

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL

CAMILA FROTTE
CLARISSE SOPHIA ALEJANDRA DI NÚBILA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO NATURAL POR RCD**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2015

CAMILA FROTTE
CLARISSE SOPHIA ALEJANDRA DI NÚBILA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO NATURAL POR RCD**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. André Nagalli

CURITIBA
2015

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO NATURAL POR RCD

Por

**CAMILA FROTTE
CLARISSE SOPHIA ALEJANDRA DI NÚBILA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 03 de dezembro de 2015, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – André Nagalli, Dr.
UTFPR

Gustavo Macioski
UTFPR

Prof. José Alberto Cerri, Dr.
UTFPR

Prof. Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente ao professor André Nagalli por nos orientar no trabalho de conclusão de curso, por sua paciência, motivação, prontidão e pela serenidade transmitida para encaminharmos a pesquisa.

Ao Gustavo Macioski, José Cerri e Wellington Mazer pelas contribuições feitas na banca de TCC 1, e também ao longo do desenvolvimento do nosso trabalho, que foram importantes para nortear a pesquisa.

Ao Felipe Perreto pelo auxílio com os ensaios laboratoriais.

Ao Paulo Sabino por seu auxílio em questões operacionais que viabilizaram nosso trabalho.

Às professoras Janine e Vanessa e aos professores Arthur e Adauto, que contribuíram com nosso trabalho.

Ao gerente da USIPAR Rodrigo Lopes, pela disponibilização do agregado reciclado e também pelas informações que nos foram concedidas.

Eu, Clarisse, agradeço aos meus amigos e familiares, especialmente à Ângela, à Bruna e à Elis por todo o carinho, compreensão e por todo o suporte que me foi dado ao longo do curso e em especial no período do TCC.

Eu, Camila, agradeço aos meus pais pelo apoio, ao Carlos por toda a compreensão e ajuda.

RESUMO

FROTTE, Camila; DI NÚBILA, Clarisse Sophia Alejandra. Estudo das propriedades de concretos com substituição parcial de agregado natural por RCD. 2015. 86f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Produção Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

O setor da construção civil é um dos responsáveis pela geração de resíduos e pela extração de recursos naturais. De forma a contribuir com a sustentabilidade, nota-se a importância de estudos sobre as propriedades de resíduos de construção e demolição (RCD) de forma a incentivar a sua reciclagem, reduzindo o consumo de matérias primas naturais e a deposição de resíduos no meio ambiente. Assim, o presente trabalho trata do estudo das propriedades de concretos com substituição parcial de agregado natural por RCD. O agregado reciclado em questão é um tipo de bica corrida proveniente de uma usina de reciclagem de RCD, a Usinas de Recicláveis Sólidos Paraná (USIPAR), localizada em Almirante Tamandaré – PR. O agregado reciclado foi caracterizado quanto à sua granulometria e demais características físicas. A fração miúda do agregado reciclado foi escolhida para substituir o agregado natural para produção de concreto. Demais características desta fração foram estudadas, como teor de material pulverulento, massa específica e absorção de água. Foram produzidos concretos com diferentes taxas de substituição de agregado natural por agregado reciclado (0%, 25%, 50%). Foi avaliada então a influência do teor de substituição nas propriedades do concreto, sendo elas trabalhabilidade, absorção, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Verificou-se que o agregado em questão é classificado como misto, e que a granulometria da fração miúda é adequada para emprego em concreto, bem como seu teor de material pulverulento e absorção. Constatou-se que o aumento do teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado reduziu a trabalhabilidade, a massa específica seca e saturada do concreto e o módulo de elasticidade, bem como aumentou a absorção e o índice de vazios. A massa específica real do concreto não foi influenciada pelo teor de substituição. Com relação às resistências à compressão e à tração, a substituição de agregado natural pelo agregado reciclado levou a um decréscimo na resistência do concreto. O concreto com 50% de teor de substituição obteve uma maior resistência à compressão axial que o concreto com teor de substituição de 25%, e mesma resistência à compressão diametral que o concreto controle.

Palavras-chave: RCD. Agregado de resíduo misto. Agregado reciclado. Concreto.

ABSTRACT

FROTTE, Camila; DI NÚBILA, Clarisse Sophia Alejandra. Study of properties of concretes with partial replacement of natural aggregate by CDW. 2015. 86f. Course completion work – Civil Production Engineering, Civil Construction Department, Federal University of Technology – Paraná, Curitiba, 2015.

The civil construction sector is one of those responsible for waste generation and the extraction of natural resources. In order to contribute to sustainability, there is the importance of studies on the properties of construction and demolition waste (CDW) in order to encourage recycling, reducing consumption of natural raw materials and waste disposal on the environment. The present work deals with the study of properties of concrete with partial replacement of natural aggregate by CDW. The recycled aggregate in question is a type of crusher run aggregate from a CDW recycling plant, the Usinas de Recicláveis Sólidos do Paraná (USIPAR), located in Almirante Tamandaré - PR. The recycled aggregate was characterized in respect to their particle size and other physical characteristics. The fine fraction of recycled aggregate was chosen to replace the natural aggregate for concrete production. Other characteristics of this fraction were analysed, as pulverulent material content, specific weight and water absorption. Concretes were produced with different substitution rates of natural aggregate by recycled aggregate (0%, 25%, 50%). Then the influence of the replacement content in concrete properties was assessed, in respect to their workability, absorption, void ratio, specific weight, compressive strength, tensile strength by diametrical compression and elasticity modulus. It was found that the aggregate in question is classified as mixed, and that the granulometric distribution of the fine fraction of the recycled aggregate is suitable for use in concrete, as well as its pulverulent content and absorption. It was found that increasing the substitution rate of natural aggregate by recycled aggregate reduced the workability, the dry specific weight and saturated specific weight, and modulus of elasticity of concretes, as well as increased absorption and void ratio of concretes. The real specific weight of the concrete was not influenced by the replacement content. In regard to the compression and tensile strength, the replacement of natural aggregate by recycled aggregate led to a decrease in concrete strength. The concrete with a 50% replacement level obtained a greater compressive strength than the concrete with 25% replacement level, and the same tensile strength as the reference concrete.

Key-words: CDW. Mixed waste aggregate. Recycled aggregate. Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Resistência à compressão em função do efeito isolado do teor de substituição do agregado	25
Figura 2	Resistência à tração na flexão ($ft'F$) e por compressão diametral ($ft'D$) em função do efeito isolado de AMR	25
Figura 3	Efeito do teor de agregado reciclado miúdo de concreto na resistência à compressão do concreto	28
Figura 4	Efeito do teor de agregado reciclado miúdo de cerâmica na resistência à compressão do concreto	28
Figura 5	Fluxograma dos procedimentos metodológicos	34
Figura 6	Pilha de agregado de RCD em estudo	37
Figura 7	Detalhamento visual da pilha de agregado de RCD. a) Conduíte e tela plástica. b) Pastilha cerâmica e pedaço de louça sanitárias. c) Sacos plásticos. d) Madeira, espuma, borracha, arame e isopor. e) Revestimento cerâmico, papel e pedaço de concreto de grandes dimensões. f) Granito e capa de fio elétrico	38
Figura 8	Plano de amostragem do agregado de RCD	39
Figura 9	Amostra de agregado de RCD a ser caracterizado, previamente ao quarteamento	39
Figura 10	Quarteamento da amostra de agregado de RCD a ser caracterizado	40
Figura 11	Distribuição granulométrica do agregado natural miúdo, e zonas ótima e utilizável da NBR 7211:2009	43
Figura 12	Distribuição granulométrica do agregado natural graúdo, e zonas granulométricas da NBR 7211:2009	44
Figura 13	Contaminantes removidos na triagem da amostra AR Total 1	45
Figura 14	Distribuição granulométrica do agregado reciclado em sua totalidade	46
Figura 15	Distribuição granulométrica do agregado reciclado miúdo, e zonas ótima e utilizável da NBR 7211:2009	48
Figura 16	Distribuição granulométrica do agregado natural miúdo e do agregado reciclado miúdo	49
Figura 17	Distribuição granulométrica do agregado reciclado graúdo, e zonas granulométricas da NBR 7211:2009	50
Figura 18	Distribuição granulométrica do agregado natural graúdo e do agregado reciclado graúdo	51
Figura 19	Proporção das diferentes frações que compõem o agregado reciclado	52
Figura 20	Ensaio de caracterização realizados para cada fração de agregado	53
Figura 21	Ensaio de absorção do agregado reciclado miúdo. a) Secagem da amostra. b) Moldagem do tronco de cone	55
Figura 22	Molde metálico cilíndrico utilizado para a confecção dos corpos de prova	57
Figura 23	Relação de número de corpos de prova por tipo de ensaio de concreto	58
Figura 24	Prensa utilizada no ensaio de compressão axial	60
Figura 25	Prensa e dispositivo utilizados no ensaio de compressão diametral	61
Figura 26	Prensa e medidores de deformação com bases independentes utilizados no ensaio de módulo de elasticidade estático	62

Figura 27	Porções obtidas por meio do ensaio de composição do agregado reciclado graúdo passante na peneira 19mm e retido na 4,75mm. a) Grupo 1. b) Grupo 2. c) Grupo 3. d) Grupo 4	64
Figura 28	Porções obtidas por meio do ensaio de composição do agregado reciclado graúdo passante na peneira 63 mm e retido na 19 mm. a) Grupo 1. b) Grupo 2. c) Grupo 3. d) Grupo 4	65
Figura 29	Curva de absorção do agregado miúdo reciclado	69
Figura 30	Médias e erros padrão dos resultados de resistência à compressão axial do concreto aos 7 e 28 dias	74
Figura 31	Médias e erros padrão dos resultados de resistência à tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias	76
Figura 32	Médias e erros padrão dos resultados de módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Absorção de água dos agregados de concreto reciclados e naturais	31
Tabela 2	Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado natural miúdo, amostra 1 (AN Miúdo 1)	41
Tabela 3	Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado natural miúdo, amostra 2 (AN Miúdo 2)	42
Tabela 4	Módulo de finura do agregado natural miúdo	42
Tabela 5	Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado natural graúdo, amostra 1 (AN Graúdo 1)	43
Tabela 6	Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado natural graúdo, amostra 2 (AN Graúdo 2)	44
Tabela 7	Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado reciclado total, amostra 1 (AR Total 1)	45
Tabela 8	Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado reciclado total, amostra 2 (AR Total 2)	46
Tabela 9	Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado reciclado miúdo, amostra 1 (AR Miúdo 1)	47
Tabela 10	Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado reciclado miúdo, amostra 2 (AR Miúdo 2)	47
Tabela 11	Módulo de finura do agregado reciclado miúdo	48
Tabela 12	Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado reciclado graúdo, amostra 1 (AR Graúdo 1)	49
Tabela 13	Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado reciclado graúdo, amostra 2 (AR Graúdo 2)	50
Tabela 14	Teor de material pulverulento - Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural	54
Tabela 15	Absorção de água - Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural	55
Tabela 16	Resultado do ensaio de composição do agregado reciclado graúdo passante na peneira 19 mm e retido na 4,75 mm	63
Tabela 17	Resultado do ensaio de composição do agregado reciclado graúdo passante na peneira 63 mm e retido na 19 mm	65
Tabela 18	Resultado do ensaio de composição do agregado reciclado graúdo passante na peneira 63 mm e retido na 4,75 mm	66
Tabela 19	Resultado do ensaio de teor de material pulverulento do agregado natural graúdo e miúdo	66
Tabela 20	Resultado do ensaio de teor de material pulverulento do agregado reciclado miúdo	67
Tabela 21	Massa específica dos agregados utilizados nos concretos	67
Tabela 22	Massa unitária solta e compactada do agregado natural graúdo	68
Tabela 23	Absorção do agregado reciclado miúdo para diferentes tempos de imersão em água	68
Tabela 24	Abatimento de tronco de cone obtido pelos concretos com diferentes teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado	70
Tabela 25	Absorção dos concretos no estado endurecido	70
Tabela 26	Índice de vazios dos concretos no estado endurecido	71
Tabela 27	Massa específica seca dos concretos no estado endurecido	71

Tabela 28	Resultados dos ensaios de compressão axial do concreto aos 7 dias, em MPa	72
Tabela 29	Médias e erros dos resultados de resistência à compressão axial do concreto aos 7 dias, para as confiabilidades de 68,27% e 95,45%, em MPa	72
Tabela 30	Resultados dos ensaios de compressão axial do concreto aos 28 dias, em MPa	73
Tabela 31	Médias e erros dos resultados de resistência à compressão axial do concreto aos 28 dias, para as confiabilidades de 68,27% e 95,45%, em MPa	73
Tabela 32	Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias, em MPa	75
Tabela 33	Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias, em MPa	76
Tabela 34	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias, em GPa	77
Tabela 35	Médias e erros dos resultados de módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias, para as confiabilidades de 68,27% e 95,45%, em GPa	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AGR	Agregado Graúdo Reciclado
AMR	Agregado Miúdo Reciclado
AN	Agregado Natural
AR	Agregado Reciclado
ARC	Agregado de Resíduo de Concreto
ARM	Agregado de Resíduo Misto
CB	<i>Crushed Brick</i>
CC	<i>Crushed Concrete</i>
CDW	<i>Construction and Demolition Waste</i>
CP	Corpo de Prova
C _{Ref}	Concreto de Referência
C25%	Concreto com de 25% de teor de substituição de agregado natural por reciclado
C50%	Concreto com 50% teor de substituição de agregado natural por reciclado
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPV – ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
NBR	Norma Brasileira
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
USIPAR	Usinas de Recicláveis Sólidos Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Agregado Miúdo
a/c	Relação Água/Cimento
f_{cj}	Resistência de Dosagem do Concreto à Compressão
f_{ck}	Resistência Característica do Concreto à Compressão
$f_{t'D}$	Resistência à Tração por Compressão Diametral
$f_{t'F}$	Resistência à Tração na Flexão
M_{an}	Massa do Agregado Natural
M_{ar}	Massa do Agregado Reciclado
M_i	Massa da Amostra Saturada Imersa em Água
M_s	Massa da Amostra Seca
M_{sat}	Massa da Amostra Saturada
p	Agregado Graúdo
p_{rec}	Agregado Graúdo Reciclado
γ_{an}	Massa Específica do Agregado Natural
γ_{ar}	Massa Específica do Agregado Reciclado
γ_r	Massa Específica Real
γ_s	Massa Específica da Amostra Seca
γ_{sat}	Massa Específica da Amostra Saturada
S_d	Desvio Padrão de Dosagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO	16
1.1.1 Objetivos específicos.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	18
2.2 AGREGADOS RECICLADOS DE RCD E SUA APLICAÇÃO EM MISTURAS DE CONCRETO	21
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	34
3.1 COLETA DE AGREGADO RECICLADO	35
3.2 PREPARO DAS AMOSTRAS DE AGREGADO RECICLADO.....	38
3.3 ESCOLHA DO AGREGADO A SER UTILIZADO PARA SUBSTITUIR O AGREGADO NATURAL	40
3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS RECICLADO E NATURAL...	52
3.4.1 Natureza dos materiais constituintes.....	53
3.4.2 Teor de material pulverulento.....	53
3.4.3 Massa específica e massa unitária	54
3.4.4 Absorção de água	54
3.4.5 Absorção de água ao longo do tempo.....	55
3.5 PREPARO DAS AMOSTRAS DE CONCRETO	56
3.6 ENSAIOS DE CONCRETO	58
3.6.1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone.....	58
3.6.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	59
3.6.3 Resistência à compressão axial	60
3.6.4 Resistência à tração por compressão diametral	60
3.6.5 Módulo de elasticidade estático	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	63
4.1.1 Natureza dos materiais constituintes.....	63
4.1.2 Teor de material pulverulento.....	66
4.1.3 Massa específica e massa unitária	67
4.1.4 Absorção de água	68

4.1.5 Absorção de água ao longo do tempo.....	68
4.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS	69
4.2.1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone.....	69
4.2.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	70
4.2.3 Resistência à compressão axial	72
4.2.4 Resistência à tração por compressão diametral	75
4.2.5 Módulo de elasticidade estático	77
5 CONCLUSÃO	80
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS.....	82

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil pode ser considerado de suma importância para o desenvolvimento de uma cidade, estado ou país devido à sua influência social, econômica e ambiental, sendo, neste aspecto, o responsável por grande parte da extração de recursos naturais do planeta (GUSMÃO, 2008) e, como consequência, grande gerador de resíduos.

Portanto, a construção civil constitui um segmento que impacta consideravelmente o meio ambiente, em grande parte pelo consumo de matérias primas naturais, energia e pelos resíduos gerados, decorrente tanto de atividades de construção, reformas e reparos, quanto de atividades de demolição.

Sendo um dos setores que mais contribui com a geração de resíduos, a construção civil é responsável por cerca de 50 a 70% do volume de resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil (BRASIL, 2005). Considerando-se a média da massa de resíduos gerados por área construída, o Brasil atinge um índice de aproximadamente 300 kg/m², enquanto em países desenvolvidos este índice é inferior a 100 kg/m² (MONTEIRO *et al.*, 2001).

De acordo com Malia *et al.* (2011), a cerâmica e o concreto correspondem à maior porção de material inerte dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Ressalta-se que esse estudo não considerou os solos de escavação para o levantamento da composição dos resíduos.

Além dos impactos ambientais por conta dos resíduos gerados, a indústria da construção civil é uma grande consumidora de recursos naturais. De acordo com John (2000), no Brasil, de 15% a 50% do total recursos naturais explorados atendem a esta indústria.

Tendo em vista esse panorama, é necessário que medidas sejam tomadas visando tanto à minimização do volume de resíduos a serem depositados no ambiente, da extração de recursos naturais, como a reciclagem de RCD.

Num contexto nacional, a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307/02, que trata especificamente de resíduos da construção civil, e “*estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil*”, juntamente com as Resoluções CONAMA nº 348/04, nº 431/11 e a nº 448/12, aborda a reciclagem como destino obrigatório de resíduos pertencentes a

determinadas classes, como é o caso, por exemplo, de componentes de concreto e cerâmicos provenientes da construção, demolição, reformas e reparos de edificações (BRASIL, 2002; 2004; 2011; 2012).

Além disso, como uma maneira de normatizar e também de incentivar a utilização de materiais reciclados, foram criadas normas nacionais para o uso de agregados reciclados de resíduos de construção civil, como a NBR 15115:2004 (ABNT, 2004a) e a NBR 15116:2004 (ABNT, 2004b).

A utilização de RCD como agregados é objeto de estudo de pesquisadores, e dentre as aplicações desses agregados estão a sua utilização como sub-base de pavimentação, bem como sua incorporação em concreto, solo cimento e pavimentos (FERREIRA e PEREIRA, 2009).

No caso do uso de agregados reciclados para compor o concreto, dentre os estudos realizados, encontram-se: o uso de agregados reciclados de cerâmica vermelha em pavimento de concreto (CAVALLINE *et al.*, 2014); o uso de agregados reciclados para moldagem de blocos de pavimentação em concreto (POON *et al.*, 2002; POON e CHAN, 2007); e fabricação de blocos de concreto a partir de agregados reciclados (POON *et al.*, 2002); entre outros.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar as propriedades de concretos compostos por agregados reciclados de RCD.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Caracterizar o agregado reciclado a ser utilizado para produção de concreto.
- Definir a faixa granulométrica do agregado reciclado de RCD que irá compor o agregado a ser utilizado nos concretos.
- Avaliar propriedades mecânicas e físicas de concretos com diferentes teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado de RCD.

1.2 JUSTIFICATIVA

As consequências dos abusos ao meio ambiente, seja pelo uso exacerbado de recursos naturais, pela utilização incorreta de recursos ou pelos resíduos gerados, têm sido assunto de grande enfoque mundial. Tal fato gerou diversas iniciativas, tanto privadas quanto governamentais, visando reverter os processos de degradação ambiental.

Como é citado por Hill *et al.* (2001), duas alternativas para reduzir a utilização de produtos naturais na construção civil são: otimizar o uso destes ou utilizar materiais alternativos.

No âmbito da utilização de materiais alternativos, uma possível medida para mitigação dos impactos ao meio ambiente é a utilização de materiais reciclados a partir do RCD. Os resíduos gerados podem ser reciclados e utilizados na própria obra, ou também podem ser destinados a usinas de reciclagem.

Dentre as vantagens de se utilizar materiais reciclados a partir do RCD estão a diminuição da necessidade da alocação de áreas para a deposição desses resíduos, bem como minimização da possível destinação de RCD em locais inapropriados (FERREIRA e PEREIRA, 2009), bem como a redução na pressão por matérias primas naturais.

Sendo um dos materiais mais consumidos pelo setor da construção civil, os agregados constituem um importante material a ser produzido a partir do RCD. Além do fato de contribuir com a preservação do meio ambiente, o agregado proveniente de RCD apresenta menor custo de capital, de energia e, potencialmente, de transporte (KULAIF, 2001).

De maneira a contribuir para a sustentabilidade na construção civil, o presente estudo visa complementar o conhecimento sobre as propriedades de concretos com substituição de agregado natural por agregados oriundo de RCD, incentivando a sua reciclagem, e também auxiliando a diminuição da resistência por parte do setor da construção civil quanto à utilização desse tipo de agregado reciclado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Esse capítulo abordará sobre resíduos sólidos na construção civil de maneira geral, desde sua conceituação e classificação até sua composição e normativas para sua adequada gestão. Além disso, o capítulo compreende a aplicação de agregados reciclados de RCD em misturas de concreto, apresentando estudos realizados nos últimos anos sobre esses assuntos.

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

De acordo com a ABNT NBR 10004:2004, Resíduos Sólidos são resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição (ABNT, 2004c).

A NBR 10004:2004 tem por objetivo classificar os resíduos sólidos de acordo com a origem, a composição química e características, de forma a melhor gerenciá-los, diminuindo sua interferência no meio ambiente e na saúde pública (ABNT, 2004c).

A análise dos resíduos é realizada considerando-se a inflamabilidade, a corrosividade, a reatividade, a toxicidade e a patogenicidade. Por meio desses parâmetros, os resíduos são classificados, de acordo com a ABNT NBR 10004:2004 (ABNT, 2004c), em dois grupos, perigosos e não perigosos, sendo ainda este último grupo subdividido em não inerte e inerte, como apresentado a seguir:

- a) resíduos classe I – Perigosos. Aqueles que apresentam periculosidade;
- b) resíduos classe II – Não perigosos;
- c) resíduos classe II A – Não inertes. Podem apresentar biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
- d) resíduos classe II B – Inertes. Adequados aos padrões de potabilidade com relação à solubilidade de seus componentes.

Considerando-se o sistema de classificação citado, os RCD's, em sua maioria, podem ser classificados como resíduos classe II B (SILVA, 2011; SILVA e FERNANDES, 2012). Porém, podem ser classificados como classe I caso estejam

consideravelmente contaminados por resíduos considerados perigosos, como solventes e tintas, por exemplo (SILVA, 2011).

De acordo com a Resolução CONAMA nº 307/02, Resíduos da Construção Civil “são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha” (BRASIL, 2002).

A Resolução CONAMA nº307/02, bem como as devidas atualizações (Resoluções nº 348/04, nº 431/11 e nº 448/12), foram criadas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente visando a amenização dos impactos ambientais causados por RCD por meio da normalização da disposição de resíduos de acordo com sua classificação.

Por sua vez, a classificação do CONAMA baseia-se nas características de cada tipo de RCD, de acordo com o indicado a seguir:

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

objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Ainda, determinou-se que os geradores de resíduos seriam responsáveis pelo descarte adequado do material e incumbidos de elaborar Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, de acordo com as seguintes etapas da Resolução CONAMA nº 307/02:

I - caracterização: identificação e caracterização dos resíduos;

II - triagem: deve ser realizada na origem ou em áreas licenciadas para a disposição adequada de acordo com as classificações;

III - acondicionamento: isolamento dos resíduos até que seja transportado, garantindo as condições de reutilização e reciclagem, quando estas forem possíveis;

IV - transporte: deverá ser realizado em conformidade com as etapas anteriores e de acordo com as normas técnicas vigentes para o transporte de resíduos;

V - destinação: deverá ser prevista de acordo com o estabelecido na Resolução.

Em suma, a Resolução CONAMA nº 307/02 visa estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais (BRASIL, 2002).

Ao que refere-se à composição dos resíduos de construção e demolição, Leite (2001) afirma que fatores relevantes a serem considerados no estudo destes são: os sistemas construtivos, técnicas construtivas e disponibilidade de matéria prima em cada local.

Atentando-se ao fato de que uma edificação é composta por componentes de vários tipos e que, devido a isso, o canteiro de obras torna-se palco da realização de atividades com diversos materiais, mostra-se evidente o fato de que os resíduos oriundos da construção civil são muito heterogêneos e apresentam uma grande dificuldade de separação (LEITE, 2001).

Frisando ainda a diversidade de atividades e etapas geradoras de resíduos de construção, Nagalli (2014) detalha como fatores inerentes à geração de RCD para obras típicas brasileiras a mobilização, instalação de canteiro e serviços preliminares; atividades administrativas; escavação e terraplenagem; fundações e infraestrutura; superestrutura; escoramentos para lajes e vigas; impermeabilizações;

coberturas; alvenarias de fechamento e revestimentos internos e externos; instalações elétricas, hidráulicas, eletromecânicas, lógica ou gás; esquadrias; serralheria; vidraçaria; paisagismo e recreação; mobiliário; limpeza da obra; e, por fim, a desmobilização do canteiro.

Por meio de um estudo de caracterização do RCD total de uma obra típica brasileira que incluía como uma de suas etapas a terraplenagem, observou-se que a parcela dominante de resíduo é de concretos e argamassa (53%) e que a cerâmica vermelha engloba 9% da caliça produzida (HERNANDES e VILLAR, 2004, *apud* NAGALLI, 2014).

2.2 AGREGADOS RECICLADOS DE RCD E SUA APLICAÇÃO EM MISTURAS DE CONCRETO

De acordo com a Resolução CONAMA nº 307/02, agregado reciclado é definido como “material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia” (BRASIL, 2002).

No Brasil existem normativas que regem a utilização de agregados de RCD na construção civil, como a NBR 15115:2004 (ABNT, 2004a), referente a procedimentos para execução de camadas de pavimentação com agregado reciclado, que estabelece os critérios para execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos, bem como camada de revestimento primário.

Há também a NBR 15116:2004 (ABNT, 2004b), relativa a requisitos para utilização de agregado reciclado em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. Esta norma, por sua vez, classifica os agregados reciclados em duas categorias: agregado de resíduo de concreto (ARC) e agregado de resíduo misto (ARM). Esta classificação é realizada com base nos resultados do ensaio de composição dos agregados reciclados por análise visual, cujos procedimentos constam no Anexo A da norma. De acordo com estes procedimentos, os agregados devem ser separados em 4 grupos:

- Grupo 1: fragmentos que apresentam pasta de cimento endurecida em mais de 50% do volume;
- Grupo 2: fragmentos constituídos por rocha em mais de 50% do volume;
- Grupo 3: fragmentos de cerâmica branca ou vermelha, com superfície não polida, em mais de 50% do volume;
- Grupo 4: fragmentos de materiais não minerais de natureza orgânica como madeira, plástico, betume e materiais carbonizados, e de contaminantes como vidros, vidrados cerâmicas e gesso.

O agregado é classificado como ARC quando apresenta a soma dos percentuais dos grupos 1 e 2 maior ou igual a 90%, e como ARM, quando a soma dos percentuais dos grupos 1 e 2 menor que 90%. O teor de materiais não minerais é determinado como sendo a porcentagem obtida para o grupo 4.

No caso do uso de agregados reciclados para concreto não estrutural, a NBR 15116:2004 (ABNT, 2004b) orienta que estes sejam pré-molhados. A norma também conta com procedimentos para determinação do percentual de materiais não-minerais dos agregados reciclados miúdos por líquidos densos.

Cada vez mais os agregados reciclados de RCD vêm sendo empregados na construção civil, principalmente para compor misturas de concreto, porém, o setor da construção civil ainda apresenta certa resistência à ampla utilização de agregados reciclados nas obras.

Vários fatores contribuem para essa situação, como, por exemplo, a preocupação quanto à variabilidade do material produzido a partir de diferentes fontes (CAVALLINE *et al.*, 2014). Além disso, a resistência mecânica e o módulo de elasticidade de concretos compostos por agregados reciclados são geralmente inferiores se comparados a concretos constituídos por agregados naturais (FRANKLIN e GUMEDE, 2014). No caso de agregados reciclados de concreto, por exemplo, dentre os fatores que podem contribuir para a redução na resistência à compressão estão o tipo do concreto utilizado para obtenção dos agregados reciclados, a taxa de substituição de agregado natural por agregado reciclado, a proporção água-cimento e o teor de umidade dos agregados reciclados (FRANKLIN e GUMEDE, 2014). Além disso, a contaminação dos agregados de RCD influencia sua qualidade (UTS, 1999 *apud* MOTTA, 2005). De acordo com a Resolução CONAMA 307/02, os contaminantes são os resíduos pertencentes às classes B, C e D.

Diversos estudos vêm sendo realizados nos últimos anos sobre o emprego de agregados reciclados de RCD para compor misturas de concreto.

Poon *et al.* (2002), por exemplo, investigou o uso de agregados de RCD de concreto para produção de tijolos e blocos de pavimentação de concreto. Para a mistura de concreto foram utilizadas taxas de substituição em massa de agregados (gráudo e miúdo) de até 100%, com ou sem incorporação de cinzas volantes, sendo que a proporção foi de 45% de agregado reciclado miúdo, e 55% de agregado reciclado gráudo. Como resultado, demonstrou-se que taxas de substituição de agregados de 25% e 50% tiveram pequeno efeito na resistência à compressão dos elementos pré-moldados estudados, sendo que taxas maiores reduziram a resistência à compressão. No caso da resistência à flexão, o aumento na taxa de substituição de agregados levou a um aumento na resistência.

Ferreira (2013) estudou o potencial de aplicação de agregados reciclados de RCD de concreto, originário de uma usina de beneficiamento de resíduos de construção civil, em concretos estruturais a serem aplicados em lajes pré-moldadas. Foi realizado um estudo de dosagens, sendo que as taxas de substituição de agregado gráudo natural por agregado gráudo reciclado foram de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. A partir disso, foram determinadas dosagens (uma para cada teor de substituição de agregado) que contemplassem a resistência característica à compressão (f_{ck}) de 25 MPa. Os concretos confeccionados com essas dosagens passaram por caracterização físico-mecânica nos estados fresco e endurecido.

Verificou-se que o aumento da taxa de substituição de agregados levou à diminuição na resistência à compressão do concreto. Com base nos resultados dos ensaios de caracterização, o concreto reciclado com melhor desempenho e custo benefício foi selecionado para produção da laje pré-moldada com concreto reciclado. Neste caso, o concreto constituído por agregados reciclados selecionado possui taxa de substituição de agregado natural por agregado reciclado de 75%, e traço em massa de 1:2,06:0,74:2,21:0,50 (1:a:p:p_{rec}:a/c), e teor de aditivo hiperplastificante de 0,56%. O concreto de referência possui traço 1:2,01:2,89:0,50 (1:a:p:a/c), e teor de aditivo de 0,20%. As lajes pré-moldadas constituídas pelo concreto de referência e pelo reciclado foram submetidas a ensaio de flexão, e ambas possuíram deslocamentos muito inferiores ao limite recomendado por norma, quando aplicada a carga correspondente à combinação de ações quase permanente de serviço. Foi possível concluir que a laje construída com o concreto reciclado em questão atende

aos requisitos de resistência e deformação, demonstrando o potencial uso deste agregado reciclado em concretos estruturais (FERREIRA, 2013).

O emprego de agregados reciclados em pavimentação de concreto também vem sendo investigado. Cavalline *et al.* (2014) construíram uma seção de pavimento teste em concreto com agregado reciclado de tijolos de alvenaria, e outra em concreto convencional, de modo a possibilitar a comparação de suas propriedades. Resultados mostraram que o pavimento de controle e o composto por agregado reciclado exibiram propriedades no estado fresco e endurecido semelhantes, como o abatimento em tronco de cone, ar incorporado, módulos de ruptura e de elasticidade, e coeficiente de Poisson. Apesar de o pavimento composto por agregados reciclados ter apresentado uma maior resistência à compressão aos 28 dias, pode-se concluir que os resultados iniciais indicam que foram alcançadas propriedades mecânicas aceitáveis em ambos os pavimentos. A diferença de valores quanto à resistência à compressão pode ser atribuída ao fato de que no caso do pavimento controle foi utilizada uma relação água/cimento de 0,38, enquanto o pavimento de concreto com agregado reciclado, a relação foi de 0,35 (CAVALLINE *et al.* 2014). Outro fator a que pode ser possivelmente atribuída esta diferença é o maior volume de agregados grossos no caso do concreto composto por agregados reciclados, em comparação com o concreto convencional (CAVALLINE *et al.* 2014). Não foi observada fissuração em nenhum dos pavimentos durante as inspeções visuais realizadas nos primeiros 11 meses de serviço.

Leite (2001) também investigou a influência da utilização de agregados de RCD nas propriedades do concreto. O agregado reciclado utilizado em sua pesquisa é proveniente da britagem de RCD coletado no Aterro de Inertes da Zona Sul, da cidade de Porto Alegre, composto de material cerâmico (blocos, tijolos, telhas, revestimento de piso e parede), argamassa (revestimento e assentamento), concreto e pedras naturais. No laboratório, foram descartados papel, papelão, madeira, barras de aço, vidros, e outras impurezas. Em seu estudo, foram consideradas cinco relações *a/c* e cinco níveis de substituição, tanto do agregado miúdo reciclado, quanto do agregado graúdo reciclado, sendo que os níveis das variáveis e as combinações a serem executadas foram definidas através de um projeto estatístico. Foi observado que quanto maior o teor de substituição de agregado graúdo (AGR), menor era a resistência à compressão do concreto, enquanto que, quanto maior o teor de substituição do agregado miúdo (AMR), maior era a resistência (Figura 1).

Além disso, para altas relações a/c, a combinação de agregados reciclados miúdos e graúdos levou a concretos de maior resistência, sendo esta tanto maior quanto maior era o teor de substituição dos agregados.

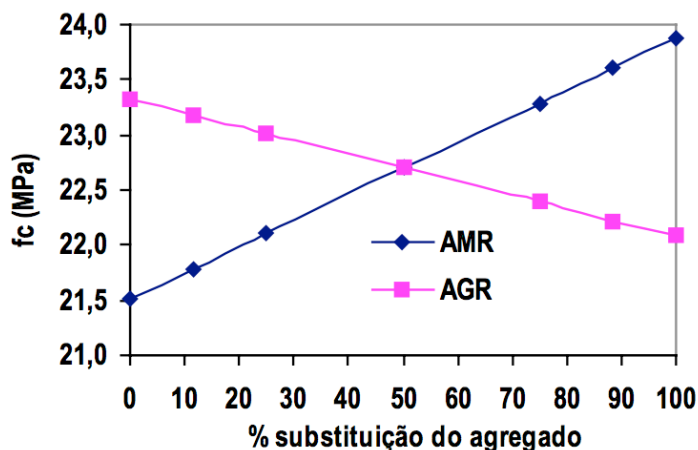


Figura 1 – Resistência à compressão em função do efeito isolado do teor de substituição do agregado.
Fonte: Leite (2001).

Leite (2001) também apresentou resultados para o efeito isolado do teor de agregado miúdo reciclado (AMR) na resistência à tração do concreto (Figura 2). Foi observado um crescimento da ordem de 16% para a resistência à tração na flexão, e de 14% para resistência à tração por compressão diametral.

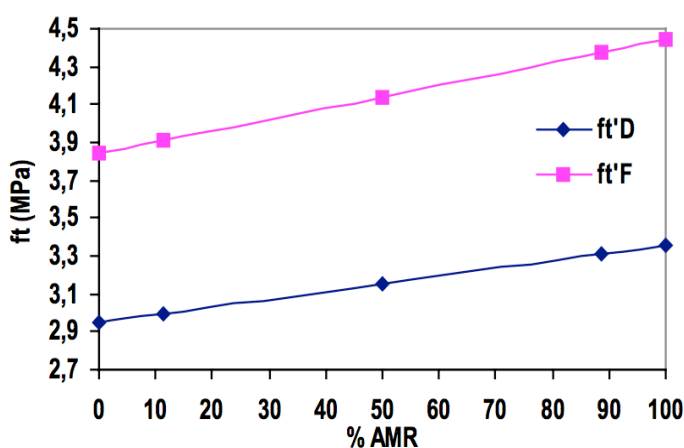


Figura 2 – Resistência à tração na flexão (ft'F) e por compressão diametral (ft'D) em função do efeito isolado de AMR.
Fonte: Leite (2001).

Ainda sobre o estudo de Leite (2001), quanto ao módulo de elasticidade dos concretos com agregados reciclados, foi observado que as variáveis que mais influenciaram os resultados foram a relação a/c e o teor de AGR. Foram observadas reduções nos valores por conta da porosidade do material reciclado (LEITE, 2001).

As reduções no módulo de elasticidade dos concretos com agregados reciclados são maiores quanto maiores as relações a/c e os teores de AGR utilizados na produção dos concretos (LEITE, 2001).

Cabral *et al.* (2007) realizaram uma modelagem da resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados de RCD. Agregados reciclados de concreto, argamassa e cerâmica vermelha foram utilizados, para produção de concreto, tanto miúdos como graúdos, em diferentes taxas de substituição de agregado natural por agregado reciclado. A relação água cimento também foi variada (0,4 a 0,8). De acordo com o modelo encontrado, constatou-se que, como consequência da substituição de agregado natural por agregado reciclado, tem-se uma diminuição na resistência à compressão do concreto, exceto no caso do emprego de agregado miúdo de cerâmica vermelha. No estudo foi encontrado um aumento na resistência à compressão em concretos compostos por agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha, em substituição ao agregado natural miúdo, em teores de 50% e 100%.

Uma possível explicação para esse aumento de resistência é o fato da superfície do agregado reciclado de cerâmica ser áspera, o que promove melhor ligação entre a matriz de cimento e os agregados reciclados (CABRAL *et al.*, 2007). Outra hipótese para o aumento de resistência é que a água absorvida pelos agregados, com o passar do tempo de mistura, torna-se disponível para a hidratação de partículas remanescentes de cimento que não foram hidratadas (CABRAL *et al.*, 2007). Essa hidratação adicional ocorre na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, aumentando assim a ligação entre a matriz de cimento e os agregados (KHALAF e DEVANNY, 2004). Outra razão para este incremento na resistência pode ser explicado pela ocorrência de reações pozolânicas devido à utilização de agregado miúdo de cerâmica vermelha, as quais melhoram a zona de transição entre a pasta e o agregado (LEITE, 2001), apontando para a característica cimentícia de resíduos de cerâmica vermelha.

A pozolanidade de resíduos de cerâmica vermelha foi investigada por Liu *et al.* (2014), que estudaram o efeito pozolânico do pó gerado a partir do processo de reciclagem de resíduo de demolição de concreto e tijolos de argila, e seu uso como suplemento para cimento no concreto. Concluíram que, se tanto a proporção de pó de tijolos de argila quanto a taxa de substituição forem bem projetadas, o pó híbrido pode fazer com que o concreto atinja requisitos de resistência e trabalhabilidade,

apresentando, portanto, um potencial de ser utilizado como um suplemento de cimento para o concreto. Vieira (2005) estudou o efeito pozolânico de resíduos de cerâmica vermelha moídos, comparando-os com uma pozolana convencional utilizada pela indústria de cimento. Foram moldadas amostras de argamassas e concretos com teores de substituição do cimento por cerâmica moída de 0%, 20% e 40% em peso, com a/c de 0,5. Embora houve uma redução na resistência à compressão dos concretos ao se utilizar cerâmica vermelha moída em substituição parcial do cimento, esta redução não foi proporcional ao teor de substituição utilizado. Para um teor de substituição de 40%, a resistência à compressão foi mantida em 89% com relação à do concreto convencional, que pode ser atribuído tanto pelo efeito pozolânico, quanto a seu efeito *filler* (VIEIRA, 2005).

Khatib (2005) estudou as propriedades de concreto contendo agregados reciclados miúdos de concreto moído e de tijolo moído. Foram produzidos concretos com os teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado de 0%, 25%, 50% e 100%, sendo a relação a/c igual a 0,5. Foi observada uma tendência de redução na resistência à compressão dos concretos à medida em que se aumentou o teor de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado, tanto de concreto (Figura 3) quanto de cerâmica (Figura 4). Percebeu-se também que após 28 dias de cura, a taxa de ganho de resistência à compressão dos concretos contendo agregados reciclados, tanto de concreto quanto de cerâmica, foi maior que a taxa do concreto controle, indicando a ocorrência de ação cimentante na presença de agregados reciclados miúdos (KHATIB, 2005). Quanto ao módulo de elasticidade, constatou-se que a substituição de agregado natural por agregado reciclado resultou em uma diminuição do módulo de elasticidade do concreto, sendo que esta redução está associada com o aumento do teor de substituição (KHATIB, 2005). Verificou-se que os concretos que compostos por cerâmica britada, ou CB, (*crushed brick*) atingiram maiores módulos de deformação em comparação aos concretos compostos por concreto britado, ou CC (*crushed concrete*) (KHATIB, 2005).

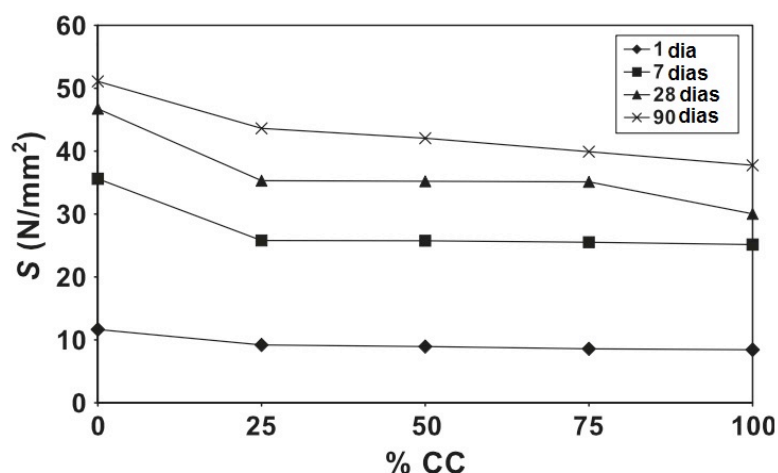


Figura 3 – Efeito do teor de agregado reciclado miúdo de concreto na resistência à compressão do concreto.
Fonte: Khatib (2005).

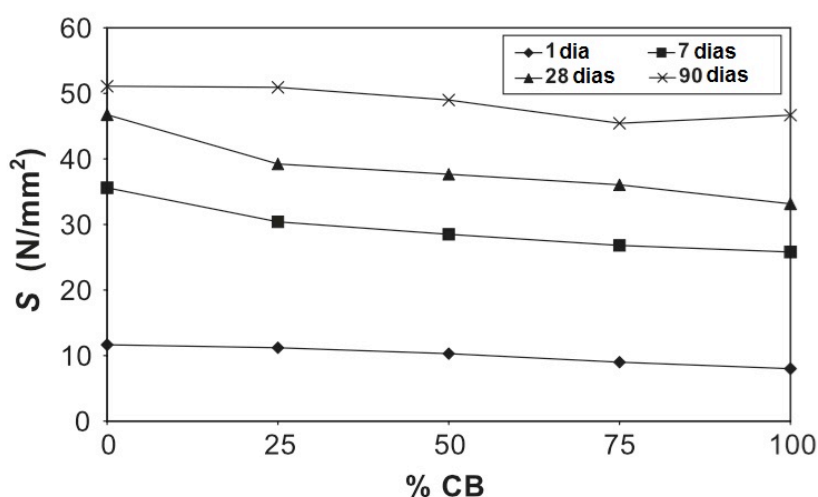


Figura 4 – Efeito do teor de agregado reciclado miúdo de cerâmica na resistência à compressão do concreto.
Fonte: Khatib (2005).

Os comportamentos observados por e Leite (2001), Khatib (2005) e Cabral *et al.* (2007) mostram que a influência do agregado miúdo reciclado sobre a resistência do concreto precisa ser mais bem compreendida.

A influência dos agregados reciclados na porosidade do concreto também é estudada. Tenório (2007) observou a tendência do índice de vazios aumentar ao substituir areia por agregado miúdo reciclado, fato que o autor sugeriu estar relacionado à granulometria do agregado miúdo reciclado. O agregado em questão apresentou maior teor de materiais finos ($D < 0,15$ mm) e de materiais pulverulentos ($D < 0,075$ mm) que a areia, os quais são capazes de aprisionar mais ar na mistura fresca e assim, após o endurecimento, deixar maior quantidade de vazios na pasta

(TENÓRIO, 2007).

Butler (2003), que estudou o emprego de agregados reciclados graúdos em concreto, verificou aumentos em torno de 40% para valores da absorção de água, e de 30%, para os índices de vazios dos concretos compostos por agregados reciclados, em comparação com os concretos convencionais. Constatou também que, para os concretos reciclados com resistência elevada e baixa relação água/cimento, ocorre mais absorção de água, comparando-se com os concretos convencionais, devido à influência do agregado graúdo que é mais poroso.

Com relação à densidade do concreto no estado endurecido, aos 28 dias, Khatib (2005) encontrou valores que variaram de 2.267 até 2.427 kg/m³ para todos os concretos estudados, sendo que o concreto controle obteve a maior densidade. Uma diminuição da densidade foi observada com o aumento do teor de substituição de agregado natural por reciclado, sendo que os concretos contendo AMR de tijolo obtiveram uma menor densidade em comparação com os concretos contendo AMR de concreto.

Para aplicar um traço em massa de concretos convencionais em um concreto composto por agregados reciclados, de acordo com Leite (2001), é necessário que se faça uma compensação da quantidade de material reciclado a ser utilizado. Sem esta compensação, para um mesmo traço, os volumes de concreto convencional e de concreto com agregados reciclados produzidos seriam diferentes entre si, devido ao fato de agregados reciclados possuírem uma massa específica geralmente inferior com relação a agregados naturais (LEITE, 2001). De acordo com Bazuco (1999) *apud* Ferreira (2013), a massa específica dos agregados reciclados é cerca de 5 a 10% menor que a dos agregados naturais, dependendo, em parte, da origem e da granulometria do material. Vieira (2003), estudando agregados reciclados de RCD de material cerâmico, concreto, e argamassa, dentre outros constituintes em menor porcentagem, obteve valores de massa específica de 2,52 kg/dm³ para a fração graúda, cerca de 7% menor com relação aos agregados graúdos naturais utilizados no estudo, e de 2,51 kg/dm³ para a fração miúda, aproximadamente 4% menor com relação aos agregados miúdos naturais utilizados na pesquisa (VIEIRA, 2003). De acordo com Chen *et al.* (2003), foram encontrados valores de massa específica para agregados reciclados compostos por cerâmicas, tijolos e principalmente resíduos de concreto entre 2,28 a 2,29 kg/dm³ para a fração graúda, cerca de 13% menor com relação aos agregados graúdos naturais utilizados no

estudo, e entre 2,19 e 2,26 kg/dm³ para a fração miúda, aproximadamente 15% menor com relação aos agregados miúdos naturais. Leite (2001), por sua vez, apresentou que a massa específica dos agregados reciclados utilizados em seu estudo é 4% e 19% menor que a massa específica das frações dos agregados naturais miúdos e graúdos, respectivamente.

De modo a considerar-se a compensação do volume de agregados reciclados nos traços do concreto, é utilizada a seguinte equação (CABRAL *et al.*, 2007; LEITE, 2001):

$$M_{ar} = \frac{M_{an}}{\gamma_{an}} \times \gamma_{ar} \quad (1)$$

M_{ar} = massa do agregado reciclado (g)

M_{an} = massa do agregado natural (g)

γ_{ar} = massa específica do agregado reciclado (g/cm³)

γ_{an} = massa específica do agregado natural (g/cm³)

Outra questão que deve ser considerada no preparo da mistura de concreto é a absorção dos agregados reciclados, que geralmente se mostra muito maior do que no caso dos agregados naturais. Chen *et al.* (2003) encontraram valores de absorção para agregados reciclados compostos por cerâmicas, tijolos e principalmente resíduos de concreto entre 5% a 7,5% para a fração graúda, e entre 7,2% e 10,4% para a fração miúda. Percebe-se que são valores muito acima dos encontrados para agregados naturais, que no caso deste estudo atingiram valores de 1,2% para a fração graúda, e 1% para a fração miúda (CHEN *et al.*, 2003). Um estudo de Gómez-Soberón (2002) também confirma essa diferença entre as taxas de absorção de agregados reciclados e naturais. A Tabela 1 apresenta os valores encontrados para absorção de água de agregados reciclados de concreto e agregados naturais.

Dessa forma, é importante que se umidifique previamente os agregados reciclados antes de dispô-los na betoneira, para que não absorvam parte da água de amassamento, o que interferiria na hidratação do cimento (CABRAL *et al.*, 2007). Além disso, Weggel *et al.* (2011) demonstram que a alta absorção dos agregados reciclados, incluindo agregados reciclados de tijolo de alvenaria, pode influenciar a

trabalhabilidade da mistura de concretos. Isto pode ser explicado pelo fato de que, sem o acomodamento da absorção adicional, misturas com agregados reciclados de concreto podem ser mais duras e podem perder a trabalhabilidade mais rapidamente do que misturas convencionais (CAVALLINE *et al.*, 2014).

Tabela 1 - Absorção de água dos agregados de concreto reciclados e naturais

Tamanho das partículas (mm)	Agregados reciclados de concreto			Agregados naturais		
	10-20	5-10	0-5	12-20	5-12	0-5
Absorção de água (%)	5,828	6,806	8,160	0,876	1,134	1,490

Fonte: Adaptado de GÓMEZ-SOBERÓN (2002).

Dessa forma, é importante que se umidifique previamente os agregados reciclados antes de dispô-los na betoneira, para que não absorvam parte da água de amassamento, o que interferiria na hidratação do cimento (CABRAL *et al.*, 2007). Além disso, Weggel *et al.* (2011) demonstram que a alta absorção dos agregados reciclados, incluindo agregados reciclados de tijolo de alvenaria, pode influenciar a trabalhabilidade da mistura de concretos. Isto pode ser explicado pelo fato de que, sem o acomodamento da absorção adicional, misturas com agregados reciclados de concreto podem ser mais duras e podem perder a trabalhabilidade mais rapidamente do que misturas convencionais (CAVALLINE *et al.*, 2014).

Estudando acerca do uso de agregados reciclados em concreto, dez minutos antes do preparo da mistura na betoneira, Cabral *et al.* (2007) umedeceram os agregados reciclados com 80% da água que seria absorvida por eles em 24h. Os agregados foram pré-umidificados com esta quantidade de água uma vez que, durante os ensaios de absorção de água, os agregados reciclados atingiram 80% da absorção total de água em média nas primeiras 2h de ensaio. Leite (2001), por sua vez, optou por pré-umidificar os agregados reciclados graúdos e miúdos com taxas de 50 e 40% da absorção média, respectivamente. Este procedimento também foi realizado 10 minutos antes do preparo da mistura na betoneira. A decisão de se compensar parcialmente a taxa de absorção dos agregados reciclados faz com que não haja um grande excesso de água na mistura de concreto, o que acarretaria na diminuição considerável da resistência mecânica (LEITE, 2001). Em suma, essa compensação parcial faz com que não haja uma diminuição excessiva da relação a/c das misturas por conta da absorção, mas também não deixa as misturas fluidas demais (LEITE, 2001). Além disso, é importante destacar que, quando misturados os

materiais na betoneira, a absorção dos agregados ocorre mais lentamente, ou até mesmo é interrompida pelo revestimento das partículas com a pasta de cimento, o que contribui para que não haja absorção total pelos agregados (NEVILLE, 1995 *apud* LEITE, 2001). Porém, é importante ressaltar que os estudos de Cabral *et al.* (2007) e Leite (2001) não verificaram a influência da pré-umidificação nas propriedades do concreto como uma variável isolada.

Em um estudo sobre a técnica de pré-saturação dos agregados reciclados como maneira de solucionar o problema da absorção de parte da água que seria necessária para a hidratação do cimento, García-González *et al.* (2014) avaliaram sua influência na consistência e na resistência à compressão de concretos. Para isso, foram determinados períodos necessários para que os agregados reciclados atingissem uma umidade adequada para então serem incorporados à mistura de concreto. Posteriormente, misturas de concreto foram preparadas com taxas de substituição em massa de agregado graúdo natural por agregado reciclado de 0%, 20%, 50% e 100%, e com períodos de pré-saturação de 3 e 5 minutos. Neste estudo foram empregados agregados reciclados mistos com dimensão máxima característica de 16 mm. Como resultado, obteve-se que a imersão dos agregados reciclados em água trouxe uma diminuição na consistência e na resistência à compressão do concreto. Nos casos em que os agregados foram imersos em água por 3 minutos, foram atingidas consistências plástica e mole, enquanto a imersão por 5 minutos acarretou em consistências fluidas. No caso da resistência à compressão, houve uma perda de cerca de 11% para pré-saturação de 3 minutos, e de 13% para 5 minutos. Houve uma perda na resistência à compressão de cerca de 11% para pré-saturação de 3 minutos, e de 13% para 5 minutos.

O estudo de García-González *et al.* (2014) também constatou que a consistência das misturas de concreto cujos agregados reciclados não foram pré-saturados aumentou com o aumento da taxa de substituição de agregados, como era esperado. Constatou-se também que o aumento do teor de substituição levou a uma diminuição da resistência à compressão axial do concreto. Entretanto, apesar da perda de resistência, a resistência média à compressão axial de 25 MPa para a qual os traços foram dimensionados foi atingida por todos os corpos de prova ensaiados.

A NBR 15116:2004, estabelece que, para preparo de concreto sem função estrutural, a absorção máxima permitida para os ARC é de 7%, para os graúdos, e

12%, para os miúdos, enquanto para os ARM, estes limites são de 12% e 17%, respectivamente (ABNT, 2004b).

No âmbito do estudo dos contaminantes presentes nos agregados reciclados, foi realizada uma pesquisa investigando o efeito de contaminantes (tijolos cerâmicos, cerâmicas, vidro, madeira) em ARC nas propriedades do concreto a ser aplicado em blocos de pavimentação em concreto (POON e CHAN, 2007). Nesse estudo somente os agregados miúdos reciclados (< 5 mm) foram utilizados. Os contaminantes foram misturados e substituíram 10% dos agregados reciclados de concreto. Houve em média uma redução de 5% na densidade dos blocos com contaminantes incorporados. Verificou-se que o tijolo moído e a cerâmica moída aumentaram a resistência à tração dos blocos, ao contrário do vidro moído e das aparas de madeira, as quais trouxeram uma significativa redução na resistência. A absorção de água dos blocos foi maior no caso dos constituídos por concreto com contaminantes, sendo que as aparas de madeira levaram a um aumento considerável na absorção. É possível atingir os padrões exigidos para este tipo de elemento ajustando a relação a/c (POON e CHAN, 2007). No caso dos blocos moldados com uma relação agregado/cimento igual a 3, foi possível atingir os padrões exigidos em diversos países para resistência à compressão, exceto no caso em que havia aparas de madeira como contaminante. Concluiu-se que um nível aceitável de contaminação dos ARC pode aumentar de 1% para até 10% no caso da produção de blocos de pavimentação em concreto.

A argamassa aderida, por exemplo, também pode interferir nas propriedades dos demais resíduos. Segundo Paranavithana e Mohajerani (2006), a presença de argamassa aderida contribui para uma menor densidade de partícula, alta porosidade e absorção de água, bem como variação na qualidade de agregados reciclados.

Como pode-se perceber pelos estudos citados anteriormente, a aplicação de agregados reciclados de RCD na produção de concretos possui um grande potencial. Além disso, ressalta-se que pesquisas como estas, demonstrando o desempenho de concretos compostos por agregados reciclados e a influência que certos parâmetros relacionados com o agregado reciclado e com a taxa de substituição de agregados empregada, são muito importantes para trazer cada vez mais segurança e confiança aos profissionais da construção civil em empregar esses materiais nas obras.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo contempla os materiais que serão utilizados para a confecção de concretos com diferentes taxas de substituição de agregado natural por agregado reciclado. Além disso, aborda os procedimentos para a análise, por meio de ensaios laboratoriais, de características físicas e propriedades mecânicas dos agregados reciclado e natural, bem como a coleta e preparo das amostras de agregado reciclado de RCD. Por fim, apresenta a maneira como as amostras de concreto foram produzidas, e as propriedades mecânicas e físicas que foram estudadas, a fim de obter-se um comparativo de desempenho de concretos com diferentes quantidades de agregado reciclado. Os procedimentos executados encontram-se organizados na Figura 5.

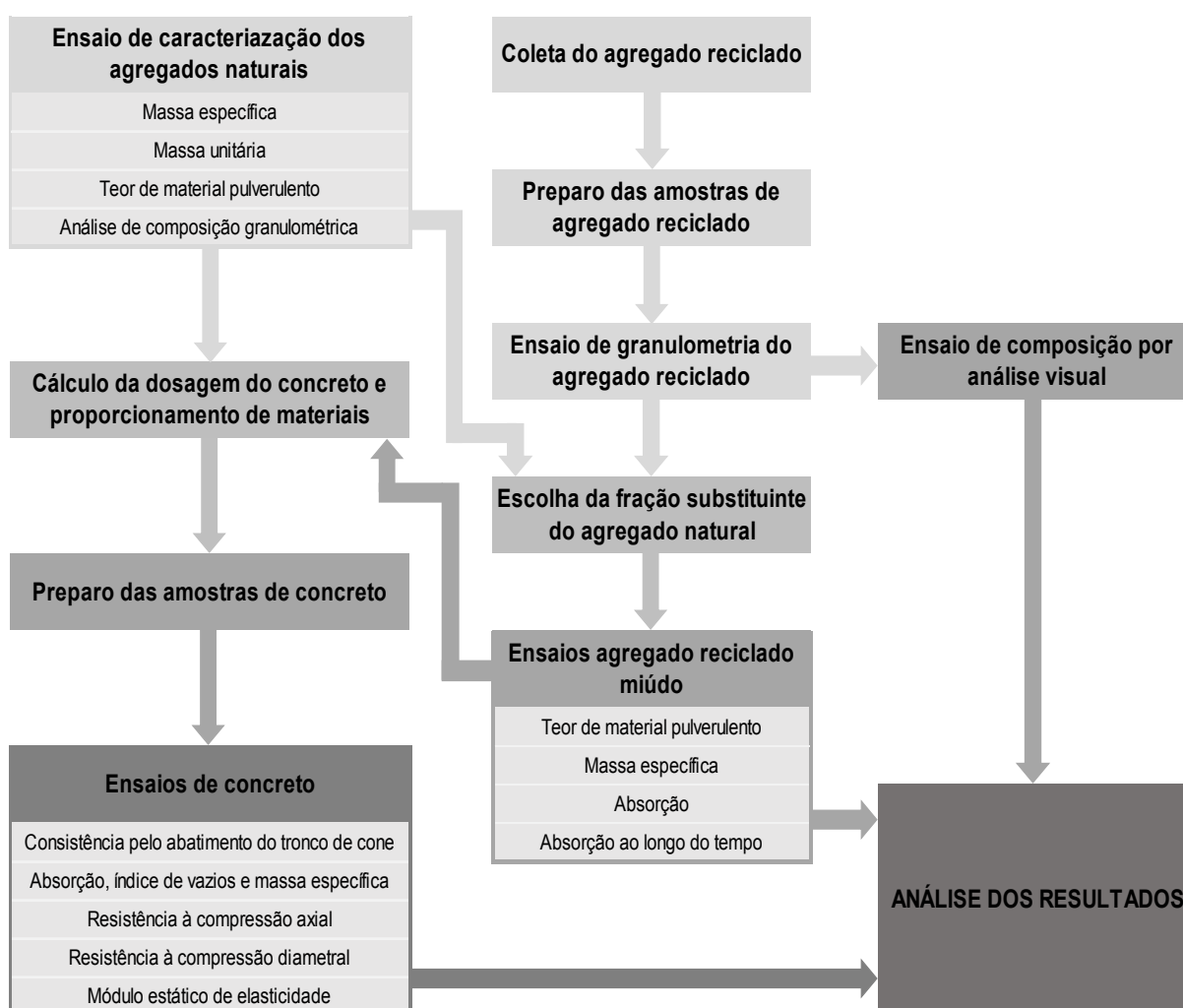


Figura 1 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos.
Fonte: Autoria própria.

Os materiais empregados no presente estudo são os seguintes:

- Cimento CPV – ARI, por conter baixo teor de adição;
- Areia grossa de rio lavada;
- Brita 1 de origem granítica;
- Agregados reciclados de RCD;
- Água potável.

Os métodos empregados no presente estudo são apresentados nos itens a seguir.

3.1 COLETA DE AGREGADO RECICLADO

O agregado reciclado foi coletado na usina de reciclagem de RCD Usinas de Recicláveis Sólidos Paraná (USIPAR), localizada em Almirante Tamandaré – PR. A USIPAR recolhe RCD classe A e os tritura, transformando-os em areia, brita 1, brita 0 e rachão. O material que chega à usina passa por uma área de triagem, onde ocorre a separação dos materiais recicláveis pela usina (pedras, resto de concreto, tijolos e telhas) e dos que não poderão ser ali processados (papel, ferro, madeira, vidro, entre outros). O material a ser reciclado passa por britadores, e o material resultante é transportado até peneiras vibratórias, onde é realizada sua separação em diferentes produtos. No caso dos materiais que não serão processados pela usina (plásticos, papéis, entre outros), são prensados e encaminhados para empresas licenciadas para a destinação correta destes resíduos (USIPAR, 2015). Os materiais excedentes como o aço e a madeira são destinados para reciclagem específica. Os rejeitos (tapetes, roupas, isopor, fitas, gesso, entre outros) são encaminhados para aterro industrial classe II.

Outro produto produzido na usina é a bica corrida, que até meados de maio de 2015, não apresentava valor comercial. Este material estava sendo fornecido para utilização como material para aterro. Atualmente este produto está sendo empregado para base de pavimentação asfáltica, melhoria de estradas não

pavimentadas, sob micro revestimentos em vias não pavimentadas, e reforço para solo com pouca capacidade de suporte (USIPAR, 2015). A diferença entre este material e os demais produtos gerados pela usina é que, além dos resíduos classe A, há a existência de solos na composição da bica corrida, recebidos em meio às cargas (LOPES, 2015).

A origem da bica corrida se dá por meio da triagem manual que ocorre quando das descargas das caçambas, e posteriormente o material é jogado por meio de uma pá carregadeira até um alimentador vibratório. Após isso, a bica corrida fina é separada no alimentador vibratório, formando-se por meio dos resíduos de menor granulometria somente por meio do “peneiramento”, e a bica corrida grossa é processada por meio do britador primário de mandíbulas, passando por uma esteira na qual novamente ocorre triagem manual, existindo um eletroímã nesse processo (LOPES, 2015).

A bica corrida gerada a partir desse processo possui essa denominação pelo fato de possuir uma composição que contempla uma grande faixa granulométrica, uma vez que contém tanto fração miúda quanto graúda. A diferença entre a bica corrida grossa e a bica corrida fina é a dimensão máxima do agregado, que é maior no caso da bica corrida grossa.

O agregado coletado para a presente pesquisa corresponde à bica corrida com a granulometria grossa, uma vez que este material estava acumulado em uma quantidade maior na usina, em comparação com a bica corrida fina.

Para o presente estudo foi coletado um volume de 3000 litros de agregado reciclado em um único dia em maio de 2015, de maneira a se desconsiderar a variabilidade na composição do agregado que é produzido em dias diferentes, que se deve à variação da natureza dos resíduos recebidos pela usina. Portanto, as características a serem analisadas dizem respeito a um tipo único de agregado.

O material foi trazido até a UTFPR por um caminhão basculante, e foi despejado sobre lonas plásticas, formando uma pilha (Figura 6).

Como era previsto pela característica da bica corrida grossa fornecida pela USIPAR, o material recebido apresentou granulometria muito diversificada e, além deste fato, engloba uma vasta gama de materiais. Dentre os materiais presentes na amostra de RCD, encontram-se diversos tipos de contaminantes, como é mostrado na Figura 7.



Figura 6 – Pilha de agregado de RCD em estudo.
Fonte: Autoria própria.

Por meio da análise superficial realizada na pilha de RCD, podem ser vistos pedaços de materiais plásticos, como está exibido na Figura 7a, 7c e 7f. Na Figura 7b consta uma fração de louça sanitária bem como uma pastilha cerâmica, ainda inteira. São vistos também pedaços de espuma de enchimento amarela, borracha, isopor e pedaços de madeira (Figura 7d), estes sendo vistos facilmente em tamanhos e tipos diversificados. Torna-se claro em todas as imagens a existência de materiais de origem cimentícia (argamassas e concretos) e cerâmica vermelha.

Na Figura 7e, além da grande peça de concreto e da placa de revestimento cerâmico, nota-se um pedaço de papel, material que foi encontrado em diversos tamanhos por toda a amostra. Observou-se também, apesar de em menor frequência, a presença de pedaços de granito (Figura 7f), vidro, gesso, raízes de plantas e pedaços de aço.

A aparência e materiais presentes no agregado de RCD é muito distinta dos agregados de origem natural e, no que diz respeito à fração mais fina apresentada, considera-se a possibilidade de que a coloração amarronzada da amostra úmida seja proveniente tanto de cerâmica vermelha quanto da possível existência de solo na bica corrida grossa fornecida pela USIPAR.



Figura 7 – Detalhamento visual da pilha de agregado de RCD. a) Conduíte e tela plástica. b) Pastilha cerâmica e pedaço de louça sanitárias. c) Sacos plásticos. d) Madeira, espuma, borracha, arame e isopor. e) Revestimento cerâmico, papel e pedaço de concreto de grandes dimensões. f) Granito e capa de fio elétrico.
Fonte: Autoria própria.

3.2 PREPARO DAS AMOSTRAS DE AGREGADO RECICLADO

Após a coleta do agregado reciclado de RCD, foram coletadas porções de mesma massa de 7 pontos distintos da pilha, sendo retirada a camada de material mais superficial (cerca de 10 cm), totalizando numa amostra de 50 kg. O plano de amostragem adotado é apresentado na Figura 8, onde cada número indica um ponto

de coleta distinto do resíduo. A Figura 9 apresenta a porção resultante deste processo de amostragem, a qual foi utilizada para realização dos ensaios de caracterização do agregado reciclado. Ressalta-se que esta porção resultante não passou por nenhum processo beneficiamento.

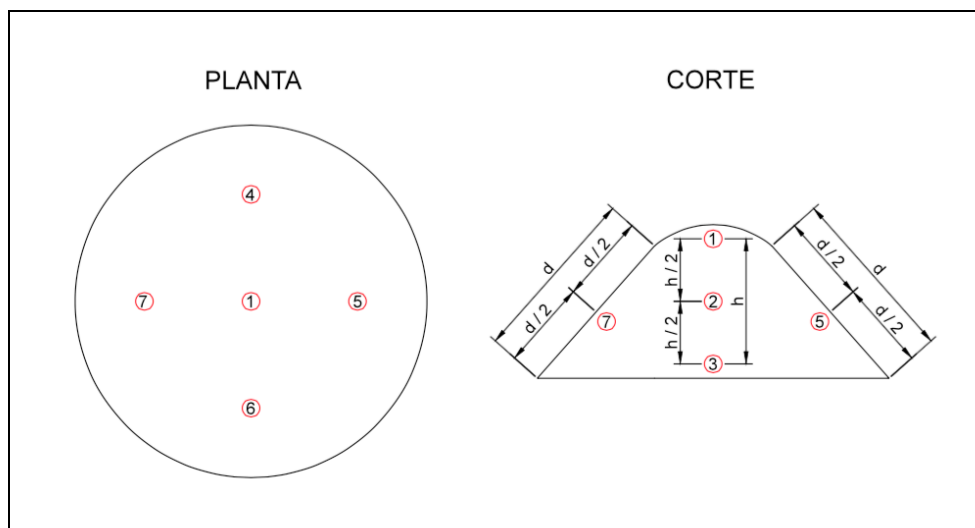


Figura 8 – Plano de amostragem do agregado de RCD.

Fonte: Autoria própria.



Figura 2 – Amostra de agregado de RCD a ser caracterizado, previamente ao quarteamento.

Fonte: Autoria própria.

Após este processo, o material foi homogeneizado e posteriormente quarteado (Figura 10) até a obtenção de duas porções, as quais foram armazenadas bombonas plásticas.



Figura 10 – Quarteamento da amostra de agregado de RCD a ser caracterizado.
Fonte: Autoria própria.

Este processo foi realizado de acordo com a NBR NM 27:2001 (ABNT, 2001a), que estabelece as diretrizes para redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.

3.3 ESCOLHA DO AGREGADO A SER UTILIZADO PARA SUBSTITUIR O AGREGADO NATURAL

O agregado reciclado em estudo é constituído tanto por agregados graúdos quanto miúdos. No presente trabalho foi utilizada apenas uma fração do agregado reciclado para substituir o agregado natural, para emprego em concreto. A escolha da fração a ser empregada foi realizada com base em dois fatores: semelhança da curva granulométrica do agregado reciclado com relação ao agregado natural; e abundância de material. Para analisar a fração do agregado reciclado que se enquadra nestes critérios foram realizados ensaios de composição granulométrica dos agregados natural e reciclado de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003). Posteriormente estes valores foram comparados com as Zonas Granulométricas, no caso dos agregados graúdos, e com os limites de Zonas Ótima e Utilizável, para os agregados miúdos, estabelecidos pela NBR 7211:2009.

Para os agregados reciclados, foram realizadas as seguintes determinações: distribuição granulométrica do agregado reciclado em sua totalidade, distribuição granulométrica da fração graúda, e distribuição granulométrica da fração miúda.

Previamente ao ensaio foi realizada uma triagem para a separação de contaminantes como plásticos, pedaços de madeira, papel, entre outros.

No caso da primeira determinação, foram utilizadas todas as peneiras da série normal e intermediária. No caso da segunda determinação, a escolha da peneira de maior abertura levou em consideração a dimensão máxima encontrada no ensaio de granulometria do agregado graúdo natural, enquanto a peneira de menor abertura foi a de 4,75 mm. Por fim, para a última determinação foram utilizadas as peneiras a partir da 4,75 mm até a 0,15 mm.

Todos os ensaios de granulometria foram realizados em duplicata, como recomendado por norma.

A partir destes ensaios foram também determinados o módulo de finura (agregados miúdos), e a dimensão máxima característica (agregados graúdos). O módulo de finura corresponde à soma das percentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. A dimensão máxima característica correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma percentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados dos ensaios realizados com as duas amostras de agregado natural miúdo (areia), AN Miúdo 1 e AN Miúdo 2.

Tabela 2 – Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado natural miúdo, amostra 1 (AN Miúdo 1).

Peneira (mm)	Massa ret. (g)	% ret.	% ret. acumul.	% passantes
9,5	0,00	0,00	0,00	100,00
6,3	7,90	1,58	1,58	98,42
4,8	11,20	2,25	3,83	96,17
2,4	64,80	12,99	16,82	83,18
1,2	104,60	20,97	37,79	62,21
0,6	103,80	20,81	58,60	41,40
0,3	116,10	23,28	81,88	18,12
0,15	63,50	12,73	94,61	5,39
0	26,90	5,39	100,00	0,00
Σ	498,80	100,00		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado natural miúdo, amostra 2 (AN Miúdo 2).

Peneira (mm)	Massa ret. (g)	% ret.	% ret. acumul.	% passantes
9,5	0,00	0,00	0,00	100,00
6,3	6,00	1,20	1,20	98,80
4,8	16,10	3,23	4,43	95,57
2,4	67,50	13,53	17,96	82,04
1,2	102,10	20,47	38,43	61,57
0,6	110,00	22,05	60,49	39,51
0,3	115,50	23,16	83,64	16,36
0,15	58,90	11,81	95,45	4,55
0	22,70	4,55	100,00	0,00
Σ	498,80	100,00		

Fonte: Autoria própria.

O módulo de finura deste agregado é exibido na Tabela 4. O módulo de finura de 2,97 enquadra-se na zona utilizável, estabelecida na NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).

Tabela 4 – Módulo de finura do agregado natural miúdo.

	AN Miúdo 1	AN Miúdo 2
MF	2,94	3,00
Média	2,97	

Fonte: Autoria própria.

O gráfico da distribuição granulométrica do agregado natural miúdo é representado na Figura 11, bem como os limites de Zona Ótima e Zona Utilizável estabelecidos pela NBR 7211:2009. É possível verificar também por meio do gráfico que o agregado enquadra-se na Zona Utilizável.

As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados dos ensaios realizados com as duas amostras de agregado natural graúdo (brita), AN Graúdo 1 e AN Graúdo 2. A partir de ambas tabelas é possível identificar que a dimensão máxima característica deste agregado é 19 mm.

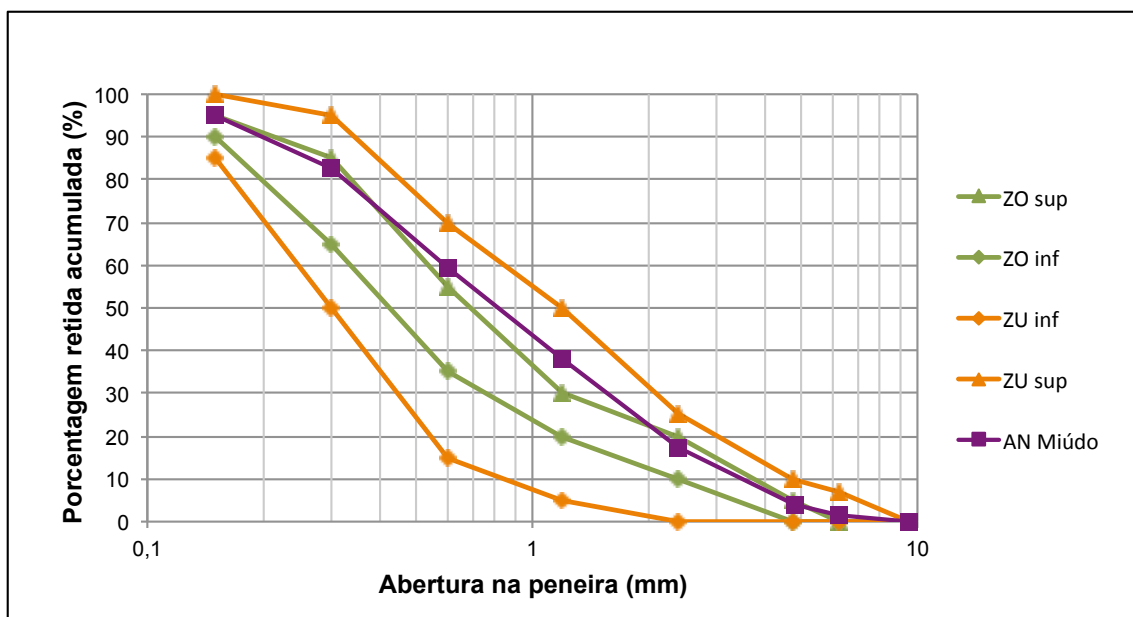


Figura 11 – Distribuição granulométrica do agregado natural miúdo, e zonas ótima e utilizável da NBR 7211:2009.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado natural graúdo, amostra 1 (AN Graúdo 1).

Peneira (mm)	Massa ret. (g)	% ret.	% ret. acumul.	% passantes
31,5		0,00	0,00	
25	0,00	0,00	0,00	100,00
19	31,00	0,31	0,31	99,69
12,5	4.717,00	47,16	47,47	52,53
9,5	3.491,40	34,91	82,37	17,63
6,3	1.509,70	15,09	97,47	2,53
4,75	125,10	1,25	98,72	1,28
0	128,30	1,28	100,00	0,00
Σ	10.002,50	100,00		

Fonte: Autoria própria.

O gráfico da distribuição granulométrica do agregado natural graúdo é representado na Figura 12, bem como os limites de Zonas Granulométricas estabelecidos pela NBR 7211:2009. É possível verificar por meio do gráfico que este agregado enquadra-se próximo ao limite inferior da Zona Granulométrica 9,5/25 da norma.

Tabela 6 – Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado natural graúdo, amostra 2 (AN Graúdo 2).

Peneira (mm)	Massa ret. (g)	% ret.	% ret. acumul.	% passantes
31,5		0,00	0,00	
25	0,00	0,00	0,00	100,00
19	0,00	0,00	0,00	100,00
12,5	4.189,80	41,91	41,91	58,09
9,5	3.426,40	34,27	76,18	23,82
6,3	1.972,30	19,73	95,91	4,09
4,75	278,70	2,79	98,69	1,31
0	130,60	1,31	100,00	0,00
Σ	9.997,80	100,00		

Fonte: Autoria própria.

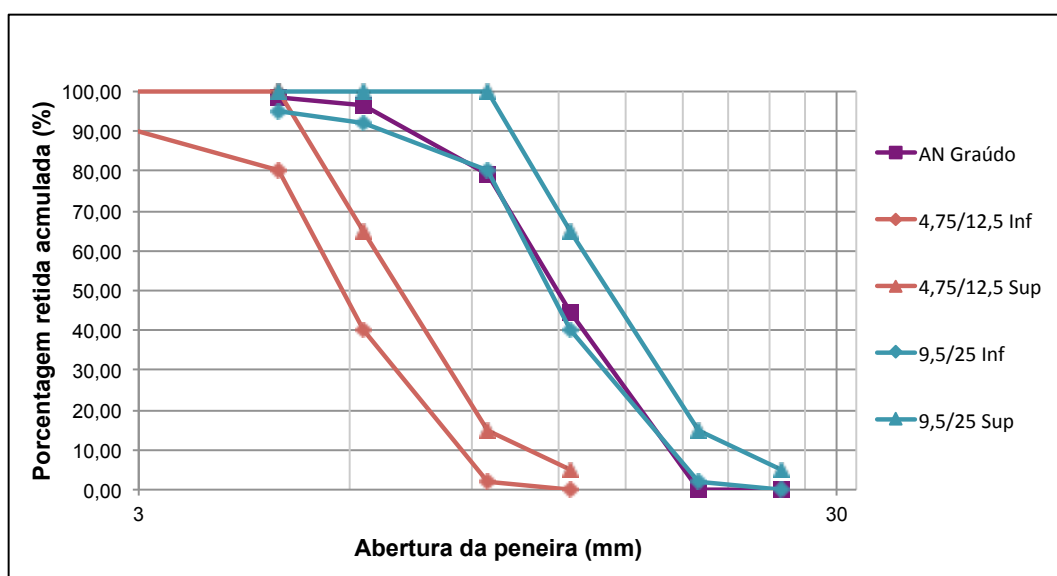


Figura 12 – Distribuição granulométrica do agregado natural graúdo, e zonas granulométricas da NBR 7211:2009.

Fonte: Autoria própria.

Quanto ao ensaio de granulometria do agregado reciclado, previamente foi realizada uma triagem manual das amostras de modo a remover materiais contaminantes. A massa de material contaminante removida foi de 58,20 g (0,51% da massa da amostra) e 72,50 g (0,65% da massa da amostra) para as amostras AR Total 1 e AR Total 2, respectivamente. A Figura 13 apresenta os contaminantes removidos da amostra AR Total 1, dentre os quais encontram-se metais, madeira, raízes, espuma de poliuretano, fios, lascas de tinta, plástico duro, plástico mole,

papel e isopor.



Figura 13 – Contaminantes removidos na triagem da amostra AR Total 1.
Fonte: Autoria própria.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados dos ensaios realizados com as duas amostras de agregado reciclado, AR Total 1 e AR Total 2.

Tabela 7 – Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado reciclado total, amostra 1 (AR Total 1).

Peneira (mm)	Massa ret. (g)	% ret.	% ret. acumul.	% passantes
75	0,00	0,00	0,00	100,00
63	0,00	0,00	0,00	100,00
50	856,60	7,57	7,57	92,43
38	388,20	3,43	10,99	89,01
32	514,30	4,54	15,54	84,46
25	823,40	7,27	22,81	77,19
19	626,70	5,53	28,34	71,66
12,5	1.021,60	9,02	37,36	62,64
9,5	388,80	3,43	40,80	59,20
6,3	459,80	4,06	44,86	55,14
4,75	310,40	2,74	47,60	52,40
2,4	869,30	7,68	55,28	44,72
1,2	1.194,00	10,54	65,82	34,18
0,6	1.273,60	11,25	77,07	22,93
0,3	1.461,90	12,91	89,98	10,02
0,15	759,10	6,70	96,68	3,32
0	375,40	3,32	100,00	0,00
Σ	11.323,10	100,00		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado reciclado total, amostra 2 (AR Total 2).

Peneira (mm)	Massa ret. (g)	% ret.	% ret. acumul.	% passantes
75	0,00	0,00	0,00	100,00
63	315,40	2,87	2,87	97,13
50	445,80	4,05	6,92	93,08
38	552,10	5,02	11,94	88,06
32	302,90	2,75	14,69	85,31
25	1.194,40	10,86	25,54	74,46
19	578,70	5,26	30,80	69,20
12,5	827,30	7,52	38,32	61,68
9,5	418,90	3,81	42,13	57,87
6,3	444,20	4,04	46,17	53,83
4,75	357,00	3,24	49,41	50,59
2,4	846,30	7,69	57,10	42,90
1,2	1.147,30	10,43	67,53	32,47
0,6	1.173,10	10,66	78,19	21,81
0,3	1.381,20	12,55	90,75	9,25
0,15	686,10	6,24	96,98	3,02
0	332,00	3,02	100,00	0,00
Σ	11.002,70	100,00		

Fonte: Autoria própria.

O gráfico da distribuição granulométrica das amostras de agregado reciclado AR Total 1 e AR Total 2 está apresentado na Figura 14.

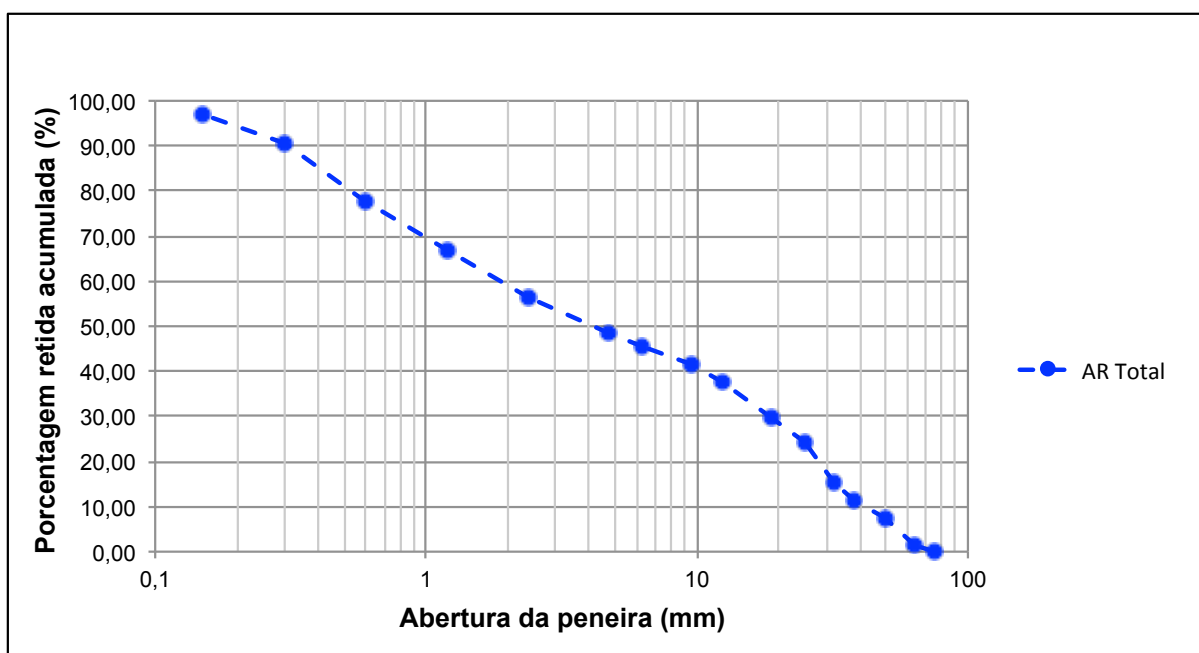


Figura 14 – Distribuição granulométrica do agregado reciclado em sua totalidade.

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados dos dois ensaios de composição granulométrica realizados com os agregados reciclados foram extraídos somente os dados referentes às massas retidas nas peneiras a partir da 4,75 mm até o fundo, de modo a caracterizar a granulometria da fração miúda do agregado reciclado. A Tabela 9 e a Tabela 10 apresentam a distribuição granulométrica da fração miúda do agregado reciclado, referentes às amostras denominadas AR Miúdo 1 e AR Miúdo 2, respectivamente.

Tabela 9 – Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado reciclado miúdo, amostra 1 (AR Miúdo 1).

Peneira (mm)	Massa ret. (g)	% ret.	% ret. acumul.	% passantes
4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
2,4	869,30	14,65	14,65	85,35
1,2	1.194,00	20,12	34,77	65,23
0,6	1.273,60	21,47	56,24	43,76
0,3	1.461,90	24,64	80,88	19,12
0,15	759,10	12,79	93,67	6,33
0	375,40	6,33	100,00	0,00
Σ	5.933,30	100,00		

Fonte: Autoria própria

Tabela 10 – Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado reciclado miúdo, amostra 2 (AR Miúdo 2).

Peneira (mm)	Massa ret. (g)	% ret.	% ret. acumul.	% passantes
4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
2,4	846,30	15,20	15,20	84,80
1,2	1.147,30	20,61	35,82	64,18
0,6	1.173,10	21,08	56,89	43,11
0,3	1.381,20	24,81	81,71	18,29
0,15	686,10	12,33	94,04	5,96
0	332,00	5,96	100,00	0,00
Σ	5.566,00	100,00		

Fonte: Autoria própria.

O módulo de finura deste agregado é exibido na Tabela 11. Percebe-se que o módulo de finura de 2,82 enquadra-se na Zona Ótima, estabelecida na NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).

Tabela 11 – Módulo de finura do agregado reciclado miúdo.

	AR Miúdo 1	AR Miúdo 2
MF	2,80	2,84
Média	2,82	

Fonte: Autoria própria.

O gráfico da distribuição granulométrica do agregado natural miúdo é representado na Figura 15, bem como os limites de Zona Ótima e Zona Utilizável estabelecidos pela NBR 7211:2009 (ABNT, 2009). É possível verificar por meio do gráfico que o agregado enquadra-se na Zona Utilizável.

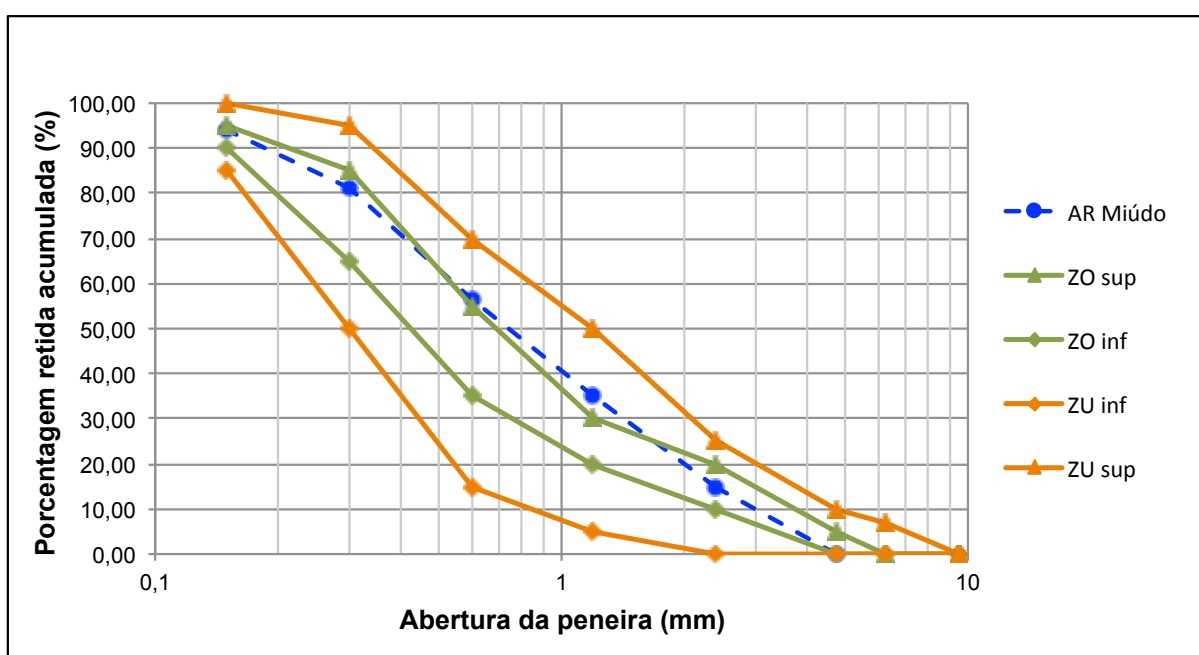


Figura 15 – Distribuição granulométrica do agregado reciclado miúdo, e zonas ótima e utilizável da NBR 7211:2009.

Fonte: Autoria própria.

De modo a comparar as distribuições granulométricas dos agregados natural e reciclado miúdo, foi plotado um gráfico com as curvas encontradas a partir dos ensaios realizados com ambos agregados (Figura 16). Percebe-se que as curvas dos agregados estão próximas e possuem um formato semelhante.

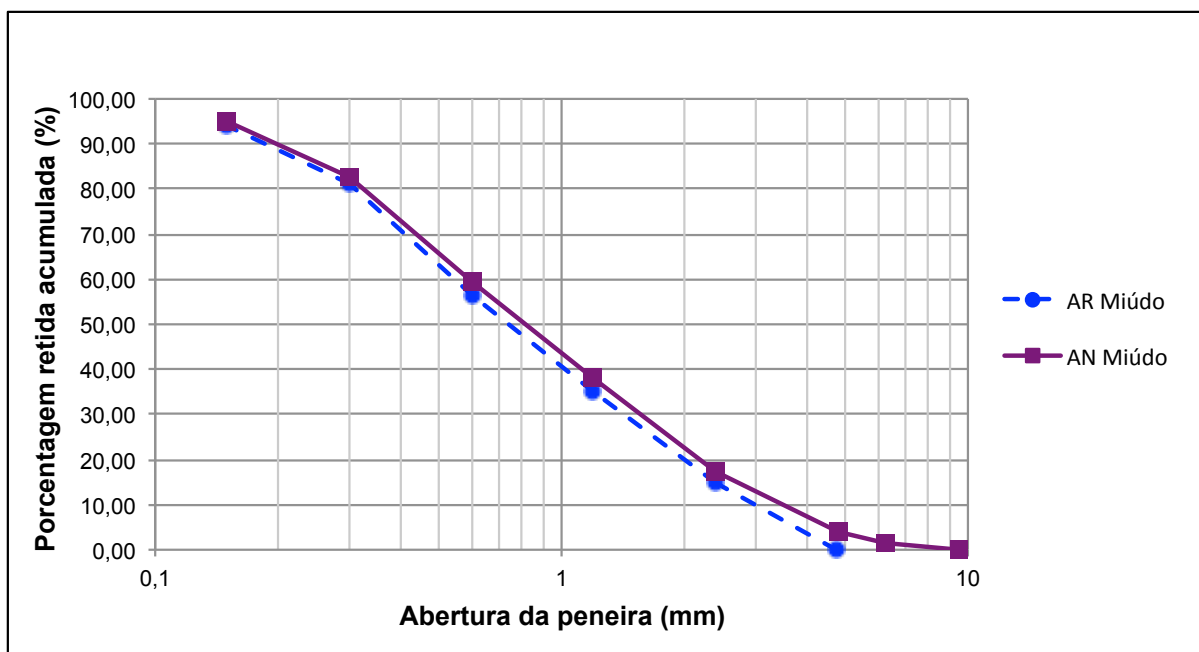


Figura 16 – Distribuição granulométrica do agregado natural miúdo e do agregado reciclado miúdo.

Fonte: Autoria própria.

De maneira a se obter a distribuição granulométrica do agregado reciclado graúdo foram extraídos somente os dados referentes às massas retidas entre as peneiras 12,5 mm e 4,75 mm, excluindo-se a massa retida na peneira 19mm, de modo a garantir que a dimensão máxima característica do agregado fosse a mesma da brita natural. As Tabelas 12 e 13 apresentam a distribuição granulométrica da fração graúda do agregado reciclado, referentes às amostras denominadas AR Graúdo 1 e AR Graúdo 2, respectivamente.

Tabela 12 – Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado reciclado graúdo, amostra 1 (AR Graúdo 1).

Peneira (mm)	Massa ret. (g)	% ret.	% ret. acumul.	% passantes
19	0,00	0,00	0,00	100,00
12,5	1.021,60	46,85	46,85	53,15
9,5	388,80	17,83	64,68	35,32
6,3	459,80	21,09	85,77	14,23
4,75	310,40	14,23	100,00	0,00
Σ	2.180,60	100,00		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 – Resultado do ensaio de composição granulométrica do agregado reciclado graúdo, amostra 2 (AR Graúdo 2).

Peneira (mm)	Massa ret. (g)	% ret.	% ret. acumul.	% passantes
19	0,00	0,00	0,00	100,00
12,5	827,30	40,41	40,41	59,59
9,5	418,90	20,46	60,87	39,13
6,3	444,20	21,70	82,56	17,44
4,75	357,00	17,44	100,00	0,00
Σ	2.047,40	100,00		

Fonte: Autoria própria.

O gráfico da distribuição granulométrica do agregado reciclado graúdo é representado na Figura 17, bem como as Zonas Granulométricas estabelecidas pela NBR 7211:2009. É possível verificar por meio do gráfico que este agregado não se enquadra em nenhuma das Zonas Granulométricas especificadas na norma, configurando uma deficiência na graduação de seus grãos para atendimento às normas vigentes de agregados para concreto.

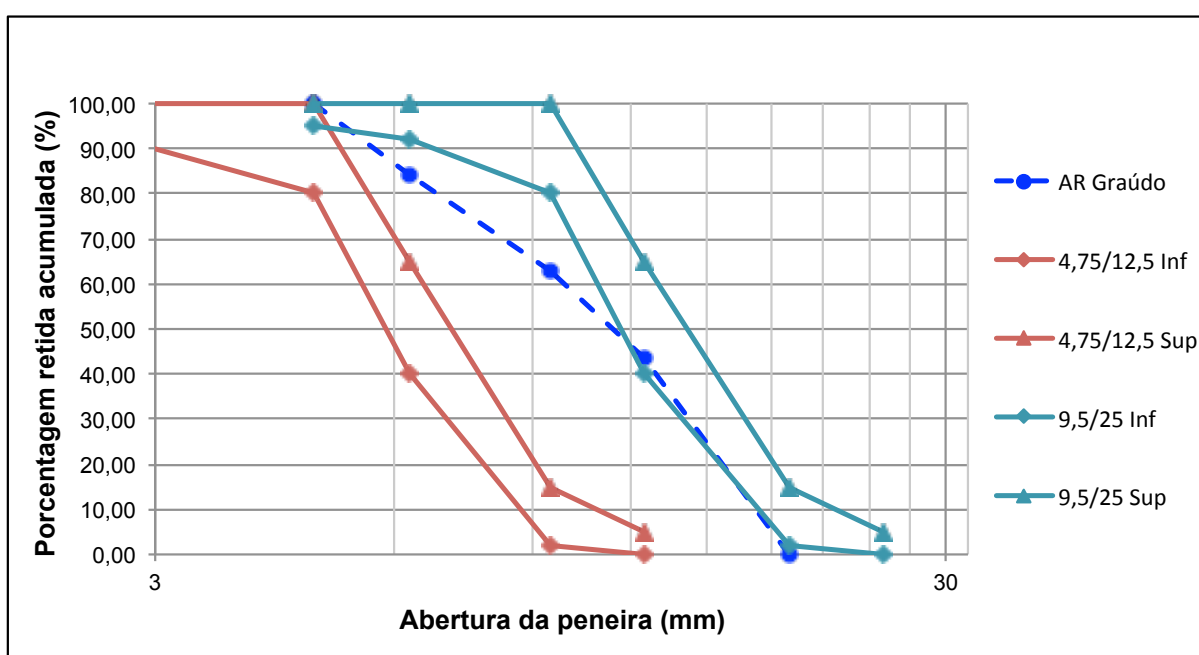


Figura 17 – Distribuição granulométrica do agregado reciclado graúdo, e zonas granulométricas da NBR 7211:2009.

Fonte: Autoria própria.

De modo a comparar as distribuições granulométricas dos agregados natural e reciclado graúdo foi plotado um gráfico com as curvas encontradas a partir dos ensaios realizados com ambos agregados (Figura 18).

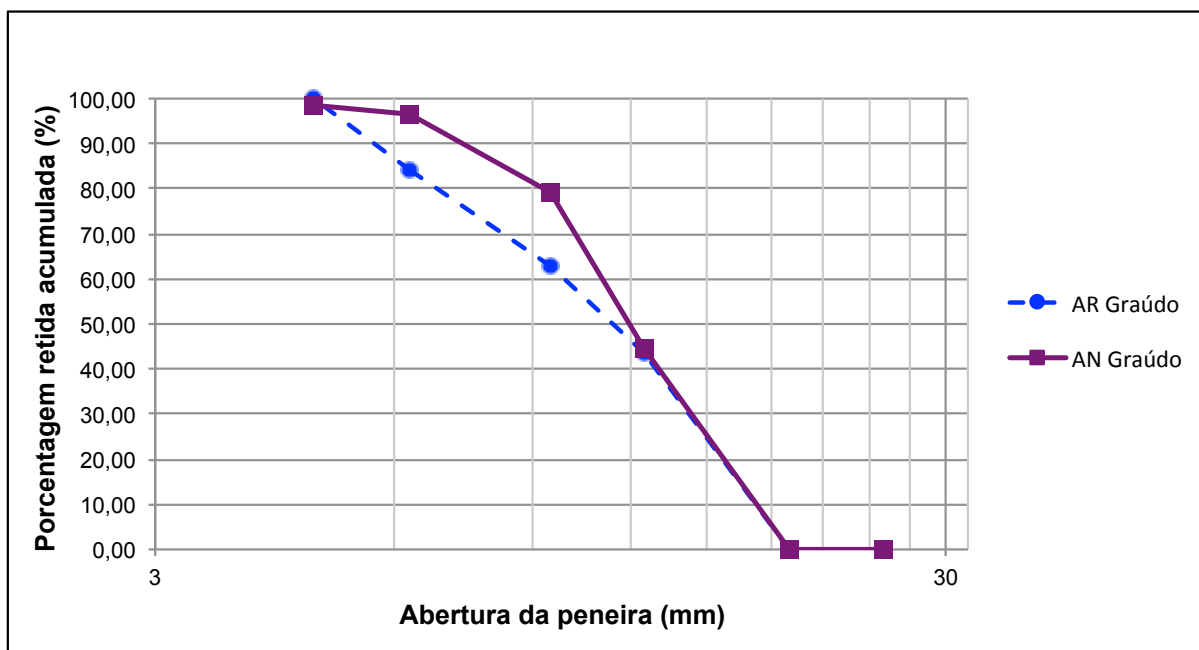


Figura 18 – Distribuição granulométrica do agregado natural graúdo e do agregado reciclado graúdo.

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que as curvas dos agregados estão próximas, porém possuem um formato distinto na primeira metade das curvas. Apesar de ambos agregados possuírem mesma dimensão máxima característica, o agregado reciclado possui granulometria mais fina se comparado com a brita. Para o agregado reciclado graúdo ser utilizado em substituição ao agregado natural para compor misturas de concreto, deveria ser realizada uma correção de sua granulometria.

A Figura 19 apresenta um gráfico que demonstra as proporções em massa de fração miúda, graúda, e contaminantes (plásticos, pedaços de madeira, papel, entre outros) que compõem o agregado reciclado em estudo, encontradas a partir dos ensaios de granulometria realizados com as duas amostras deste material, AR Total 1 e AR Total 2.

A partir deste gráfico, percebe-se que o agregado reciclado miúdo é encontrado em maior quantidade no agregado reciclado estudado, correspondendo a 51,19% do material. A proporção total de agregado graúdo é de 48,22%, porém a fração que potencialmente substituiria o agregado natural graúdo, com dimensão máxima característica de 19 mm, corresponde a 18,82%.

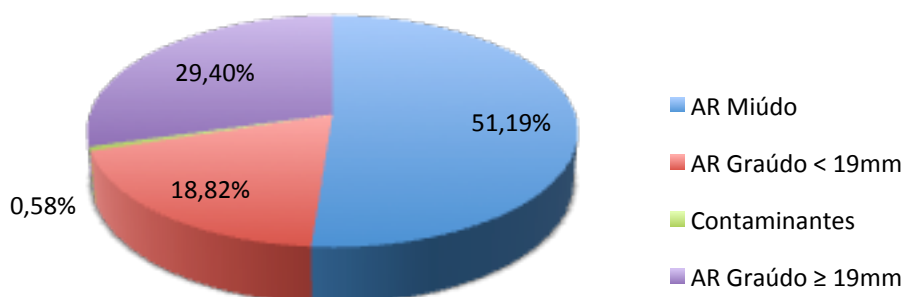


Figura 19 – Proporção das diferentes frações que compõem o agregado reciclado.

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados apresentados anteriormente, e de acordo com os critérios para escolha da fração do agregado reciclado a ser utilizado para substituir o agregado natural para produção de concreto, a fração escolhida foi a miúda, tanto pela semelhança de sua granulometria com relação ao agregado natural, quanto por apresentar em maior quantidade no agregado reciclado.

3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS RECICLADO E NATURAL

O estudo das características físicas do agregado reciclado de RCD é importante, pois estas irão influenciar diretamente as propriedades do concreto. As seguintes características foram analisadas neste trabalho: natureza dos materiais constituintes, massa específica, e absorção de água.

No caso dos agregados naturais, as características estudadas são as seguintes: distribuição granulométrica, massa específica, e massa unitária.

A Figura 20 apresenta um quadro com a relação de ensaios de caracterização realizados para cada fração de agregado.

Ensaio	Material			
	AN Miúdo	AN Graúdo	AR Miúdo	AR Graúdo
Granulometria	X	X	X	X
Teor de material pulverulento	X	X	X	
Massa específica	X	X	X	
Massa unitária (compactada)		X		
Absorção			X	
Absorção x tempo			X	
Natureza dos materiais				X

Figura 20 – Ensaios de caracterização realizados para cada fração de agregado.
Fonte: Autoria própria.

3.4.1 Natureza dos materiais constituintes

A norma que determina o procedimento da obtenção da composição dos agregados reciclados por análise visual para utilização em concreto sem função estrutural é a NBR 15116:2004, Anexo A (ABNT, 2004b). A partir deste ensaio é possível enquadrar os agregados em uma das seguintes categorias: ARC ou ARM.

A composição do agregado reciclado foi determinada por meio de catação e análise visual macroscópica. Neste ensaio a fração graúda dos agregados reciclados tem seus grãos agrupados de acordo com sua natureza, de maneira a identificar-se as porcentagens dos diferentes materiais que compõem o agregado reciclado coletado.

3.4.2 Teor de material pulverulento

O material pulverulento é o passante na peneira cuja malha possui abertura de 0,075 mm. O ensaio para determinação desta característica dos agregados é regulamentado pela NBR NM 46:2013. Os ensaios foram realizados em duplicata, portanto os valores encontrados correspondem à média de duas determinações.

A NBR 15116:2004 (ABNT, 2004b) estabelece valores limites para o teor de pulverulento do agregado reciclado a ser empregado em concreto sem função estrutural (Tabela 14).

Tabela 14 - Teor de material pulverulento - Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural.

	ARC		ARM	
	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo
Teor de material passante na malha 75 μm (%)	≤ 10	≤ 15	≤ 10	≤ 20

Fonte: Adaptado de ABNT, 2004b.

Após o ensaio, foi verificado se o valor encontrado para teor de material pulverulento se enquadra nos limites especificados na norma.

3.4.3 Massa específica e massa unitária

A massa específica corresponde à relação entre a massa de um agregado seco e seu volume, excluindo-se o volume dos poros. Foram realizados os ensaios para agregados miúdos, de acordo com a NBR NM 52:2009 (ABNT, 2009c), e para os agregados graúdos, de acordo com a NBR NM 53:2009 (ABNT, 2009d).

Considerando-se a massa do agregado por unidade de volume unitário, com vazios intergranulares e volume aparente inclusos, a norma regulamentadora é a NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006). Foi determinada a massa unitária solta e compactada apenas do agregado graúdo natural. Os ensaios foram realizados em duplicata e, portanto, os valores encontrados correspondem à média de duas determinações.

3.4.4 Absorção de água

O ensaio de absorção de água do agregado determina a porcentagem de acréscimo de massa de uma amostra devido ao preenchimento de seus poros permeáveis por água. Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR NM 30:2001 (ABNT, 2001b), somente para os agregados reciclados miúdos.

Após secagem em estufa por 24 h, a amostra de agregado foi coberta por água, e mantida desta maneira por 24 h. Posteriormente a água em excesso foi retirada, e iniciou-se o processo de secagem uniforme da amostra, que foi realizado com o auxílio de um secador de cabelo (Figura 21a). Este processo foi realizado até o agregado atingir a condição saturada superfície seca, que foi determinada a partir

da moldagem de um tronco cônico metálico (Figura 21b). O agregado atinge esta condição quando o cone de agregado miúdo desmorona ao ser retirado do molde.

Este ensaio foi realizado em duplicada, e a absorção foi determinada como sendo a média dos resultados.

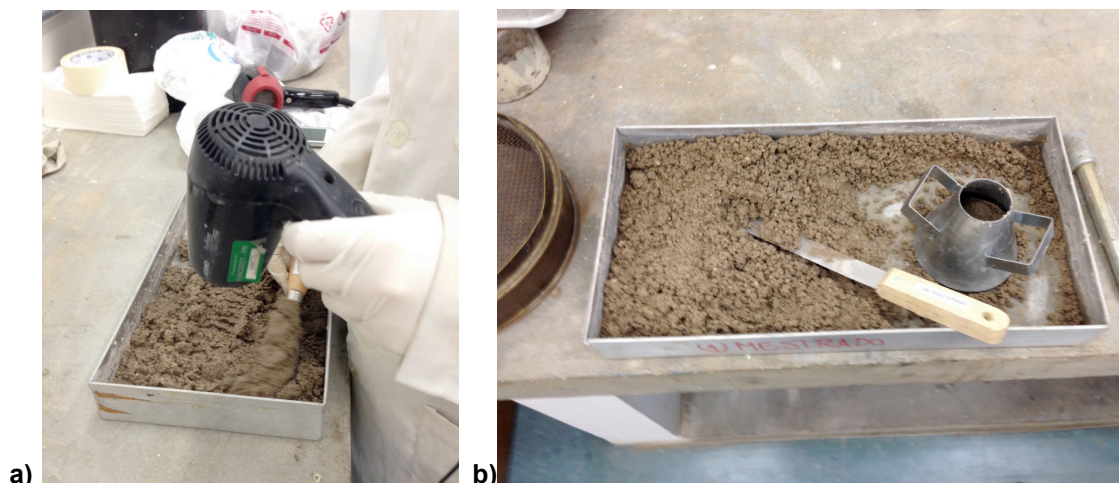


Figura 21 – Ensaio de absorção do agregado reciclado miúdo. a) Secagem da amostra. b) Moldagem do tronco de cone.

Fonte: Autoria própria.

A NBR 15116:2004 (ABNT, 2004b) estabelece valores limites para a absorção de água do agregado reciclado a ser empregado em concreto sem função estrutural (Tabela 15).

Tabela 15 – Absorção de água - Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural

	ARC		ARM	
	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo
Absorção de água (%)	≤7	≤12	≤12	≤17

Fonte: Adaptado de ABNT, 2004b.

Os resultados obtidos a partir deste ensaio foram comparados com os valores da Tabela 15, de modo a verificar se o agregado se enquadra nos requisitos estabelecidos pela norma.

3.4.5 Absorção de água ao longo do tempo

O ensaio de absorção de água do agregado miúdo ao longo do tempo foi realizado com base na NBR NM 30:2001 (ABNT, 2001b), porém ao invés de cobrir a

amostra com água durante 24 h, foram realizados ensaios com amostras que foram submetidas a diferentes intervalos de tempo de imersão em água, sendo estes os seguintes: 1, 2, 3, 5, 10, e 30 minutos e 1, 2,5, 3 e 4 horas. Cada amostra possuía uma massa seca inicial de 100 g, e os ensaios foram realizados somente uma vez para cada intervalo de tempo de imersão.

3.5 PREPARO DAS AMOSTRAS DE CONCRETO

Inicialmente, como parâmetro de dosagem, adotou-se uma resistência característica (f_{ck}) de 20 MPa. Considerando a variabilidade da resistência do concreto devido ao seu processo de obtenção, fez-se necessário um ajuste utilizando um desvio padrão de dosagem (S_d) de forma a se obter a resistência de dosagem do concreto à compressão (f_{cj}), como segue:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \times S_d \quad (2)$$

Utilizou-se o S_d no valor de 4 MPa obtido por meio da NBR 12655:2006 (ABNT, 2006), adotando-se a condição A, em que o proporcionamento dos materiais é feito em massa e há correção de umidade. Dessa forma, foi calculado o f_{cj} , que resultou em 26,6 MPa. Tendo em mãos este valor, o procedimento de dosagem para a produção dos concretos foi o ABCP/ACI, por meio do qual obteve-se o traço inicial 1:2,90:3,16, com a/c de 0,645.

Como parâmetro para o abatimento do tronco de cone, foi utilizado o limite de 5 a 7cm estabelecidos por Ripper (1995) para concretos para estruturas usuais e lastros com consistência plástica.

Foram obtidos concretos com três taxas de substituição de agregado natural por agregado reciclado miúdo (0%, 25% e 50%). No decorrer do presente trabalho, o concreto com taxa de substituição nula (concreto de referência), será denominado concreto C_{Ref} . Os concretos cujos teores de substituição são 25% e 50% serão denominados C25% e C50%, respectivamente.

Por fim, para cada teor de substituição foram produzidas duas betonadas de 20 litros cada. Ressalta-se que as quantidades de agregado reciclado miúdo

empregadas nos concretos C25% e C50% foram corrigidas com base na equação 1, apresentada na revisão de literatura.

Para a execução de cada betonada do concreto de controle, inicialmente realizou-se a imprimação da betoneira com uma argamassa de mesmo traço do concreto. Posteriormente, foram adicionados os materiais previamente pesados na seguinte ordem: 50% da água, brita, cimento, areia e os 50% de água remanescentes. Após 10 minutos de mistura, foi realizado o ensaio *slump test*, que apresentou o resultado de 3 cm, inferior ao almejado. Notou-se, então, a necessidade do aumento do teor de argamassa, alterando o traço para 1:2,90:2,81 e tornando possível o abatimento de tronco de cone de 6 cm, valor dentro do limite estipulado.

Nos concretos C25% e C50%, de maneira a corrigir os efeitos da absorção de água dos agregados reciclados na mistura de concreto, estes foram pré-molhados por 15 minutos com a quantidade de água equivalente a 80% da absorção total do agregado reciclado, recomendada pela NBR 15116:2004 (ABNT, 2004b). O processo de obtenção dos concretos com teores de substituição foi similar ao do concreto de controle, com a ressalva de que o agregado reciclado foi lançado à betoneira imediatamente após a areia.

Para os ensaios do concreto no estado endurecido foram utilizados moldes cilíndricos de 10 cm x 20 cm, como mostra a Figura 22.



**Figura 22 – Molde metálico cilíndrico utilizado para a confecção dos corpos de prova.
Fonte: Autoria própria.**

Foram confeccionados 21 corpos de prova (CP's) por traço, totalizando 63. O número de CP's utilizados em cada ensaio é apresentado no quadro da Figura 23. A cura dos corpos de prova de concreto ocorreu em umidade ambiente.

Ensaio	Número de CPs ensaiados
Absorção, índice de vazios e massa específica	4
Resistência à compressão axial (7 dias)	4
Resistência à compressão axial (28 dias)	6
Resistência à tração por compressão diametral	4
Módulo de elasticidade	3
Total	21

Figura 23 – Relação de número de corpos de prova por tipo de ensaio de concreto.
Fonte: Autoria própria.

3.6 ENSAIOS DE CONCRETO

As propriedades dos concretos com diferentes teores de substituição de agregado natural por agregado de RCD estudadas foram as seguintes: consistência (estado fresco), absorção de água, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão axial, resistência à compressão diametral, e módulo estático de elasticidade.

3.6.1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone

Este ensaio, conhecido como *slump test*, avalia a trabalhabilidade do concreto no estado fresco e é regulamentado pela NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998). Para sua execução fazem-se necessários uma base metálica plana quadrada, um molde tronco-cônico e uma haste metálica de seção circular.

A trabalhabilidade foi determinada para cada um dos três tipos de concreto produzidos (C_{Ref} , C25% e C50%).

3.6.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica, relacionados à porosidade do concreto, foram realizados de acordo com a NBR 9778:2009 (ABNT, 2009e).

Após 28 dias de cura, foram colocados 4 corpos de prova de cada traço em estufa a 100 °C por 24 h, e foram medidas suas massas secas (M_s). Em seguida, estes corpos de prova foram colocados em imersão em água também pelo período de 24h, e, após secagem superficial, realizaram-se medidas de sua massa em condição saturada (M_{sat}). A massa da amostra saturada imersa em água (M_i) foi determinada com a utilização de uma balança hidrostática

Para o cálculo da absorção (A), utiliza-se a seguinte fórmula:

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100\% \quad (3)$$

O cálculo do índice de vazios (I_v), é obtido pela relação que segue:

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100\% \quad (4)$$

As massas específicas a serem calculadas são a real (γ_r), da amostra seca (γ_s) e a massa específica saturada (γ_{sat}), de acordo com as fórmulas:

$$\gamma_r = \frac{M_s}{M_s - M_i} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (5)$$

$$\gamma_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (6)$$

$$\gamma_{sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (7)$$

Este ensaio foi realizado 4 vezes cada traço de concreto, sendo 2 amostras por betonada.

3.6.3 Resistência à compressão axial

A obtenção das resistências à compressão aos 7 e 28 dias dos corpos de prova de concreto foram realizadas pelo método descrito na NBR 5739:2007 (ABNT, 2007).

Utilizou-se uma prensa hidráulica EMIC modelo PC200 com capacidade de 200 tf (Figura 24) Na realização deste ensaio os corpos de prova encontravam-se com umidade ambiente.



Figura 24 – Prensa utilizada no ensaio de compressão axial.
Fonte: Autoria própria.

Para cada teor de substituição foram realizados 10 rompimentos, sendo 4 corpos de prova ensaiados a 7 dias, e 6 corpos de prova, a 28 dias.

3.6.4 Resistência à tração por compressão diametral

Para o ensaio de tração na compressão, adotou-se como referência a NBR 7222:2011 (ABNT, 2011).

A prensa hidráulica utilizada foi a EMIC modelo DL30.000 com capacidade de 30tf e velocidade uniforme de aplicação de carga de 0,05 MPa/s. Além disso, fez-se necessário um dispositivo auxiliar para o rompimento dos corpos de prova (Figura 25).

Para o cálculo da resistência à tração por compressão diametral (f_t), utiliza-se a seguinte fórmula:

$$f_t = \frac{2P}{\pi dh} \quad (N/mm^2) \quad (8)$$

P = força aplicada (N)

d = diâmetro do corpo de prova (mm)

h = altura do corpo de prova (mm)

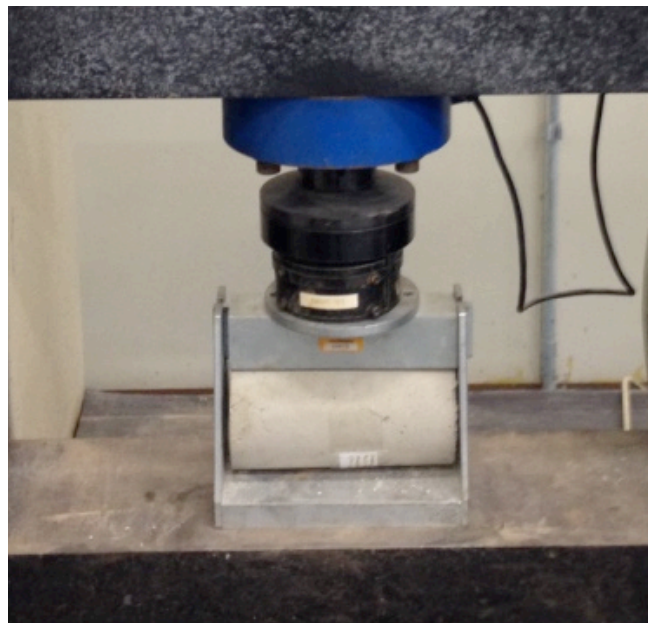


Figura 25 – Prensa e dispositivo utilizados no ensaio de compressão diametral.
Fonte: Autoria própria.

Foram rompidos 4 corpos de prova aos 28 dias para cada traço de substituição.

3.6.5 Módulo de elasticidade estático

Para a realização deste ensaio, utilizou-se a mesma prensa do ensaio de compressão diametral, e medidores de deformação mecânicos com bases independentes (Figura 26). Nestes, encontravam-se dois relógios comparadores posicionados diametralmente opostos, e foram realizadas leituras a cada 2000 N aplicados a partir da terceira etapa de carregamento. A taxa de carregamento

utilizada foi de 5 MPa/min. A normalização do procedimento encontra-se na NBR 8522:2008 (ABNT, 2008b).



Figura 26 – Prensa e medidores de deformação com bases independentes utilizados no ensaio de módulo de elasticidade estático.
Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Lei de Hooke, por meio da plotagem do gráfico da deformação pela tensão aplicada nos corpos de prova, o módulo de elasticidade é determinado pela inclinação da reta referente ao regime elástico do concreto, em que tensão e deformação específica apresentam uma proporcionalidade linear.

Foram realizados três ensaios para cada traço de concreto aos 28 dias e em umidade ambiente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e a discussão, referentes aos ensaios de caracterização dos agregados, bem como às propriedades dos concretos produzidos com diferentes teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os resultados e discussão que dizem respeito à caracterização dos agregados referem-se à distribuição granulométrica, escolha da fração do agregado a ser utilizado para substituir o agregado natural, natureza dos materiais constituintes do agregado reciclado, teor de material pulverulento, massa específica e massa unitária, e absorção de água, sendo apresentados nos itens a seguir.

4.1.1 Natureza dos materiais constituintes

Para este ensaio foi utilizada a amostra de agregado reciclado gráudo AR Total 1, que passou pelo ensaio de composição granulométrica. A Tabela 16 apresenta as proporções em massa dos materiais que compõem o agregado reciclado, considerando a fração passante na peneira 19 mm e retida na peneira 4,75 mm.

Tabela 16 – Resultado do ensaio de composição do agregado reciclado gráudo passante na peneira 19 mm e retido na 4,75 mm.

Grupo	Massa seca (g)	Proporção (%)
G1	684,80	34,55
G2	753,30	38,00
G3	365,50	18,44
G4	178,70	9,01
Total	1.982,30	100,00

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados acima, é possível afirmar que o agregado reciclado passante na peneira 19 mm e retido na peneira 4,75 mm é classificado como ARM, uma vez que a soma dos percentuais dos grupos 1 e 2 é menor que 90%, correspondendo a 72,55%. Percebe-se também que o teor de material cerâmico corresponde a 18,44%, enquanto o teor de materiais não minerais corresponde a 9,01%.

A Figura 27 ilustra as porções de materiais que compõem o agregado reciclado passante na peneira 19 mm e retido na peneira 4,75 mm, separadas nos quatro grupos definidos pela NBR 15116:2004.

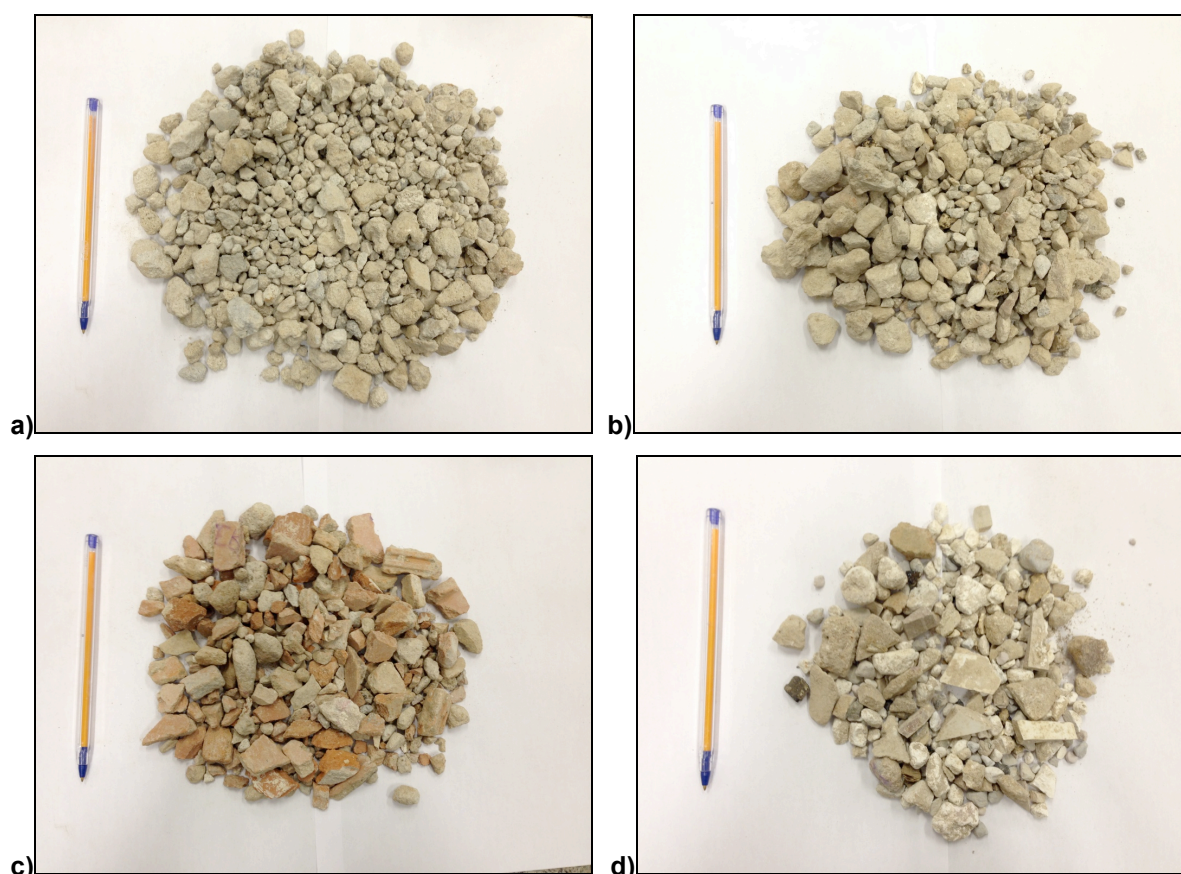


Figura 27 – Porções obtidas por meio do ensaio de composição do agregado reciclado gráudo passante na peneira 19 mm e retido na 4,75 mm. a) Grupo 1. b) Grupo 2. c) Grupo 3. d) Grupo 4. Fonte: Autoria própria.

A Tabela 17 apresenta as proporções em massa dos materiais que compõem o agregado reciclado, considerando a fração passante na peneira 19 mm e retida na peneira 4,75 mm.

Tabela 17 – Resultado do ensaio de composição do agregado reciclado graúdo passante na peneira 63 mm e retido na 19 mm.

Grupo	Massa seca (g)	Proporção (%)
G1	901,50	29,43
G2	1.348,80	44,04
G3	511,10	16,69
G4	301,60	9,85
Total	3.063,00	100,00

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados apresentados, é possível afirmar que o agregado reciclado passante na peneira 63 mm e retido na peneira 19 mm é classificado como ARM, uma vez que a soma dos percentuais dos grupos 1 e 2 é menor que 90%, correspondendo a 73,47%. Percebe-se também que o teor de material cerâmico corresponde a 16,69%, enquanto o teor de materiais não minerais corresponde a 9,85%.

A Figura 28 ilustra as porções de materiais que compõem o agregado reciclado passante na peneira 63 mm e retida na peneira 19 mm, separadas nos quatro grupos definidos pela NBR 15116:2004.

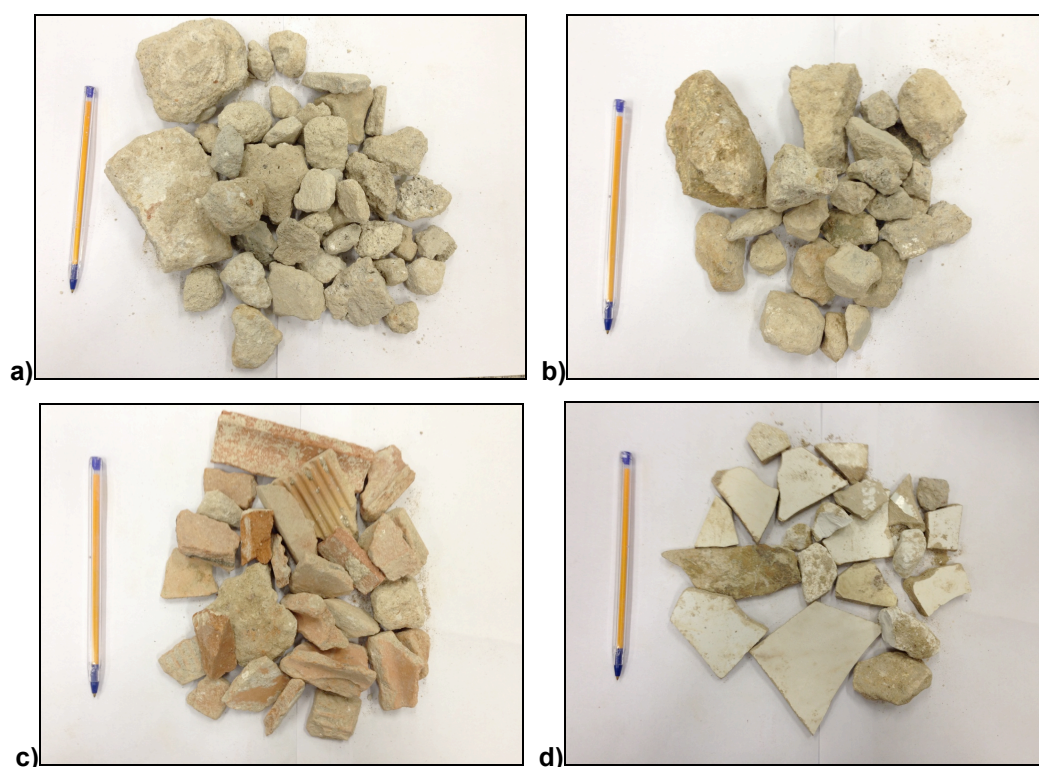


Figura 28 – Porções obtidas por meio do ensaio de composição do agregado reciclado graúdo passante na peneira 63 mm e retido na 19 mm. a) Grupo 1. b) Grupo 2. c) Grupo 3. d) Grupo 4.
Fonte: Autoria própria.

A Tabela 18 apresenta as proporções em massa dos materiais que compõem o agregado reciclado, considerando toda a fração graúda, correspondente ao material passante na peneira 63 mm e retido na peneira 4,75 mm.

Tabela 18 – Resultado do ensaio de composição do agregado reciclado graúdo passante na peneira 63mm e retido na 4,75mm.

Grupo	Massa seca (g)	Proporção (%)
G1	1.586,30	31,44
G2	2.102,10	41,66
G3	876,60	17,37
G4	480,30	9,52
Total	5.045,30	100,00

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados apresentados acima, percebe-se que o agregado reciclado, considerando a dimensão máxima característica de 63 mm, pode ser classificado como ARM, sendo a soma dos percentuais dos grupos 1 e 2 igual a 73,10%. O teor de material cerâmico corresponde a 17,37%, enquanto o teor de materiais não minerais corresponde a 9,52%.

Ressalta-se que o agregado como um todo é classificado como ARM, mesmo o ensaio tendo sido realizado somente com a fração graúda, uma vez que a origem da fração miúda e graúda é a mesma.

4.1.2 Teor de material pulverulento

As Tabelas 19 e 20 apresentam os teores de material fino passante pela peneira 75 µm dos agregados naturais (areia e brita), e do agregado reciclado miúdo, respectivamente.

Tabela 19 – Resultado do ensaio de teor de material pulverulento do agregado natural graúdo e miúdo.

	AN Miúdo 1	AN Miúdo 2	AN Graúdo 1	AN Graúdo 2
Teor pulverulento (%)	1,87	1,60	0,96	0,66
Média	1,73		0,81	

Fonte: Autoria própria.

Tabela 20 – Resultado do ensaio de teor de material pulverulento do agregado reciclado miúdo.

	AR Miúdo 1	AR Miúdo 2
Teor pulverulento (%)	3,62	2,43
Média	3,03	

Fonte: A autoria própria.

Os resultados de teor de pulverulentos dos agregados naturais encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211:2009 (ABNT, 2009). No caso do agregado reciclado miúdo, o teor de pulverulentos encontra-se dentro do limite de 20% estipulado pela NBR 15116:2004 (ABNT, 2004b) para utilização de agregado reciclado misto miúdo em concreto sem função estrutural. Pode-se afirmar que o teor de pulverulentos do agregado reciclado miúdo é cerca de 75% maior que o teor de pulverulentos do agregado natural miúdo.

4.1.3 Massa específica e massa unitária

A Tabela 21 apresenta os valores de massa específica dos agregados naturais e do agregado reciclado miúdo.

Tabela 21 – Massa específica dos agregados utilizados nos concretos.

	AN Miúdo	AN Graúdo	AR Miúdo
Massa específica (g/cm³)	2,63	2,74	2,54

Fonte: A autoria própria.

De acordo com os resultados acima, percebe-se que o agregado reciclado miúdo apresenta uma massa específica 3,4% menor com relação ao agregado natural miúdo. Esta relação está próxima do que foi indicado por Bazuco (1999) *apud* Ferreira (2013), de que a massa específica dos agregados reciclados é cerca de 5 a 10% menor que a dos agregados naturais. Além disso, a massa específica do agregado reciclado miúdo é similar à do agregado utilizado no estudo de Vieira (2003), que encontrou a massa específica de 2,51 g/cm³ para os agregados naturais miúdos utilizados em sua pesquisa, os quais possuem uma natureza similar ao agregado utilizado no presente trabalho.

A Tabela 22 apresenta os resultados de massa unitária solta e compactada do agregado natural graúdo.

Tabela 22 – Massa unitária solta e compactada do agregado natural graúdo.

	Solta	Compactada
Massa unitária (kg/m³)	1.425,72	1.506,55

Fonte: Autoria própria.

Estes resultados foram utilizados para o cálculo da dosagem do concreto.

4.1.4 Absorção de água

A absorção de água encontrada para o agregado reciclado miúdo é de 12,35%. Este valor enquadra-se dentro do limite estabelecido pela NBR 15116:2004, que estabelece que a absorção de água máxima para agregados reciclados mistos miúdos para utilização em concreto deve ser de 17%.

4.1.5 Absorção de água ao longo do tempo

A Tabela 23 apresenta a absorção do agregado reciclado miúdo para cada tempo de imersão em água.

Tabela 23 – Absorção do agregado reciclado miúdo para diferentes tempos de imersão em água.

Tempo (min)	Absorção (%)
1	4,70
2	7,16
3	7,27
5	6,17
10	8,11
30	8,22
60	6,95
150	9,60
180	9,23
240	9,34

Fonte: Autoria própria.

A partir destes dados foi plotado um gráfico, e ajustada uma curva de absorção do agregado reciclado miúdo (Figura 29).

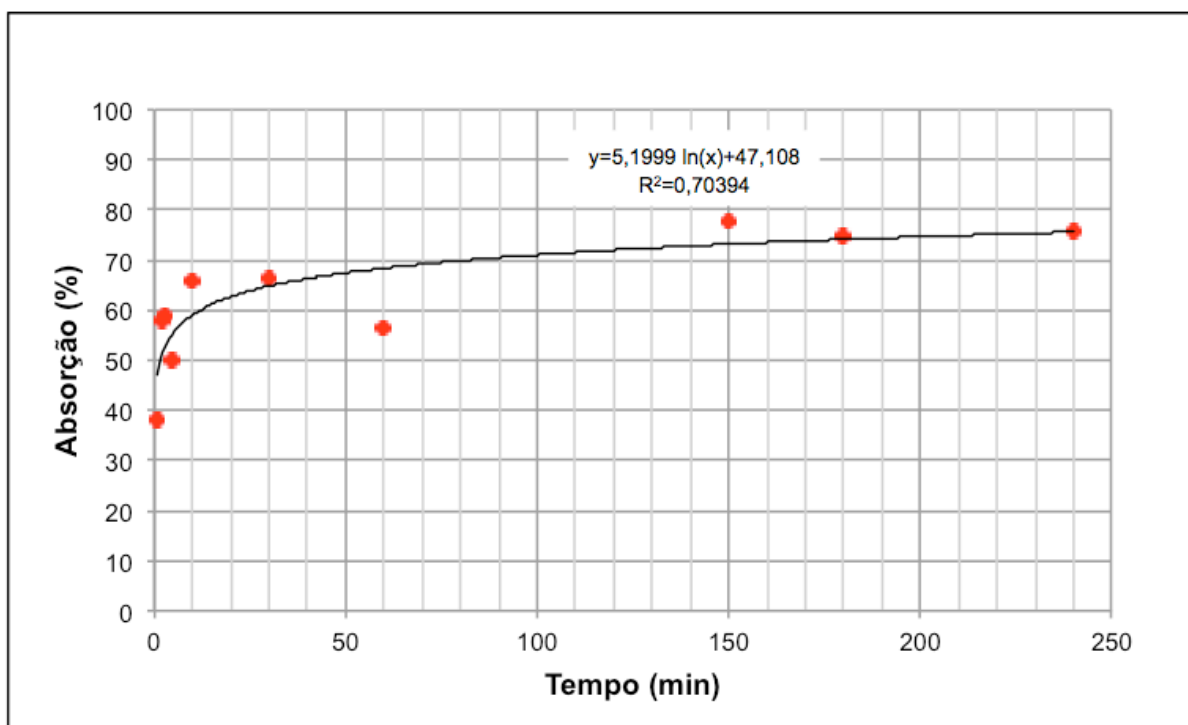


Figura 29 – Curva de absorção do agregado miúdo reciclado
Fonte: Autoria própria.

Com base no gráfico acima, estima-se que a porcentagem de água absorvida por este agregado após 15 minutos (intervalo de tempo utilizado para pré-molhagem) de imersão em água seja de 62%.

4.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS

Os resultados e discussão referentes às propriedades dos concretos correspondem à consistência, absorção, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão axial, resistência à compressão diametral, e módulo de elasticidade, e que serão apresentados nos itens a seguir.

4.2.1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone

Os valores obtidos pelos ensaios de consistência pelo abatimento do tronco de cone encontram-se na Tabela 24.

Tabela 1 – Abatimento de tronco de cone obtido pelos concretos com diferentes teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado.

	C_{Ref}	C25%	C50%
Abatimento obtido (cm)	6,0	5,0	3,5

Fonte: A autoria própria.

Pode-se observar que a adição do agregado reciclado causou a redução do *slump* do concreto, chegando a uma diferença de 42,67% para o C50%, quando comparado ao concreto convencional. No caso do concreto C25%, o *slump* ainda enquadra-se no limite de trabalhabilidade estabelecido para o C_{Ref} , entre 5,0 e 7,0 cm.

Uma vez que os agregados reciclados foram pré-molhados antes de serem adicionados à mistura de concreto, esperava-se que o aumento do teor de substituição levasse a uma diminuição da consistência do concreto, como observado por García-González *et al.* (2014). Porém, o *slump* diminuiu com o aumento do teor de substituição.

Tal resultado alerta para o fato de que a pré-molhagem recomendada pela NBR 15116:2004 (ABNT, 2004b) pode não ter sido suficiente para a correção da absorção excessiva de água pelo agregado oriundo de RCD. O intervalo de tempo de 15 minutos em que a pré-molhagem ocorreu também pode não ter sido satisfatório.

Uma solução para a correção do efeito de diminuição da trabalhabilidade do concreto seria o emprego de aditivo plastificante na mistura. Outra opção seria a adequação do procedimento de pré-molhagem dos agregados reciclados.

4.2.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os resultados dos ensaios de absorção de água dos concretos são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Absorção dos concretos no estado endurecido.

	C_{Ref}	C25%	C50%
Absorção (%)	5,61	7,97	8,74

Fonte: A autoria própria.

Observa-se que a absorção aumenta com o aumento do teor de substituição apesar de ser uma relação não linear, apresentando um aumento com relação ao concreto C_{Ref} de cerca de 42% e 65% para os concretos C25% e C50%, respectivamente.

Calculou-se, também, o índice de vazios dos corpos de prova de concreto, como segue na Tabela 26.

Tabela 26 – Índice de vazios dos concretos no estado endurecido.

	C_{Ref}	C25%	C50%
Índice de vazios (%)	12,49	16,86	18,20

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que o índice de vazios também é aumentado para cada teor de substituição em relação ao C_{Ref} , sendo que para o C25% há 35% mais vazios, e para o C50% este índice aumenta cerca de 46%. Estes dados confirmam o aumento da absorção com o aumento do teor de substituição. Estes resultados encontram-se em consonância com o observado por Tenório (2007), que verificou a tendência do índice de vazios aumentar com a substituição da areia por agregado miúdo reciclado. Esse aumento no índice de vazios pode estar relacionado com o maior teor de material pulverulento do agregado reciclado miúdo empregado no presente estudo, uma vez que essa fração é capaz de aprisionar mais ar na mistura fresca e assim, após o endurecimento, deixar maior quantidade de vazios na pasta (TENÓRIO, 2007).

Por fim, obtiveram-se os valores referentes às massas específicas real, seca e saturada dos concretos no estado endurecido para cada teor de substituição, como consta na Tabela 27.

Tabela 27 – Massa específica seca dos concretos no estado endurecido.

	C_{Ref}	C25%	C50%
M. esp. real (g/cm ³)	2,54	2,54	2,55
M. esp. seca (g/cm ³)	2,23	2,12	2,08
M. esp. saturada (g/cm ³)	2,35	2,28	2,26

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que o aumento do teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado, levou a uma diminuição da massa específica seca e saturada

dos concretos, o que se mostra de acordo com o aumento do índice de vazios e da absorção do concreto. Quanto à densidade do concreto, verificou-se que esta propriedade não foi interferida pelo teor de substituição de agregado, o que mostra que o fato da massa específica do agregado reciclado ser menor que a massa específica do agregado natural não influenciou esta característica do concreto.

4.2.3 Resistência à compressão axial

Os resultados dos ensaios de compressão axial do concreto aos 7 dias são apresentados na Tabela 28. Fazendo-se uma análise de dados espúrios, verificou-se que não houve necessidade de eliminar nenhum dos resultados para o cálculo da média.

Tabela 28 – Resultados dos ensaios de compressão axial do concreto aos 7 dias, em MPa.

	C _{Ref}	C25%	C50%
Betonada 1	22,0	17,4	22,2
	23,2	18,0	19,5
Betonada 2	24,4	18,8	21,9
	23,4	17,8	21,8

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados acima apresentados, foram calculadas as médias e os erros para cada um dos teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado, para 68,27% e 95,45% de confiabilidade (Tabela 29). Os erros apresentados estão considerando a correção por t de Student, para grau de liberdade igual a três.

Tabela 29 – Médias e erros dos resultados de resistência à compressão axial do concreto aos 7 dias, para as confiabilidades de 68,27% e 95,45%, em MPa.

		C _{Ref}	C25%	C50%
Confiabilidade	68,27%	23,3 ± 0,6	18,0 ± 0,3	21,4 ± 0,8
	95,45%	23,3 ± 1,6	18,0 ± 0,9	21,4 ± 2,1

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados acima apresentados, é possível afirmar, com uma confiabilidade de 95%, que a média da resistência à compressão aos 7 dias do concreto C25% é diferente da média da resistência obtida pelo C_{Ref}, sendo cerca de

23% menor com relação à do concreto C_{Ref} . O concreto C50%, por sua vez, obteve uma média de resistência à compressão aos 7 dias cerca de 8% menor com relação ao concreto C_{Ref} . É possível afirmar que, para uma confiabilidade de 68%, as médias das resistências à compressão do C50% e do C_{Ref} são diferentes. Existe portanto uma probabilidade de 32% de que a substituição de agregado natural por agregado reciclado em 50% não tenha afetado a resistência à compressão axial do concreto aos 7 dias.

Os resultados dos ensaios de compressão axial do concreto aos 28 dias são apresentados na Tabela 30. Fazendo-se uma análise de dados espúrios, verificou-se que não houve a necessidade de eliminar nenhum dos resultados para o cálculo da média.

Tabela 30 – Resultados dos ensaios de compressão axial do concreto aos 28 dias, em MPa.

	C_{Ref}	C25%	C50%
Betonada 1	24,7	22,5	26,8
	27,9	22,0	21,4
	27,6	20,8	24,0
Betonada 2	34,0	23,6	23,8
	30,3	25,2	27,6
	28,3	20,2	27,2

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados acima apresentados, foram calculadas as médias e os erros para cada um dos teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado, para 68,27% e 95,45% de confiabilidade (Tabela 31). Os erros apresentados estão considerando a correção por t de Student, para grau de liberdade igual a cinco.

Tabela 31 – Médias e erros dos resultados de resistência à compressão axial do concreto aos 28 dias, para as confiabilidades de 68,27% e 95,45%, em MPa.

	C_{Ref}	C25%	C50%
Confiabilidade	68,27%	28,8 ± 1,4	22,4 ± 0,8
	95,45%	28,8 ± 3,4	22,4 ± 2,0

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se, portanto que, após 28 dias de cura, a média de resistência à compressão do concreto C25% é aproximadamente 22% menor com relação à do

concreto C_{Ref} . Pode-se afirmar, com uma confiabilidade de 95%, que as médias de resistência à compressão do C25% e do C_{Ref} são diferentes. Analisando-se o concreto C50%, sua média de resistência à compressão axial após 28 dias de cura é cerca de 13% menor que o concreto C_{Ref} . Para uma confiabilidade de 68%, é possível afirmar que as médias de resistência à compressão do C50% e do C_{Ref} são diferentes. Portanto existe uma probabilidade de 32% de que a substituição de agregado natural por agregado reciclado em 50% não tenha afetado a resistência à compressão do concreto aos 28 dias.

A Figura 30 apresenta um gráfico com as médias, e seus respectivos erros padrão, para a resistência à compressão do concreto para os diferentes teores de substituição, tanto para 7 quanto para 28 dias.

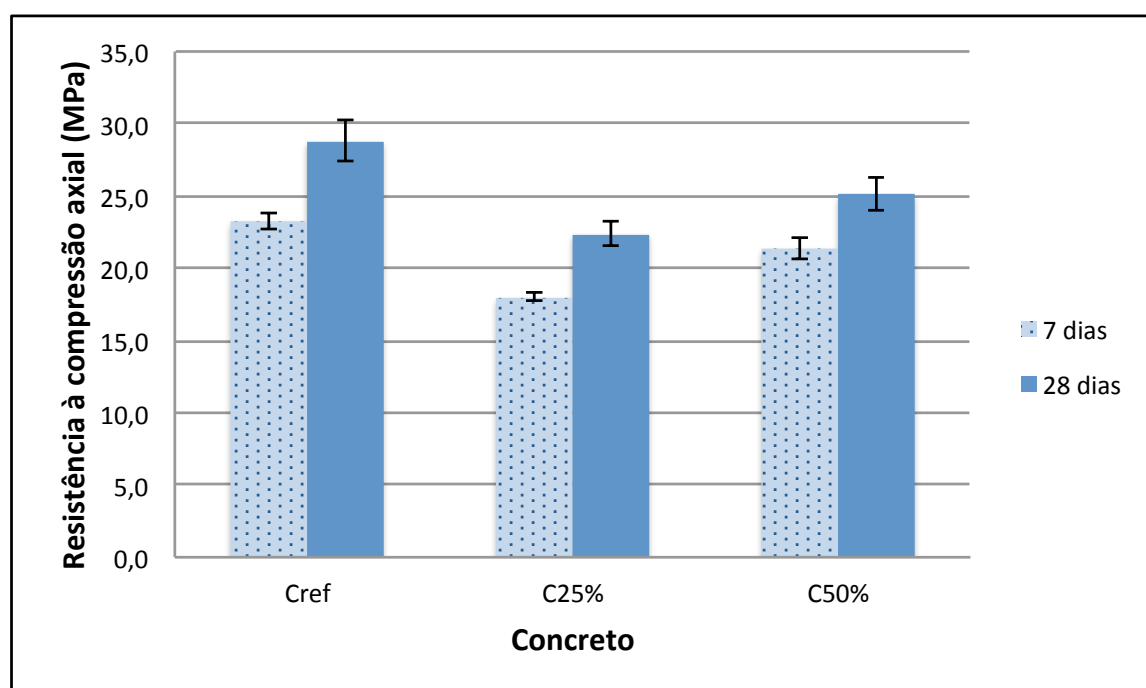


Figura 30 – Médias e erros padrão dos resultados de resistência à compressão axial do concreto aos 7 e 28 dias.

Fonte: Autoria própria.

Em suma, a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, considerando os teores de 25% e 50%, levou a um decréscimo na resistência à compressão do concreto aos 7 e aos 28 dias, fato que pode ser correlacionado com a literatura (FRANKLIN e GUMEDE, 2014; KHATIB, 2005). Porém, percebeu-se que taxa de substituição de 50% de agregado natural por agregado reciclado concreto foi a que menos trouxe prejuízos para a resistência à compressão axial do concreto.

O fato de o concreto C50% ter obtido uma maior resistência que o C25% encontra-se de acordo com o apresentado pelo estudo de Leite (2001), que observou, para um agregado de origem semelhante ao agregado empregado no presente estudo, um aumento da resistência à compressão com o aumento do teor de substituição do agregado miúdo. Sendo o agregado reciclado empregado no presente estudo composto por uma parcela de cerâmica (18,44%), o ganho de resistência à compressão pode estar relacionado com a pozolanicidade de seus finos, que agem como aglomerantes, contribuindo para o aumento da resistência do concreto (CABRAL *et al.*, 2007; LEITE, 2001; LIU *et al.*, 2014; VIEIRA, 2005).

Outro fator que pode ter contribuído para a obtenção de uma maior resistência à compressão para o concreto C50% é o fato de que a água absorvida pelos agregados reciclados pode ter se tornado disponível, com o passar do tempo de mistura, para a hidratação de partículas remanescentes de cimento que não foram hidratadas (CABRAL *et al.*, 2007).

4.2.4 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias são apresentados na Tabela 32. Fazendo-se uma análise de dados espúrios, verificou-se a necessidade de eliminar o valor de 2,0 MPa do concreto C_{Ref} para o cálculo da média.

Tabela 32 – Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias, em MPa.

	C _{Ref}	C25%	C50%
Betonada 1	2,0	2,3	2,7
	2,7	2,0	2,3
Betonada 2	2,5	2,8	3,1
	3,1	2,4	2,4

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados acima apresentados, foram calculadas as médias e os erros para cada um dos teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado, para 68,27% e 95,45% de confiabilidade (Tabela 33). Os erros apresentados estão considerando a correção por t de Student, considerando grau de

liberdade igual a 3 para os resultados dos concretos C25% e C50%, e igual a 2 para o concreto C_{Ref} .

Tabela 33 – Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias, em MPa.

		C_{Ref}	C25%	C50%
Confiabilidade	68,27%	$2,8 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,2$	$2,6 \pm 0,2$
	95,45%	$2,8 \pm 0,7$	$2,4 \pm 0,6$	$2,6 \pm 0,6$

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se portanto que, após 28 dias de cura, a resistência à tração por compressão diametral do concreto C25% é aproximadamente 14% menor com relação à resistência do concreto C_{Ref} . Pode-se afirmar com uma confiabilidade de 68% que as médias de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias são diferentes. Analisando-se o concreto C50%, percebe-se que a resistência encontrada foi praticamente a mesma do concreto C_{Ref} .

A Figura 31 apresenta um gráfico com as médias, e seus respectivos erros padrão, para a resistência à tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias para os diferentes teores de substituição.

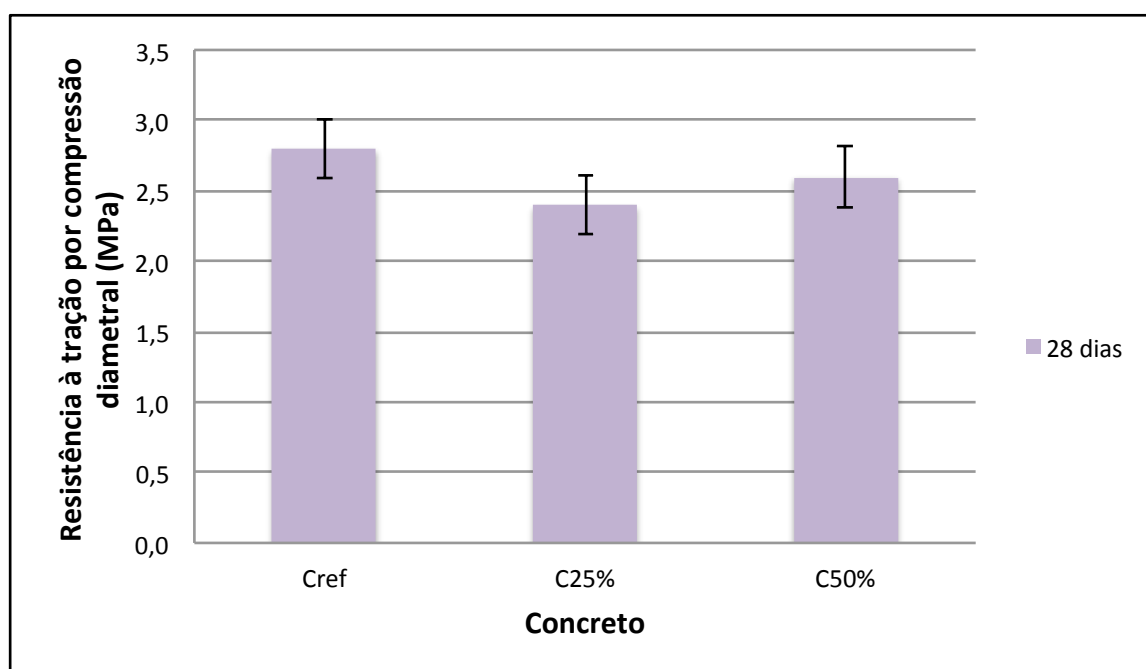


Figura 31 – Médias e erros padrão dos resultados de resistência à tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias.

Fonte: Autoria própria.

Em suma, a substituição do agregado reciclado pelo agregado natural em 25% levou a um decréscimo na resistência à tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias. A taxa de substituição de 50% de agregado natural por agregado reciclado concreto não trouxe prejuízos para a resistência à compressão do concreto. Os resultados encontrados mostram-se de acordo com os resultados obtidos para resistência à compressão. Isto porque, para ambas resistências, os valores encontrados foram maiores para o concreto C50% em comparação com o C25%. Além disso, o estudo de Leite (2001) aponta o fato de que agregados reciclados miúdos podem trazer um aumento tanto na resistência à compressão quanto à tração dos concretos.

4.2.5 Módulo de elasticidade estático

Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias, em GPa.

	C_{Ref}	C25%	C50%
Betonada 1	31,6	30,6	23,2
Betonada 2	36,7	25,7	24,0
	31,0	28,7	22,3

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados acima apresentados, foram calculadas as médias e os erros para cada um dos teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado, para 68,27% e 95,45% de confiabilidade (Tabela 35). Os erros apresentados estão considerando a correção por t de Student, para grau de liberdade igual a dois.

Tabela 35 – Médias e erros dos resultados de módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias, para as confiabilidades de 68,27% e 95,45%, em GPa.

		C_{Ref}	C25%	C50%
Confiabilidade	68,27%	33,1 ± 2,3	28,3 ± 1,9	23,1 ± 0,6
	95,45%	33,1 ± 8,2	28,3 ± 6,4	23,1 ± 2,2

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que, após 28 dias de cura, o módulo de elasticidade do C25% é aproximadamente 15% menor com relação à resistência do concreto controle. Para uma confiabilidade de 68%, é possível afirmar que as médias do módulo de elasticidade do C25% e do C_{Ref} são diferentes. Analisando-se o C50%, pode-se afirmar que o módulo de elasticidade encontrado foi cerca de 30% menor em comparação com o concreto controle. Pode-se afirmar que, para uma confiabilidade de 95%, as médias de módulo de elasticidade do C50% e do C_{Ref} são diferentes.

A Figura 32 apresenta um gráfico com as médias, e seus respectivos erros padrão, para o módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias para os diferentes teores de substituição.

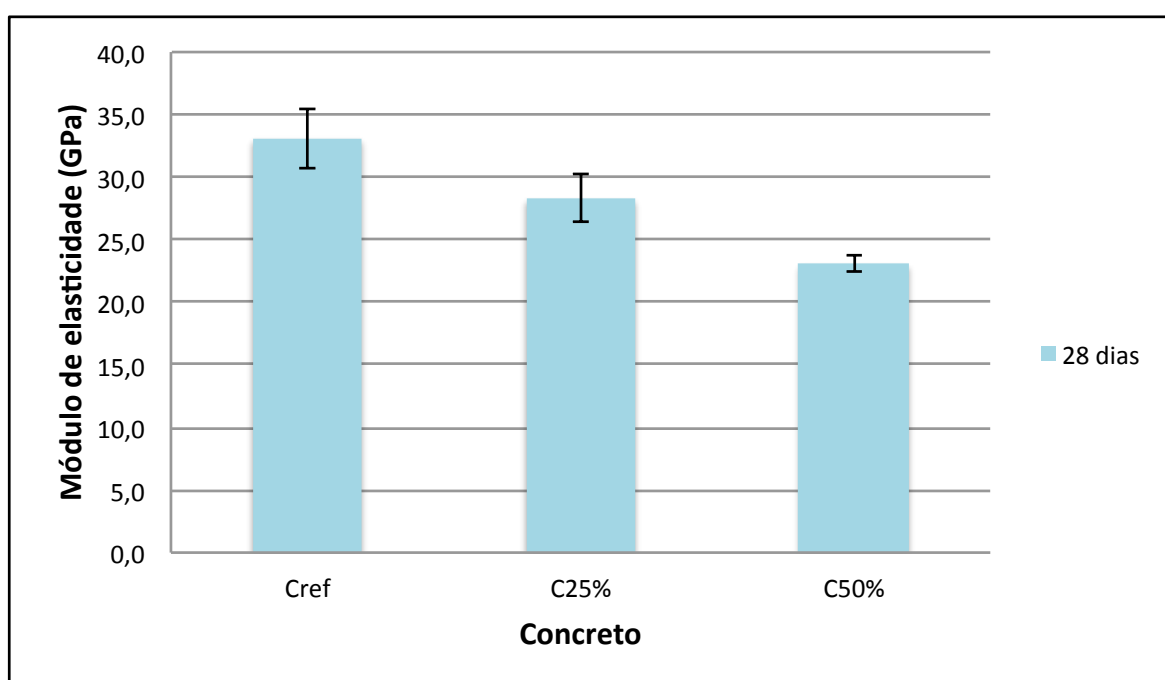


Figura 32 – Médias e erros padrão dos resultados de módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias.

Fonte: Autoria própria.

Em suma, ocorreu uma diminuição no módulo de elasticidade do concreto com o aumento do teor de substituição, o que se mostra de acordo com o observado por Khatib (2005). Além disso, com base nos resultados obtidos pelo ensaio para determinação do índice de vazios, essa redução no módulo de elasticidade era esperada.

Porém, ao comparar-se os resultados de módulo de elasticidade com os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e diametral, esperava-se

que o módulo de elasticidade do C50% apresentasse um aumento com relação ao C25%.

Com base nas propriedades estudadas dos agregados reciclados e dos concretos, não foi possível verificar o motivo do aumento da resistência à compressão não ter sido acompanhado pelo aumento do módulo de elasticidade e pela redução do índice de vazios. Talvez um estudo das propriedades químicas e da microestrutura das partículas do agregado reciclado, bem como da interação entre pasta e agregado, poderia auxiliar a entender a causa deste fenômeno.

5 CONCLUSÃO

A partir do presente estudo, pode-se concluir que:

- O agregado reciclado empregado no presente estudo é classificado como Agregado de Resíduo Misto.
- Quanto à granulometria, a fração miúda do agregado reciclado estudado é adequada para emprego em concreto, enquanto a fração graúda deve ter sua composição granulométrica corrigida.
- A fração miúda encontra-se em maior abundância na bica corrida grossa em estudo, representando cerca de 51%, enquanto a fração graúda com dimensão máxima característica de 19 mm corresponde a 19%.
- O teor de material pulverulento e a absorção de água do agregado reciclado miúdo estão dentro dos limites estabelecidos para uso em concreto sem função estrutural.
- A massa específica do agregado reciclado miúdo é cerca de 3% menor que a do agregado natural miúdo.
- O aumento do teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado levou a uma diminuição na trabalhabilidade, das massas específicas seca e saturada e do módulo de elasticidade do concreto, bem como a um aumento da absorção e do índice de vazios. A massa específica real do concreto não foi interferida pelo teor de substituição.
- Com relação à resistência à compressão axial e diametral dos concretos, a substituição de agregado natural pelo agregado reciclado levou a um decréscimo na resistência do concreto. O concreto C50% obteve uma maior resistência à compressão axial que o C25%. Quanto à resistência à tração por compressão diametral, o concreto C50% obteve a mesma resistência que o concreto controle.
- A fração miúda da bica corrida grossa proveniente da USIPAR tem potencial para emprego em concreto.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e conhecimentos adquiridos com a realização do presente trabalho, foram listadas sugestões para realização de trabalhos futuros envolvendo o emprego da bica corrida produzida pela USIPAR em concreto, apresentadas a seguir:

- Estudo da influência do emprego da fração graúda do agregado reciclado nas propriedades de concretos;
- Estudo da variabilidade da composição e demais propriedades dos agregados reciclados por meio da coleta de amostras de material produzido em diferentes dias;
- Estudo da composição da fração de agregado reciclado miúdo, de maneira a identificar-se o percentual de materiais não minerais que a compõem;
- Estudo considerando a influência do emprego do agregado reciclado nas propriedades do concreto, considerando-se taxas de substituição de agregado natural por agregado reciclado diferentes das utilizadas no presente estudo;
- Estudo das propriedades químicas e microestruturais dos agregados reciclados, e da interação pasta e agregado no concreto;
- Estudo da pozolanicidade dos contaminantes presentes no agregado reciclado e sua influência nas propriedades do concreto;
- Estudo da influência da absorção de água pelo RCD na hidratação do cimento.

REFERÊNCIAS

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

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009

_____. **NBR 7222:** Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8522:** Concreto: Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008b.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009e.

_____. **NBR 10004:** Classificação de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

_____. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. Rio de Janeiro, 2004b.

_____. **NBR NM 27:** Agregados: Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001a.

_____. **NBR NM 30:** Agregado Miúdo - Determinação da Absorção de Água. Rio de Janeiro, 2001b.

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

_____. **NBR NM 46:** Agregados: Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009c.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009d.

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

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

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº. 307** - Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, de 05 de julho de 2002. Brasília DF, n. 136, 2002.

_____. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Área de manejo de resíduos da construção e resíduos volumosos**: orientação para o seu licenciamento e aplicação da Resolução Conama 307/2002. 2005.

_____. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº. 348** - Altera a Resolução CONAMA no 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos, de 16 de agosto de 2004. Brasília DF, n. 158, 2004.

_____. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº. 431** - Altera o art. 3o da Resolução no 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso", de 24 de maio de 2011. Brasília DF, n. 99, 2011.

_____. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº. 448** - Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, de 18 de janeiro de 2012. Brasília DF, n. 14, 2012.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto - Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. São Carlos: USP, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 18 de nov. 2015.

CABRAL, A. E. B., SCHALCH, V., DAL MOLIN, D. C. C., RIBEIRO, J. L. D. Modelagem da resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados de RCD. **Minerva**, São Carlos, v. 4, n. 1, p. 75-84, 2007.

CAVALLINE, T. L., SCHWERIN, D. E., WEGGEL, D. C., MCCLURE, C. Construction of a Full-Scale Recycled Brick Masonry Aggregate Concrete Test Pavement. Proceedings of 4th IJAC/ISAM Joint International Conference, 2014, Orlando/Florida. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://cd14.ijme.us/papers/031__Tara%20L.%20Cavalline,%20Dallas%20E.%20Schwerin,%20David%20C.%20Weggel,%20Chuck%20McClure.pdf>. Acesso em: 8 de out. 2014.

CHEN, H., YEN, T., CHEN, K. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 125–132, 2003.

FERREIRA, E. T. **Contribuição ao estudo do potencial de aproveitamento de agregados reciclados de RCC produzidos na Usiben - João Pessoa - em concreto estrutural aplicado em lajes pré-moldadas**. 2013. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

FERREIRA, G. E., PEREIRA, L. dos S. Mercados de Agregados no Brasil. In: Salvador Luiz Matos de Almeida, S. L. M de, LUZ, A. B. da (Ed.). **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. p. 3-29.

FRANKLIN, S. O., GUMEDE, M. T. Studies on Strength and Related Properties of Concrete Incorporating Aggregates from Demolished Wastes: Part 1—A Global Perspective. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 4, p. 311-317, 2014.

GARCÍA-GONZÁLEZ, J., RODRÍGUEZ-ROBLES, D., JUAN-VALDÉS, A., POZO, J. M., GUERRA-ROMERO, M. I. Pre-Saturation Technique of the Recycled Aggregates: Solution to the Water Absorption Drawback in the Recycled Concrete Manufacture. **Materials**, v. 7, p. 6224-6236, 2014.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. **Cement and concrete research**. v. 32, p. 1301-1311, 2002.

GUSMÃO, A.D. **Manual de Gestão dos Resíduos da Construção Civil**. Recife: Gráfica Editora, 2008.

HILL, A. R., DAWSON, A. R., MUNDY, M. Utilization of aggregate materials in road construction and bulk fill. **Journal of Resources, Conservation and Recycling**, v. 32, n. 3-4, p. 305-320, 2001.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 f. Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KHALAF, F. M.; DeVENNY, A. **Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete**: review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 16, n. 04, p. 331-340, 2004.

KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], n. 35, p. 763-769, 2005.

KULAIF, Y. **Análise dos mercados de matérias-primas minerais**: estudo de caso da indústria de pedras britadas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2001.

LEITE, M. A. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIU, Q., TONG, T., LIU S., YANG, D., YU, Q. Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement, **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 754-763, 2014.

LOPES, Rodrigo Fernando. **Material para UTFPR - 3 m3 BICA para TESTE**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <clarissedinubila@yahoo.com.br> em 19 de novembro de 2015.

MÁLIA, M., BRITO, J., BRAVO, M. Indicadores de Resíduos de Construção e Demolição para Construções Residenciais Novas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 117-130, 2011.

MONTEIRO, J. H. P., FIGUEIREDO, C. E. M., MAGALHÃES, A. F., MELO, M. A. F. de, BRITO, J. C. X. de, ALMEIDA, T. P. F. de, MANSUR, G. L. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NAGALLI, A. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

PARANAVITHANA, S., MOHAJERANI, A. Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 48, n. 1, p. 1-12, 2006.

POON, C.S., KOU, S.C., LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. **Construction and Building Materials**, v. 16, n. 5, p. 281-289, 2002.

POON, C.S., CHAN, D. Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 1, p. 164-175, 2007.

RIPPER, E. **Manual prático de materiais de construção**. São Paulo: Pini, 1995.

SILVA, L. M. **Gestão de resíduos da construção civil: dificuldades para implementação do Plano Integrado de Gestão de Resíduos da Construção no município de São Leopoldo**. 2011. 85 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SILVA, V. A., FERNANDES, A. L. T. Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) em Uberaba-MG. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 24, n. 2, p. 333-344, 2012.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando**

aplicações estruturais. 2007. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

USIPAR (USINAS DE RECICLÁVEIS SÓLIDOS DO PARANÁ), Como funciona o processo realizado pela USIPAR. Disponível em: <<http://www.usiparreciclagem.com>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VIEIRA, A. de A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

WEGGEL, D. C., CHEN, S. E., HILGER, H., BESNARD, F., CAVALLINE, T., TEMPEST, B., ALVEY, A., GRIMMER, M., TURNER, R. (2011, March). **Final Scientific Report, Building Materials Reclamation Program**. Department of Energy (DOE) Program, Department of Civil and Environmental Engineering, University of North Carolina, Charlotte, 2011.