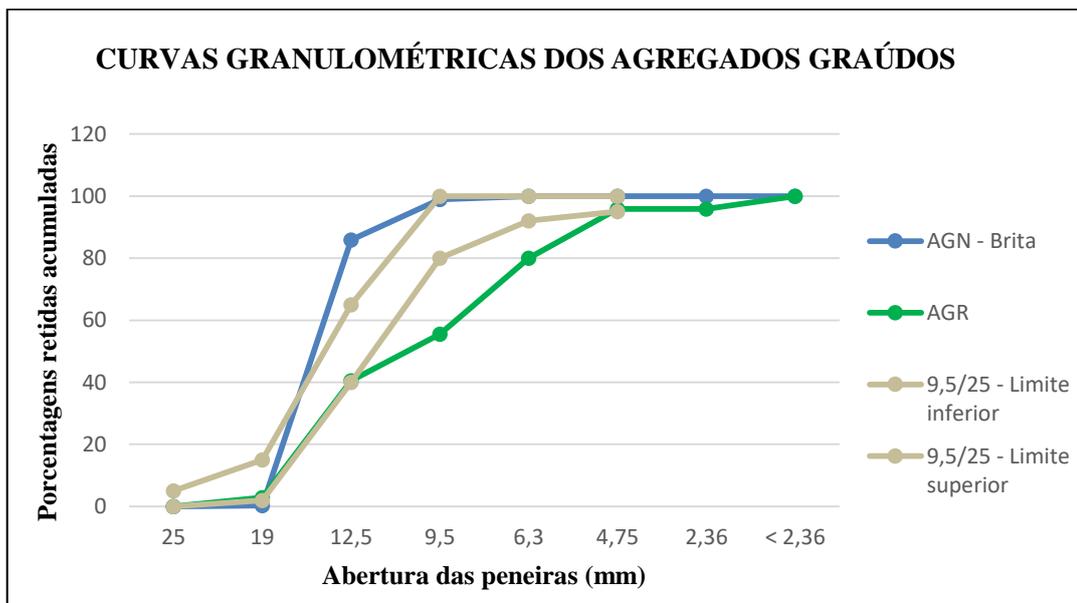
Os agregados gráudos natural e reciclado utilizados apresentaram distribuição granulométrica bem diferentes, conforme pode ser observado através da Tabela 6. O agregado gráudo reciclado apresentou módulo de finura menor que o do agregado gráudo natural,

significando que o tamanho de suas partículas é menor, o que aumenta a superfície específica dos agregados e, conseqüentemente, a necessidade de maior quantidade de água para uma mistura com a mesma consistência, em comparação ao agregado graúdo natural utilizado. Assim, o uso dos agregados graúdos reciclados pré-molhados pode ser uma alternativa viável para que a consistência dos concretos com agregados reciclados não seja muito afetada.

Os agregados miúdos natural e reciclado utilizados também apresentaram distribuição granulométrica bem diferentes, conforme pode ser observado através da Tabela 7. O agregado miúdo reciclado apresentou módulo de finura maior que o do agregado miúdo natural, significando que o tamanho de suas partículas é maior, o que diminui a superfície específica dos agregados e, conseqüentemente, a necessidade de menor quantidade de água para uma mistura com a mesma consistência, em comparação ao agregado miúdo natural utilizado. Tal característica do agregado miúdo reciclado favorece a redução da demanda de água na mistura para a manutenção das consistências dos concretos com agregados reciclados na mesma faixa de consistência adotada para o Concreto de Referência (CR).

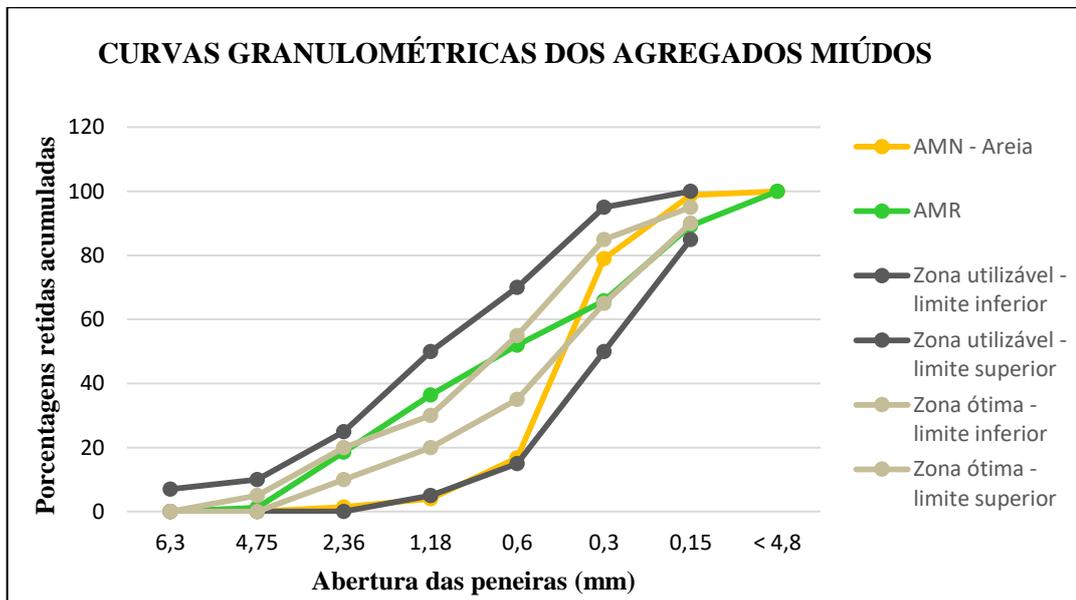
A seguir, através das Figuras 5 e 6, serão apresentadas as curvas granulométricas dos agregados graúdos e miúdos, respectivamente.

Figura 5 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos natural e reciclado e limites inferior e superior da brita 1 especificada pela NBR 7211:2009.



Fonte: arquivo pessoal (2017).

Figura 6 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos natural e reciclado e limites inferiores e superiores das zonas utilizável e ótima especificadas pela NBR 7211:2009.



Fonte: arquivo pessoal (2017).

Para os agregados graúdos natural e reciclado, as curvas granulométricas apresentadas na Figura 5 evidenciaram que estes, apesar de apresentarem tendência, não se encaixam completamente na zona granulométrica 9,5/25 especificada na NBR 7211:2009. Apesar disso, todos os agregados foram utilizados sem manipulações em sua granulometria.

As curvas granulométricas dos agregados miúdos natural e reciclado apresentadas na Figura 6 evidenciaram uma granulometria contínua para o agregado miúdo reciclado (AMR), exibindo uma curva dentro dos limites da zona ótima em quase toda a sua extensão; para o agregado miúdo natural (AMN), observa-se uma curva que coincide com o limite inferior da zona utilizável em grande parte da sua extensão, exibindo sua característica de material muito fino. A granulometria contínua, como a apresentada pelo agregado miúdo reciclado, é uma característica desejável para a produção de um concreto, pois permite um melhor arranjo entre as partículas do agregado, aumentando o efeito de empacotamento entre os grãos (LEITE, 2001).

4.1.2 Massa específica e massa unitária

Os resultados dos ensaios de massa específica e massa unitária dos agregados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Massa específica e unitária dos agregados graúdos e miúdos no estado solto.

Agregados	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)
AGN	2,778	1,568
AGR	2,359	1,272
AMN	2,622	1,423
AMR	2,500	1,148

Fonte: arquivo pessoal (2017).

Os resultados obtidos demonstraram que a massa específica do agregado graúdo reciclado (AGR) é cerca de 15% menor que a do agregado graúdo natural (AGN), enquanto que para o agregado miúdo reciclado (AMR) a massa específica é aproximadamente 5% menor que a do agregado miúdo natural (AMN). Com relação à massa unitária, os agregados reciclados miúdo e graúdo apresentaram valores cerca de 19% inferiores às respectivas massas unitárias dos agregados naturais miúdo e graúdo.

Os resultados de massa específica e unitária dos agregados confirmam a menor densidade dos agregados reciclados com relação aos agregados naturais. Confirmam também a necessidade de compensação das massas de agregados reciclados quando forem utilizados traços de concretos convencionais para misturas com agregados reciclados, a fim de evitar que hajam diferenças relativamente grandes nos volumes de concreto produzido.

4.1.3 Absorção de água

Na Tabela 9, estão apresentados os resultados dos ensaios de absorção dos agregados utilizados.

Tabela 9 - Absorção dos agregados graúdos e miúdos.

Agregados	Absorção (%)
AGN	0,76
AGR	7,48
AMN	1,01
AMR	10,47

Fonte: arquivo pessoal (2017).

Os agregados naturais apresentaram baixas taxas de absorção, diferentemente dos agregados reciclados, os quais exibiram taxas de absorção cerca de 10 vezes maiores que os agregados naturais. O agregado graúdo reciclado apresentou taxa de absorção de 7,48%,

enquanto que o agregado graúdo natural apresentou taxa de absorção de 0,76%. O agregado miúdo reciclado apresentou taxa de absorção de 10,47%, enquanto que o agregado miúdo natural apresentou taxa de absorção de 1,01%.

A maior absorção apresentada pelos agregados reciclados, juntamente com a menor densidade destes, em comparação com os agregados naturais, confirmam a maior porosidade dos agregados reciclados, indicando uma menor resistência, podendo contribuir para uma redução na resistência mecânica dos concretos produzidos com estes agregados. A maior absorção dos agregados reciclados indica que estes também podem interferir na consistência das misturas de concretos, caso não seja feita a compensação de água através da pré-molhagem dos agregados ou a utilização de aditivos superplastificantes na mistura.

4.1.4 Teor de matéria orgânica e materiais pulverulentos

Os resultados dos ensaios de teor de matéria orgânica e materiais pulverulentos dos agregados utilizados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Teor de matéria orgânica e material pulverulento dos agregados graúdos e miúdos.

Agregados	Teor de material pulverulento relativo à massa do agregado (%)
AGN	0,25
AGR	0,53
AMN	0,71
AMR	3,24

Fonte: arquivo pessoal (2017).

O agregado graúdo reciclado apresentou um teor de material pulverulento de 0,53%, cerca de 2 vezes maior que o teor observado no agregado graúdo natural, o qual apresentou teor de 0,25%. Contudo, tanto o agregado graúdo natural quanto o agregado graúdo reciclado apresentaram-se dentro do limite estabelecido pela NBR 7211:2009, que é de 1% para agregados graúdos.

O agregado miúdo reciclado apresentou um teor de material pulverulento de aproximadamente 3,24%, enquanto que o agregado miúdo natural apresentou um teor de 0,71%. O agregado miúdo natural apresentou-se dentro do limite aceitável pela NBR 7211:2009. Quanto ao agregado miúdo reciclado, este apresentou teor de material pulverulento dentro do limite aceitável para concretos protegidos do desgaste superficial (5%), contudo levemente

acima do limite máximo aceitável para concreto submetido a desgaste superficial (3%). Mesmo assim, os agregados reciclados foram utilizados sem manipulações.

Segundo Paula (2010), as partículas finas dos agregados, com quantidade até o limite recomendado pela norma, auxiliam no preenchimento dos vazios da argamassa. Porém, o autor afirma que o excesso dessas partículas na mistura do concreto poderá causar prejuízos às propriedades do concreto, pois o excesso de materiais pulverulentos demanda adição de uma maior quantidade de água para hidratação do cimento, o que provoca o aumento da quantidade de vazios e conseqüentemente a queda da resistência mecânica e da durabilidade dos concretos produzidos. Contudo, Rodrigues e Fucale (2014) afirmam que o material pulverulento presente em maiores quantidades nos agregados reciclados (principalmente na fração miúda) são compostos basicamente de material cimentício e podem gerar um efeito fíler, possibilitando o ganho de resistência dos concretos com agregados reciclados.

4.1.5 Composição química do agregado reciclado

Na Tabela 11 serão apresentadas as composições químicas dos agregados reciclados iniciais (ARC, ARCV e ARCR) utilizados nesta pesquisa.

Tabela 11 - Composição química dos agregados reciclados iniciais (ARC, ARCV e ARCR).

Agregados	Compostos – teor (%)										
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ag ₂ O	Outros
ARC	50,06	26,49	11,09	5,35	2,18	1,89	1,20	1,10	0,22	0,17	0,27
ARCV	63,19	2,16	20,50	7,03	2,93	0,15	1,22	2,34	0,10	0,11	0,29
ARCR	56,52	19,35	11,67	4,34	3,21	1,73	1,31	1,11	0,15	0,16	0,27

Fonte: arquivo pessoal (2017).

A Tabela 14 apresenta a composição química do agregado reciclado final utilizado (após mistura).

Tabela 12- Composição química do agregado reciclado final.

Agregado reciclado final	Compostos – teor (%)										
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	Ag ₂ O	P ₂ O ₅	Outros
	54,44	21,45	11,98	4,94	2,52	1,66	1,32	1,1	0,16	0,14	0,29

Fonte: arquivo pessoal (2017).

A sílica (SiO_2) é o principal óxido constituinte do agregado reciclado final utilizado, com teor de 54,44%. O óxido de cálcio (CaO) e a alumina (Al_2O_3) são os outros óxidos mais representativos, os quais apresentaram teores de 21,45% e 11,98%, respectivamente. A amostra apresentou teor de 4,94% de óxido de ferro (Fe_2O_3), entre outros óxidos menos representativos.

A origem da sílica (SiO_2) está associada, principalmente, aos concretos, argamassas e à cerâmica vermelha. O óxido de cálcio (CaO) está relacionado ao aglomerante (pasta de cimento endurecida e cal) presente em componentes construtivos, e aos agregados originais de rocha calcária. A alumina (Al_2O_3) está associada, principalmente, à presença da cerâmica vermelha, e secundariamente, à presença de cimento (presente em argamassas). O óxido de ferro (Fe_2O_3) está relacionado à cerâmica vermelha e também ao cimento (presente em argamassas e concretos) (ULSEN et al., 2010; ANGULO et al., 2009).

Os principais óxidos componentes dos agregados miúdos reciclados, SiO_2 , CaO , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , são também os principais óxidos presentes nos cimentos e no clínquer. Este fato indica o potencial dos agregados miúdos reciclados para auxiliar no aumento da resistência dos concretos, tendo em vista suas características de aglomerante que tendem a conferir uma elevada resistência à matriz do concreto.

4.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS

4.2.1 Consistência

Os resultados do abatimento de cada mistura de concreto estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

Tipo de concreto	Abatimento médio (mm)
CR	70
Re-25	80
Re-50	80
Re-75	50
Re-100	10

Fonte: arquivo pessoal (2017).

A faixa de abatimento de 70 ± 10 mm (adotada como parâmetro na dosagem do CR) foi exibida pelo CR e pelos concretos reciclados Re-25 e Re-50, os quais apresentaram um

incremento no abatimento com relação ao CR em virtude do uso dos agregados reciclados pré-molhados, não apresentando assim problemas quanto à consistência. No entanto, mesmo com a utilização dos agregados graúdos reciclados pré-umedecidos, os concretos Re-75 e Re-100 apresentaram abatimento médio abaixo da faixa desejada, em consequência da forma dos grãos (mais angular e lamelar), da textura superficial (mais rugosa e áspera) e da maior porosidade dos agregados, que afetaram a consistência da mistura desses concretos. Ainda assim, o concreto Re-75 apresentou uma trabalhabilidade relativamente aceitável. No entanto, o concreto Re-100 apresentou baixa trabalhabilidade.

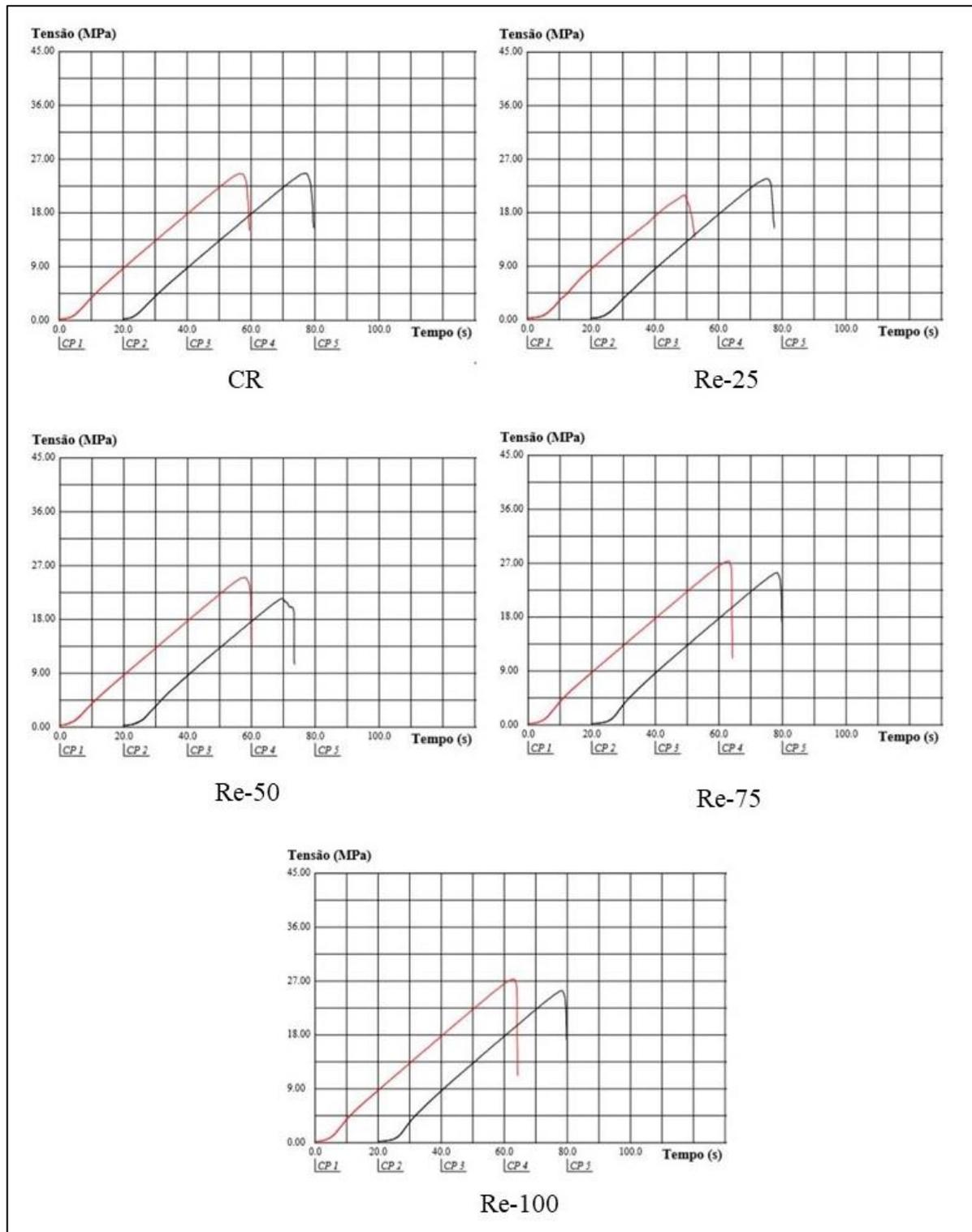
O uso do agregado miúdo reciclado contribui para o aumento na quantidade total de finos na mistura, favorecendo ao aumento dos valores de abatimento. Porém, o comportamento inverso é observado quando são utilizados agregados graúdos reciclados. Observa-se que à medida em que é aumentado o teor de agregado graúdo reciclado na mistura, as características das partículas de agregado graúdo tem sua influência negativa muito maior que o benefício trazido pelo aumento do teor de finos proporcionado pelo agregado miúdo reciclado, tornando inevitável a redução do abatimento do concreto (LEITE, 2001).

Rashwan e Abourizk citados por Leite (2001), afirmam que a trabalhabilidade dos concretos com agregados reciclados não depende especialmente da quantidade de água existente na mistura, como no caso dos concretos convencionais, mas sim da forma e da textura do agregado reciclado utilizado. A forma e a textura dos agregados reciclados podem proporcionar um maior travamento das misturas de concreto, inibindo a mobilidade das partículas que precisarão de uma maior quantidade de pasta para uma maior trabalhabilidade. Ressaltamos ainda que o ensaio do abatimento do tronco de cone não é suficiente para medir a trabalhabilidade dos concretos de agregados reciclados, tendo em vista que estes materiais apresentam misturas muito mais secas que as misturas de concretos convencionais (LEITE, 2001).

4.2.2 Resistência à compressão axial

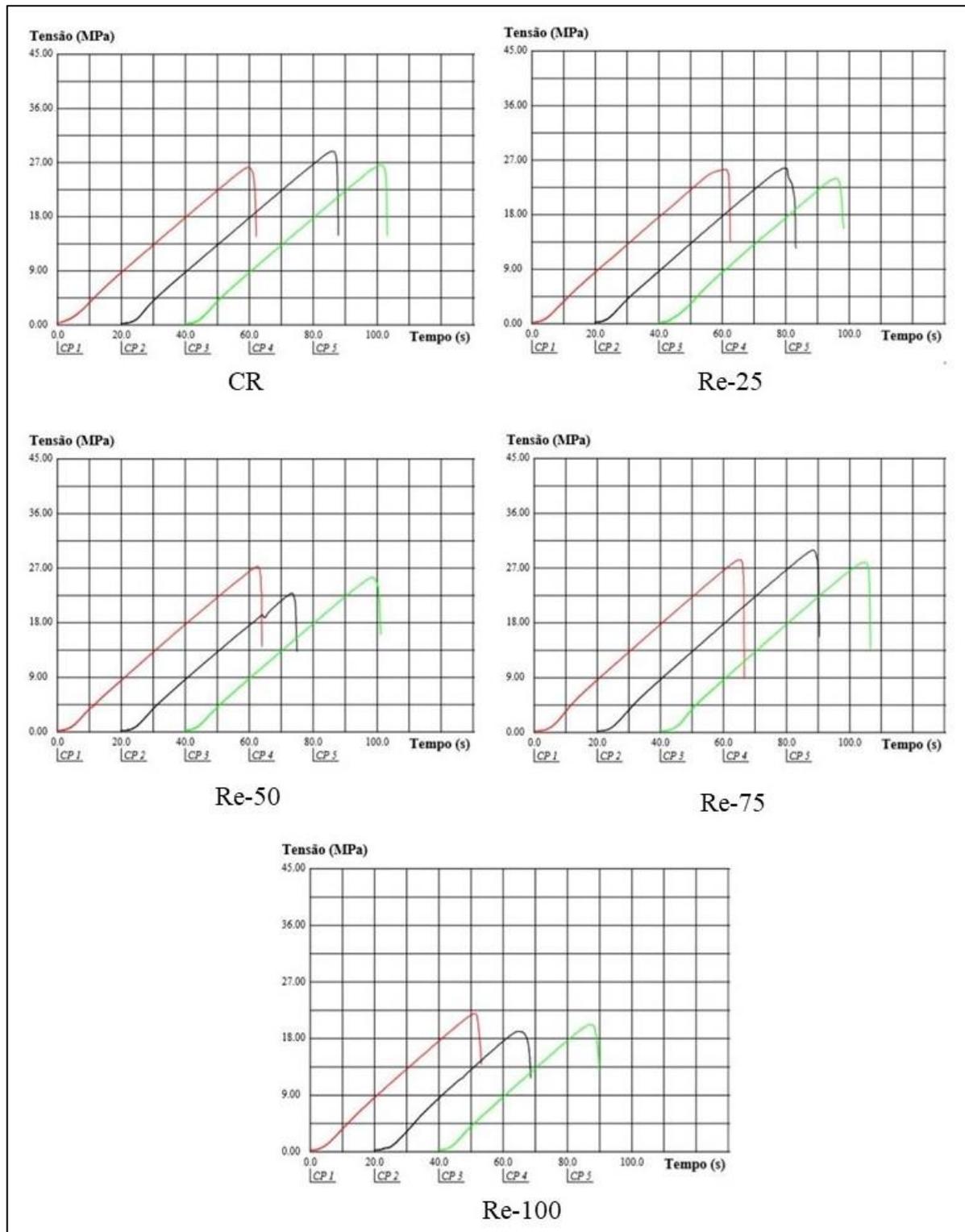
Através do ensaio de compressão axial dos concretos nas idades de 14 e 28 dias, foram obtidos os gráficos em linhas que relacionam o incremento de tensão de compressão ao tempo decorrido até a ruptura do material, os quais serão apresentados a seguir nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 - Resistências à compressão axial dos concretos aos 14 dias.



Fonte: arquivo pessoal (2017).

Figura 8 - Resistência à compressão axial do concreto aos 28 dias.



Fonte: arquivo pessoal (2017).

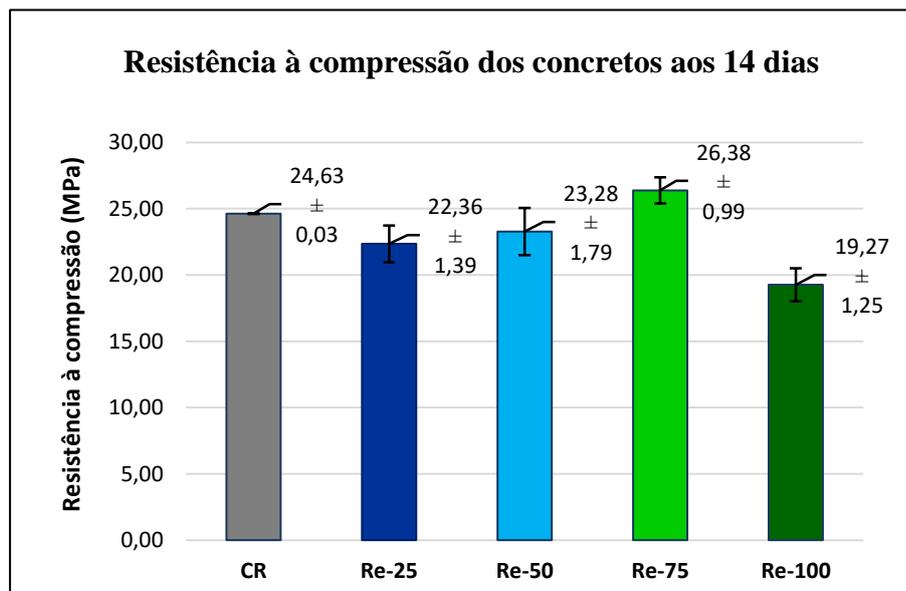
Os resultados de resistência à compressão axial média dos concretos estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 14 - Resistência à compressão axial dos concretos (média).

Tipo de concreto	Idade (dias)	
	14	28
	Resistência média (MPa)	Resistência média (MPa)
CR	24,62	27,25
Re-25	22,36	25,11
Re-50	23,28	25,22
Re-75	26,38	28,79
Re-100	19,27	20,48

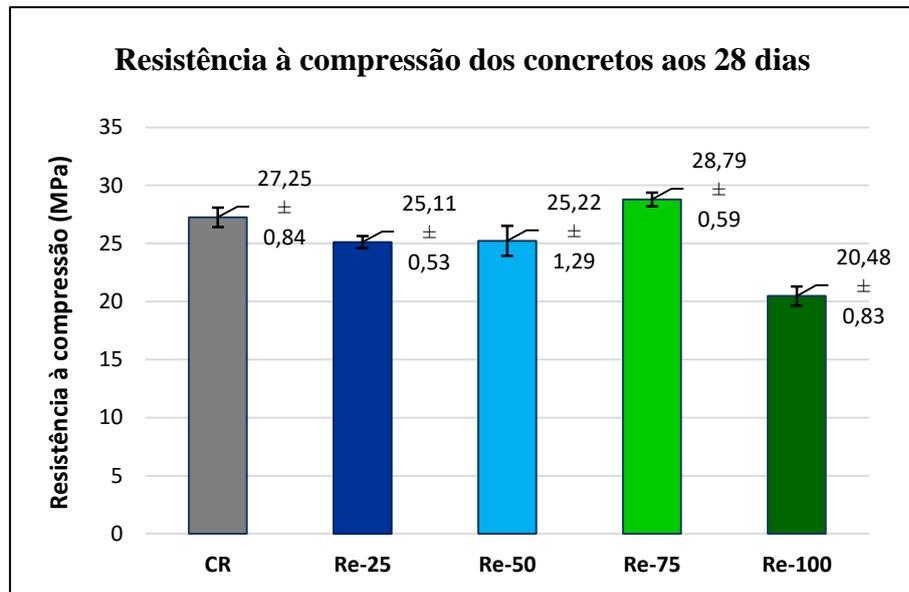
Fonte: arquivo pessoal (2017).

Nas Figuras 9 e 10 serão apresentados gráficos de colunas com o valor médio de resistência à compressão axial de cada tipo de concreto nas idades de 14 e 28 dias.

Figura 9 - Resistência à compressão axial dos concretos aos 14 dias de idade (média).

Fonte: arquivo pessoal (2017).

Figura 10 - Resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias de idade (média).



Fonte: arquivo pessoal (2017).

A partir das Figuras 9 e 10, pode-se observar que os concretos com agregados reciclados apresentaram resistências à compressão aos 14 e aos 28 dias próximas ou superiores ao concreto com agregados naturais (Concreto de Referência), com exceção do concreto com 100% de agregados reciclados, Re-100, o qual apresentou valores de resistência à compressão relativamente baixos em comparação ao CR.

A resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade é o parâmetro comumente utilizado para caracterizar a capacidade mecânica de um concreto. Com relação a este parâmetro, observou-se que os concretos com teor de substituição de 25% e 50% de agregados reciclados (Re-25 e Re-50, respectivamente) apresentaram resistências à compressão média aproximadamente 8% inferior à do Concreto de Referência (CR). O concreto com teor de substituição de 75% de agregados reciclados (Re-75) exibiu os melhores resultados, superando a resistência à compressão do CR em aproximadamente 6%. No entanto, os concretos com teor de substituição de 100% de agregados reciclados (Re-100) apresentaram uma redução da resistência à compressão de aproximadamente 25% com relação ao CR.

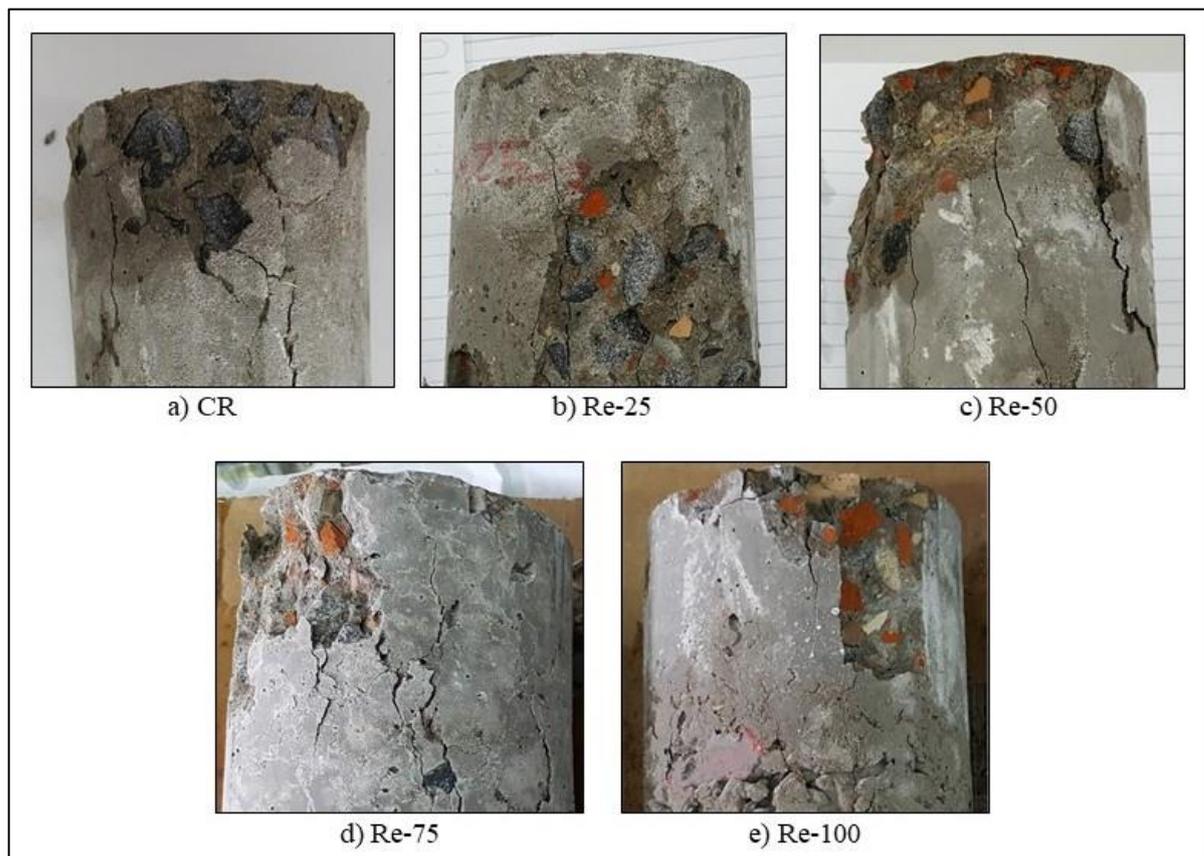
Apesar de terem apresentado valores de resistência à compressão menores que o Concreto de Referência, os concretos com teores de 25% e 50% de agregados reciclados (Re-25 e Re-50, respectivamente) atingiram valores de resistência à compressão média aos 28 dias acima de 25 MPa, superando assim a resistência característica à compressão de dosagem, não comprometendo, portanto, a eficácia do material quanto a esta propriedade. Dessa forma, todos

os concretos reciclados produzidos, com exceção do concreto com 100% de agregados reciclados (Re-100), apresentaram resultados de resistência à compressão axial satisfatórios. Ressalta-se ainda que o concreto Re-100, embora tenha apresentado resistência à compressão aos 28 dias abaixo da resistência característica à compressão de dosagem, exibiu resultado médio acima de 20 MPa, o que comprova seu potencial de utilização para concretos estruturais.

4.2.2.1 Padrões de falhas dos concretos

A seguir, na Figura 11, serão apresentadas imagens de exemplares dos corpos-de-prova de cada tipo de concreto produzido após a ruptura à compressão aos 28 dias de idade.

Figura 11 – Exemplares dos corpos-de-prova após ruptura à compressão aos 28 dias.



Fonte: arquivo pessoal (2017).

Com relação aos padrões de falhas, observou-se que a ruptura no concreto convencional (Concreto de Referência) aconteceu predominantemente na zona de transição de interface entre a pasta e o agregado (Figura 11a), mostrando que essa região é o ponto mais frágil do material e que os agregados naturais são mais resistentes que a pasta do concreto. Já nos concretos com agregados reciclados, a ruptura sobreveio predominantemente nos agregados

reciclados e também, nas zonas de transição de interface entre a pasta do concreto e os agregados naturais quando estes estavam presentes na composição desses concretos reciclados (Figuras 11b, 11c, 11d e 11e).

Leite (2001) afirma que os concretos com agregados reciclados apresentam melhora na zona de transição de interface entre a pasta do concreto e o agregado reciclado, fato que pode ser observado através das rupturas desses tipos de concretos, as quais aconteciam no agregado reciclado ao invés de acontecer na interface pasta/agregado, como é mais comum no concreto convencional. Dessa forma, um dos elos mais frágeis da mistura (interface pasta/agregado) passa a ser mais resistente nos concretos com agregados reciclados, o que pode causar um ganho de resistência do concreto com o aumento do teor de substituição de agregados reciclados.

A boa aderência entre a pasta do concreto e o agregado reciclado pode ser explicado através da maior angulosidade apresentada pelo material reciclado, o que significa que o mesmo possui maior área de superfície de contato que o agregado natural para que haja uma melhor aderência da pasta com o agregado (DEVENNY e KHALAF, citados por LEITE, 2001). A alta porosidade e o elevado teor de absorção apresentada pelos agregados reciclados também são fatores que podem propiciar uma boa aderência à matriz de concreto e um incremento de resistência entre as primeiras idades e os 28 dias. Além disso, entende-se que exista um efeito de cura interna do concreto, inerente as características dos agregados leves que apresentam alto teor de absorção, que pode favorecer ao ganho de resistência mecânica desses concretos (MACHADO JR. e AGNESI citados por LEITE, 2001).

Em análise aos resultados, considerando os padrões de falha dos concretos submetidos ao ensaio de compressão axial aos 28 dias, percebe-se que o fato dos agregados reciclados utilizados apresentarem menor massa específica, e conseqüentemente, maior porosidade e menor resistência que os agregados naturais provocou uma redução das resistências à compressão dos concretos com teores de 25% e 50% de agregados reciclados (Re-25 e Re-50, respectivamente), em comparação com o Concreto de Referência (CR). No entanto, com relação aos concretos reciclados, notou-se que estes concretos apresentaram ganho de resistência à compressão com o aumento do teor de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados até 75%. Isto pode estar relacionado com o efeito fíler gerado pelas partículas finas presentes em maiores quantidades nos agregados reciclados (principalmente na fração miúda), compostas basicamente de material cimentício, possibilitando o ganho de resistência dos concretos com agregados reciclados. Além disso, a melhora na zona de transição de interface entre a pasta do concreto e o agregado reciclado pode ter contribuído para o aumento da resistência do concreto, o que pode ser evidenciado através dos resultados obtidos

pelos concretos com teor de substituição de 75% de agregados reciclados (Re-75), cuja melhoria na zona de transição e na matriz do concreto começam a ser sentidas e a resistência do concreto com maior teor de agregados reciclados passa a ser maior que a dos concretos com baixo teor.

A perda de resistência à compressão apresentada pelo concreto com 100% de agregados reciclados (Re-100) ocorreu, principalmente, devido à presença de vazios de concretagem, observados após a desmoldagem dos corpos-de-prova, os quais foram provocados pela baixa mobilidade da mistura que dificultou a moldagem e o adensamento do concreto. Observou-se que, no concreto Re-100, houve uma ampliação do efeito de travamento da mistura provocado pelos grãos dos agregados reciclados (devido a forma mais angular e lamelar, textura superficial mais rugosa e áspera, e maior porosidade), que inibiram drasticamente a mobilidade das partículas, evidenciando a necessidade de uma maior quantidade de pasta para uma maior trabalhabilidade. Neste trabalho, optou-se por não fazer o ajuste do teor de argamassa das misturas a fim de não alterar os parâmetros fixos de dosagem para facilitar a compreensão dos efeitos causados pela substituição dos agregados naturais por reciclados em um determinado tipo de concreto convencional, e não alterar o custo final da mistura. Dessa forma, o concreto Re-100 teve suas propriedades afetadas pela baixa trabalhabilidade da mistura, mascarando assim um possível bom resultado quanto as propriedades de resistência mecânica caso a dosagem desse tipo de concreto fosse ajustada para as características específicas dos agregados reciclados utilizados.

4.2.3 Resistência à tração

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral média dos concretos estão apresentados na Tabela 17.

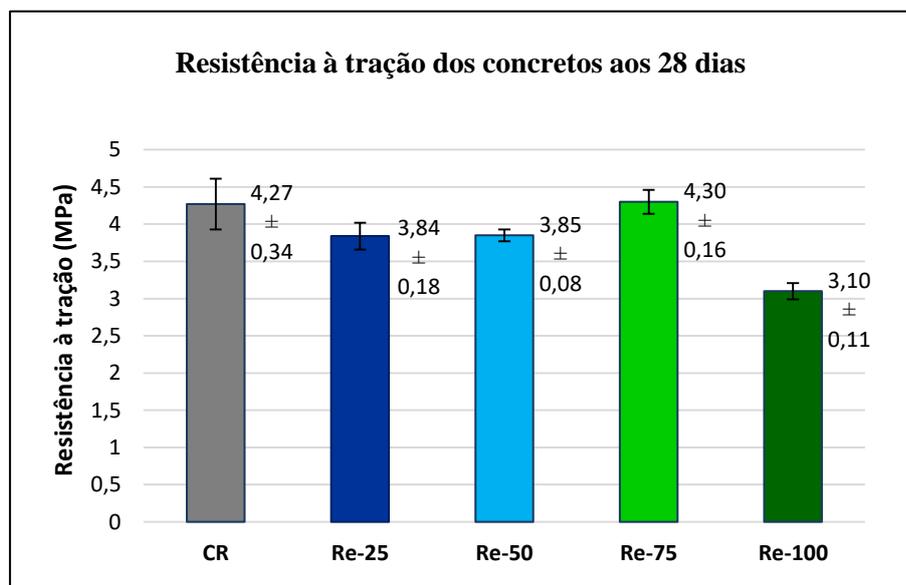
Tabela 15 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias de idade.

Tipo de concreto	Resistência média à tração (MPa)
CR	4,27
Re-25	3,84
Re-50	3,85
Re-75	4,30
Re-100	3,10

Fonte: arquivo pessoal (2017).

A seguir será apresentado o gráfico com o valor médio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de cada tipo de concreto.

Figura 12 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias de idade (média).



Fonte: arquivo pessoal (2017).

Na Figura 12 pode-se observar que, semelhantemente ao comportamento exibido nos ensaios de resistência à compressão, os concretos com agregados reciclados apresentaram resistências à tração próximas ou superiores ao concreto com agregados naturais (Concreto de Referência), com exceção do concreto Re-100, o qual apresentou valores de resistência à tração relativamente baixos em comparação ao Concreto de Referência (CR).

Os concretos reciclados Re-25 e Re-50 exibiram resistências à tração média aproximadamente 10% inferior à do Concreto de Referência. O melhor resultado foi obtido pelo concreto Re-75, o qual apresentou resistência à tração aproximadamente 0,7% maior que o Concreto de Referência. O concreto Re-100 apresentou uma redução da resistência à tração de aproximadamente 27% com relação ao Concreto de Referência.

Os concretos reciclados produzidos apresentaram resultados de resistência à tração satisfatórios levando em consideração às propriedades esperadas para concretos com resistência característica à compressão de dosagem de 25 MPa; dessa forma, os resultados mostraram que a inserção dos agregados reciclados não comprometeu a eficácia do material quanto a esta propriedade. Lembrando ainda da promissora melhoria de desempenho mecânico do concreto

com 100% de agregados reciclados (Re-100) a partir do ajuste da dosagem deste tipo de concreto.

4.2.4 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

A média dos resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 16 - Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos aos 28 dias de idade.

Tipo de concreto	Absorção média (%)	Índice de vazios médio (%)	Massa específica real (g/cm ³)
CR	5,84	13,19	2,604
Re-25	6,61	14,89	2,590
Re-50	8,03	17,29	2,576
Re-75	10,21	20,96	2,565
Re-100	12,63	23,75	2,468

Fonte: arquivo pessoal (2017).

Levy (2001) afirma que a absorção de água é a determinação do total de poros permeáveis na estrutura do concreto. Já o índice de vazios está relacionado a todos os poros existentes na estrutura do concreto. A absorção de água é um dos principais mecanismos de entrada de água no concreto endurecido, e a presença de água no concreto é imprescindível para que a maioria dos mecanismos de deterioração ocorra (HANSEN citado por LOVATO, 2007). Contudo, segundo Neville citado por Lovato (2007), a absorção não pode ser utilizada como parâmetro de qualidade do concreto, embora a maioria dos concretos considerados bons para uso apresente taxa de absorção inferior a 10%.

Analisando os resultados, nota-se um incremento na absorção e no índice de vazios dos concretos em função do aumento do teor de agregados reciclados, conforme apontado na literatura. Com relação ao CR, os concretos exibiram aumento na taxa de absorção de água e no índice de vazios de 13,18% e 12,89%, respectivamente, no caso do concreto Re-25, de 37,5% e 31,08%, respectivamente, no caso do concreto Re-50, de 74,83% e 58,91%, respectivamente, no caso concreto Re-75, e de 116,27% e 80,06%, respectivamente, no caso do concreto Re-100.

Tendo em vista a maior porosidade dos concretos produzidos com agregados reciclados, deve-se tomar bastante cuidado na concepção das misturas de concreto afim de evitar fissuras e reduzir problemas de durabilidade para aplicações estruturais.

Quanto à massa específica dos concretos, sabe-se que esta propriedade está diretamente relacionada à massa específica dos agregados. Assim, devido ao fato dos agregados reciclados apresentarem menores valores de massa específica que os agregados naturais, observa-se a redução da massa específica dos concretos em função do aumento do teor de agregados reciclados na mistura.

Em comparação com o Concreto de Referência (CR), os concretos reciclados apresentaram uma redução da massa específica de 0,54% para o concreto Re-25, 1,08% para o concreto Re-50, 1,5% para o concreto Re-75, e de 5,22% para o concreto Re-100. No entanto, notou-se que a redução da massa específica dos concretos reciclados não necessariamente, provocou a redução da resistência mecânica destes, uma vez que o concreto Re-75, embora tenha apresentado massa específica menor que as dos concretos CR, Re-25 e Re-50, exibiu os maiores valores de resistência à tração e compressão. Este fato pode ter relação com a significativa melhoria das características mecânicas da matriz do compósito para a determinada concentração de agregados reciclados, destacando o efeito fíler gerado pelas partículas finas presentes em maiores quantidades nos agregados reciclados, compostas basicamente de material cimentício, e a melhora na zona de transição de interface entre a pasta do concreto e o agregado reciclado, a qual passa a ser mais evidente, conforme mencionado anteriormente.

CAPÍTULO 5
CONCLUSÕES

5 CONCLUSÕES

A segregação dos diferentes tipos resíduos gerados, realizada na fonte geradora, possibilita a obtenção de diferentes tipos de agregados reciclados de acordo com sua proveniência, de forma a promover a redução da heterogeneidade da composição e o aumento da qualidade deste tipo de agregado, além de viabilizar a formação de agregados reciclados com composição predeterminada, conforme realizado neste estudo.

O agregado miúdo reciclado utilizado apresentou granulometria contínua, mostrando ser um agregado com características granulométricas desejáveis para a produção de concretos. Notou-se que o fato dos agregados reciclados apresentarem massa específica inferior à dos agregados naturais determinou a redução da massa específica dos concretos em função do aumento do teor de agregados reciclados nas misturas. Além disso, a alta taxa de absorção dos agregados reciclados resultou no aumento da absorção e do índice de vazios dos concretos em função do aumento do teor de agregados reciclados na mistura.

A utilização da pré-molhagem do agregado graúdo reciclado compensou a elevada taxa de absorção dos agregados reciclados e garantiu a trabalhabilidade dos concretos reciclados, com exceção do concreto com 100% de agregados reciclados, o qual apresentou baixa trabalhabilidade devido às características de forma, textura e porosidade dos grãos que intensificaram o efeito de travamento da mistura com este teor de agregados reciclados.

Em termos de propriedades mecânicas, todos os concretos reciclados apresentaram resultados de resistências à compressão e à tração satisfatórios, com exceção do concreto com 100% de agregados reciclados que apresentou uma significativa redução nas resistências à compressão e à tração, em comparação ao Concreto de Referência. O concreto com teor de substituição de 75% de agregados reciclados obteve os melhores resultados, apresentando resistências médias à compressão e à tração superiores às do Concreto de Referência. O concreto com 100% de agregados reciclados, embora tenha apresentado resistência à compressão abaixo da resistência característica de dosagem, exibiu resultado médio acima de 20 MPa, comprovando seu potencial de utilização para concretos estruturais.

As misturas de concretos com agregados reciclados tendem a demandar uma maior quantidade de pasta que as misturas com agregados naturais pelo fato dos agregados reciclados serem mais porosos. Dessa forma, o desempenho mecânico do concreto com 100% de agregados reciclados pode ser melhorado a partir do ajuste da dosagem, tendo em vista que a dosagem utilizada (realizada para concreto convencional) determinou uma mistura de baixa

trabalhabilidade que provocou problemas na moldagem dos corpos-de-prova, gerando vazios de concretagem que comprometeram a qualidade do concreto produzido.

Este estudo indica viabilidade na utilização de agregados reciclados de RCD em concreto convencional. Observou-se que não houve diferença significativa nas resistências à compressão e tração finais apresentadas pelos concretos com teor de até 75% de agregados reciclados. Contudo, ressaltamos que a aplicação de agregados reciclados em concretos estruturais requer um controle rigoroso na dosagem, além da necessidade de investigação ao que se refere a durabilidade desses concretos devido ao aumento da porosidade dos mesmos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 15116. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos.** Rio de Janeiro. 2004.

ABNT NBR NM 248. **Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2003.

ABNT NBR NM 30. **Agregado miúdo – Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2001.

ABNT NBR NM 45. **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2006.

ABNT NBR NM 46. **Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2003.

NBR, ABNT. 5738 - **Concreto- Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro, 2003.

ABNT NBR NM 5739. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2007.

ABNT NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2014.

ABNT, NBR. 7211. **Agregados para concreto-Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

ABNT NBR NM 67. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1998.

ABNT NBR NM 7222. **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2011.

ABNT NBR 9776. **Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1987.

ABNT NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2005.

ABNT NBR 9935. **Agregados – Terminologia**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2011.

ABNT NBR 9937. **Agregados – Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1987.

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição. Entulho. Disponível em: <<http://abrecon.org.br/entulho/o-que-e-entulho/>> Acesso em: 22 de abril de 2018.

ABRECON. Universidade Federal do Paraná. **Relatório de Pesquisa Setorial**. Paraná, 2015.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2016**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>>. Acesso em 10 de janeiro de 2018.

ANGULO, Sérgio Cirelli. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos. **Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo**. 2005.

ANGULO, Sérgio Cirelli et al. Chemical–mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. **Waste management**, v. 29, n. 2, p. 721-730, 2009.

ANGULO, S. C. et al. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. **In: V SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. CT – 206 – IBRACON, São Paulo**, 12f. 2002.

ANGULO, S.C.; JOHN, V. M.; ULSEN, C.; KAHN, H.; MUELLER, A. Separação óptica do material cerâmico dos agregados mistos de resíduos de construção e demolição. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.13, n. 2, p. 61-73, abr. / jun. 2013.

AKHTAR, Ali; SARMAH, Ajit K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262-281, 2018.

BARRETO, Ismeralda Maria Castelo Branco do Nascimento. Gestão de resíduos na construção civil. Aracaju: **SENAI/SE; SENAI/DN; COMPETIR; SEBRAE/SE; SINDUSCON/SE, 2005.**

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil (Literature review: reuse of construction and demolition waste in the construction industry). **Cerâmica**, v. 61, p. 178-189, 2015.

BRASILEIRO, Luzana Leite. Utilização de Agregados Reciclados Provenientes de RCD em Substituição ao Agregado Natural no Concreto Asfáltico. **Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Piauí, 2013.**

BRAVO, Miguel et al. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of cleaner production**, v. 99, p. 59-74, 2015.

BUI, Ngoc Kien; SATOMI, Tomoaki; TAKAHASHI, Hiroshi. Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 376-385, 2017.

CALVO, Nuria; VARELA-CANDAMIO, Laura; NOVO-CORTI, Isabel. A dynamic model for construction and demolition (C&D) waste management in Spain: **Driving policies based on economic incentives and tax penalties. Sustainability**, v. 6, n. 1, p. 416-435, 2014.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CHUNG, Shan-shan; LO, Carlos WH. Evaluating sustainability in waste management: the case of construction and demolition, chemical and clinical wastes in Hong Kong. **Resources, conservation and recycling**, v. 37, n. 2, p. 119-145, 2003.

CONTRERAS, M. et al. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 594-600, 2016.

COSTA, Inês de Almeida Cunha. Resíduos de Construção e Demolição: fatores determinantes para a sua gestão integrada e sustentável. **Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia**, 2014.

COSTA, Nébel da et al. Planejamento de programas de reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: uma análise multivariada. **Eng. sanit. ambient**, v. 12, n. 4, p. 446-456, 2007.

DE BRITO, Jorge; ALVES, Fátima. Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research. **Materials and Structures**, v. 43, n. 1, p. 35-51, 2010.

DE BRITO, J.; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 4, p. 429-433, 2005.

DE BRITO, J.; ROBLES, R. Methodology for the prediction of concrete with recycled aggregates properties. In: **Proceedings of the international conference on excellence in concrete production through innovation, London**. 2008. p. 477-488.

DE LIMA, José Dantas; GRANDE, Campina. PLANO DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DO MUNICÍPIO DE FORTALEZA-CE. 2006.

DI MARIA, Andrea; EYCKMANS, Johan; VAN ACKER, Karel. Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. **Waste Management**, 2018.

DURAN, Xavier; LENIHAN, Helena; O'REGAN, Bernadette. A model for assessing the economic viability of construction and demolition waste recycling—the case of Ireland. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 46, n. 3, p. 302-320, 2006.

FAVARETTO, Patrícia et al. Characterization and Use of Construction and Demolition Waste from South of Brazil in the Production of Foamed Concrete Blocks. **Applied Sciences**, v. 7, n. 10, p. 1090, 2017.

FERREIRA, Luis; DE BRITO, Jorge; BARRA, Marilda. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. **Magazine of Concrete Research**, v. 63, n. 8, p. 617-627, 2011.

FERREIRA, A. C. L. et al. Gestão de Resíduos Sólidos na Construção Civil. **Revista Pensar Engenharia**, v.2, n. 2., 2014.

FOLINO, Paula; XARGAY, Hernán. Recycled aggregate concrete—mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. **Construction and Building Materials**, v. 56, p. 21-31, 2014.

FONSECA, N.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, Luís. The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 6, p. 637-643, 2011.

FRAJ, Amor Ben; IDIR, Rachida. Concrete based on recycled aggregates—Recycling and environmental analysis: A case study of paris' region. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 952-964, 2017.

GOMES, M.; DE BRITO, J.; BRAVO, M. Mechanical performance of structural concrete with the incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 10, p. 04014076, 2013.

GONZÁLEZ, Jesús Suárez et al. Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 507-514, 2017.

GRATTAN-BELLEW, P. E. Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 1, p. 3-16, 1996.

GUALBERTO, Alane Bessa et al. Avaliação do uso de resíduos da construção civil reciclados como agregados do concreto em um pátio de compostagem. **Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa**. 2017.

HANSEN, Torben C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. **Materials and structures**, v. 19, n. 3, p. 201-246, 1986.

HUANG, Beijia et al. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 36-44, 2018.

DE OLIVEIRA, Maria Elane Dias et al. Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. **Eng Sanit Ambient**, v. 16, n. 3, p. 219-224, 2011.

JOHN, Vanderley M.; AGOPYAN, Vahan. Reciclagem de resíduos da construção. **São Paulo**, 2000.

KRÜGER, Patricia; PEREIRA, Eduardo; CHINELATTO, Adriana SA. INFLUÊNCIA DO AGREGADO RECICLADO NA DURABILIDADE DO CONCRETO: UMA REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA. **Revista Técnico-Científica**, v. 1, 2017.

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese de doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LEITE, Rafael Antonio et al. Usina de reciclagem de resíduos de construção e demolição do município de Passo Fundo-RS: avaliação da viabilidade econômica. **RECEN-Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 12, n. 1, p. 107-129, 2010.

LEVY, S. M. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. **Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.** São Paulo-SP, p. 194, 2001.

LI, Wengui et al. Effects of nanoparticle on the dynamic behaviors of recycled aggregate concrete under impact loading. **Materials & Design**, v. 112, p. 58-66, 2016.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto. Porto Alegre, 2007. 180p.** 2007. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LU, Weisheng. Estimating the Amount of Building-Related Construction and Demolition Waste in China. In: **Proceedings of the 18th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate.** Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. p. 539-548.

MARTÍNEZ-LAGE, Isabel et al. Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 171-176, 2012.

MCGINNIS, Michael J. et al. Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 258-269, 2017.

MENEGAKI, Maria; DAMIGOS, Dimitris. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, 2018.

NAKAJIMA, Shiro; FUTAKI, Mikio. National R&D Project to Promote Recycle and Reuse of Timber Constructions in Japan. **Deconstruction and Materials Reuse: Technology, Economic, and Policy**, p. 42, 2001.

NASSAR, Roz-Ud-Din; SOROUSHIAN, Parviz. Use of Recycled Aggregate Concrete In Pavement Construction. **The Journal of Solid Waste Technology and Management**, v. 42, n. 2, p. 137-144, 2016.

NEPOMUCENO, Miguel CS; ISIDORO, Rui AS; CATARINO, José PG. Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 284-294, 2018.

PAREKH, D. N.; MODHERA, C. D. Assessment of recycled aggregate concrete. **Journal of engineering research and studies**, v. 2, n. 1, p. 1-9, 2011.

PASCHOALIN FILHO, João Alexandre et al. Gerenciamento dos resíduos de demolição gerados nas obras de um edifício localizado na Zona Leste da Cidade de São Paulo/SP. **Desenvolvimento em questão**, v. 13, n. 30, 2015.

PAULA, Paulo Roberto Freire de et al. **Utilização dos resíduos da construção civil na produção de blocos de argamassa sem função estrutural**. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica de Pernambuco, Recife.

PAZ, Diogo HF; LAFAYETTE, Kalinny PV. Forecasting of construction and demolition waste in Brazil. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 8, p. 708-716, 2016.

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 294-309, 2017.

PEREIRA, Fátima Maria de Sousa. Diagnóstico da Geração de Resíduos da Construção Civil em Teresina. **Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Piauí**. 2015.

PINTO, Tarcísio de Paula. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. **São Paulo**, v. 189, 1999.

PINTO, T. P. Relatório PT 1 [juntado ao Processo 2002-0120.686-9 da Prefeitura do Município de São Paulo]. **São Paulo**, 2003.

POON, C. S. et al. Quantifying the impact of construction waste charging scheme on construction waste management in Hong Kong. **Journal of construction engineering and management**, v. 139, n. 5, p. 466-479, 2013.

QUEBAUD, M. R. et al. Influência do teor em agregados provenientes da reciclagem de materiais de demolição (agregados reciclados) na permeabilidade do concreto. In: **41º Congresso Brasileiro do Concreto. Salvador, Brasil**. 1999.

RODRIGUES, Clarissa Ribeiro de Sá; FUCALE, Stela. Experimental mix proportion of concrete made with recycled aggregate from civil construction waste. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 99-111, 2014.

RODRÍGUEZ, G. et al. Assessment of construction and demolition waste plant management in Spain: in pursuit of sustainability and eco-efficiency. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 16-24, 2015.

SARDÁ, M. C. **Diagnóstico do entulho gerado no município de Blumenau-SC: potencialidades de uso em obras públicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), UFSC, 129f. 2003.

SCHNEIDER, Dan Moche; PHILIPPI JR, Arlindo. Gestão pública de resíduos da construção civil no município de São Paulo. **CEP**, v. 3034, p. 050, 2004.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 108-118, 2015.

SILVA, Vinícius Arcanjo da; FERNANDES, André Luís Teixeira. Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) em Uberaba-MG. **Sociedade & Natureza**, v. 24, n. 2, 2012.

SOTO, Nicolle Talyta Arriagada et al. **Avaliação do uso de agregado de resíduo de construção civil nas propriedades do concreto no slump para fabricação de artefatos de concreto**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SOUZA, Márcia IB; SEGANTINI, Antonio AS; PEREIRA, Joelma A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, p. 205-212, 2008.

TAM, Vivian WY; SOOMRO, Mahfooz; EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272-292, 2018.

TAM, Vivian WY; TAM, Leona; LE, Khoa N. Cross-cultural comparison of concrete recycling decision-making and implementation in construction industry. **Waste management**, v. 30, n. 2, p. 291-297, 2010.

TENÓRIO, Jonathas Judá Lima et al. Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais. 2007.

TENÓRIO, Jonathas Juda Lima et al. Concrete produced with recycled aggregates. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, v. 5, n. 5, p. 692-701, 2012.

THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J. A. Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 536-546, 2016.

TORGAL, Fernando Pacheco; JALALI, Said. Construction and demolition (C&D) wastes. In: **Eco-efficient construction and building materials**. Springer, London, 2011. p. 51-73.

TOWNSEND, Timothy; WILSON, Christina; BECK, Blaine. The benefits of construction and demolition materials recycling in the United States. **University of Florida: Gainesville, FL, USA**, 2014.

ULSEN, Carina. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2011.

ULSEN, Carina et al. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. Rem: **Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 2, p. 339-346, 2010.

VERIAN, Kho Pin; ASHRAF, Warda; CAO, Yizheng. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, p. 30-49, 2018.

WAGIH, Ashraf M. et al. Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. **HBRC journal**, v. 9, n. 3, p. 193-200, 2013.

WANG, Yuyin; CHEN, Jie; GENG, Yue. Testing and analysis of axially loaded normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns. **Engineering Structures**, v. 86, p. 192-212, 2015.

XIAO, Jianzhuang et al. Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading. **Cement and Concrete Research**, v. 71, p. 46-55, 2015.

XU, Jin-Jun et al. Recycled Aggregate Concrete in FRP-confined columns: A review of experimental results. **Composite Structures**, v. 174, p. 277-291, 2017.

YANG, Won-Seok et al. Past, present and future of waste management in Korea. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 17, n. 2, p. 207-217, 2015.

YUAN, Hongping et al. A dynamic model for assessing the effects of management strategies on the reduction of construction and demolition waste. **Waste Management**, v. 32, n. 3, p. 521-531, 2012.

ZANGESKI, Dahiane dos Santos Oliveira et al. Estudo Comparativo Entre a Resistência à Compressão do Concreto com Agregado Convencional Calcário e com Agregados Recicláveis. **Ensaio e Ciência: C. Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 21, n. 2, p. 64-69, 2017.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os resultados, discussões e conclusões relatadas nesta pesquisa, alguns aspectos podem servir como ponto de partida para trabalhos futuros, entre os quais sugere-se:

- realizar estudos de métodos de dosagem que possam ser melhor adequados e aplicados aos concretos com agregados reciclados;
- realizar estudos dos mecanismos de transporte interno de água e a influência da pré-molhagem dos agregados reciclados nas propriedades do concreto, avaliando a maneira mais adequada para compensar a absorção dos agregados reciclados durante o preparo das misturas;
- avaliar as características da zona de transição de interface pasta/agregado dos concretos com agregados reciclados e sua influência nas propriedades mecânicas do concreto.
- analisar a influência que os materiais pulverulentos presentes em maior quantidade nos agregados reciclados exercem nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos;
- avaliar a durabilidade do concreto com agregados reciclados.