UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu*

José Yter Alcantara Costa

Agregado reciclado de resíduos de construção e demolição: variabilidade e influência no comportamento mecânico do concreto.

São Paulo

2018

José Yter Alcantara Costa

Agregado reciclado de resíduos de construção e demolição: variabilidade e influência no comportamento mecânico do concreto.

Dissertação apresentada ao programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu como requisito parcial obtenção do título de Mestrado em Engenharia Civil.

Mestrando: José Yter Alcantara Costa

Orientador: Prof. Dr. Sandro Martini

Linha de Pesquisa: LP 1 – Ciência dos Materiais Aplicada à Construção Civil

São Paulo

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Universidade São Judas Tadeu

Bibliotecária: Cláudia Silva Salviano Moreira - CRB 8/9237

C837a

Costa, José Yter Alcantara.
Agregado reciclado de resíduos de construção e demolição: variabilidade e influência no comportamento mecânico do concreto / José Yter Alcantara Costa. - São Paulo, 2018.
f.: il.; 30 cm.

Orientador: Sandro Martini.
Dissertação (mestrado) – Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2018.

1. Concreto. 2. Resíduos como materiais de construção. 3. Agregados (materiais de construção). I. Martini, Sandro. II. Universidade São Judas Tadeu, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil. III. Título

CDD 22 – 690.058

José Yter Alcantara Costa

Agregado reciclado de resíduos de construção e demolição: variabilidade e influência no comportamento mecânico do concreto.

Dissertação apresentada ao programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu como requisito parcial obtenção do título de Mestrado em Engenharia Civil.

Ciência dos Materiais Aplicada à Construção Civil.

Prof. Dr. Sandro Martini (Orientador)

Prof. Dr. Juarez Ramos, da Silva (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Rui Barbosa, de Souza (Banca Examinadora)

São Paulo, 14 de setembro de 2018.

Dedico este trabalho aos meus avós, Abdias dos Anjos Neto (*In memoriam*) e Valmira Alcântara dos Anjos.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Ao Prof. Dr. Flávio Leal Maranhão, por ter me incentivado a dar este importante passo, por ser meu orientador desde a graduação, pelo suporte no tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Aos Professores Sandro Martini e Rui Barbosa de Souza, pela orientação durante o exame de qualificação.

Aos Professores Maurício Resende, Douglas Casagrande, Carlos Antonio da Rocha e Sonia Maria Dion, pelas importantes contribuições neste trabalho.

Ao colega e pesquisador Eng. Roberto Munhoz, pela importante ajuda na parte experimental, conselhos e críticas.

Ao Colega Eng. Danilo Feitosa Bispo, pela ajuda na parte experimental.

Ao amigo Arq. Paulo Machado Jr. pela ajuda na revisão técnica.

Ao Eng. Marcos Nunes, da UVR Grajaú S.A. por ter fornecido o agregado reciclado de RCD, sem o qual seria impossível a realização deste trabalho.

Dr. Holger Schmidt, da empresa MC Bauchemie, por ter fornecido o aditivo.

Aos meus pais Nelmacy Alcântara dos Anjos e José Maria Pinheiro Costa, pela educação que aqui me trouxe.

A minha esposa Alessandra Alcântara Barros Costa, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

A minha filha Carolyne dos Santos Costa, que tanto amo.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

A constante demanda por infraestrutura e moradia, ocasionado pelo crescimento mundial, somadas ao baixo grau de industrialização da construção civil, são fatores preponderantes para o aumento do consumo de materiais e para a geração de resíduos. No Brasil, a produção de agregados para construção foi de 741 milhões de toneladas, somente para o ano de 2014, correspondendo a um consumo per capita de 3,7 t/hab./ano, neste mesmo ano foram gerados aproximadamente 102 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição. Devido à falta de atratividade financeira, apenas uma pequena parte destes resíduos é reciclada, a grande maioria depositada em aterros como material inerte, provocando grandes desafios a indústria da construção civil e as administrações públicas. Nas últimas duas décadas, diversas pesquisas de âmbito nacional e internacional tem comprovado a eficiência do uso de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) na produção de concreto e argamassas. Atualmente no Brasil existem diversos grupos de pesquisas desenvolvendo trabalhos sobre utilização do RCD, dentre estes grupos destacamos o grupo de pesquisa da Universidade São Judas Tadeu, que sob a liderança do Professor Dr. Flávio Leal Maranhão desenvolve pesquisas sobre este tema, o qual este trabalho faz parte.

Diante deste novo cenário, este trabalho surge com o objetivo de estudar a variabilidade dos agregados reciclados de RCD e sua influência nas propriedades físicas do concreto. Compõem esta pesquisa revisão bibliográfica e estudos experimentais. Na revisão bibliográfica foram explorados assuntos relacionados a definições, políticas públicas, consequências ambientais da deposição dos RCD e o processo de produção de agregados reciclados. Nos estudos experimentais foram analisadas as propriedades dos agregados reciclados de RCD e sua influência nas propriedades dos concretos.

Quanto aos resultados obtidos nas amostras dos agregados reciclados analisados foram verificados: 3,19% de teor médio de impureza; influência da variabilidade entre as respectivas coletas, nos teores de argamassa, rochas, materiais cerâmicos, e impurezas no comportamento mecânico das misturas de concreto. Tratando das propriedades do concreto produzido, foram verificadas perdas de abatimento relacionadas a absorção de água dos agregados reciclados e ao teor de

material pulverulento. Também foram verificados que concretos fabricados com agregados reciclados apresentaram resistência à compressão similar às misturas de concreto utilizando agregados naturais.

Palavras-chave: resíduos de construção e demolição; RCD; resíduos da construção civil; RCC; concreto de RCD; variabilidade.

ABSTRACT

The constant demand for infrastructure and housing, caused by world growth, in addition to the low degree of the civil construction's industrialization, are preponderant factors for the increase of the consumption of materials and for the generation of waste. In Brazil, the aggregate's production for the construction sector was 741 million tons, considering only 2014, corresponding to a per capt consumption of 3.7 ton per inhabitant per year, during the same year, approximately 102 million tons of Construction and demolition waste were generated. Due to the lack of financial attractiveness, only a small part of this waste is recycled, the vast majority is still thrown in landfills as an inert material, posing major challenges to the construction industry and to the public administrations. In the last two decades, several national and international surveys have proven the efficiency of using Construction and Demolition Waste (C&DW) in the production of concrete and mortars. Currently in Brazil, there are several research groups developing studies regarding the use of C&DW, among these groups we can highlight the research group of the São Judas Tadeu University, which under the leadership of Professor Dr. Flávio Leal Maranhão develops research on this topic, which this paper is part of.

In view of this new scenario, this work aims the study of recycled aggregate variability of C&DW variability and their influence on the physical properties of concrete. This research is composed of literature review and experimental studies. About the literature review, subjects related to definitions, public policies, environmental consequences of throwing away C&DW and the process of producing recycled aggregates were explored. During the experimental studies, the properties of recycled aggregates from C&DW and their influence on concrete properties were analyzed.

Regarding the results obtained by the recycled samples that were analyzed, it was found: 3.19% of average impurity content; due to the variability among the respective samples, mortar, rocks, ceramic materials, and impurities in the mechanical behavior of the concrete mixtures. About the properties of the produced concrete, it was verified losses of abatement related to water absorption from the recycled aggregates and also related to the content of pulverulent material. It was also verified

that concrete made from recycled aggregates showed compressive strength similar to concrete mixtures using natural aggregates.

Keywords: construction and demolition waste; C&DW; construction waste; C&CW; C&DW concrete; variability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Imagem da Usina UVR Grajaú S.A. 31
Figura 02 - Imagens do aterro onde está inserido a UVR Grajaú 32
Figura 03 - Planta de produção da UVR Grajau 33
Figura 04 - Separação de material produzido na UVR Grajaú 34
Figura 05 - Influência do fator a/c e teor de ar incorporado na resistência 54
Figura 06 - Fatores que influenciam no módulo de elasticidade 57
Figura 07 - Quarteamento 62
Figura 08 - Método de Redução das Amostras 63
Figura 09 - Composição de uma amostra de agregado reciclado 64
Figura 10 - Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria 66
Figura 12 - Análise estatística da composição das amostras de agregado reciclado de RCD 79
Figura 13 - Análise granulométrica do agregado miúdo (# 0,0 - 4,8 (mm)) 81
Figura 14 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm)), coletado em 2014 82
Figura 15 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm)), coletado em 2015 82
Figura 16 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 0,0 - 1 0,0 (mm)), coletado em 2017 83
Figura 17 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm)), coletado em 2014 84
Figura 18 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm)), coletado em 2015 84
Figura 19 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm)), coletado em 2017 85
Figura 20 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm)), coletado em 2014 86
Figura 21 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm)), coletado em 2015 86
Figura 22 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm)), coletado em 2017 87

Figura 23 - Teor de material pulverulento do agregado miúdo (# 0,0 - 4,8 (mm)) 90
Figura 24 - Teor de material pulverulento do agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm)) . 91
Figura 25 - Teor de material pulverulento do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm)) 91
Figura 26 - Teor de material pulverulento do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm)) 92
Figura 27 - Coeficiente de variação em função do teor de material pulverulento 93
Figura 28 - Massa Unitária do agregado miúdo (# 0,0 - 4,8 (mm)) 94
Figura 29 - Massa Unitária do agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm)) 95
Figura 30 - Massa Unitária do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm)) 95
Figura 31 - Massa Unitária do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm)) 96
Figura 32 - Coeficiente de variação em função da massa unitária 97
Figura 33 - Massa específica do agregado miúdo (# 0,0 - 4,8 (mm)) 97
Figura 34 - Massa específica do agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm)) 98
Figura 35 - Massa específica do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm)) 98
Figura 36 - Massa específica do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm)) 99
Figura 37 - Coeficiente de variação em função da massa específica 100
Figura 38 - Absorção do agregado miúdo (# 0,0 - 4,8 (mm)) 101
Figura 39 - Absorção do agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm)) 102
Figura 40 - Absorção do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm)) 102
Figura 41 - Absorção do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm)) 103
Figura 42 - Coeficiente de variação em função da absorção de água 104
Figura 43 - Abatimento de mistura de concreto com agregado graúdo reciclado de granulometria # 0,0 - 10,0 (mm) 107
Figura 44 - Abatimento de mistura de concreto com agregado graúdo reciclado de granulometria # 10,0 - 20,0 (mm) 107
Figura 45 - Perda de abatimento para diferentes misturas de concreto com agregado reciclado de RCD 108
Figura 46 - Massa específica das misturas de concreto no estado fresco 109
Figura 47 – Valores médios para massa específica das misturas de concreto no estado fresco 110
Figura 48 - Coeficiente de variação em função da massa específica do concreto no estado fresco 111
Figura 49 - Teor de Ar Incorporado nas misturas de concreto contendo diferentes proporções de agregados reciclados de RCD 112

Figura 50 - Coeficiente de variação em função do teor de ar incorporado ao concreto no estado fresco 113
Figura 51 - Massa específica do concreto no estado endurecido 115
Figura 52 - Coeficiente de variação em função da massa específica concreto 116
Figura 53 - Absorção de água por capilaridade 117
Figura 54 - Coeficiente de variação em função da absorção de água por capilaridade para diferentes misturas de concreto 118
Figura 55- Resistência à compressão aos 28 dias 119
Figura 56 - Coeficiente de variação em função da resistência à compressão do concreto aos 28 dias 120
Figura 57 - Resistência à tração por compressão diametral 121
Figura 58 - Coeficiente de variação em função da resistência à tração por compressão diametral 122
Figura 59 - Módulo de elasticidade longitudinal dinâmico 123
Figura 60 - Coeficiente de variação em função do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico 124

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Distribuição da planta da UVR Grajaú S.A. 33
Tabela 02 - RCD lançados em vias públicas 36
Tabela 03 - Proporção de RCD presente nos RSU coletados 36
Tabela 04 - Estimativa de geração de RCD em diversos países 37
Tabela 05- Fonte geradora e composição do RCD (%) 44
Tabela 06 - Requisitos mínimos da NBR 15.116 46
Tabela 07 - Critérios de Avaliação do Ultrassom 58
Tabela 08 - Composição das misturas de concreto 70
Tabela 09 - Análise estatística da composição das amostras de agregado reciclado de RCD 79
Tabela 10 - Coeficientes de variação em função das peneiras 88
Tabela 11 - Coeficientes de variação em função das peneiras para o agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm)) 88
Tabela 12 - Coeficientes de variação em função das peneiras para o agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm)) 89
Tabela 13 - Coeficientes de variação em função das peneiras para o agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm)) 89
Tabela 14 - Análise estatística 93
Tabela 15 – Análise estatística 96
Tabela 16 - Coeficiente de variação em função da massa específica dos agregados reciclados de RCD 100
Tabela 17 - Coeficiente de variação em função da absorção de água dos agregados reciclados de RCD 104
Tabela 18 - Coeficiente de variação em função da massa específica do concreto . 110
Tabela 19 - Coeficiente de variação em função do teor de ar incorporado ao concreto no estado fresco 113
Tabela 20 - Coeficiente de variação em função da massa específica do concreto no estado endurecido 115
Tabela 21 - Coeficiente de variação em função da absorção de água por capilaridade 117
Tabela 22 - Coeficiente de variação em função da resistência à compressão 119

Tabela 23 - Coeficiente de variação em função da resistência à tração por compressão diametral 121
Tabela 24 - Coeficiente de variação em função do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico 123

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Normas Técnicas Nacionais.....39

Quadro 02 - Leis, decretos e resoluções que tratam da gestão de RCD 43

Quadro 03 - Programa experimental – Agregados.....60

Quadro 04 - Programa experimental – Ensaios do concreto.....61

Quadro 05 - Grupos de fragmentos.....64

Quadro 06 - Abertura das peneiras utilizadas nos ensaios 65

Quadro 07 - Analise granulométrica do agregado miúdo (# 0,0 - 4,8 (mm)) 80

Quadro 08 - Composição das misturas de concreto com agregado reciclado e ensaios de abatimento.....106

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição.

ABRELP – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.

ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção.

ARRCD – Agregado Reciclado de Resíduos de Construção e Demolição.

ASTM - American Society for Testing and Materials.

CETEB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.

NBR – Norma Brasileira.

NBR NM – Norma Brasileira Norma Mercosul.

PNRS – Programa Nacional de Resíduos Sólidos.

RCC – Resíduos da Construção Civil.

RCD – Resíduos de Construção e Demolição.

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos.

CTRCC - Central de Tratamento de Resíduos de Construção Civil.

UVR – Unidade de Valorização de Resíduos.

CV – Coeficiente de Variação.

LISTA DE SIMBOLOS

σ - Desvio padrão.

ρ Massa específica.

μ - Coeficiente de Poisson.

t - Tonelada

s - Segundos.

S – Erro padrão.

R^2 - Coeficiente de correlação.

n – Numero de medições.

N - Newton.

MPa - Mega Pascal.

mm - Milímetros.

m^3 - Metro cúbico.

m - Metro.

m - Massa.

kg - Quilo grama

GPa - Giga Pascal.

g - Grama

Fck - Resistência característica à compressão do concreto.

Fcd - Resistência de cálculo à compressão do concreto.

Ev – Índice de Volume de Vazios.

Ed - Módulo de elasticidade dinâmico.

E - Módulo de elasticidade.

dm^3 - Decímetro cúbico.

B2 - Brita dois.

B1 - Brita um.

a/c - Fator água/cimento.

ρ_{ap} - Massa unitária média do agregado no estado solto, em kg/m^3.

ρ_W - Massa específica da água, em kg/m^3;

d_1 - Massa específica relativa do agregado seco.

$\bar{X}$ - Média aritmética.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 25
1.1 Contextualização da Pesquisa 28
1.2 Objetivo 29
1.3 Estrutura do Trabalho 30

2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO 31
2.1 Definições e Normalização 37
2.2 Políticas Públicas para RCD 40
2.3 Agregados Reciclados de RCD 43
2.3.1 Presença de Contaminantes e Outros Materiais Indesejados 49
2.3.2 Variabilidade dos Agregados Reciclados de RCD 49
2.3.3 Processo de Produção dos Agregados de RCD 51
2.4 Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de RCD 52
2.4.1 Trabalhabilidade 52
2.4.2 Massa Específica do Concreto no Estado Fresco 53
2.4.3 Teor de Ar Incorporado no Concreto no Estado Fresco 53
2.4.4 Absorção de Água do Concreto no Estado Endurecido por Ascenção Capilar 54
2.4.5 Determinação da Resistência a Compressão do Concreto 55
2.4.6 Determinação do Módulo de Elasticidade do Concreto 56

3 PESQUISA DE CAMPO 31

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL 59
4.1 Caracterização dos Agregados 60
4.2 Produção de Concretos com Agregados Reciclados de RCD 60
4.3 Métodos Experimentais 61
4.3.1 Quarteamento das Amostras 61
4.3.2 Composição dos Agregados Reciclados de RCD 63
4.3.3 Análise Granulométrica 65
4.3.4 Índices Físicos 67

4.3.5 Teor de Material Pulverulento 68
4.3.6 Determinação do Índice de Vazios 69
4.3.7 Produção de Concretos 69
4.4 Método Estatístico 73

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 77
5.1 Caracterização Física dos Agregados Reciclados de RCD 77
5.1.1 Caracterização do agregado reciclado 77
5.1.2 Análise Granulométrica 80
5.1.3 Teor de Material Pulverulento 90
5.1.4 Massa Unitária 94
5.1.5 Massa Específica 97
5.1.6 Absorção de Água 101
5.2 Influências dos Agregados Reciclados de RCD nas Propriedades do Concreto no Estado Fresco 105
5.2.1 Abatimento de Cone de Tronco 105
5.2.2 Massa Específica do Concreto no Estado Fresco 109
5.2.3 Teor de Ar-Incorporado 112
5.3 Influências dos Agregados Reciclados de RCD nas Propriedades do Concreto no Estado Endurecido 114
5.3.1 Massa Específica do Concreto no Estado Endurecido 114
5.3.2 Absorção de Água por Capilaridade 116
5.3.3 Resistência à Compressão 118
5.3.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral 121
5.3.5 Módulo de Elasticidade Longitudinal Dinâmico 122

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 125

REFERÊNCIAS 127

APÊNDICE A – Nomenclatura dos Agregados Reciclados de RCD 137
APÊNDICE B – Composição Gravimétrica dos Agregados Reciclados de RCD 139

APÊNDICE C – Análise Granulométrica dos Agregados Reciclados de RCD 141
APÊNDICE D –Gráficos Correlacionando diferentes Resultados de Ensaios dos Agregados Reciclados de RCD 147
APÊNDICE E –Gráficos Correlacionando diferentes Resultados de Ensaios das Misturas de Concreto Contendo Agregados Reciclados de RCD 149
APÊNDICE F – Resultados da Análise de Variância dos Ensaios Realizados nos Agregados Reciclados 153
APÊNDICE G – Resultados da Análise de Variância dos Ensaios Realizados nos Concretos fabricados com Agregados Reciclados 159
APÊNDICE H – Teor de Impurezas e Teor de Materiais Cerâmicos. 163

ANEXO A - Fluxograma da UVR Grajaú S.A. 165

1 INTRODUÇÃO

Sendo responsável por consumir mais da metade dos recursos naturais extraídos do planeta, no processo produtivo e na manutenção do ambiente construído, a indústria da construção civil é tida como o setor de atividades humanas que mais utiliza energia e consome recursos naturais (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2005). Com o crescimento da população mundial e a constante demanda por infraestrutura e moradia, o impacto ambiental gerado pelo setor é cada vez maior. Além disso, o baixo grau de industrialização que caracteriza as atividades produtivas na construção civil, além de aumentar o consumo de materiais, contribui para geração de resíduos.

Segundo a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (ANEPAC, 2018), a produção global de minerais em 2014 foi de 65 bilhões de toneladas, sendo que deste total, 45 bilhões de toneladas são agregados (areia e brita) para construção. Ainda segundo a ANEPAC (2018), no Brasil, a produção de agregados para construção foi de 741 milhões de toneladas, para o ano de 2014, correspondendo a um consumo per capita de 3,7 t/Hab./ano. É sabido que as reservas minerais de areia e brita são abundantes no Brasil, no entanto, em algumas regiões as reservas estão distantes do centro consumidor, tendo-se que transportar o material por distâncias superiores a 100 km, fazendo com que o frete represente até 2/3 do custo do material, segundo Herrmann (2012). Muitos dos problemas ambientais relacionados a indústria da construção civil está associado à elevada quantidade de recursos envolvidos. Considerando que a construção civil possui demanda entre 4 e 7 t/Hab./ano de agregados (JOHN *et al*. 2016), torna-se inevitável a busca por estratégias visando a redução do impacto ambiental.

A minimização do consumo de recursos naturais deve ser tratada como prioridade, envolvendo um conjunto de ações que inclui: (a) maximização da vida útil de componentes e edifícios; (b) estratégias para reduzir perdas da construção; (c) melhoria do processo de gestão e (d) aumento da reciclagem dos resíduos. Políticas públicas voltadas a otimização do consumo de materiais e energias, e a reciclagem e redução dos resíduos gerados pela indústria da construção civil passa a ser um desafio.

Devido aos grandes volumes envolvidos, os resíduos das atividades produtivas, daqui em diante denominados como Resíduos de Construção e Demolição[1] (RCD), que até então é visto pela sociedade como um problema a mais, causado por esta indústria, pois uma parcela é inadequadamente destinada na malha urbana ou em aterros ilegais, gerando custos à sociedade e agravando os problemas ambientais, tende a se tornar uma solução para redução da extração de minerais, através de sua reutilização. Algumas indústrias de materiais destinados à construção civil já utilizam grande quantidade de resíduos. A indústria cimentícia, por exemplo, recicla grandes quantidades de resíduos do ferro gusa e cinzas volantes. A indústria metalúrgica recicla seus próprios resíduos.

Por meio de sua utilização como matéria-prima ou agregado, o RCD pode deixar de ser um problema, tornando-se uma alternativa a utilização de agregados naturais. O emprego de RCD contribui de forma positiva para a diminuição do consumo de insumos da construção civil oriundo de processo de britagem de rochas, britas e areia artificial, sendo assim uma importante ferramenta no combate a degradação ambiental.

Uma resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução CONAMA Nº 307/2002, considerada um marco institucional, determina que: “Os geradores deverão ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”. Apesar deste avanço, a reciclagem em larga escala dos RCD, exceto para os metais, vai depender de políticas de incentivo à produção e ao consumo. Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON), após a Resolução CONAMA Nº 448/2012[2], a implantação de usinas de reciclagem de RCD ganhou força, existindo no Brasil aproximadamente 310 usinas de reciclagem de RCD em operação, número relativamente baixo, se considerado a quantidade gerada deste material.

Para Angulo (2000), uma forma de amenizar o impacto gerado pelo descarte de RCD, no meio ambiente, é através da reciclagem. Buttler (2003) lembra que a

[1] Nesta pesquisa será utilizado o acrônimo RCD para fazer referência aos Resíduos da Construção e Demolição, por ser um termo mais conhecido em outros países (C&DW – Construction and Demolition Waste).

[2] A Resolução CONAMA Nº448/2012 altera os artigos 2°, 4°, 5°, 6°, 8º 9°, 10°, 11° e revoga os artigos 7°, 12° e 13° da Resolução 307 /2002.

reciclagem de RCD, além de trazer benefícios ecológicos, gera uma nova forma de comércio. Leite (2001) lembra que no Brasil, a utilização de agregados reciclados de RCD é bem difundida em obras de pavimentação, concretos não estruturais, na fabricação de blocos de concreto e em obras de drenagem.

No cenário internacional, países como Holanda, Dinamarca, Alemanha e Suíça, entre outros, reutilizam e reciclam entre 50% e 90% dos RCD (ANGULO, 2005), enquanto no Brasil ainda é praticada a deposição ilegal e sistemática destes resíduos, causando assoreamento em rios, entupimento de sistemas de drenagem de águas pluviais, degradação de áreas e esgotamentos de áreas de aterro, além de custos socioeconômicos elevados nas grandes cidades. No Brasil há incertezas quanto a reutilização e reciclagem de resíduos pela construção civil, embora existam estudos sendo desenvolvidos por grupos de pesquisa em diversas universidades, entre elas a Universidade São Judas Tadeu.

O emprego de agregado reciclado de RCD, em substituição aos naturais, já vem sendo utilizado há muitos anos em todo o mundo. Segundo Levy (2010) os primeiros registros de reutilização do RCD datam da época das edificações das cidades do Império Romano. Este mesmo autor observa que após a segunda guerra mundial, o RCD teve uma aplicação significativa na reconstrução das cidades europeias. Para Levy (2010), está cada vez mais comum a reutilização do RCD como insumo na própria construção civil, porém a heterogeneidade da composição e a variabilidade das propriedades dos agregados reciclados são considerados importantes impasses a sua maior disseminação em produto com maior valor agregados, como em concretos estruturais. Desta forma optou-se por analisar experimentalmente as propriedades dos agregados reciclados de RCD e dos concretos produzidos com estes agregados e, em última análise, comparar com resultados obtidos com agregados não reciclados.

Segundo Angulo (2000), a variabilidade do agregado reciclado de RCD pode influenciar nas características mecânicas do concreto, devido à:

- Absorção de parte da água empregada na produção do concreto pelo agregado de RCD reciclado seco, variando a relação água/cimento.
- A natureza do agregado reciclado influencia na trabalhabilidade do concreto.

- Devido a relação de água/cimento muito baixas, a não correção da absorção de água dos agregados reciclados pode retirar a água necessária à trabalhabilidade requerida.

1.1 Contextualização da Pesquisa

Nas últimas duas décadas, diversas pesquisas de âmbito nacional e internacional têm comprovado a eficiência do uso de RCD na produção de concreto e argamassas. Atualmente no Brasil existem diversos grupos de pesquisas desenvolvendo trabalhos sobre utilização do RCD, dentre estes grupos destacamos o grupo de pesquisa da Universidade São Judas Tadeu, que sob a liderança do Professor Dr. Flávio Leal Maranhão, desenvolve pesquisas sobre este tema e a qual este trabalho faz parte. Estes grupos de pesquisa podem ser facilmente identificados através da Plataforma Lattes – CNPQ3. Abaixo estão listados os grupos de pesquisa e suas respectivas universidades:

- Laboratório de Materiais de Construção – Universidade São Judas Tadeu.
- Tecnologias Sustentáveis e desenvolvimento para o Semiárido – Instituto Federal da Paraíba.
- Sustentabilidade, Desempenho e Reabilitação das Edificações – Universidade de Brasília.
- Saneamento e inovação – Universidade Estadual de Ponta Grossa.
- Resíduos Sólidos – Universidade de Caxias do Sul.
- Pesquisas em Tecnologias para o Saneamento Ambiental – Instituto Federal de Brasília.
- Materiais e construções sustentáveis – Instituto Federal da Paraíba.
- Materiais construtivos e de resíduo de construção e demolição (MC & RCD) – Instituto Federal do Maranhão.
- Inovação em materiais de construção civil – Universidade Federal de Uberlândia.

[3] "A Plataforma Lattes representa a experiência do CNPq na integração de bases de dados de Currículos, de Grupos de pesquisa e de Instituições em um único Sistema de Informações" Fonte: http://lattes.cnpq.br/.

- GTRCC - Grupo de Gestão e Tecnologia dos Resíduos da Construção Civil – Universidade Federal de São Carlos.
- Grupo de Reciclagem de Resíduos Sólidos e Materiais Alternativos – Universidade Federal do Vale do São Francisco.
- Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Estruturas – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Estruturas da Universidade Federal do Ceará.
- Grupo de Estudos em Durabilidade dos Materiais – Universidade Federal da Bahia.
- Grupo de Análise Experimental e Pesquisa aplicada à tecnologia e eco tecnologia do concreto – Instituto Federal do Pará.
- GPTR - Planejamento e Inovações Tecnológicas em Transportes – Instituto Federal de Santa Catarina.
- Engenharia Geotécnica – Universidade Federal de Sergipe.
- A Geomática na Construção Civil, nos Transportes e no Meio Ambiente – Universidade do Estado do Amazonas.
- Laboratório de Estudos Ambientais para Metalurgia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais de Cosntrução – Universidade de São Paulo

Como forma de apoio as pesquisas sobre agregados reciclados de RCD, a Universidade São Judas Tadeu estabeleceu um acordo de cooperação com a Unidade de Valorização de Resíduos Grajaú S.A.

1.2 Objetivo

O objetivo geral desta pesquisa é estudar a variabilidade dos agregados reciclados de RCD e influência nas propriedades físicas do concreto.

Objetivos específicos:

1. Avaliar a influência do processo de produção de agregados reciclados em suas propriedades

2. Avaliar a variabilidade das propriedades físicas dos agregados reciclados.

3. Avaliar a influência dos agregados reciclados de RCD nas propriedades do concreto no estado fresco.

4. Avaliar a influência dos agregados reciclados de RCD nas propriedades do concreto no estado endurecido.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos. O capítulo 1 é dedicado à introdução, fazem parte deste capítulo o objetivo e a justificativa. O capítulo 2 trata da pesquisa de campo. O capítulo 3 é dedicado a revisão bibliográfica onde são apresentadas definições, políticas públicas, consequências ambientais da deposição dos RCD e o processo de produção de agregados reciclados. O capítulo 4 é dedicado ao programa experimental, onde são apresentados o planejamento de ensaios e os métodos experimentais. No capítulo 5 é realizado a análise dos resultados. E finalmente no capítulo 6 são apresentadas as considerações finais.

2 PESQUISA DE CAMPO

A planta utilizada para desenvolvimento desta pesquisa está localizada em um aterro sanitário com 360.000 m², na zona sul de São Paulo e foi projetada para receber 2.000 t/dia de RCD de empresas privadas e de prefeituras dos municípios da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Sua operação teve início em 2014 e recebe resíduos das Classes A e B. Não são aceitos resíduos de origem domiciliares, pneus, gesso, isopor, produtos químicos, podas de vegetação e produtos contaminados. Nas Figuras 01 e 02 são apresentadas imagens da Usina e do aterro onde está inserida.

Figura 01 - Imagem da Usina UVR Grajaú S.A.

Fonte: UVR Grajaú S.A. (2017).

A Unidade de Valorização de Resíduos Grajaú S.A. possui capacidade de processar, por meio de trituração, separação, classificação e armazenamento 600.000 t/ano de RCD, transformando estes em agregados reciclados, que servem de insumos

para diversas aplicações na construção civil. Este volume de produção seria capaz de atender a 7% da necessidade de agregados reciclados do munícipio de São Paulo.

Figura 02 - Imagens do aterro onde está inserido a UVR Grajaú

Fonte: UVR Grajaú S.A. (2017).

Os produtos e subprodutos obtidos pela UVR Grajaú possuem variados potenciais de aplicações na indústria da construção civil como, areia reciclada, pedrisco e britas 1 e 2 (zonas 9,5/25 mm e 19/31,5 mm, respectivamente), todos adequados às demandas do mercado consumidor. A Figura 05 indica os locais específicos de geração de cada produto na planta de processamento da UVR Grajaú S.A, considerando a indicação na Tabela 07.

Figura 03 - Planta de produção da UVR Grajau

Fonte: UVR Grajaú S.A. (2017).

A tabela 01 apresenta os agregados produzidos e as respectivas faixas granulométricas. Os materiais de maior demanda são a Areia Reciclada e o Pedrisco.

Tabela 01 - Distribuição da planta da UVR Grajaú S.A.

	Produto	Granulometria (mm)
1	Pedrisco	4,8 - 10,0
1	Bica Fina	0,0 - 10,0
2	Brita Nº 1	10,0 - 20,0
3	Brita Nº 2	20,0 - 40,0
4	Bica Grossa	0,0 - 40,0
5	Areia Reciclada	0,0 - 4,8
5	Escalpe	0,0 - 10,0

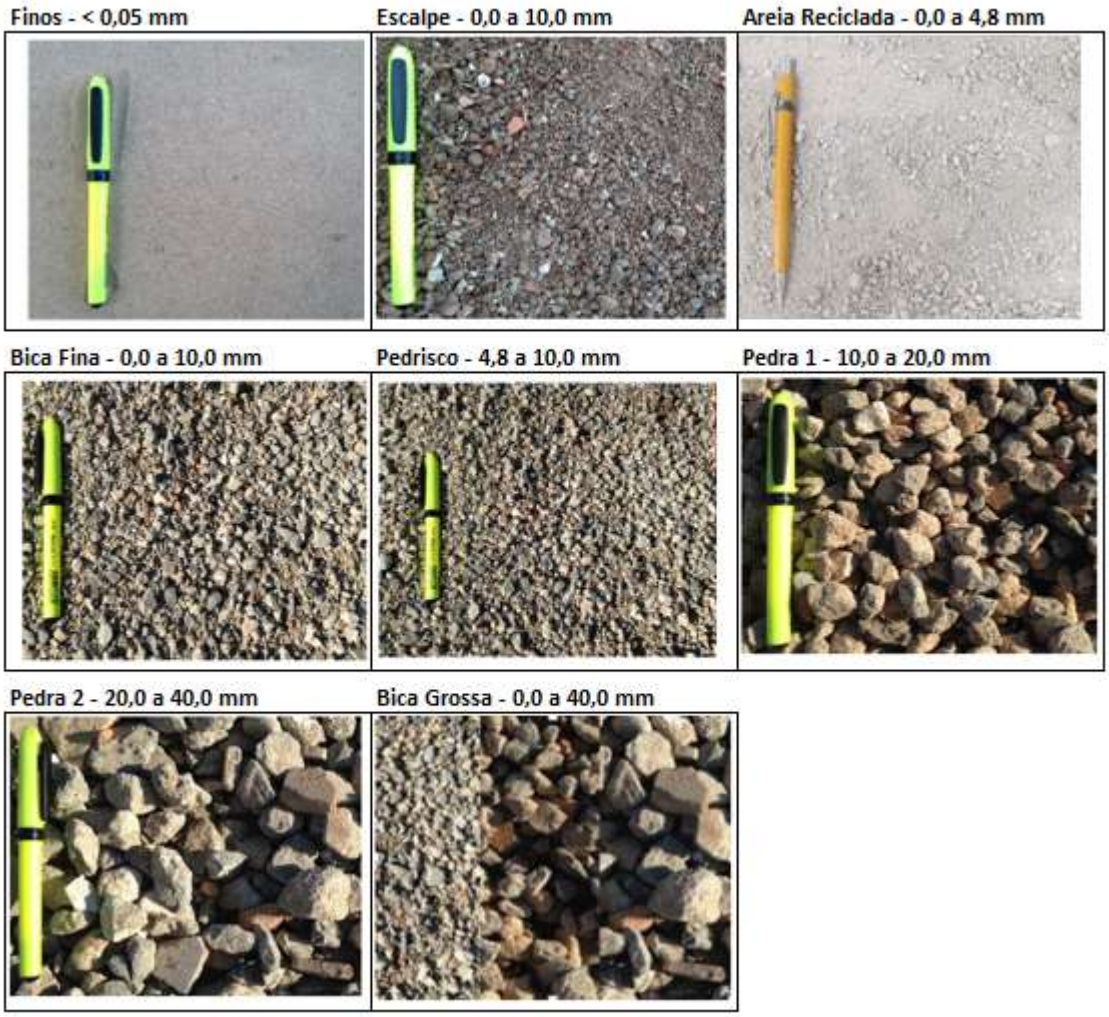
Fonte: UVR Grajaú S.A. (2017).

Observando a Figura 03, na região (5) é separado material denominado escalpe, agregado fino rico em solo e areia reciclada. Nas regiões (4), (3), (2) e (1)

formam-se as pilhas dos agregados bica grossa, brita nº2, brita nº1, bica fina e pedrisco, respectivamente. No silo à esquerda, não numerado na figura acima, são armazenados os finos (< 0,05 mm).

Na Figura 04 são apresentados os materiais produzidos na UVR Grajaú. Para esta pesquisa serão utilizados a Areia Reciclada (0,0 a 4,8 mm), Pedrisco (4,8 a 10,0 mm), brita º1 (10,0 a 20,0 mm) e brita n°2 (20,0 a 40,0 mm).

Figura 04 - Separação de material produzido na UVR Grajaú



Fonte: UVR Grajaú S.A. (2017).

3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A construção civil possui papel relevante na indústria brasileira, sendo reconhecida como importante indicativo de crescimento econômico e social. Sem a construção civil não há possibilidade de se estabelecer sistemas de saúde, energia, água, esgoto, transporte, lazer, produção industrial e suprir a demanda por residências (BLUMENSCHEIN, 2004). A indústria da construção civil, além do papel de destaque na geração de renda e emprego, é um grande consumidor de recursos naturais e um grande gerador de resíduos. Além dos impactos provocados pela extração de matérias-primas naturais, na indústria da construção civil se origina uma significativa massa de resíduos urbanos igualmente responsável por impactos ambientais e sanitários (SCHNEIDER, 2003).

Embora os RCD não representem grandes riscos ambientais, em razão de suas características químicas e materiais serem semelhantes aos agregados naturais e solos, provocam graves problemas em muitas cidades brasileiras, sobrecarregando os sistemas de limpeza pública municipais, gerando problemas de ordem estética, ambiental e de saúde pública.

No ano de 2015, segundo a ABRELPE[4], somente as empresas de limpeza pública coletaram 45,15 milhões de toneladas de RCD, gerados nas atividades dos municípios e/ou abandonados em logradouros, o que representa 56,6% da massa de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados no Brasil. Essa grande massa de resíduos, quando mal gerenciada, degrada a qualidade da vida urbana, sobrecarrega os serviços municipais de limpeza pública e reforça no país a desigualdade social uma vez que escassos recursos públicos são continuamente drenados para pagar a conta da coleta, transporte e disposição de resíduos depositados irregularmente em áreas públicas. Na Tabela 02 são apresentados o volume de RCD coletado por empresas de limpeza públicas, para os anos de 2013, 2014 e 2015.

[4] ABRELP é uma associação voltada ao desenvolvimento técnico e operacional do mercado de gestão de resíduos sólidos no Brasil. (ABRELP, 2015, p. 11).

Tabela 02 - RCD lançados em vias públicas

Descrição	2013	2014	2015
População brasileira (milhões)	201,1	202,8	204,4
kg/hab./dia	0,584	0,603	0,605
t/dia	117.435	122.262	123.721
t/ano (milhões)	42.858	44.635	45.158

Fonte: ABRELPE.

A Tabela 03 relaciona a proporção de RCD em relação ao RSU, para o mesmo período.

Tabela 03 - Proporção de RCD presente nos RSU coletados

RSU x RCD	2013	2014	2015
RSU (milhões t/ano)	76,4	78,6	79,9
RCD (milhões t/ano)	42,9	44,6	45,2
%	56,1%	56,8%	56,5%

Fonte: ABRELPE.

A deposição irregular do RCD gera impactos ambientais, pois contribui para a degradação ambiental, causa impactos sociais, contribuindo para proliferação de agentes causadores de doenças e precarização na qualidade de vida dos moradores do seu entorno, gera impacto econômico devido ao alto custo de sua remoção. Angulo *et al.* (2011) observa que a pouca preocupação com o destino desses resíduos gera degradação de áreas urbanas e assoreamento de córregos.

Alves *et al.* (2014) observa que quando os RCD são descartados das construções como material inerte, causa ônus e problemas associados ao seu volume, geralmente bastante significativo, chegando a ocupar em torno de 50% do volume total dos aterros públicos de algumas cidades brasileiras.

Fiscalização deficiente, altos custos operacionais das empresas coletoras com combustíveis e manutenção da frota em razão das distâncias dos pontos geradores até os locais de disposição, falta de incentivos à reutilização dos RCD, falta de mercados para captação dos RCD, são todos fatores que incentivam a deposição irregular.

Apesar desse grande volume de resíduos, constata-se que ainda está abaixo do encontrado em outras regiões do mundo utilizando como referência o indicador de consumo de kg/hab./ano. Essa diferença deve-se, na maior parte dos casos, a

informalidade que caracteriza a atividade. Por isso, John *et al*. (2016) propõe que seja utilizado um indicador acima de 500 kg/hab./ano para o Brasil. A Tabela 04 demonstra a estimativa de geração de RCD em alguns países, com base na literatura existente.

Tabela 04 - Estimativa de geração de RCD em diversos países

País	Mt/ano	kg/hab./ano	Fonte
Suécia	1,2 – 6	136 – 680	TOLSTOY, BÖRKLUND & CARLSON (1998); EU (1999)
Holanda	12,8 - 20,2	820 – 1300	LAURITZEN (1998); BROSSINK; BROUWERS & VAN; KESSEL (1996); EU (1999)
EUA	136 - 171	463 – 584	EPA (1998); PENG, GROSSKOPF, KIBERT (1994)
UK	50 - 70	880 – 1120	DETR (1998); LAURITZEN (1998)
Bélgica	7,5 - 34,7	735 – 3359	LAURITZEN (1998), EU (1999)
Dinamarca	2,3 - 10,7	440 – 2010	
Itália	35 - 40	600 – 690	
Alemanha	79 - 300	963 – 3658	
Japão	99	785	KASA (1998)
Portugal	3,2 - 4,4	325	EU (1999); RUIVO E VEGA (*apud* MARQUES NETO, 2009)
Brasil	**45**	**219**	**ABRELPE (2015)**
	102	**510**	**JONH *et al.* (2011)**

Fonte: Fernandez (2012).

Na próxima seção será apresentado o histórico, as políticas públicas para gestão de resíduos provenientes da construção civil, a definição e normalização de agregados reciclados de RCD, e o seu uso na produção de concretos.

3.1 Definições e Normalização

Angulo (2005) define o RCD como todo e qualquer resíduo oriundo das atividades da construção civil, incluindo limpeza de terrenos com presença de solos e vegetação. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) de 2010 definiu o termo Resíduos da Construção Civil (RCC), em seu Artigo 13, como “os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos

os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis” (Brasil, 2010a, Artigo 13, inciso I, alínea h).

Leite (2001) classifica o RCD como materiais pesados, e de grande volume, que quando depositados indiscriminadamente devem ser considerados verdadeiros focos para depósitos de outros tipos de resíduos, que podem gerar contaminações devido à lixiviação ou solubilização de substâncias nocivas.

Em 05 de julho de 2002 o CONAMA publicou a Resolução n° 307, que dispõe sobre diretrizes, critérios e procedimentos para o gerenciamento dos resíduos da construção civil. Esta resolução define Resíduos da Construção Civil (RCC) como: “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, argamassas, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.”

Ainda, segundo a resolução CONAMA nº 307/2002, os RCC devem ser classificados como:

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

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;

IV - Classe D - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas,

instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Fernandez (2012) destaca que os RCD estão sujeitos a Legislação Federal, que trata de resíduos sólidos, bem como, às legislações específicas de âmbito Estadual e Municipal e às Normas Técnicas brasileira.

Foram publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) uma série de normas técnicas que tratam dos resíduos sólidos e de procedimentos para gerenciamentos de RCD. Estas Normas Técnicas estão detalhadas no Quadro 01.

Quadro 01 - Normas Técnicas Nacionais

Norma	**Descrição**
NBR 10004	Resíduos sólidos (classificação)
NBR 15112	RCC e resíduos volumosos - áreas de transbordo e triagem (diretrizes para projetos, implantação e operação).
NBR 15113	RCC e resíduos inertes - aterros (diretrizes para projetos, implantação e operação).
NBR 15114	RCC - áreas para reciclagem (diretrizes para projetos, implantação e operação).
NBR 15115	Agregados reciclados de RCC - execução de camada de pavimentação (procedimentos).
NBR 15116	Agregados reciclados de RCC - utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural (requisitos).

Fonte: Autor.

A NBR 15116 (ABNT, 2004) define o RCD como resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solo, rocha, madeira, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha. Embora esta mesma norma defina agregado reciclado como material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura, ela também limita seu uso para pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural.

As normas técnicas NBR 15112, 15113 e 15114 tratam de controles para a implantação, projeto e operação das áreas de triagem e transbordo, aterros e áreas de reciclagem. Segundo estas normas, esses empreendimentos devem considerar a

minimização de impactos como geração de poeira, ruído, drenagem, impermeabilização e outros causados pela circulação de carroceiros, caçambeiros e outros tipos de transportadores. O licenciamento ambiental para quaisquer desses empreendimentos também é uma exigência das normas citadas.

3.2 Políticas Públicas para RCD

Somente em 2002, com a publicação da Resolução CONAMA nº 307, começaram a surgir políticas públicas voltadas para a gestão de RCD; embora o artigo 23, inciso VI, da Constituição Federal de 1988, já determinasse que há competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios a proteção do meio ambiente e o combate à poluição em qualquer de suas formas. A resolução indica, como instrumento básico para sua implementação, o Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil, de responsabilidade dos municípios e do Distrito Federal, incorporando um Programa Municipal e Projetos de Gerenciamento, de forma a envolver como corresponsáveis o Poder Público, os geradores e os transportadores desses resíduos. A Lei Nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, determina como condição para Estados, Municípios e o Distrito Federal terem acessos a recursos da União, a elaboração de Planos de Resíduos Sólidos. No entanto, apenas 10 estados brasileiros possuem Plano Estadual de Resíduos Sólidos. Segundo Ministério do Meio Ambiente, 33,5% dos 5.570 municípios brasileiros possuem Planos de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, e de acordo com Marques Neto (2009, *apud* FERNANDEZ, 2012), apenas 1% dos municípios brasileiros possuem planos de gerenciamento de RCD.

Segundo a ABRELPE (2012), a política brasileira para os Resíduos Sólidos identifica o desenvolvimento dos Planos de Gestão dos Resíduos Sólidos como sua principal preocupação, devido sua interação com aspectos ambiental, econômico, legal entre outros, oferecendo um plano sistematizado para uma melhor implementação, tendo soluções disponíveis, tanto em termos de aceitação social quanto de viabilidade econômica. Desta forma entende-se que cabe ao poder público uma participação voltada, preferencialmente, a regulamentação e disciplinamento das atividades, e aos agentes geradores privados, o exercício de suas responsabilidades

pelo correto manejo e destinação dos resíduos gerados em decorrência de sua atividade.

Segundo Wiens *et al.* (2006), implementar políticas voltadas ao gerenciamento de resíduos pressupõe considerar o ciclo de vida dos mesmos: geração na fonte, acondicionamento, transporte e, por última, a reciclagem, retornando assim ao ciclo produtivo. Ainda, segundo este autor, o desenvolvimento tecnológico para a reciclagem dos materiais, a atratividade econômica e a existência de mercado consumidor que absorva esta produção também influencia a implantação de políticas eficientes.

Segundo Fagury (2007), a gestão adequada de RCD, em caráter público, pode acarretar:

- Redução de custos da limpeza urbana e recuperação de áreas degradadas;
- Redução dos impactos provenientes de exploração de jazidas naturais de agregados para a construção;
- Incentivo a parcerias para a captação, reciclagem e reutilização de RCD;
- Geração de emprego e renda;
- Incentivo a redução da geração de resíduos nas atividades construtivas.

Wiens *et al.* (2006) observa que o gerenciamento de RCD é uma questão mundial e que em diversos países, incluindo os Estados Unidos, os países da comunidade europeia e os asiáticos, o incentivo à redução, reutilização e reciclagem de resíduos é parte da política ambiental adotada nesses locais.

Blumenschein (2004) lembra a experiência holandesa, onde foi possível atingir índices de reciclagem superiores a 90% de todos os resíduos produzidos por construções e demolições como resultado de uma combinação de fatores ao longo de vinte anos, entre eles: programas de pesquisa, altas taxas de disposição de resíduos recicláveis em aterros, mercado restrito pré-definido, agregados de qualidade equiparando-se a matérias-primas secundárias, diretrizes de avaliação de qualidade do processo e dos resíduos processados e certificação de qualidade dos agregados reciclados.

Castro (2012) chama a atenção para a Espanha, onde o Real Decreto 105/2008, de 1 de fevereiro, pelo qual se regula a produção e gestão de RCD, estabelece o regime jurídico para produção e gestão dos resíduos de construção e demolição, com a finalidade de fomentar sua prevenção, reutilização, reciclagem e

outras formas de valorização. Este novo decreto obriga o desenvolvedor do projeto a incluir um estudo de gestão de resíduos de construção e demolição no projeto de construção e obriga o empreiteiro a criar um plano de resíduos de construção e demolição para o canteiro de obras. Tanto o estudo, quanto o plano são necessários a fim de obter uma licença de construção, e incluem dois importantes aspectos de controle: as quantidades de resíduos e custos de tratamento. Este decreto recomenda que um depósito monetário seja feito para garantir que os geradores lidem com os seus resíduos de construção e demolição da maneira mais apropriada.

No Brasil existe uma legislação, voltada a gestão de RCD, abrangente e atualizada em relação a outros países, além de completa quanto aos aspectos ambientais considerados. No entanto, existem diversas dificuldades para a implantação completa destas leis nas diferentes esferas de poder, principalmente por questões políticas e pressões de setores econômicos.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, para o ano de 2017, dos 5.570 municípios brasileiros, 3.053 municípios possuem plano de gestão integrada de resíduos sólidos[5]. Em âmbito nacional, apenas 14 estados brasileiros possuem plano estadual de gestão de resíduos sólidos[6], outros 9 estados estão desenvolvendo planos estaduais de forma a atender à Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) – regulamentada pelo Decreto nº 7.404 de 02 de agosto de 2010.

No Quadro 02, estão relacionadas decretos, leis e resoluções federais que norteiam a gestão de RCD no Brasil.

[5] Fonte: IBGE. Diretoria de Pesquisas - DPE - Coordenação de População e Indicadores Sociais - COPIS.

[6] Fonte: Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/instrumentos-da-politica-de-residuos/item/10611.

Quadro 02 - Leis, decretos e resoluções que tratam da gestão de RCD

Documento	Descrição
Decreto no 7.404/2010	Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a PNRS, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos sistemas de logística reversa, e dá outras providências.
Lei Federal no 12.305/2010	Institui a PNRS, altera a Lei no 9.605 de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.
Lei Federal no 11.445/2007	Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis no 6.766, de 19 de dezembro de 1979, no 8.036, de 11 de maio de 1990, no 8.666, de 21 de junho de 1993 e no 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências.
Resolução no 348/2004	Altera a Resolução Conama no 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos.
Resolução no 307/2002	Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos RCC.
Lei Federal no 10.257/2001	Estatuto das Cidades: regulamenta os Artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.
Lei Federal no 9.605/1998	Lei de Crimes Ambientais: dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.
Lei Federal no 6.938/1981	Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.

Fonte: Fernandez (2012).

3.3 Agregados Reciclados de RCD

As composições básicas dos RCD podem variar em função do tipo de obra, do sistema construtivo empregado e em razão da localidade. John *et al.* (2016) classificam os resíduos de construção em:

- Solos.
- Materiais “cerâmicos”: rochas naturais, concreto, argamassas, cerâmica vermelha, cerâmica branca, cimento-amianto, gesso, vidro.
- Materiais metálicos: aço para concreto armado, latão, chapas de aço galvanizado, etc.
- Materiais orgânicos: madeira, plásticos diversos, materiais betuminosos, tintas e adesivos, papel, restos de vegetais e outros produtos de limpeza de terrenos.

A proporção entre estas fases, presente nos RCD, varia dependendo de sua origem, um exemplo disso é que os RCD provenientes de obras de pavimentação, apresentam altas concentrações de materiais asfálticos, já para obras de edificação possuem uma maior concentração de argamassa.

Na Tabela 05, são apresentadas as principais fontes geradoras, e os principais componentes do RCD, segundo Fernandez (2012).

Tabela 05- Fonte geradora e composição do RCD (%)

Componentes	**Trabalhos rodoviários**	**Escavações**	**Sobras de demolições**	**Obras diversas**	**Sobras de limpeza**
Concreto	48,0	6,1	54,3	17,5	18,4
Tijolo	-	0,3	6,3	12,0	5,0
Areia	4,6	9,6	1,4	3,3	1,7
Solo, poeira, lama	16,8	48,9	11,9	16,1	30,5
Rocha	7,0	32,5	11,4	23,1	23,9
Asfalto	23,6	-	1,6	1,0	0,1
Metais	-	0,5	3,4	6,1	4,4
Madeira	0,1	1,1	1,6	2,7	3,5
Papel/material orgânico	-	1,0	1,6	2,7	3,5
Outros	-	-	0,9	0,9	2,0

Fonte: Levy (1997, *apud* FERNANDEZ, 2012).

O agregado reciclado é uma mistura de agregado graúdo e miúdo obtido da britagem do RCD. A porcentagem de cada fração depende da granulometria e da composição do RCD bem como do diâmetro máximo do agregado produzido pelo britador. Segundo Leite (2001), quanto a textura e forma, o agregado reciclado de RCD possui forma mais irregular e textura superficial áspera e porosa. Para Fagury (2007), a utilização de agregados reciclados de RCD pode ser considerada como uma oportunidade de converter despesas em receitas ou em reduzir despesas com a deposição de resíduos e com a extração de matérias-primas.

As aplicações mais usuais para o agregado reciclado incluem os materiais destinados à base e sub-base de pavimentos, aterros, concretos sem fins estruturais, argamassas e matéria-prima para a fabricação de tijolos e blocos de concreto. A dificuldade para qualquer aplicação está no controle da variabilidade das características físicas ou na presença de impurezas e contaminantes

No uso em pavimentos, Leite (2001) mostrou que os agregados reciclados podem não atender aos limites granulométricos impostos, pois possui grande potencial de variação em suas propriedades físicas. Porém, controlando a execução e fazendo uso de energia modificada, é possível obter pavimentos com bons desempenhos, observa a autora.

Miranda (2005) observa que a absorção de água e teor de finos (< 0,075 mm) são as principais causadoras de variabilidade de desempenho em argamassas produzidas com agregados reciclados de RCD. Angulo (2005), concluiu que a porosidade dos agregados reciclados de RCD é responsável pela variabilidade no comportamento mecânico dos concretos produzidos com estes, quando se tem a relação a/c constante.

Pinto (1999 *apud* FAGURY, 2007), afirma que os processos de gestão de resíduos em canteiros de obra, por meio da sofisticação dos procedimentos de demolição e de especialização no tratamento e reutilização de RCD, podem conformar um novo ramo da engenharia civil. Para John *et al.* (2016), a reciclagem dos resíduos de construção e demolição é viável do ponto de vista técnico e ambiental.

Para Maranhão (2016), no Brasil é habitual que nas usinas de reciclagem, a classificação dos agregados reciclados de RCD como vermelho, quando este possui alto teor de cerâmica, cinza quando o agregado é rico em produtos à base de cimento, e misto quando a concentração de ambos os materiais é uniforme. Segundo a NBR 15.116 (ABNT, 2004), os agregados reciclados devem ser classificados em dois tipos:

- ARC (Agregado de Resíduo de Concreto) – Agregado obtido do beneficiamento de resíduos de Classe “A” cuja composição é maior ou igual a 90% de fragmentos a base de cimento Portland e rochas
- ARM (Agregado de Resíduo Misto) – Agregado obtido do beneficiamento de resíduos de Classe “A” cujo a composição de fragmentos de cimento Portland e rochas é inferior a 90%.

Miranda *et al.* (2009) observam que a classificação dos agregados em ARC e ARM, na prática, é muito simples, bastando na usina a separação visual dos RCD com predominância de concreto, daqueles com presença de materiais cerâmicos. A Tabela

06 demonstra os requisitos mínimos, estabelecidos pela NBR 15.116 (ABNT, 2004), aos agregados reciclados de RCD para fabricação de concreto sem fins estruturais.

Tabela 06 - Requisitos mínimos da NBR 15.116

Agregado	Parâmetro	Limites NBR 15.116	
		ARC	ARM
Agregado Graúdo	Cloretos (%)	< 1%	< 1%
	Sulfatos (%)	< 1%	< 1%
	Materiais não minerais (%)	< 2%	< 2%
	Torrões de Argila (%)	< 2%	< 2%
	Teor Máximo de Contaminantes	< 3%	< 3%
	Teor de Finos (%)	< 10%	< 10%
	Absorção de Água (%)	< 7%	< 12%
Agregado Miúdo	Cloretos (%)	< 1%	< 1%
	Sulfatos (%)	< 1%	< 1%
	Materiais não minerais (%)	< 2%	< 2%
	Torrões de Argila (%)	< 2%	< 2%
	Teor Máximo de Contaminantes	< 3%	< 3%
	Teor de Finos (%)	< 15%	< 20%
	Absorção de Água (%)	< 12%	< 17%

Fonte: NBR 15.116 (ABNT, 2004).

Os agregados reciclados apresentam massa unitária[7] menores que os agregados naturais, isso se dá devido à composição do material. Leite (2001) observa que o método de trituração, a composição e a granulometria podem influenciar na massa unitária do agregado reciclado de RCD.

Em sua pesquisa, Leite (2001) relatou que os agregados reciclados miúdos e graúdos apresentaram massa unitária 21% e 30% inferiores que os agregados naturais miúdos e graúdos, respectivamente. Para Buttler (2003) os agregados reciclados graúdos possuem massa unitária 14% inferior, ao agregado natural graúdo. Cabral (2007) chama a atenção para o fato de agregados graúdos e miúdos, provenientes de mesma matéria-prima possuírem massa unitária diferentes. Este autor justifica essa diferença devido à forma dos grãos, que proporciona diferente

[7] A massa unitária, também conhecida como massa específica aparente, é a relação entre a massa do material e o seu volume, incluindo os poros permeáveis e vazios entre os grãos.

empacotamento, e ao fato que agregados miúdos podem possuir maior porcentagem de argamassa em sua composição. Leite (2001) indica que pode haver diferenças de volume, em virtude da menor massa unitária dos agregados reciclados de RCD, quando da realização de traços de concreto, havendo a necessidade de compensação da massa destes materiais.

De forma geral, os agregados reciclados de RCD apresentam massa específica inferior aos agregados naturais. Juan (2004) comenta que a massa específica do agregado reciclado de concreto sofre influência da sua composição, das técnicas de produção e da origem do concreto utilizado em sua produção. Leite (2001) observa que encontrou grande variação em resultados para massa específica dos agregados reciclados provenientes da mesma usina, para diferentes autores. Esta autora associa a variabilidade encontrada nestes resultados ao método utilizado na determinação desta propriedade e a desagregação do material durante seu manuseio.

Buttler (2003), em sua pesquisa com agregados reciclados de concreto, encontrou massa específica para o agregado graúdo variando entre 2,39 kg/dm³ e 2,46 kg/dm³. Os resultados obtidos por Juan (2004) para o agregado reciclado miúdo variou entre 2,01 kg/dm³ e 2,30 kg/dm³, para o agregado graúdo a massa específica variou entre 2,14 kg/dm³ e 2,40 kg/dm³. Para o agregado reciclado de RCD, Cabral (2007) encontrou massa específica de 2,56 kg/dm³ para o agregado miúdo e 2,27 kg/dm³ para o agregado graúdo. Os resultados encontrados por Leite (2001) foram de 2,53 kg/dm³ para o agregado reciclado miúdo e 2,51 kg/dm³ para o agregado graúdo.

Segundo Mehta *et al.* (1994), conhecer a capacidade de absorção[8] do agregado é necessária para correção das proporções de água e agregados nas misturas de concreto. O ensaio que determina absorção de água do agregado miúdo é descrito na NM 30 (“Agregado miúdo - Determinação da absorção de água”), para o agregado graúdo o ensaio é especificado pela NM 52 (“Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente”).

Para Lima (1999, *apud* LEITE, 2001), a elevado absorção de água dos agregados reciclados de RCD pode reduzir a resistência mecânica dos concretos, fabricados com estes, em até 35% e aumentar a retração em até 65%, além do aumento na fluência e redução no módulo de deformação.

[8] A capacidade de absorção é definida como a quantidade total de água necessária para trazer um agregado da condição seca em estufa para a condição SSS (MEHTA *et al.*, 1994, p. 257).

A forma irregular e a textura superficial áspera e porosa dos agregados reciclados de RCD, resulta em uma maior absorção de água, afetando a trabalhabilidade do concreto. A elevada absorção se dá devido ao teor de argamassa contida nos agregados. Para se obter uma melhor trabalhabilidade é necessário a adição de mais água na mistura de concreto, o que ocasiona em uma maior relação a/c e consequentemente em menor resistência a compressão. Para Barra (1996, *apud* LEITE, 2001), a capacidade de absorção do agregado reciclado de RCD depende de três fatores:

- Umidade do agregado reciclado;
- Tempo de permanência de contato com o material: água;
- Pré-saturação.

Boehme (2013) chama a atenção para a absorção de água pelo agregado reciclado de RCD, que varia entre 5% e 10%, portanto superior aos agregados naturais que variam em torno de 0,5% e 1,0%. Para Juan (2004) a absorção dos agregados reciclados variou de 0,8% a 13%. Leite (2001) obteve 8,6% para agregado miúdo e 4,95% para agregado graúdo, para Buttler (2003) observou uma absorção de água dos agregados reciclados variando entre 4,7% e 6,4%. Ainda segundo Boehme (2013), para utilização dos agregados reciclados de RCD é necessário que estes estejam na condição seco-saturado, a fim de evitar que seja afetado a relação a/c (água/cimento). Os dados de absorção são necessários para correção da proporção de água do traço de concreto em misturas realizadas com uso de agregado reciclado de RCD, devido às variações ocasionadas pela composição e origem destes agregados.

Para Angulo *et al*. (2011), a absorção de água dos agregados de RCD, nos primeiros 10 minutos equivale de 70% a 90% da absorção de água após 24 horas. Ainda segundo este autor, os agregados de RCD necessitam de pré-saturação para produção de concreto, quando estes são adicionados secos à mistura absorvem parte da água adicionada na pasta de cimento, reduzindo a relação água/cimento e implicando em perda de consistência, além de enfraquecer a zona de transição e reduzir a resistência do concreto. Para Padovan (2013), a pré-saturação também possui aspectos negativos, como por exemplo, a migração de água do agregado reciclado de RCD para a pasta fresca de cimento, elevando a relação a/c na zona de transição e consequentemente aumento do índice de vazios.

3.3.1 Presença de Contaminantes e Outros Materiais Indesejados

Para Miranda (2005), a dificuldade para qualquer aplicação de agregados reciclados de RCD está no controle da variabilidade das características físicas ou na presença de impurezas e contaminantes. Leite (2001) e Maranhão (2016) chamam a atenção para a presença de impurezas e contaminantes na composição dos agregados reciclados de RCD, podendo provocar efeitos negativos nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto fabricado com estes.

Embora os resíduos de construção e demolição sejam classificados como inertes, eles podem conter contaminações provenientes de seu uso. Segundo Lima (1999, *apud* LEITE, 2001) impurezas e contaminantes são classificados como materiais não inertes, presentes em agregados, capazes de prejudicar a qualidade de concretos e argamassas. Os principais contaminantes presentes nos agregados reciclados de RCD são: argilas, plásticos, materiais betuminosos, madeiras, vidros, metais e gesso. Também podem ser encontradas substâncias como cloretos e álcalis. John *et al*. (2016) lembram que RCD oriundo de obras expostas a atmosfera marinha podem estar contaminados por sais, podendo levar a corrosão de metais, caso sejam utilizados para a confecção de concretos armados.

Segundo Neville (2013), a presença de materiais betuminosos e concentrações de materiais orgânicos podem produzir excessiva incorporação de ar, fragmentos de vidros podem causar reação álcali-agregado e resíduos de materiais metálicos são responsáveis por manchas ocasionadas pela oxidação. Agregados reciclados contaminados com gesso contribuem para a formação de etringita tardia, que é altamente danoso ao concreto.

Leite (2001) acrescenta que outros metais como zinco e alumínio podem causar desprendimento do hidrogênio no concreto fresco ou fissurações devidas a expansões no concreto endurecido.

3.3.2 Variabilidade dos Agregados Reciclados de RCD

Mehta *et al.* (1994) citam que concretos fabricados com agregado reciclado possuem, no mínimo, dois terços da resistência a compressão e módulo de

elasticidade, dos concretos fabricados com agregados naturais, bem como trabalhabilidade e durabilidade satisfatórias. Estes mesmos autores observam que o concreto fabricado de agregados reciclados pode ser economicamente viável em locais onde agregados naturais de boa qualidade são escassos e quando o custo de disposição do entulho é incluído na análise econômica. Buttler (2003) observa que a microestrutura do concreto, com agregado reciclado, é influenciada principalmente pelas características da argamassa aderida ao agregado e pela nova matriz de cimento em contato com este. Também é lembrado por Buttler (2003) que a fase “agregado” é a principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto, assim como a massa específica do concreto e a resistência a compressão sofrem influência direta do agregado graúdo.

É unanime entre diversos autores que o principal obstáculo a utilização do agregado reciclado de RCD é a sua falta de homogeneidade, sendo observado a presença de impurezas e outros materiais, como cerâmica, asfalto, vidros, materiais orgânicos, entre outros, que podem aparecer em distintas proporções. Maranhão (2016), observa que a variabilidade dos agregados reciclados afeta as propriedades dos concretos.

A variabilidade presente nos agregados reciclados de RCD está relacionado à sua origem em consequência do método construtivo empregado (construção nova, demolição, obras de manutenção, etc.) e ao processo de separação e britagem utilizado na sua produção. Para Maranhão (2016), a falta de métodos sistemáticos de controle e o método utilizado para classificação dos agregados reciclados de RCD são responsáveis pela alta variabilidade medida nas publicações acadêmicas.

Para se conseguir uma melhor homogeneidade dos agregados reciclados são necessários que as plantas de produção tomem algumas precauções, como por exemplo: inspeção visual dos resíduos durante o recebimento para verificação de sua homogeneidade, separação dos materiais, coleta de informações sobre a procedência dos resíduos, além de conhecimento da origem e do tipo de estrutura que o originou. Com ações como estas é possível alcançar uma melhor uniformidade do agregado produzido.

Juan *et al.* (2009) sugerem que seja realizado nos agregados reciclados de RCD, quando estes forem utilizados para fabricação de concretos, os mesmos ensaios exigidos para agregados naturais acrescidos de ensaios que determinem a

presença de impurezas e teor de materiais finos. Maranhão (2016) lembra que, nas últimas décadas, muito se avançou em pesquisas sobre novas técnicas de reciclagem de agregados, porém a maioria das pesquisas ficaram restritas aos laboratórios.

3.3.3 Processo de Produção dos Agregados de RCD

Angulo (2000) defende que o processo de produção de agregado reciclado de RCD seja viável de forma técnica e econômica. Leite (2001) chama a atenção para países da Europa, onde a produção de agregados reciclados é incentivada pelas administrações públicas e onde existe certificação de qualidade do material e do processo de produção.

O beneficiamento de resíduos de construção e demolição não difere muito do tratamento dado a produção de agregados naturais, podendo fazer uso em ambos os processos dos mesmos equipamentos (LEITE, 2001). No Brasil, até 10 anos atrás, as plantas de reciclagem só possuíam sistemas de britagem, peneiramento, separação manual e separação magnética. De forma geral, estas plantas são compostas por: tremonha, trituradores, correia transportadora, conjunto peneirador, silos de estocagem e imã eletromagnético. Uma etapa normalmente não incluída nas centrais brasileiras é a criação de pilhas de homogeneização dos agregados de forma a diminuir a variabilidade natural do produto ao longo do processo. Maranhão (2016) indica que é possível se obter excelentes resultados na produção de agregados reciclados através de ações simples como, por exemplo, separação prévia dos resíduos através de sua densidade e a não operação da planta de processamento em dias em que a intensidade de chuvas for superior a 5 mm.

A granulometria do agregado reciclado de RCD, tanto miúdo quanto graúdo, sofre influência do equipamento utilizado para trituração e das características do RCD empregado (LEITE, 2001; BUTTLER, 2003; JUAN, 2004). Mehta *et al.* (1994) sugerem atenção para a dimensão máxima do agregado[9]. Estes autores observam que a dimensão máxima do agregado, além de influenciar na relação água/cimento, consequentemente afetando o custo de produção de concretos, também exerce influência no surgimento de microfissuras na zona de transição, entre a pasta e o

[9] A dimensão máxima característica de um agregado equivale à abertura da malha, em milímetros, da peneira (série normal ou intermediária), à qual equivale a porcentagem retida acumulada menor ou igual a 5%, em massa.

agregado graúdo. Para se ter um maior controle da granulometria dos agregados reciclados de RCD, Juan *et al.* (2009) chama a atenção para a utilização de fator de redução obtido através do quociente entre peneiras antes e depois da trituração do agregado.

3.4 Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de RCD

Segundo Angulo *et al.* (2011), agregados reciclados de RCD influenciam as condições de mistura e a trabalhabilidade do concreto no estado fresco para o concreto no estado endurecido, onde são observadas maior retração e baixo módulo de elasticidade. Para Buttler (2003) os resíduos reciclados de concreto contribuem positivamente para as propriedades mecânicas de novos concretos devido à existência de grande quantidade de partículas não hidratadas de cimento.

A seguir são exploradas algumas propriedades dos concretos produzidos com agregados reciclados de RCD.

3.4.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade, ou consistência do concreto, sofre influência direta do teor de água da mistura, entretanto existe outros fatores que interagem nesta propriedade: relação a/c, tipo e granulometria dos agregados, aditivos, finura do cimento, temperatura e tempo. Para Buttler (2003), a absorção elevada dos agregados reciclados afeta a trabalhabilidade das misturas de concreto, além de causar retração. Segundo Cabral (2007), a forma angular dos agregados reciclados, devido ao seu processo de britagem, proporciona uma razão superfície/volume maior que os agregados naturais, exigindo maior quantidade de pasta para se obter trabalhabilidade na mistura de concreto.

Dentre as propriedades do concreto no estado fresco, a trabalhabilidade é muito importante, exercendo influência sobre as propriedades do concreto no estado endurecido (LEITE, 2001). Neville (2013) observa que não existem ensaios aceitáveis que avaliam diretamente a trabalhabilidade, porém existem métodos que dão uma medida, aceita universalmente, da trabalhabilidade. Para avaliação da

trabalhabilidade de misturas de concreto, os métodos mais utilizados são: o ensaio de abatimento do tronco de cone, o ensaio VeBe e o fator de compactação.

3.4.2 Massa Específica do Concreto no Estado Fresco

O concreto produzido com agregado reciclado de RCD tende a possuir menor massa específica, devido às características dos agregados reciclados. As misturas de concreto produzidas por Buttler (2003) sofreram influência da grande quantidade de argamassa aderida ao agregado reciclado. A massa específica do concreto no estado fresco sofre forte influência da massa específica dos agregados e do grau de compactação (PADOVAN, 2013).

Nos experimentos realizados por Leite (2001), foi observado uma redução de 16% na massa específica do concreto produzido com agregado reciclado. Buttler (2003) e Juan (2004) observaram 5% de redução da massa específica em concretos produzidos com agregado reciclados em relação ao concreto produzido com agregado natural. Cabral (2007) chama a atenção para a possibilidade de utilização do concreto produzido com agregados reciclados em situações onde o peso próprio da estrutura é um problema a ser considerado.

3.4.3 Teor de Ar Incorporado no Concreto no Estado Fresco

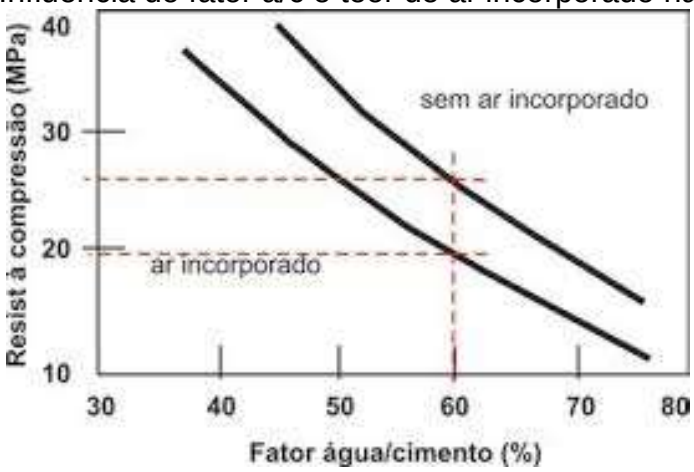
Segundo Romano *et al.* (2011), a incorporação de ar no concreto é usada desde 1930 em áreas onde predominam a baixa temperatura devido aos ciclos de gelo-degelo. Porém, este mesmo autor lembra que a presença de vazios no concreto pode gerar diversos problemas à estrutura, entre eles a redução da resistência mecânica e do módulo de elasticidade.

Concretos convencionais contêm em seu interior teores entre 1% e 3% de seu volume na forma de ar aprisionado. Para Juan (2004) concretos produzidos com agregados reciclados de RCD podem conter até 6,6% de ar incorporado. Para alguns autores, teores elevados de ar incorporado ocorre devido à pasta de argamassa aderida ao agregado reciclado que retém mais facilmente o ar dentro de seus poros.

Segundo Mehta *et al.* (1994), o adensamento inadequado do concreto pode incorporar ar à mistura, aumentando a porosidade e reduzindo a resistência mecânica

do sistema. A Figura 05 compara a resistência à compressão do concreto com e sem incorporação de ar.

Figura 05 - Influência do fator a/c e teor de ar incorporado na resistência



Fonte: Mehta *et al.* (1994).

Para Juan (2004) a pré-saturação dos agregados reciclados pode influenciar positivamente no teor de ar incorporado do concreto, trazendo os teores próximo aos de concretos convencionais. Mehta *et al.* (1994) observa que a porosidade da matriz da pasta de cimento é determinada pelo fator água/cimento.

3.4.4 Absorção de Água do Concreto no Estado Endurecido por Ascenção Capilar

O concreto, em sua constituição, é um material poroso com vazios de origem diversas. Para Bauer (2016), a importância do conhecimento do grau de permeabilidade do concreto não pode ser considerada apenas pela sua utilização em obras hidráulicas, mas também dos casos onde a durabilidade deste pode ser ameaçada pela ação de agentes agressivos.

Devido às características dos materiais constituintes, em sua mistura, o concreto produzido com agregados reciclados possui maior porosidade que os concretos produzidos com agregados naturais. Para Angulo *et al.* (2011), misturas de concreto onde os volumes de agregados reciclados representam 70% do volume total, a absorção de água do concreto pode chegar a 14%, dependendo da qualidade dos agregados reciclados de RCD. Para Buttler (2003) os concretos produzidos com

agregados reciclados de RCD apresentam absorção superior ao concreto produzido com agregados naturais da ordem de 40%.

3.4.5 Determinação da Resistência a Compressão do Concreto

Segundo Mehta *et al.* (1994) a resistência do concreto é a propriedade mais valorizada pelos engenheiros projetistas e de controle de qualidade. A resistência do concreto sofre influência da porosidade dos agregados, porosidade da matriz, dos minerais presentes na mistura, da interação química entre o agregado e a pasta de cimento, do teor de ar-aprisionado nos agregados e da capacidade dos agregados em absorver água, entre outros fatores.

Ainda segundo Mehta *et al.* (1994), as resistências à compressão e à flexão e o módulo de deformação são governados pela zona transição, considerada por estes autores como o ponto mais fraco do concreto. Considerar a zona de transição no estudo das propriedades do concreto é importante, pois esta possui propriedades químicas e físicas distintas do restante da matriz. O tamanho dos cristais e a sua disposição podem reduzir a resistência de ligação entre agregado e matriz (LEITE, 2001).

Para o concreto produzido com agregado reciclado, alguns autores divergem quanto a zona de transição entre a pasta e o agregado graúdo reciclado de RCD. Para Cabral (2007) existem duas zonas de transição em concretos produzidos com agregados reciclados de RCD. A primeira zona de transição seria entre o agregado natural e a argamassa antiga, e a segunda zona de transição surge entre a argamassa antiga e a nova argamassa. Juan (2004) justifica a baixa resistência encontrada em concreto produzidos por agregados reciclados, entre outros fatores, a existência de uma segunda zona de transição que aparece entre a argamassa antiga, aderida ao agregado natural, e a nova argamassa. Esta teoria é reforçada por Padovan (2013).

Para Leite (2001), as partículas do agregado reciclado possuem área específica maior, permitindo maior absorção da pasta de cimento pelos poros superficiais do agregado quando comparado ao agregado natural. Desta forma, segundo esta autora, ocorre maior precipitação dos cristais de hidratação nos poros do agregado, consequentemente uma zona de transição mais fechada, melhorando o desempenho do concreto. Ainda segundo esta autora, a partícula do agregado reciclado passa a

ser o elo fraco na mistura, justificando a redução na resistência do concreto com o aumento do teor de agregados reciclados utilizados.

Buttler (2003) observa que mesmo com maior relação a/c para o concreto produzido com agregado reciclado, ocorre a migração de água do agregado para a pasta, logo após o endurecimento, ocorrendo um efeito descrito por este autor como “cura interna” na zona de transição, melhorando as propriedades de ligação entre pasta e agregado.

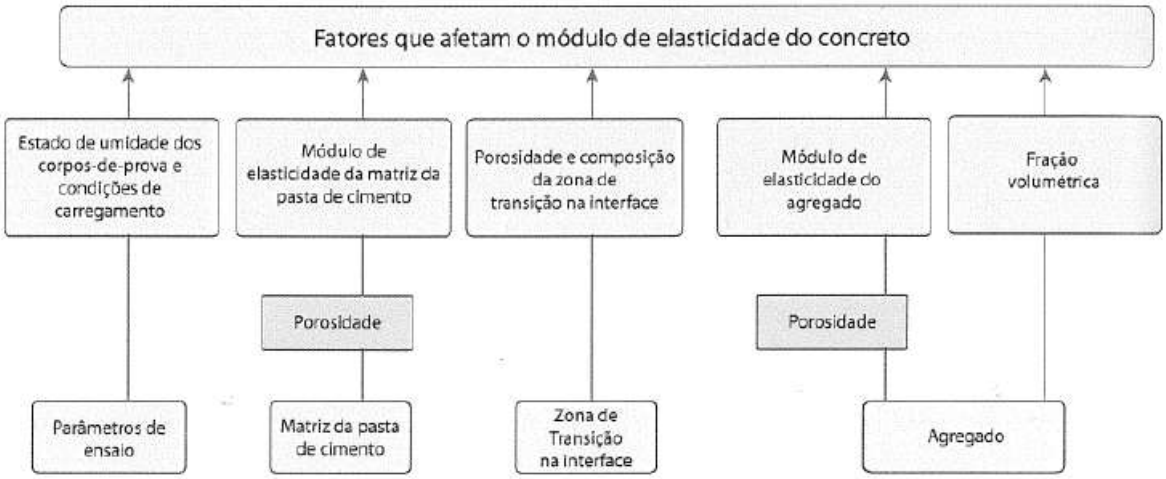
“*O agregado reciclado tende a permitir uma densificação da zona de transição e diminuição da microfissuração em razão de seu menor módulo de elasticidade permitir a compatibilização de sua deformação com a da pasta. Por si só, isso poderia levar a uma diminuição da facilidade de movimentação dos fluidos no concreto. Entretanto, o agregado reciclado é mais poroso que o agregado natural, e assim traz mais vazios para o composto, podendo também aumentar a conectividade entre os poros do sistema e, consequentemente, a facilidade com que fluidos se movem dentro deste*” (TENÓRIO, 2007, p.54).

3.4.6 Determinação do Módulo de Elasticidade do Concreto

De acordo com Martins (2012) o módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que fornece medida de rigidez de um determinado material e está associado as tensões de escoamento, tensões de ruptura e às temperaturas de propagação de trincas, podendo ser considerada como a relação entre tensão e deformação. Os parâmetros de mistura influenciam no módulo de elasticidade quando modificam a relação entre os agregados e a pasta de cimento (BAUER *et al.*, 2012).

Na Figura 06 são apresentados os fatores que afetam o módulo de elasticidade longitudinal do concreto.

Figura 06 - Fatores que influenciam no módulo de elasticidade



Fonte: Mehta *et al.* (2008, *apud* ALMEIDA, 2012).

De forma geral, concretos de maior resistência apresentam maiores módulos de elasticidade e menores deformações. Segundo Bauer *et al.* (2012), por possuir um módulo de elasticidade relativamente maior que a pasta, o agregado graúdo pode influenciar de forma positiva o módulo de elasticidade do concreto. Para Shehata (2011) os módulos estático e dinâmico são afetados de forma diferente pelas características do concreto.

É observado um crescimento nas pesquisas utilizando agregado reciclados, porém, pouco se observa nestas pesquisas a análise do módulo de elasticidade, mesmo tendo conhecimento de sua importância nos projetos estruturais para análise do comportamento das estruturas de concreto. O módulo de elasticidade longitudinal dinâmico do concreto pode ser determinado através de dois ensaios, sendo um através velocidade de propagação de ondas de ultrassom e o outro com a frequência natural de vibração do corpo de prova. No presente trabalho faremos uso do ensaio que determina a velocidade de propagação de ondas de ultrassom.

O método de ultrassom é baseado no conceito de que a velocidade de um pulso de ondas longitudinais através de um material depende de suas propriedades elásticas e de sua densidade. Este método também pode ser utilizado para detectar defeitos no interior do concreto, bem como alterações decorrentes de um ambiente agressivo. Bauer *et al.* (2012) relaciona na Tabela 07 a velocidade de propagação do som às condições do concreto.

Tabela 07 - Critérios de Avaliação do Ultrassom

Velocidade de Propagação (m/s)	**Condições do Concreto**
> 4.500	Excelente
3500 a 4.500	Bom
3.000 a 3.500	Regular (duvidoso)
2.000 a 3.000	Geralmente ruim
< 2.000	Ruim

Fonte: Bauer *et al.* (2012).

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi elaborado e desenvolvido com base nos objetivos propostos, onde foi estabelecido variáveis de análise, materiais e métodos experimentais. As amostras utilizadas nos ensaios e na produção de concreto foram retiradas na UVR Grajaú. O programa experimental foi dividido em etapas, onde são realizados a caracterização dos agregados, produção de concretos e ensaio do concreto no estado fresco e estado endurecido.

Na primeira etapa foi realizada a homogeneização e caracterização das amostras. Na etapa seguinte foram desenvolvidos os traços e preparada as misturas de concreto. Na terceira e última etapa, após realizada as misturas de concreto, foram realizados os ensaios para o concreto no estado fresco e estado endurecido.

O programa experimental consistiu em realizar 05 coletas de campo com intervalos mínimos de quinze dias entre elas. Em cada coleta foram extraídos aproximadamente 200 kg de cada fração granulométrica, divididos em 04 sacos de ráfia com 50kg. Para as amostras de 50kg, foram realizadas três amostras parciais, sendo elas no topo, meio e base das pilhas de agregados, conforme estabelece a NM 26 (ABNT, 2001). Para as coletas foi feito uso de pá, sempre 30 cm abaixo da camada superior, evitando a coleta de material segregado.

Não foram realizadas pesagens dos agregados, sendo consideradas a relação de volume para os agregados graúdos e miúdos. As amostras foram encaminhadas para o laboratório de materiais de construção da Universidade São Judas Tadeu, campus Butantã.

O presente estudo concentra-se em quatro faixas granulométricas, sendo elas:

- # 0,0 a 4,8 mm – Classificada como Areia Reciclada;
- # 4,8 a 10,0 mm – Classificada como Pedrisco;
- # 10,0 a 20,0 mm – Classificada como Brita Nº 01;
- # 20,0 a 40,0 mm – Classificada como Brita Nº 02.

Para classificação das amostras, foi utilizado a nomenclatura apresentada no apêndice A, Tabela A1.

4.1 Caracterização dos Agregados

Foram realizados ensaios para mensuração das características físicas dos agregados reciclados através de testes de análise granulométrica, massa específica, teor de finos, absorção de água, índice de vazios. No Quadro 03 estão listados todos os ensaios realizados no programa experimental, para os agregados graúdos e miúdos de RCD e as Normas técnicas de referência.

Quadro 03 - Programa experimental – Agregados

Norma	**Ensaio**	**Agregados reciclados avaliados**			
		Areia Reciclada 0,0 - 4,8	**Pedrisco 4,8-10,0**	**Brita Nº1 10,0 - 20,0**	**Brita Nº2 20,0-40,0**
NBR 15116/04	Caracterização do agregado reciclado		X	X	X
NBR NM 248/03	Determinação da composição granulométrica	X	X	X	X
NBR NM 46/03	Determinação do material pulverulento	X	X	X	X
NBR NM 52/03	Determinação da massa específica (agregado miúdo)	X			
NBR NM 45/06	Determinação da massa unitária	X	X	X	X
NBR NM 53/03	Determinação da massa específica (agregado graúdo)		X	X	X
NBR NM 53/03	Determinação da absorção de água (agregado graúdo)		X	X	X
NBR NM 30/01	Determinação da absorção de água (agregado miúdo)	X	X	X	X

Fonte: Autor.

4.2 Produção de Concretos com Agregados Reciclados de RCD

Foi avaliada a influência dos agregados reciclados nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. As Normas Técnicas de referência, e os respectivos ensaios a serem realizados nos concretos de RCD estão listados no Quadro 04.

Quadro 04 - Programa experimental – Ensaios do concreto

Norma	Ensaio
NBR NM 67/98	Determinação do abatimento inicial e final do concreto no estado fresco
NBR 9833/87	Determinação da massa específica do concreto no estado fresco
NBR NM 47/02	Determinação do teor de ar incorporado no concreto no estado fresco
NBR 09779/13	Determinação da absorção por capilaridade no concreto no estado endurecido
NBR 5739/07	Determinação da resistência à compressão do concreto
NBR 7222/11	Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos
NBR 15630/08	Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do Módulo de Elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica.

Fonte: Autor.

4.3 Métodos Experimentais

Nos próximos itens são apresentados os métodos utilizados para caracterização dos agregados reciclados de RCD e os procedimentos utilizados para análise das propriedades do concreto, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

4.3.1 Quarteamento das Amostras

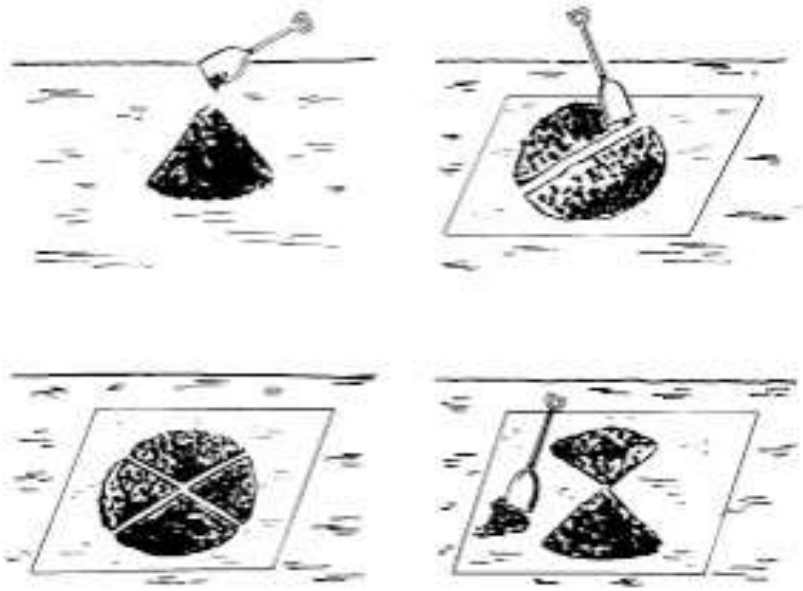
Todas as amostras coletadas foram homogeneizadas e quarteadas antes de serem submetidas aos ensaios de caracterização, conforme descrito no método “B”, da NM 27 (ABNT, 2000), e como podem ser vistos na Figura 07, a fim de garantir amostras representativas do todo.

Figura 07 - Quarteamento

Fonte: Autor.

A NBR NM 027 (ABNT, 2000) determina que as amostras sejam homogeneizadas sobre superfície rígida e limpa, onde não ocorra perda de material nem a adição acidental de substâncias. As amostras foram misturadas e homogeneizadas pelo menos três vezes. Após a homogeneização foi formado uma pilha cônica e fazendo a divisão em quatro partes iguais, onde são eliminadas duas partes e agrupadas as outras duas partes, no sentido diagonal, para nova homogeneização. O procedimento é repetido até se obter a quantidade de material necessário à execução do ensaio, conforme demonstrado na Figura 08.

Figura 08 - Método de Redução das Amostras



Fonte: AMOSTRAGEM, 2018.

4.3.2 Composição dos Agregados Reciclados de RCD

Para os ensaios de caracterização dos agregados reciclados de RCD, todas as amostras foram lavadas em água corrente, utilizando peneira de malha 4,8mm. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a (105 $\pm$ 5) °C, para depois determinar a massa total e realizar a separação dos fragmentos nos grupos acima descritos. Na Figura 09 é apresentado a composição de uma amostrada de agregado reciclado de RCD coletada em campo.

Figura 09 - Composição de uma amostra de agregado reciclado

Fonte: Autor.

Diferente do que prescreve a NBR 15116 (ABNT, 2004) as amostras foram divididas em nove grupos, conforme apresentado no Quadro 05.

Quadro 05 - Grupos de fragmentos

Grupo	Fragmentos
1	Fragmentos de argamassa em porcentagem superior a 50%
2	Fragmentos de rocha em porcentagem superior a 50%
3	Fragmentos de cerâmica branca
4	Fragmentos de cerâmica vermelha
5	Fragmentos de vidros
6	Fragmentos de betume
7	Fragmentos de aço
8	Fragmentos de gesso
9	Fragmentos de origem orgânica

Fonte: Autor.

4.3.3 Análise Granulométrica

A distribuição granulométrica possui grande influência sobre a qualidade do concreto, tanto na trabalhabilidade quanto na resistência. A composição granulométrica é obtida através do peneiramento do agregado, no qual são verificadas as porcentagens, em massa, retidas, acumuladas, em um conjunto de peneiras padronizadas. A distribuição granulométrica é a proporção relativa das massas dos diferentes tamanhos dos grãos que constituem o material.

A NBR NM 248 (ABNT, 2003) estabelece os parâmetros para realização do ensaio de composição granulométrica, bem como o conjunto de peneiras, das séries normais e intermediárias, a serem utilizadas. As peneiras utilizadas para determinação da granulometria têm aberturas padronizadas pela NM ISO 3310 (ABNT,1997), e estão descritas no Quadro 06.

Quadro 06 - Abertura das peneiras utilizadas nos ensaios

Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).			
Agregado natural			
Miúdo		**Graúdo**	
Série (mm)		Série (mm)	
Normal	Intermediária	Normal	Intermediária
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	19	
-	-		12,5
9,5	-	9,5	-
4,75	-	4,75	-
2,36	-	-	-
1,18	-	-	-
0,6	-	-	-
0,3	-	-	-
0,15		-	-
0,0075	-	0,0075	-

Fonte: NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Após a homogeneização, a amostra é separada em duas massas, (m1 e m2) com objetivo de realizar duas repetições para cada amostragem. A curva granulométrica é obtida através da média das duas repetições. As amostras são colocadas, ou porções da mesma, sobre a peneira superior do conjunto, evitando a formação de camada espessa de material sobre qualquer uma das peneiras. Na Figura 10 é apresentado o conjunto de peneiras utilizadas no ensaio.

Figura 10 - Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria

Fonte: Autor.

A agitação do conjunto das peneiras foi realizando pelo agitador mecânico por 5 minutos, a massa do material retido em cada peneira é pesada, para determinar as porcentagens retidas e acumulada. As duas massas (m1 e m2) devem apresentar a mesma dimensão máxima característica e as porcentagens retidas na mesma peneira não devem diferir em mais de 4% e a soma do material retido por peneira não deve diferir mais de 0,3% da massa inicial (m1 e m2). Caso isto ocorra, deve-se repetir o peneiramento para outras amostras.

4.3.4 Índices Físicos

A massa unitária dos agregados, no estado solto e compactado, pode ser determinada de forma simples, conforme detalha a NM 45:2006 (“Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios”), preenchendo um recipiente de volume conhecido com o agregado e determinando a sua massa. A diferença entre elas se resume ao estado em que o agregado está alocado no recipiente, se em estado solto ou compactado. É importante atentar-se para a garantia de não deformação do recipiente.

A massa específica[10] do agregado influi diretamente na massa específica do concreto, sendo diretamente proporcional à resistência do concreto. A massa específica do agregado miúdo é obtida segundo a NM 52 (“Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente”). Neste ensaio, o material é imerso em água por 24 horas, após este período a amostra é retirado e submetido à secagem superficial por uma corrente suave de ar quente até atingir coesão aparente, para essa fase utilizou-se o molde em tronco cilíndrico, após a coesão ser atingida determina-se a massa saturada superfície seca (Msss) para obter o valor da absorção de água.

Após essa primeira fase segue-se para determinação da massa específica, onde é separado 500 g do agregado miúdo após atingir a coesão aparente. A amostra é inserida em frasco normatizado e preenchido com água. Após a realização do procedimento descrito na NBR NM 52 (ABNT, 2009), o material é submetido à estufa para secagem por 24 horas (105 ± 5) ºC, após esse período determina-se a massa seca final (Msf). A massa específica é determinada através da equação abaixo:

$$d = \frac{m}{(v - v_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}}\ , \qquad \text{Eq. 01}$$

sendo:

d = massa específica do agregado, em gramas por centímetro cúbico;

[10] A massa específica, ou massa específica absoluta, é a massa da unidade de volume do material de que se constituem os grãos do agregado.

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

v = volume do frasco, em centímetros cúbicos;

v_a = volume de água adicionado ao frasco em centímetros cúbico.

m_s = massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

ρ_a = massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

Para determinar a massa específica do agregado graúdo, os resultados são obtidos segundo a NM 53 (ABNT 2009). Este ensaio consiste em lavar o agregado em peneira com abertura 4,75 mm eliminando os agregados miúdos. Posteriormente secar em estufa (105 ± 5) ºC por 24 horas, esfria-lo em temperatura ambiente para determinar a massa e em seguida submergir em água durante 24 horas. Depois secar o material superficialmente pesa-se o material para obter a massa saturada superficialmente seca (Msss). Realizada a medição, colocar-se o agregado graúdo no cesto submerso totalmente em água na balança hidrostática para determinar a massa submersa (Mb). Após o experimento o material foi seco em estufa a 105 ºC por mais 24 horas e determinado a massa do agregado final seco (Mfs). A massa específica do agregado graúdo é determinada através da equação abaixo:

$$d_1 = \frac{m}{m_s - m_a}\,, \qquad \text{Eq. 02}$$

sendo:

d_1 = massa específica do agregado seco, em g/cm³;

m_s = massa ao ar do agregado seco, em g;

m_a = massa da amostra imersa na água, em g.

4.3.5 Teor de Material Pulverulento

O ensaio para determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados segue os critérios da Norma NBR NM 46 (ABNT 2003). O ensaio consiste em lavar as amostras em água corrente nas peneiras 0,075mm e 1,18mm para evitar perda do material. Repete-se o procedimento até que a água de lavagem se torne limpa, todo

o material retido nas peneiras é inserido em estufa a 105 ºC por 24 horas. Após esse período determinava-se a massa do material seco após a lavagem (Mf). O teor de material pulverulento é determinado através da equação abaixo:

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} x100 \text{ ,} \qquad \text{Eq. 03}$$

sendo:

m_i = massa inicial da amostra seca (g)
m_f = massa da amostra seca após lavagem (g)

4.3.6 Determinação do Índice de Vazios

Ainda segundo a NM 45 (ABNT 2006), com os valores de massa específica e massa unitária do agregado, é possível determinar o volume de vazios nos agregados, em porcentagem, utilizando a equação abaixo:

$$E_v = \frac{100.[(d_1 \rho_W) - \rho_{ap}]}{d_1 \rho_W} \text{ ,} \qquad \text{Eq. 04}$$

sendo:

E_v = índice de volume de vazios nos agregados, em porcentagem;
d_1 = massa específica relativa do agregado seco;
ρ_W = massa específica da água, em kg/m³;
ρ_{ap} = massa unitária média do agregado no estado solto, em kg/m³.

4.3.7 Produção de Concretos

Três diferentes tipos de agregados reciclados de RCD foram utilizados para fabricação de concreto, Areia Reciclada (0,0 a 4,8mm), Pedrisco (4,8 a 10,0mm) e Brita Nº 1 (10,0 a 20,0mm), também foram utilizados agregado naturais, Areia Natural

Fina e Agregado Natural Brita Nº 1. Foram realizadas seis diferentes misturas, conforme Tabela 08.

Tabela 08 - Composição das misturas de concreto

Mistura	Agregado	
	Graúdo	**Miúdo**
1	Pedrisco (4,8 a 10,0 mm)	Areia Reciclada (0,0 a 4,8 mm)
2	Brita Nº 1 (10,0 a 20,0 mm)	Areia Reciclada (0,0 a 4,8 mm)
3	Agregado Natural Brita Nº 1	Areia Natural Fina
4	70% de Brita Nº 1 (10,0 a 20,0 mm) e 30% de Agregado Natural Brita Nº 1	70% de Areia Reciclada (0,0 a 4,8mm) e 30% de Areia Natural Fina
5	50% de Brita Nº 1 (10,0 a 20,0 mm) e 50% de Agregado Natural Brita Nº 1	50% de Areia Reciclada (0,0 a 4,8mm) e 50% de Areia Natural Fina
6	30% de Brita Nº 1 (10,0 a 20,0 mm) e 70% de Agregado Natural Brita Nº 1	30% de Areia Reciclada (0,0 a 4,8mm) e 70% de Areia Natural Fina

Fonte: Autor.

Para cada mistura foram determinados o abatimento inicial, abatimento após 30 minutos e abatimento após 60 minutos. Foram realizados ensaios de determinação de massa específica e teor de ar incorporado. Foram moldados corpos de prova cilíndricos para determinação da resistência à compressão aos 7 dias, 14 dias e 28 dias, absorção de água por capilaridade e determinação do teor de cloretos.

Na dosagem do concreto utilizando agregados reciclados de RCD, foram necessários ajustar alguns parâmetros a fim de não comprometer as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido. A mistura de concreto com agregados reciclados necessita de mais água do que uma mistura convencional para se atingir uma mesma consistência, devido à alta absorção desses agregados. Porém, a quantidade de água deve ser controlada, pois um excesso da mesma acarretaria menor resistência do concreto. Segundo Joseph (2015), uma superestimação da absorção de água pelo agregado reciclado influencia a qualidade do concreto de forma semelhante a um aumento da relação a/c, ambos elevam a trabalhabilidade e causa a perda das propriedades mecânicas. Já os efeitos da subestimação da absorção de água pelos agregados reciclados estão limitados a perda de trabalhabilidade e podem ser compensados pelo uso de superplastificantes.

Para escolha do cimento foi utilizado como referência Boehme (2013), onde em seu estudo que mede a absorção de água em agregados reciclados é utilizado o cimento CEM III A 42,5 N LA. O autor justifica a escolha deste tipo de cimento devido a ao seu baixo teor de C3A, baixa alcalinidade e menor risco de reação álcali-agregado. No Brasil, o cimento correspondente ao indicado pelo autor é o Cimento Portland de Alto-forno, CP lll. Para dosagem do concreto foi utilizado o método IPT, onde foram definidas as resistências:

- Fck (MPa): 25
- Desvio padrão de dosagem (MPa): 4
- Fcd (MPa): 31,6

No desenvolvimento do traço foram utilizados os dados obtidos nos ensaios de caracterização das amostras da coleta de março de 2017. Através do método IPT, foram inicialmente definidos os parâmetros ao:

- Abatimento: (70 $\pm$ 20) mm
- Relação água/cimento: 0,58
- Consumo de agregado graúdo: 802,4 kg/m³
- Consumo de agregado miúdo: 735,9 kg/m³
- Consumo de cimento: 344,83 kg/m³

O traço inicial empregado foi: 1 : 2,13 : 2,33 : 0,58, com este traço os resultados alcançados na mistura experimental não foram satisfatórios, chegando nos resultados apresentados no Quadro 07.

Quadro 07 - Resistência à compressão de corpos de provas de concreto dos traços experimentais.

CP	Data Moldagem	Data Rompimento	Idade	Resultado	
				tf	MPa
1	30/03/2017	03/04/2017	4 dias	11,20	13,98
2	30/03/2017	03/04/2017	4 dias	9,97	12,44
3	30/03/2017	03/04/2017	4 dias	10,71	13,36
4	17/04/2017	25/04/2017	8 dias	11,42	14,25
5	17/04/2017	25/04/2017	8 dias	11,79	14,71
6	17/04/2017	25/04/2017	8 dias	11,93	14,89

Fonte: Autor.

Foram realizadas novas misturas experimentais, onde foram ajustados o teor de agregados graúdos, miúdos, teor de água e teor de cimento, chegando a composição abaixo:

- Abatimento: (70 ± 20) mm
- Relação água/cimento: 0,55
- Consumo de agregado graúdo: 1.059,37 kg/m³
- Consumo de agregado miúdo: 743,40 kg/m³
- Consumo de cimento: 371,71 kg/m³

Para esta nova mistura o traço obtido, em massa, foi: 1: 2,00 : 2,85 : 0,55, com este traço os resultados alcançados na mistura experimental foram melhores que os resultados obtidos com o traço anterior. Para ambos os estudos, foi utilizado aditivo plastificante do tipo MID-RANGE. A quantidade utilizada de aditivo, na produção de concreto, foi fixada em 1% do teor de cimento, em massa. Para compensar a maior absorção de água dos agregados reciclados, foram realizados pré-saturação destes por 10 minutos, considerando 60% da absorção de água, valores demonstrados nos ensaios de caracterização apresentados no capítulo anterior.

Após a confecção do concreto foi avaliado o abatimento de cone por meio do método NM 67 (ABNT 1998); a massa específica seguido os procedimentos estabelecidos pela NBR 9833 (ABNT 2008); e o teor de ar incorporado com os procedimentos descritos na NBR NM 47 (ABNT 2002).

Foram moldados corpos de prova, seguindo os procedimentos descritos na NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, e ensaiados. Quarenta e oito horas após as moldagens, os corpos de provas foram armazenados em câmara úmida até a idade dos demais ensaios no estado endurecido.

Para determinação da absorção por ascensão capilar, foram utilizados os procedimentos da NBR 09779 (ABNT 2012); para determinação da resistência a compressão seguiu-se os procedimentos da NBR 5739 (ABNT 2007); e para o módulo de elasticidade dinâmico foram seguidos duas etapas, sendo a primeira através da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, procedimento descrito na NBR

8802 (ABNT 2013), em seguida foram utilizadas equações descritas na norma internacional C597 (ASTM, 2000) para cálculo do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico.

Abaixo segue a equação descrita na C597 (ASTM, 2000), para cálculo do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico:

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1+\mu)\cdot(1-2\mu)}{(1-\mu)}, \qquad \text{Eq. 05}$$

sendo:

E_d= módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

ρ= massa específica relativa (kg/m³);

μ= coeficiente de Poisson.

4.4 Método Estatístico

Para análise dos resultados experimentais foram utilizadas as ferramentas estatísticas: distribuição normal; probabilidade; desvio padrão; erro padrão; e coeficiente de variação.

Para Levine *et al.* (2000) a distribuição normal, ou distribuição gaussiana, é a mais importante distribuição contínua, devido a vários fatores, entre eles o teorema central do limite, onde a média dos dados converge para uma distribuição normal conforme o número de dados aumenta. Desenvolvida pelo matemático francês Abraham de Moivre, a distribuição normal descreve uma série de fenômenos físicos e financeiros além possui grande uso na estatística inferencial (FERREIRA, 2009).

Levine *et al.* (2000) define probabilidade como forma de prever possibilidades de ocorrência de uma determinada situação ou fato. Ainda segundo este autor, para determinar a razão de probabilidade, são necessários alguns conceitos, dentre eles:

a) Experimento aleatório, quando as ocorrências de um experimento podem apresentar diferentes resultados.
b) Espaço amostral, que determina as possibilidades possíveis de resultado.

c) Evento, ou ocorrência de um fato ou situação.

Para Ferreira (2009), a partir da distribuição normal, conhecendo a média e o desvio padrão, é possível determinar qualquer probabilidade. Entende-se como desvio padrão a medida que indica a dispersão dos dados dentro de uma amostra com relação à média. O desvio padrão é representado pelo símbolo σ e é calculada pela equação abaixo:

$$\sigma = \sqrt{\sum \frac{(x_1 - \bar{x})^2}{n-1}}, \qquad \text{Eq. 06}$$

sendo:

$\bar{X}$ = média aritmética
n = número de medições

Entende-se como erro padrão a medida de variação de uma média amostral em relação à média. Através deste, pode-se estimar um intervalo de confiança para a média a partir da média amostral calculada. O erro padrão é calculado pela Equação 07 abaixo:

$$s = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \qquad \text{Eq. 07}$$

sendo:

σ = desvio padrão
n = número de medições

Segundo Levine *et al.* (2000), coeficiente de variação é a medida relativa da variação, expresso como porcentagem. O coeficiente de variação é identificado pelo símbolo CV, mede a dispersão dos dados em relação à média aritmética. A equação que indica o CV está apresentada abaixo:

$$CV = \left(\frac{\sigma}{\bar{X}}\right) 100\% \,, \qquad \text{Eq. 08}$$

sendo:

σ = desvio padrão

$\bar{X}$ = média aritmética

Com uso das ferramentas estatísticas, descritas acima, foi possível medir a variabilidade dos agregados reciclados de RCD, bem como a heterogeneidade dos resultados dos ensaios do concreto nos estados fresco e endurecido. Para todos os ensaios são apresentados Valores Médios, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação (CV), juntamente com os resultados dos ensaios realizados, sob a forma de tabelas e através de gráficos de médias.

Também está sendo utilizado a ferramenta de análise de variância ANOVA, onde é possível analisar quais fatores interferem significativamente no comportamento das variáveis de resposta, assim como verificar se as interações entre estes fatores são ou não significativos. ANOVA ou Análise de variância é uma técnica estatística que permite avaliar afirmações sobre as médias dos resultados. O objetivo desta técnica é analisar se existe uma diferença significativa de um ou mais fatores (também chamados de variáveis de entrada, ou variáveis X) comparando as médias das variáveis de resposta em diferentes níveis dos fatores. O ANOVA compara a variância entre as médias do grupo à variância dentro dos grupos, para determinar se os grupos são todos, parte de uma população maior ou populações separadas com características diferentes. Os resultados da análise de variância serão apresentados nos apêndices, sob a forma de tabelas de análise de variâncias.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para verificação da variabilidade dos agregados reciclados de RCD estão sendo analisadas a composição gravimétrica, granulometria, massa unitária, massa específica, teor de material pulverulento e absorção de água.

5.1 Caracterização Física dos Agregados Reciclados de RCD

5.1.1 Caracterização do agregado reciclado

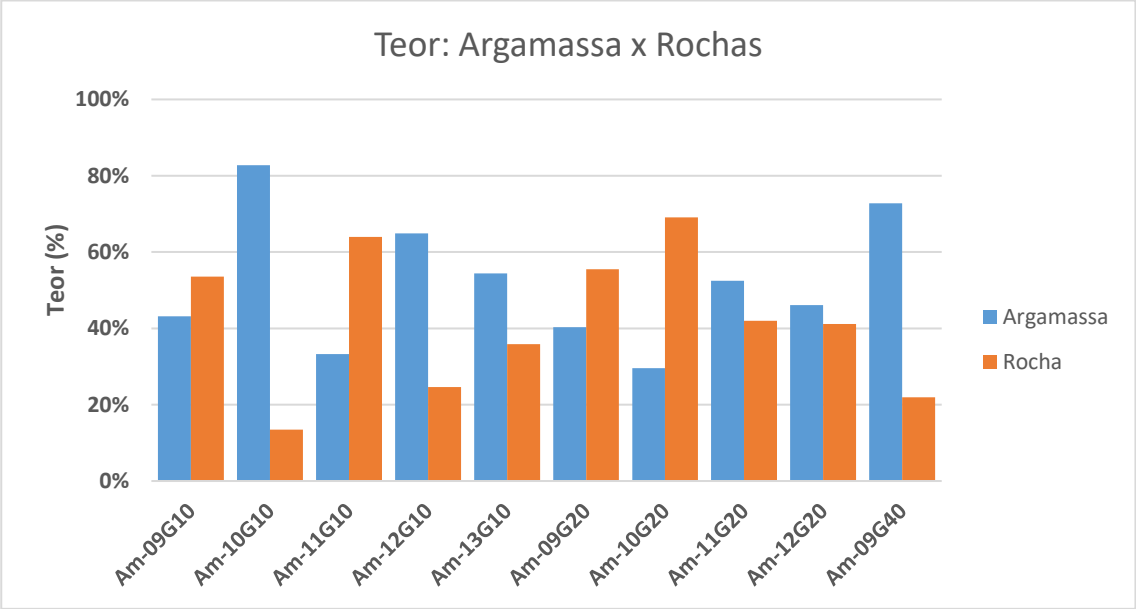
No ensaio de caracterização dos agregados reciclados de RCD, foram seguidos os procedimentos prescritos na NBR 15.116 (ABNT, 2004), descrito no capítulo 4, onde as amostras foram lavadas em água corrente, em seguida secas em estufa a (105 $\pm$ 5) °C, para depois determinar a massa total e realizar a separação dos fragmentos nos grupos acima descritos. As amostras foram divididas em nove grupos de fragmentos, sendo eles:

- Fragmentos de argamassa em porcentagem superior a 50%;
- Fragmentos de rocha em porcentagem superior a 50%;
- Fragmentos de cerâmica branca;
- Fragmentos de cerâmica vermelha
- Fragmentos de vidros;
- Fragmentos de betume;
- Fragmentos de aço;
- Fragmentos de aço.

Na análise dos agregados reciclados, com exceção da amostra Am12-G20, todas as demais amostras podem ser classificadas como Agregado de Resíduo de Concreto (ARC), conforme prescreve a NBR 15116 (ABNT, 2004). Conforme pode ser observado no Quadro B1, Apêndice B – Composição Gravimétrica dos Agregados Reciclados de RCD, foram encontradas quantidades consideráveis de betume, nas amostras. A amostra Am12-G20, descrita como Agregado de Resíduo Misto (ARM) apresentou teores elevados de cerâmica branca, cerâmica vermelha, vidro e betume.

Na Figura 11, é apresentado comparação entre o teor de argamassa e o teor de rocha, em cada amostra coletada. São observados teores variados, demostrando baixa homogeneidade.

Figura 11 - Teor de argamassa e rocha na composição das amostras



Fonte: Autor.

Foi observado nas amostras Am-10G10, Am-12G10, Am=13G10 e Am-09G40, grande concentração de argamassa nas suas respectivas composições. As amostras Am-09G10 e Am-09-G20, por terem sido coletadas juntas apresentaram concentrações de rochas e argamassa semelhantes, idem para as amostras Am-10G10 e Am-09G40.

Na Tabela 09 é apresentada a análise estatística das amostras de agregados reciclados de RCD. São observados desvios em relação à média variando entre 33% e 99%, demostrando elevada variabilidade entre as diferentes coletas. Nesta tabela, foram são indicados como cerâmica, a cerâmica branca e a cerâmica vermelha, e para o teor de impurezas foram considerados vidros, betume, aço, gesso e materiais de origem orgânica.

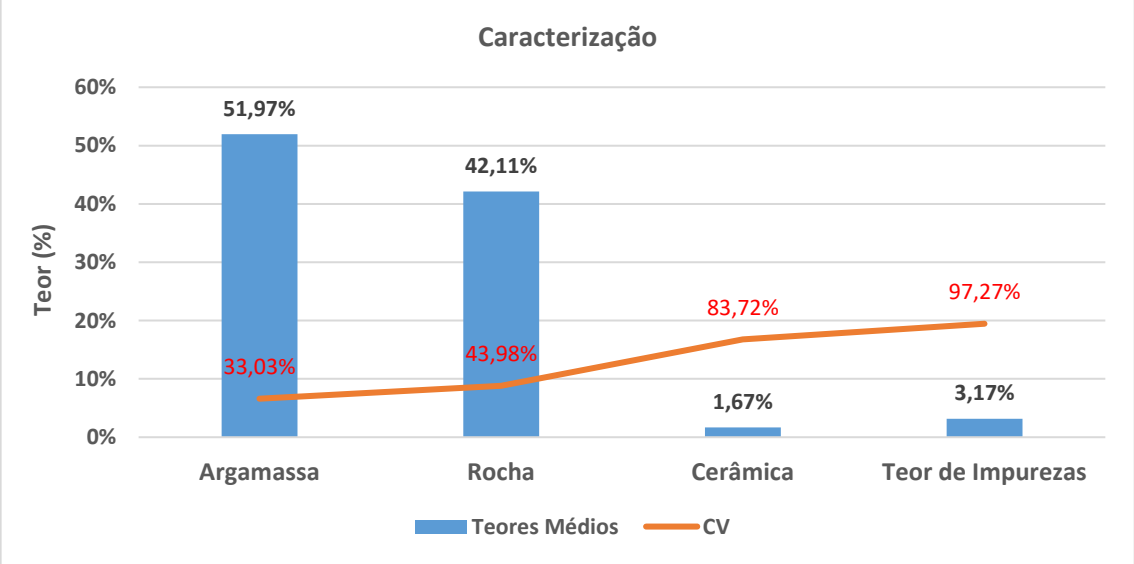
Tabela 09 - Análise estatística da composição das amostras de agregado reciclado de RCD

	Argamassa	Rocha	Cerâmica	Teor de Impurezas
Média	52,0%	42,1%	1,7%	3,2%
Erro padrão	5,4%	5,9%	0,4%	0,9%
Desvio padrão	17,2%	18,5%	1,4%	3,1%
CV	33,0%	44,0%	83,7%	97,3%

Fonte: Autor.

É importante observar que as concentrações de materiais não minerais variaram entre 0,00% e 1,30%, materiais cerâmicos a variação foi de 0,42% à 3,96%, a variação observada para impurezas foi de 0,00% a 8,85%. Comparando os resultados observados na Tabela 09 com os dados apresentados por Fernandez (2012), que já foram apresentados na Tabela 04, constata-se que os agregados reciclados possuem uma menor concentração de impurezas e maior concentração de materiais mais nobres como concretos, argamassas e rocha. Resultados semelhantes podem ser observados em Angulo (2000), Tenório (2007) e Juan (2004). Na Figura 12 está sendo apresentado gráfico com os valores médios e o coeficiente de variação.

Figura 11 - Análise estatística da composição das amostras de agregado reciclado de RCD



Fonte: Autor.

São observados elevada variabilidade para todos os materiais que compõem as amostras. O material que apresentou menor variabilidade foi a argamassa, onde o CV constatado é de 33%, também considerado elevado. As concentrações de materiais cerâmicos e impurezas ficaram limitadas a 1,7% e 3,2%, respectivamente.

Os elevados CV para argamassas e rochas são justificado pela origem dos RCD, que conforme discutido no capítulo 2, podem ter origem em obras rodoviárias, escavações, sobras de demolições e obras diversas. Também no capítulo 2 é discutido os métodos para minimizar esta variabilidade e reduzir os teores de impurezas.

5.1.2 Análise Granulométrica

O Quadro 07 apresenta as porcentagens passante acumuladas para o agregado miúdo reciclado # 0,0 - 4,8 (mm). São observados baixa variação para as peneiras a partir de # 1,18 mm.

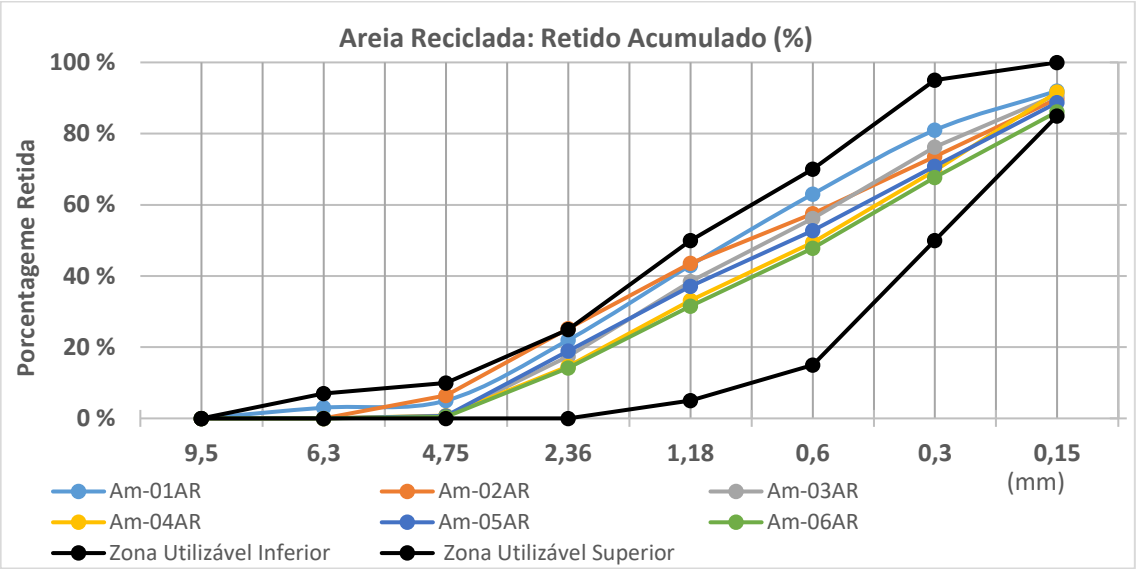
Quadro 07 - Analise granulométrica do agregado miúdo (# 0,0 - 4,8 (mm))

Peneira (mm)	**Massa passante (%)**					
	Am-01AR	**Am-02AR**	**Am-03AR**	**Am-04AR**	**Am-05AR**	**Am-06AR**
#6,3 mm	97,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
#4,75 mm	95,00	93,54	99,45	99,18	99,30	99,59
#2,36 mm	78,00	74,80	82,60	85,34	81,04	85,84
#1,18 mm	57,00	56,45	61,52	66,86	62,88	68,47
#0,6 mm	37,00	42,47	43,86	50,54	47,20	52,14
#0,3 mm	19,00	26,47	23,79	30,38	29,18	32,30
#0,15 mm	8,00	10,19	9,08	8,30	11,28	13,83

Fonte: Autor.

Na Figura 13 é apresentado a curva granulométrica do agregado miúdo # 0,0 - 4,8 (mm), onde observa-se que os materiais ensaiados atendem aos limites especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 12 - Análise granulométrica do agregado miúdo (# 0,0 - 4,8 (mm))



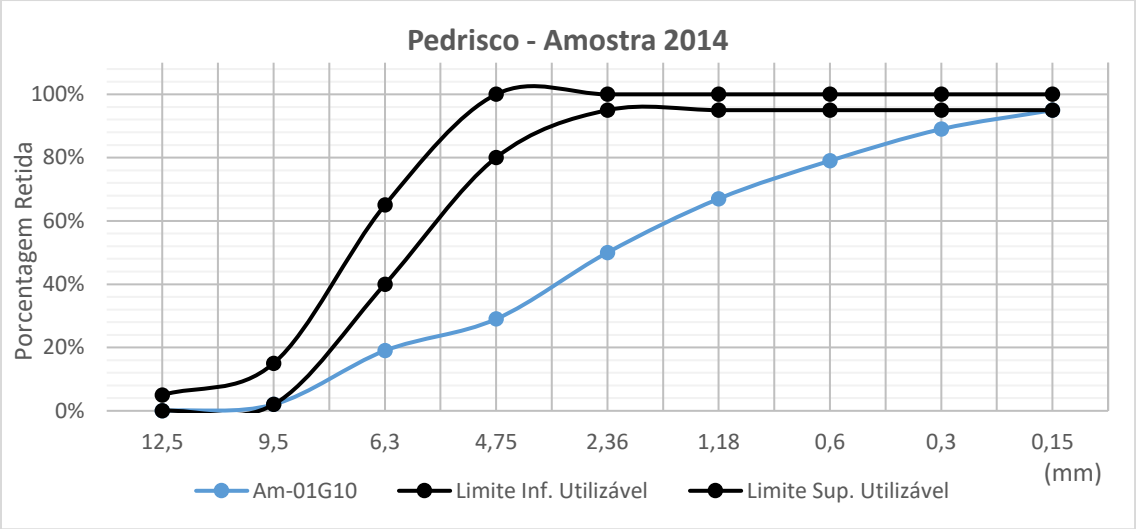
Fonte: Autor.

Na Figura 13, acima, observamos curva granulométrica contínua, o que permite melhor arranjo entre as partículas. Mesmo assim são observados valores consideráveis do CV para as peneiras #0,6 mm, #0,3 mm e #0,15 mm, confirmando as informações do Quadro 07. Os coeficientes de variação podem ser melhor visualizados na Tabela 10, onde é apresentada a análise estatística da areia reciclada em função das peneiras.

Para os agregados graúdos, pedrisco, brita nº 1 e brita nº 2, devido a quantidade as amostras ensaiadas, as mesmas serão analisadas pelos respectivos anos de coleta, de forma viabilizar a análise gráfica dos resultados. No Apêndice C – Análise Granulométrica de Agregados Reciclados de RCD, são apresentados nos Quadros C1, C2 e C3 as porcentagens passantes para os agregados graúdos descritos acima. Para o agregado graúdo # 0,0 - 10,0 (mm) é possível observar material fino passante na peneira #0,15 mm em teores elevados para algumas amostras de agregado. Neville (1995, *apud* LEITE, 2001), observa que a presença de finos é positiva quando para produção de concreto bombeável e peças delgadas.

Na Figura 14 é apresentada a curva granulométrica do agregado graúdo # 0,0 - 10,0 (mm), coletado em 2014. Nesta figura e possível observar que a amostra Am-01G10 não atende aos limites especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

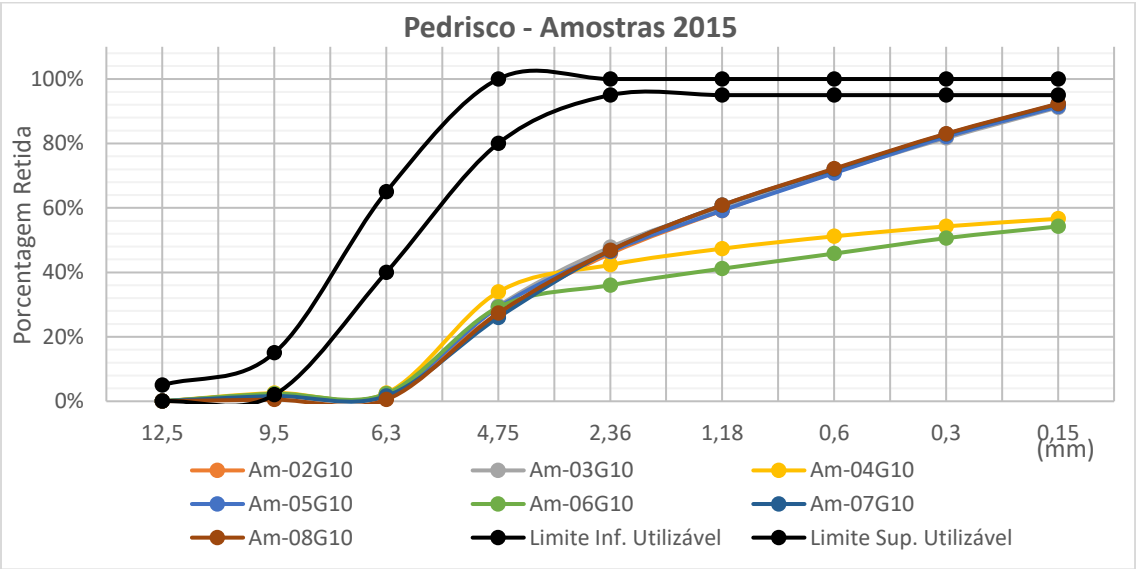
Figura 13 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm)), coletado em 2014



Fonte: Autor.

As amostras de agregado graúdo # 0,0 - 10,0 (mm), coletados em 2015, também não atenderam aos limites especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009), conforme pode ser observado na Figura 15.

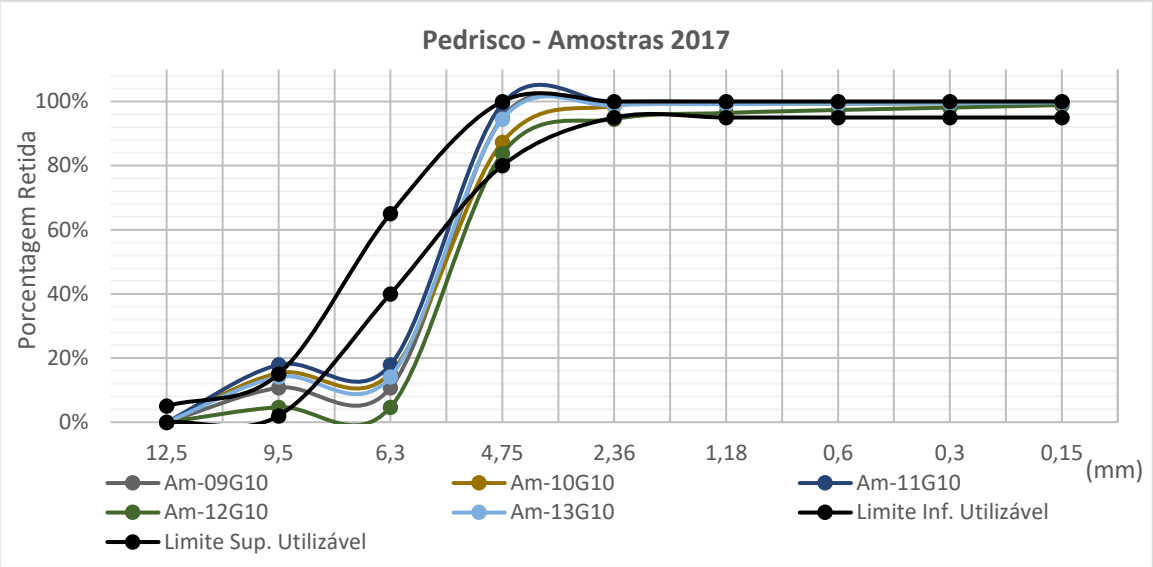
Figura 14 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm)), coletado em 2015



Fonte: Autor.

Na Figura 16 observa-se através das curvas granulométricas, que o agregado graúdo # 0,0 - 10,0 (mm) coletado em 2017, atendem parcialmente às especificações da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 15 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 0,0 - 1 0,0 (mm)), coletado em 2017

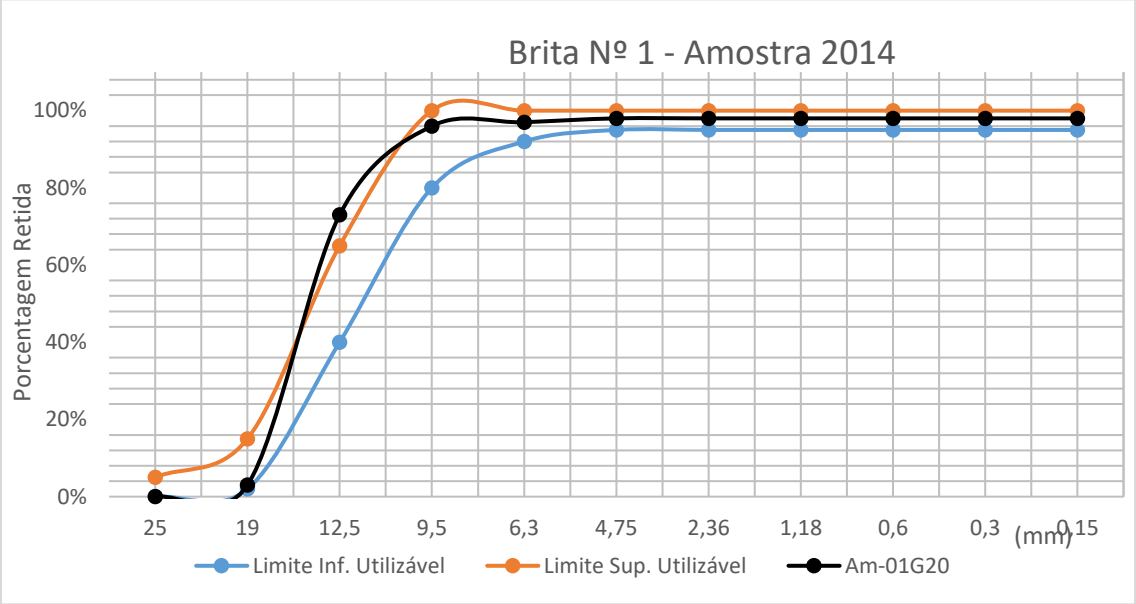


Fonte: Autor.

As amostras de brita nº 1 atendem parcialmente a NBR 7211 (ABNT, 2009), com exceção da amostra Am-03G20. Diferente do pedrisco (# 0,0 - 10,0 (mm)), os resultados encontrados para a brita nº1 (# 10,0 - 20,0 (mm)) demonstram menor quantidade de materiais finos. É observado também, que embora algumas amostras não tenham atendido a NBR 7211 (ABNT, 2009), a maioria das amostras apresentaram curva granulométrica contínua.

Na Figura 17 é apresentado a curva granulométrica do agregado graúdo # 10,0 - 20,0 (mm), coletado em 2014. É possível observar que esta amostra atende aos limites especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

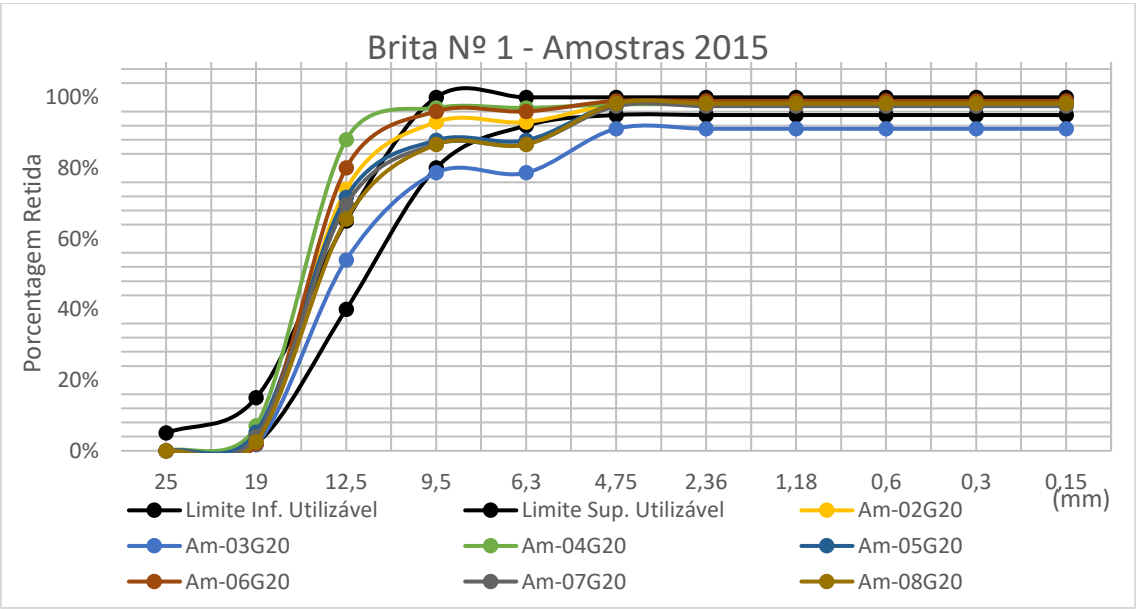
Figura 16 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm)), coletado em 2014



Fonte: Autor.

Na Figura 18 é apresentado a curva granulométrica do agregado graúdo # 10,0 - 20,0 (mm), coletado em 2015. Com exceção da amostra Am-03G20, todas atendem parcialmente aos limites especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

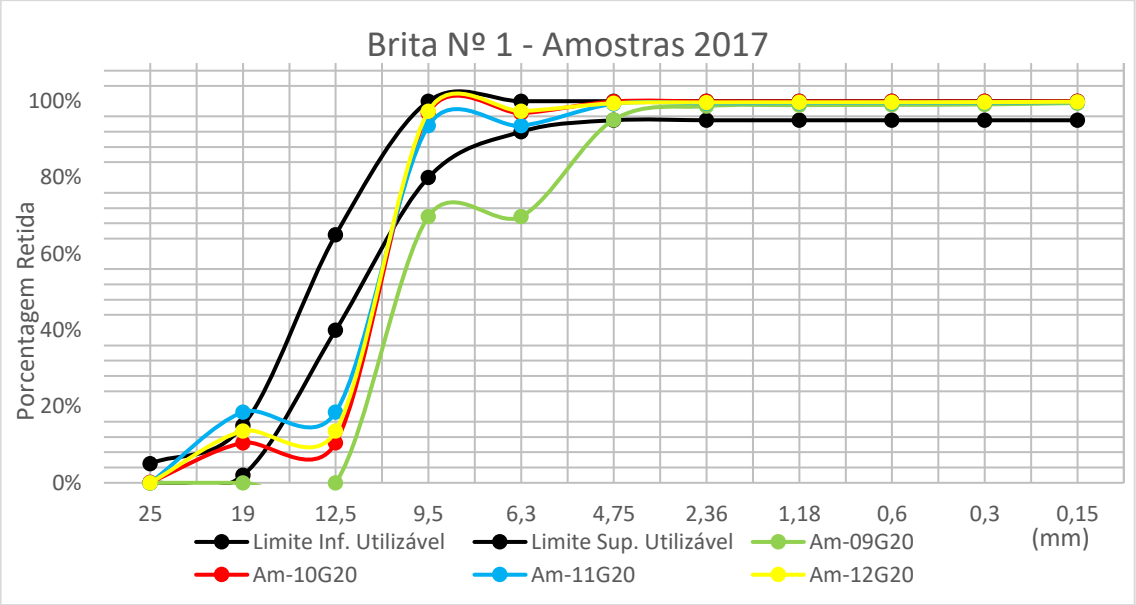
Figura 17 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm)), coletado em 2015



Fonte: Autor.

A Figura 19 apresenta a curva granulométrica do agregado graúdo # 10,0 - 20,0 (mm) coletado em 2017. Para estas amostras, são observadas dispersão em relação a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 18 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm)), coletado em 2017

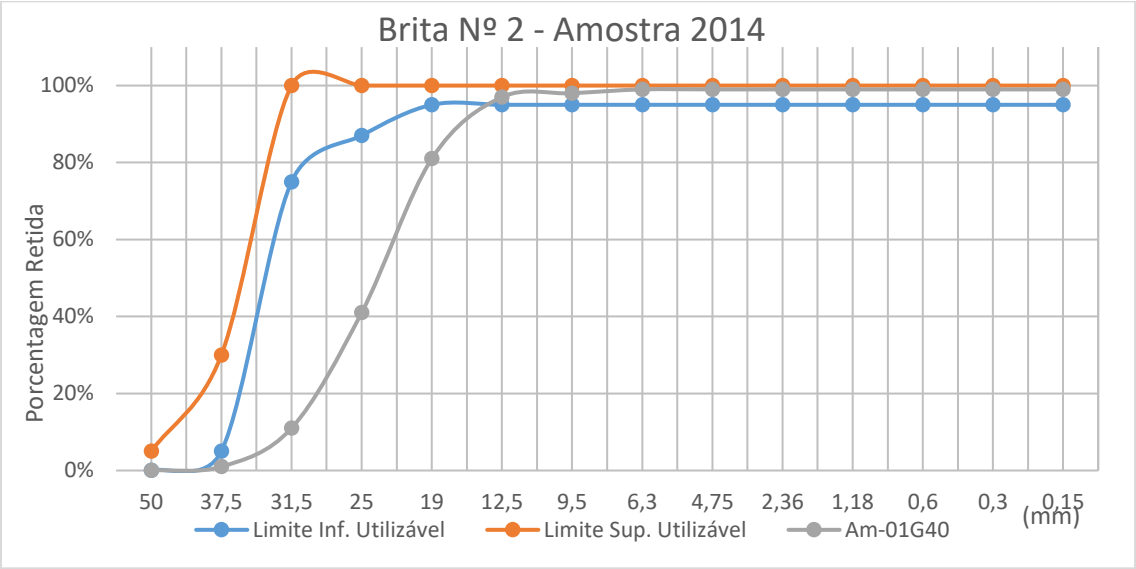


Fonte: Autor.

Nas amostras de agregado graúdo # 20,0 - 40,0 (mm) são observados maior concentração de materiais entre as peneiras #9,5 mm e #12,5 mm. Também é observada muito pouca concentração de materiais com granulometria superior a #12,5 mm e materiais finos, com granulometria inferior a #0,15 mm.

Na Figura 20 é apresentada a curva granulométrica do agregado graúdo # 20,0 - 40,0 (mm), coletado em 2014. É possível observar que a faixa granulométrica #12,5 mm a #31,5 mm não atende aos limites inferiores especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

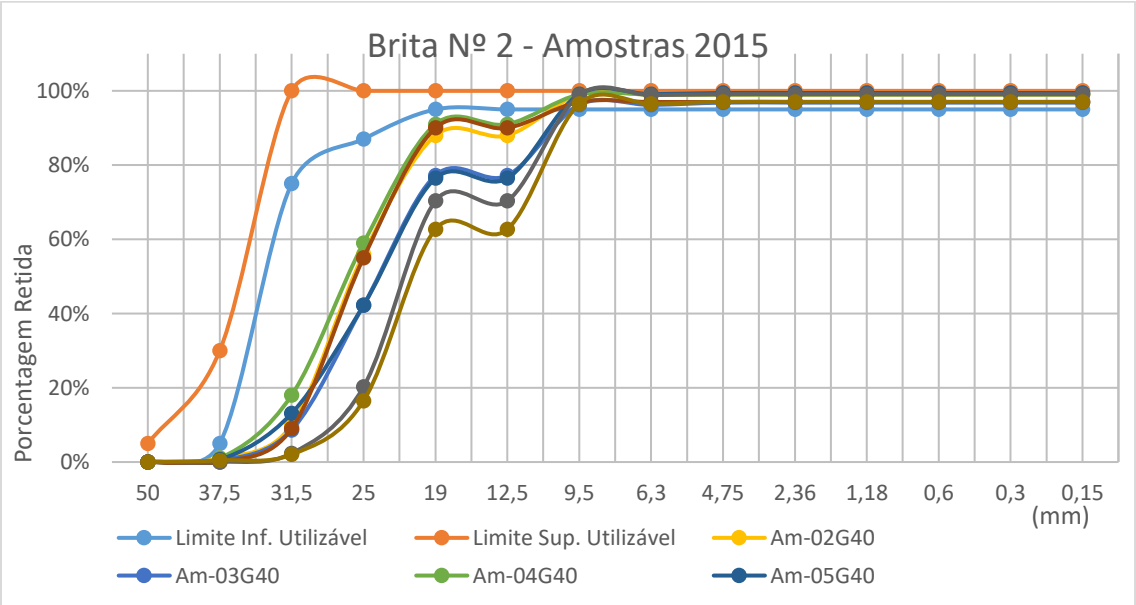
Figura 19 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm)), coletado em 2014



Fonte: Autor.

Na Figura 21 é apresentada a curva granulométrica do agregado graúdo # 20,0 - 40,0 (mm), coletado em 2015. Assim como os materiais coletados em 2014, é possível observar que a faixa granulométrica #12,5 mm a #31,5 mm não atende aos limites inferiores especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

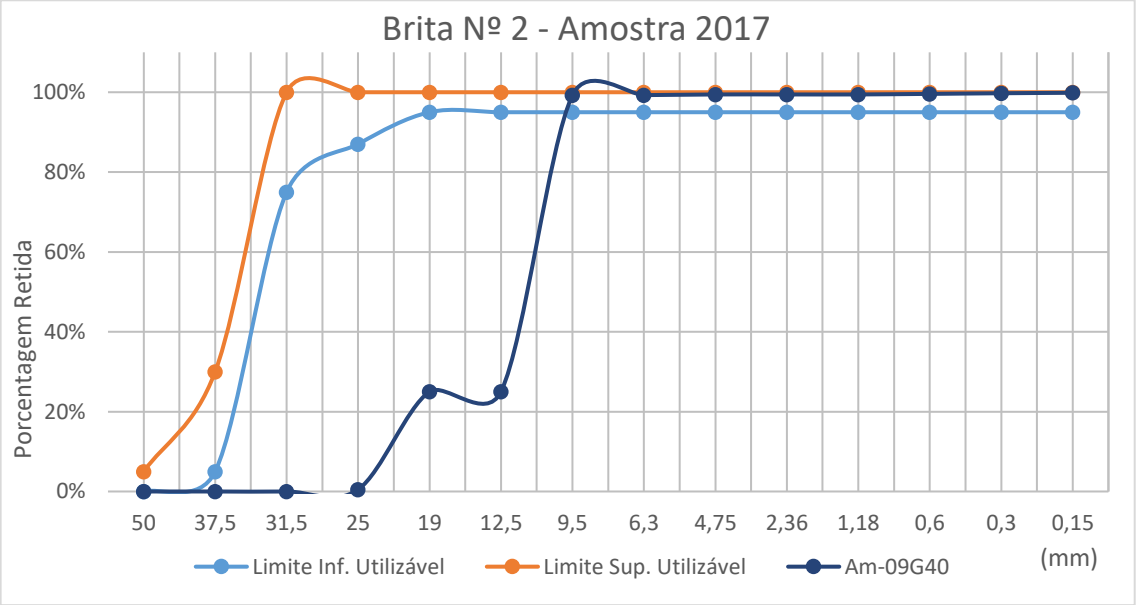
Figura 20 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm)), coletado em 2015



Fonte: Autor.

Na Figura 22 é apresentada a curva granulométrica do agregado graúdo # 20,0 - 40,0 (mm), coletado em 2017. É observado desvio acentuado em relação aos limites inferiores especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 21 - Curva granulométrica do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm)), coletado em 2017



Fonte: Autor.

Na Tabela 10 é apresentada a análise estatística da areia reciclada. Nesta tabela é apresentado o coeficiente de variação referente aos porcentuais passantes acumulados em função da abertura das peneiras. São observados desvios em relação à média para as peneiras menores, demostrando elevada variabilidade entre as diferentes coletas.

Tabela 10 - Coeficientes de variação em função das peneiras

	#6,3 mm	**#4,75 mm**	**#2,36 mm**	**#1,18 mm**	**#0,6 mm**	**#0,3 mm**	**#0,15 mm**
Média	99,50%	97,68%	81,27%	62,20%	45,53%	26,86%	10,11%
Erro padrão	0,50%	1,09%	1,75%	2,02%	2,28%	1,99%	0,89%
Desvio padrão	1,22%	2,68%	4,29%	4,94%	5,59%	4,87%	2,19%
CV	1,23%	2,75%	5,27%	7,94%	12,28%	18,15%	21,67%

Fonte: Autor.

Na Tabela 11, é apresentada a análise estatística do agregado graúdo pedrisco. São observados nesta tabela o coeficiente de variação referente aos porcentuais passantes acumulados em função da abertura das peneiras. As malhas das peneiras menores, até #4,75 mm, apresentaram elevado coeficiente de variação.

Tabela 11 - Coeficientes de variação em função das peneiras para o agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm))

	#9,5 mm	***#6,3 mm***	***#4,75 mm***	***#2,36 mm***	***#1,18 mm***	***#0,6 mm***	***#0,3 mm***	***#0,15 mm***
Média	94,00%	92,69%	46,85%	34,39%	26,94%	20,86%	15,20%	10,54%
Erro padrão	1,71%	1,94%	8,92%	7,50%	6,14%	5,17%	4,52%	4,30%
Desvio padrão	6,15%	6,98%	32,17%	27,05%	22,15%	18,64%	16,31%	15,52%
CV	6,54%	7,53%	68,67%	78,67%	82,24%	89,38%	107,32%	147,28%

Fonte: Autor.

Na Tabela 12, é apresentada a análise estatística da brita nº1, destaque para o coeficiente de variação referente aos porcentuais passantes acumulados em função da abertura das peneiras. Assim como demais granulometrias, são observados elevado CV para as peneiras menores, neste caso até #12,5 mm, o que demonstra elevada variabilidade no teor de materiais finos.

Tabela 12 - Coeficientes de variação em função das peneiras para o agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm))

	#25,0 mm	***#19,0 mm***	***#12,5 mm***	***#9,5 mm***	***#6,3 mm***	***#4,75 mm***	***#2,36 mm***	***#1,18 mm***	***#0,6 mm***	***#0,3 mm***	***#0,15 mm***
Média (%)	99,99%	94,00%	48,46%	10,04%	9,96%	2,35%	2,02%	1,99%	1,98%	1,96%	1,91%
Erro padrão	0,01%	1,60%	9,09%	2,47%	2,49%	0,69%	0,66%	0,67%	0,67%	0,67%	0,68%
Desvio padrão	0,04%	5,53%	31,49%	8,57%	8,64%	2,39%	2,30%	2,31%	2,32%	2,33%	2,36%
CV (%)	0,04%	5,88%	64,99%	85,34%	86,74%	102,00%	113,72%	116,07%	117,05%	118,78%	123,65%

Fonte: Autor.

A Tabela 13, apresenta a análise estatística da brita nº 2. São observados desvios em relação à média para as peneiras #25,0 mm, #19,0 mm e #12,5 mm.

Tabela 13 - Coeficientes de variação em função das peneiras para o agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm))

	#37,5 mm	***#31,5 mm***	***#25,0 mm***	***#19,0 mm***	***#12,5 mm***	***#9,5 mm***	***#6,3 mm***	***#4,75 mm***	***#2,36 mm***	***#1,18 mm***	***#0,6 mm***	***#0,3 mm***	***#0,15 mm***
Média (%)	99,5%	91,8%	63,0%	26,5%	24,7%	1,9%	1,8%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%	1,5%	1,5%
Erro padrão	0,1%	1,9%	6,7%	6,8%	7,3%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
Desvio padrão	0,4%	5,8%	20,2%	20,4%	21,8%	1,2%	1,3%	1,1%	1,1%	1,1%	1,1%	1,2%	1,2%
CV (%)	0,4%	6,4%	32,1%	77,2%	88,4%	64,5%	70,4%	71,1%	71,1%	71,1%	72,9%	75,1%	76,9%

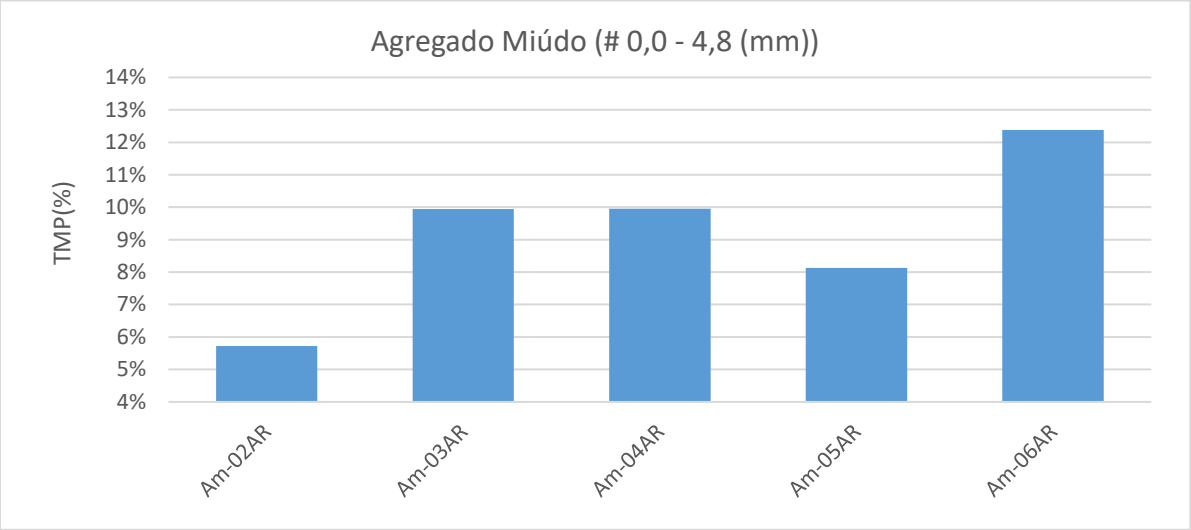
Fonte: Autor.

São observados coeficientes de variações com valores constantes, porém baixos, demonstrando baixa variabilidade entre as amostras. Diferente das demais faixas granulométricas, este material apresentou baixa variabilidade no teor de finos, o que é positivo, pois influência positivamente na absorção de água, embora o teor de argamassa identificado na seção 5.1.1 seja elevado.

5.1.3 Teor de Material Pulverulento

A Figura 23 apresenta o teor de material pulverulento para a areia reciclada. Nesta figura observamos valores variando entre 6% e 12%.

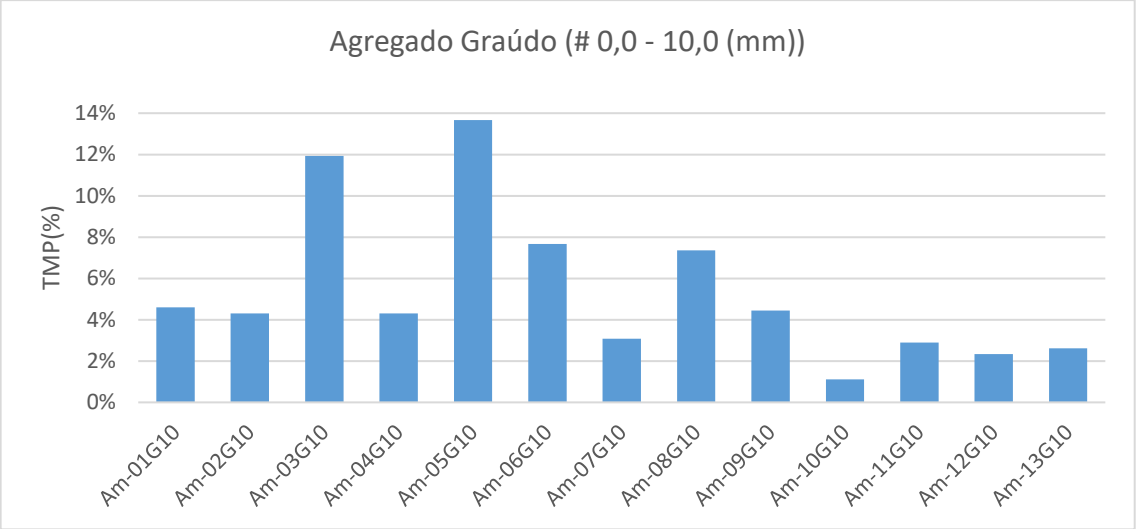
Figura 22 - Teor de material pulverulento do agregado miúdo (# 0,0 - 4,8 (mm))



Fonte: Autor.

As argamassas presentes na composição dos agregados reciclados de RCD são materiais porosos, frágeis quando comparado às rochas, e no processo de britagem produzem mais finos, justificando elevadas concentrações de materiais pulverulentos em determinas coletas. Na Figura 24 são apresentados os teores de materiais pulverulentos para as amostras de pedrisco. É observada alta variabilidade entre os resultados, com valores variando entre 1% e 14%. Dentre as 13 amostras analisadas, apenas 01 obteve teor $\leq$ 1%.

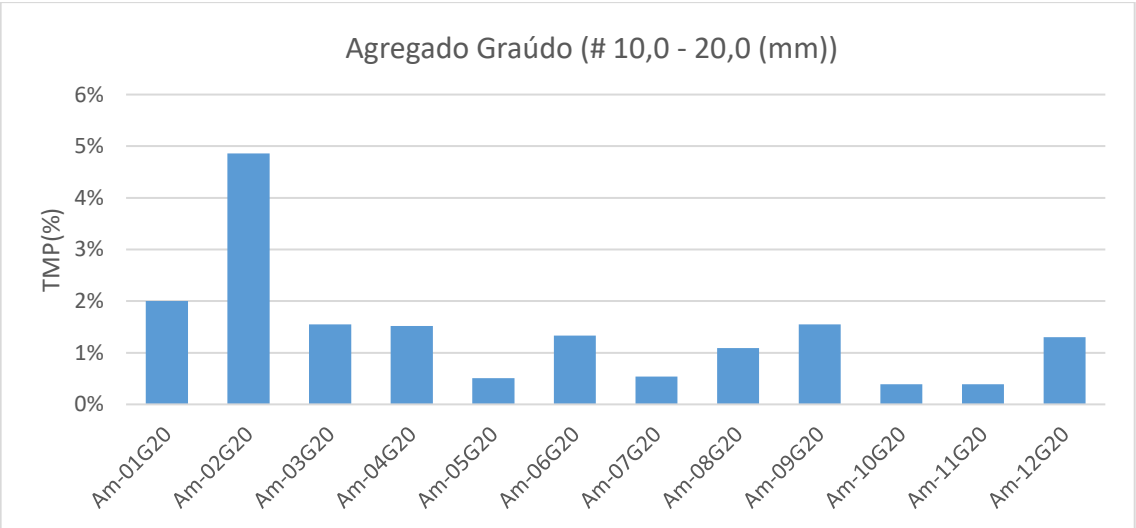
Figura 23 - Teor de material pulverulento do agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm))



Fonte: Autor.

As amostras Am-03G10 e Am-05G10, foram coletadas em julho de 2015 por Faria *et al.* (2015), para estas amostras não foram realizados os ensaios de caracterização segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004), dificultado assim justificar a elevada concentração de materiais pulverulentos. Na Figura 25 é apresentado o teor de materiais pulverulentos para a brita nº1, onde observamos que com exceção da amostra Am-02G20, coletada em 2015, as demais amostras obtiveram teores inferiores a 2%, sendo que apenas 05 amostras obtiveram teores $\leq$ 1%.

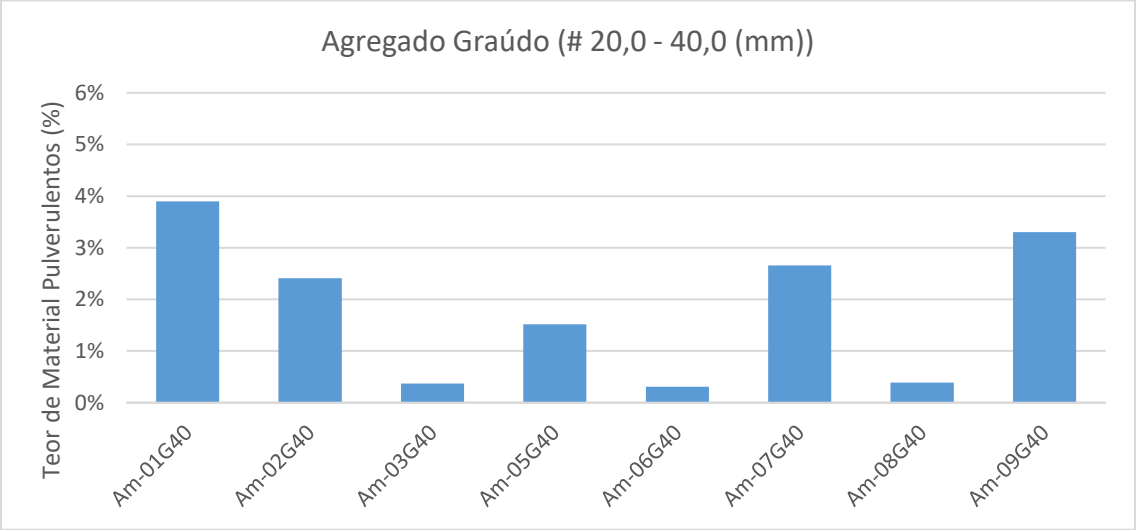
Figura 24 - Teor de material pulverulento do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm))



Fonte: Autor.

Na Figura 26 são apresentados os teores de materiais pulverulentos para a britam nº2. Valores variando entre 0,3% e 4%. Das 08 amostras ensaiadas, apenas 03 amostras obtiveram ≤ 1%.

Figura 25 - Teor de material pulverulento do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm))



Fonte: Autor.

Como observamos nas seções anteriores, 52% dos agregados reciclados de RCD é composto por material cimentício, que por serem mais porosos e consequentemente mais frágeis, desta forma produzindo mais finos, observamos também que os processos de britagem permitam a formação de finos e a sua concentração nos poros dos agregados maiores, observamos ainda que nos agregados reciclados graúdos, britas nº 1 e nº 2, a formação de materiais pulverulentos muito se dá devido ao desbaste dos grãos na movimentação, no transporte e no manuseio destes agregados.

Na Tabela 14 é apresentada a análise estatística para o teor de material pulverulento dos agregados reciclados de RCD. Todas as faixas granulométricas obtiveram elevada variabilidade, com destaque para a brita nº1. A areia reciclada obteve menor CV comparado aos demais materiais.

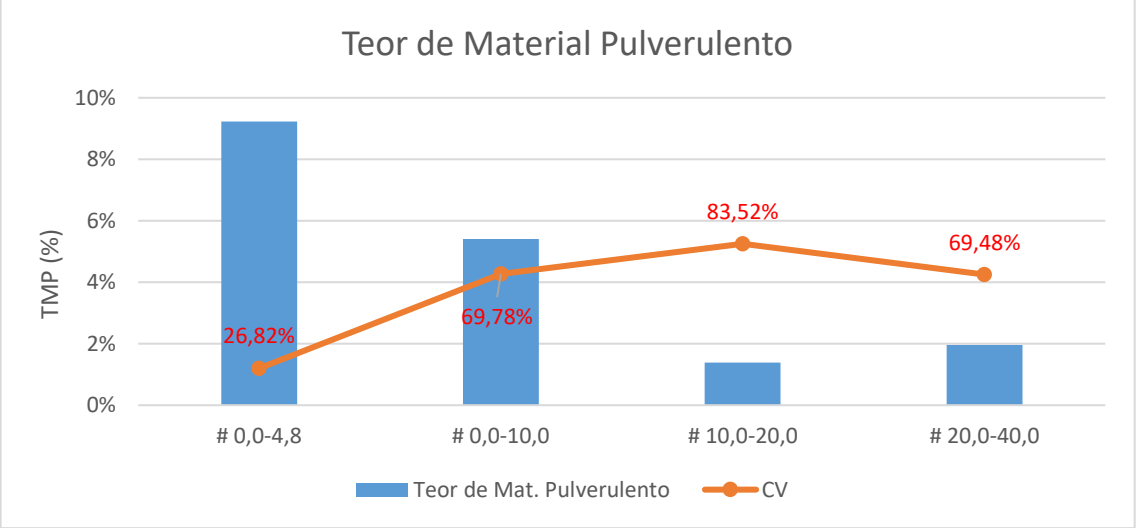
Tabela 14 - Análise estatística

	# 0,0-4,8	*# 0,0-10,0*	*# 10,0-20,0*	*# 20,0-40,0*
Média	9,22%	5,41%	1,39%	1,96%
Erro padrão	1,11%	1,05%	0,32%	0,45%
Desvio padrão	2,47%	3,77%	1,16%	1,36%
CV	26,82%	69,78%	83,52%	69,48%

Fonte: Autor.

Na Figura 27 são apresentados os valores médios para o teor de materiais pulverulentos dos agregados reciclados de RCD. Os maiores teores de materiais pulverulentos foram observados para a areia reciclada, seguido do pedrisco.

Figura 26 - Coeficiente de variação em função do teor de material pulverulento



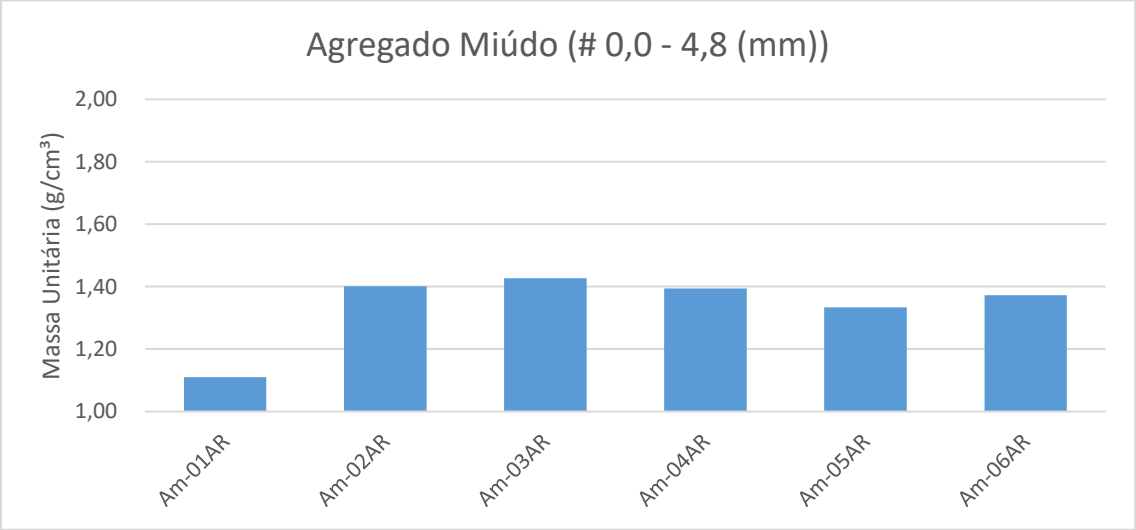
Fonte: Autor.

Nos resultados observados para a areia reciclada (# 0,0 - 4,8 (mm)) e pedrisco (# 0,0 - 10,0 (mm)), foram verificados teores de materiais pulverulentos superiores aos resultados encontrados por outros autores. Angulo (2000) obteve teores de materiais pulverulentos variando entre 0% e 7,36%, Tenório (2007) obteve, para agregados miúdos, valores variando entre 7,06% e 7,43%, e para agregados graúdos valores variando entre 0,0% e 1,66%. Para a brita nº1 (# 10,0 - 20,0 (mm)) e brita nº2 (# 20,0 - 40,0 (mm)), os teores de materiais pulverulentos foram menores, ou bem próximo, aos resultados obtidos por estes autores.

5.1.4 Massa Unitária

A Figura 28 apresenta a massa unitária do agregado miúdo, com granulometria # 0,0 - 4,8 (mm). Nesta figura é observado que a amostra coletada em 2014 apresentou grande dispersão em relação as demais amostras.

Figura 27 - Massa Unitária do agregado miúdo (# 0,0 - 4,8 (mm))

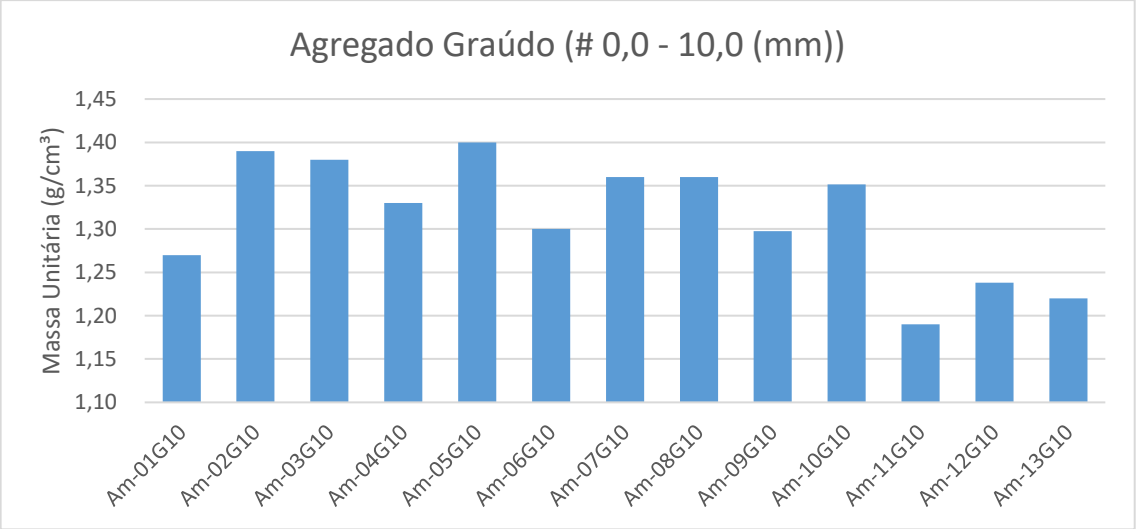


Fonte: Autor.

A mostra Am-01AR foi coletada e ensaiada em dezembro de 2014, pelo laboratório L.A. Falcão Bauer, as demais amostras foram coletadas por este autor entre os meses de maio e novembro de 2017. O comportamento da amostra Am-01AR pode ser justificado como pior arranjo entre as partículas, portanto maior volume de vazios.

A Figura 29 apresenta a massa unitária para o agregado graúdo # 0,0 - 10,0 (mm). É observado elevada dispersão entre as amostras.

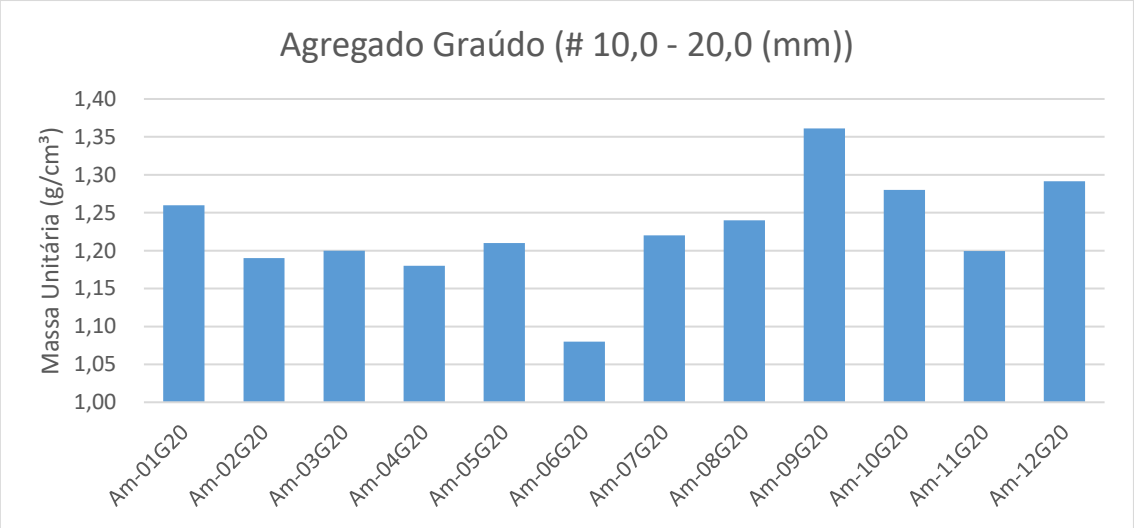
Figura 28 - Massa Unitária do agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm))



Fonte: Autor.

Na Figura 30 é apresentado a massa unitária do agregado graúdo de granulometria # 10,0 - 20,0 (mm). 10 entre 12 amostras apresentaram massa unitária entre 1,18 g/cm³ e 1,30 g/cm³.

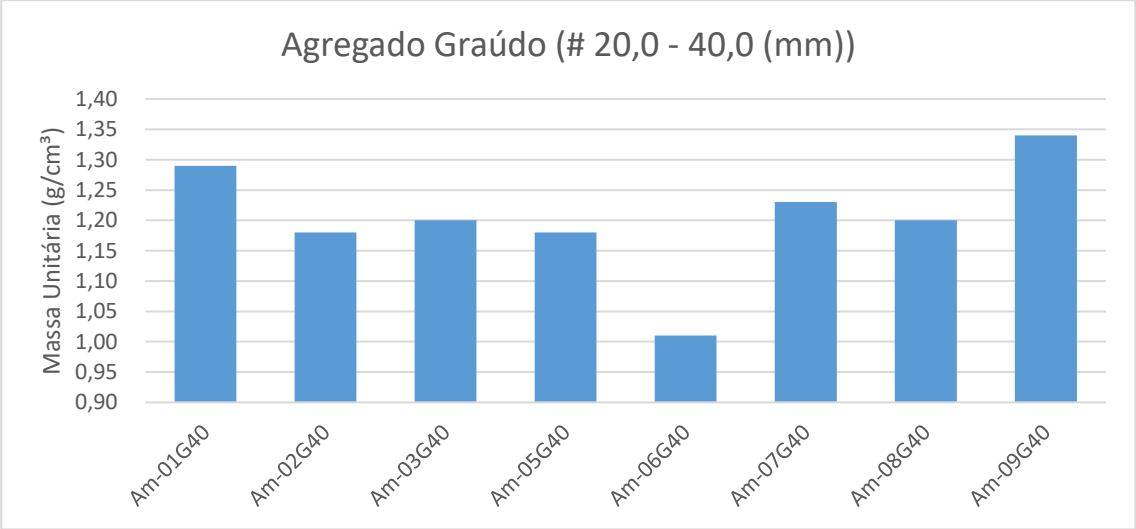
Figura 29 - Massa Unitária do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm))



Fonte: Autor.

A Figura 31 apresenta a massa unitária para o agregado graúdo, com granulometria # 20,0 - 40,0 (mm). Nesta figura é observado que 6 em 8 das amostras possui massa unitária entre 1,18 g/cm³ e 1,30 g/cm³.

Figura 30 - Massa Unitária do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm))



Fonte: Autor.

A Tabela 15 apresenta a análise estatística para a massa unitária dos agregados reciclados de RCD, são observados massa unitária média variando entre 1,20 e 1,34 (g/cm³), para todas as faixas granulométricas, valores bem próximos ao encontrado por outros autores. Buttler (2003) obteve valores variando entre 1,25 e 1,29 (g/cm³), em Leite (2001) os valores encontrados variaram entre 1,12 e 1,21 (g/cm³) e Tenório (2007) encontrou valores variando entre 1,13 e 1,33 (g/cm³).

Tabela 15 – Análise estatística

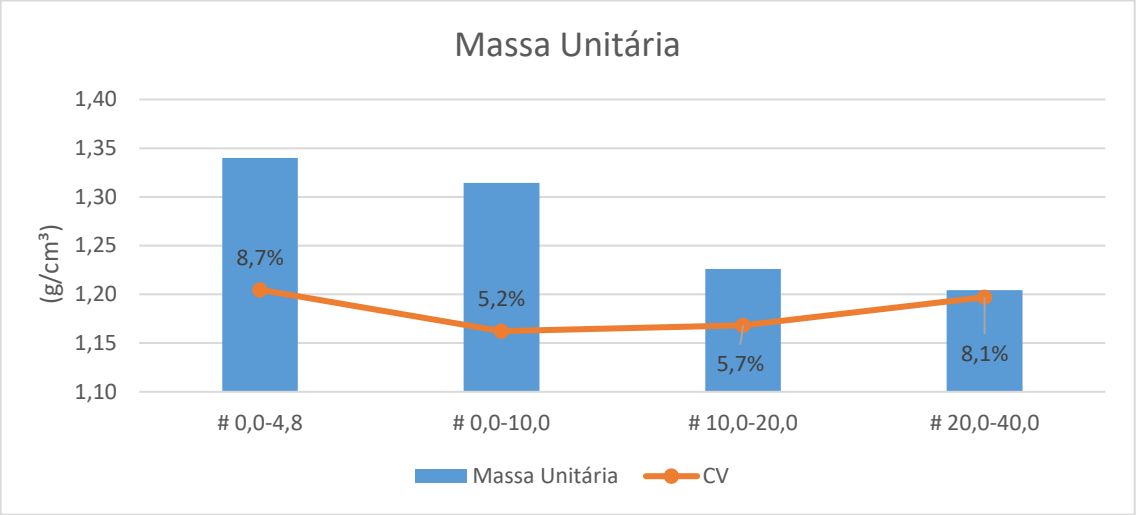
	# 0,0-4,8	***# 0,0-10,0***	***# 10,0-20,0***	***# 20,0-40,0***
Média (g/cm³)	1,34	1,31	1,23	1,20
Erro padrão	0,05	0,02	0,02	0,03
Desvio padrão	0,12	0,07	0,07	0,10
CV	8,72%	5,19%	5,68%	8,10%

Fonte: Autor.

A Figura 32 apresenta os valores médios e coeficiente de variação para a massa unitária dos agregados reciclados de RCD. É observado comportamento semelhante ao do agregado natural, onde, quanto maior a faixa granulométrica, menor a massa unitária. Foram observados também, elevados CV para todas a faixas granulométricas estudadas. O CV variou entre 5,2% e 8,7%, esta variação se justifica pela origem dos RCD, bem como pela sua composição, onde verificamos nas seções

anteriores algumas amostras com maior concentração de rochas, outras com maior concentração de argamassa

Figura 31 - Coeficiente de variação em função da massa unitária

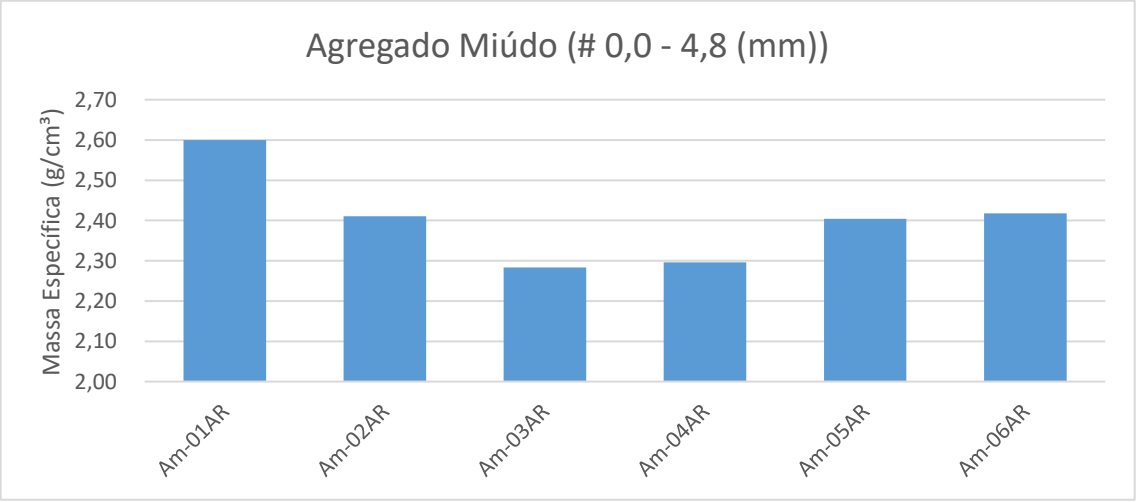


Fonte: Autor.

5.1.5 Massa Específica

É apresentada na Figura 33 a massa específica do agregado miúdo, com granulometria # 0,0 - 4,8 (mm). Nesta figura pode ser observado que exceto a amostra coletada em 2014, todas as amostras apresentaram massa específica $\leq$ 2,4 g/cm³.

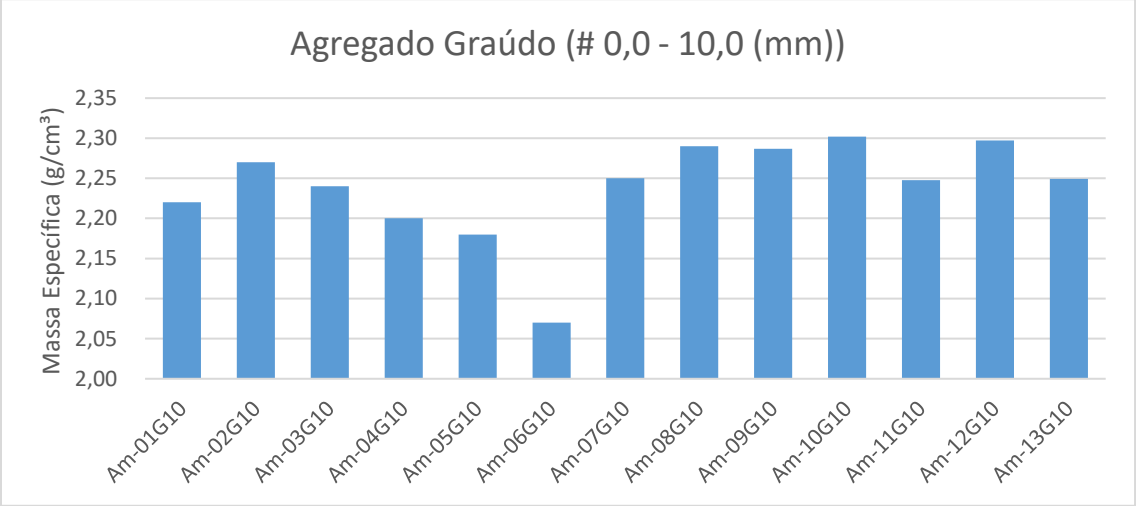
Figura 32 - Massa específica do agregado miúdo (# 0,0 - 4,8 (mm))



Fonte: Autor.

A Figura 34 apresenta a massa específica do agregado graúdo, com granulometria # 0,0 - 10,0 (mm). Nesta figura pode ser observado que a amostra Am-06G10, coletada em 2015, apresentou grande dispersão em relação as demais amostras. Todas as amostras apresentaram massa específica $\leq$ 2,3 g/cm³.

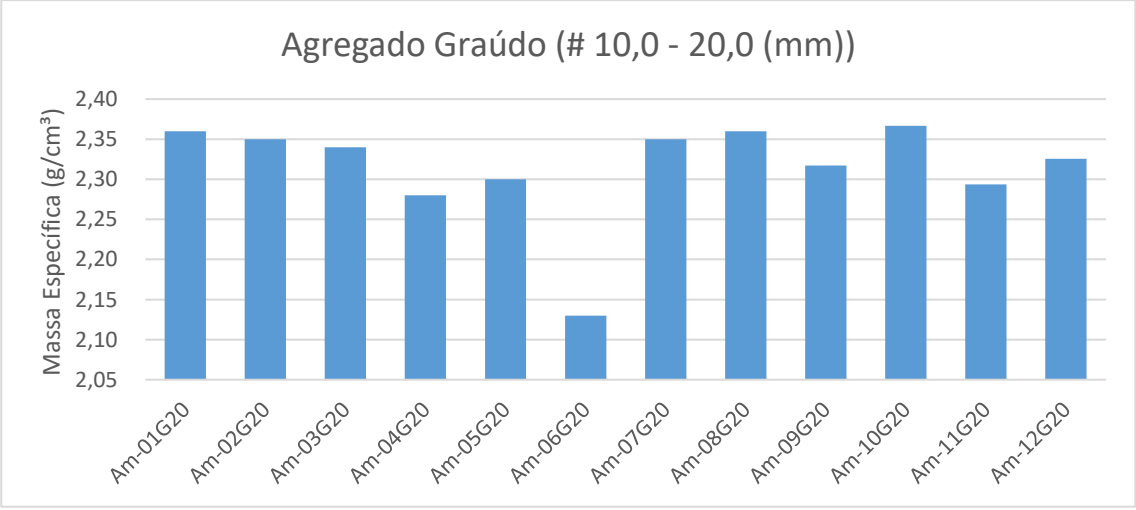
Figura 33 - Massa específica do agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm))



Fonte: Autor.

Na Figura 35 é apresentada a massa específica do agregado graúdo de granulometria # 10,0 - 20,0 (mm). Observamos que 9 entre 12 amostras apresentaram massa específica $\leq$ 2,3 g/cm³.

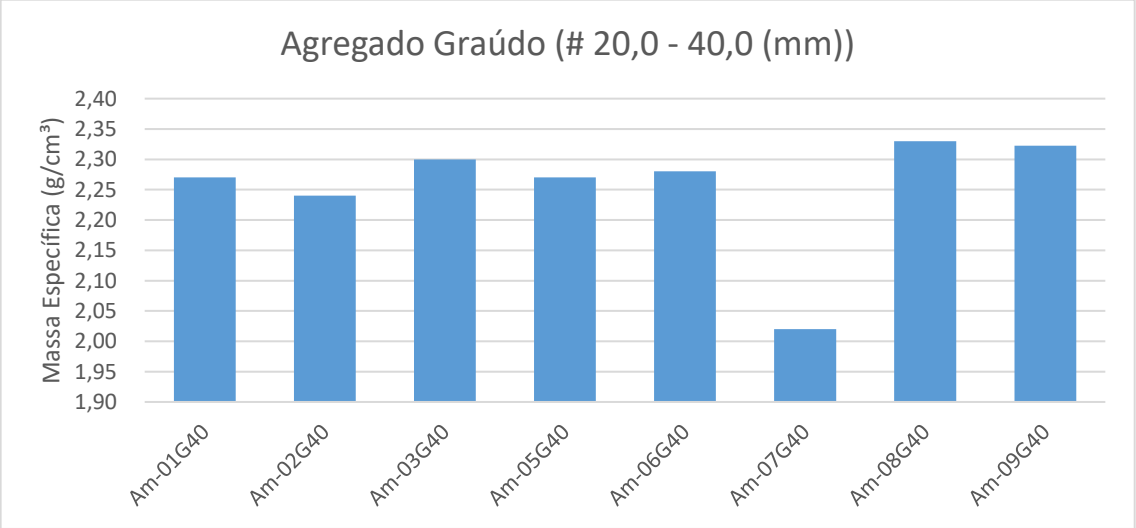
Figura 34 - Massa específica do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm))



Fonte: Autor.

Nas figuras 34 e 35, as amostras com menor massa específica foram a Am-G10 e Am-06G20, ambas coletadas em julho de 2015 por Eder (2015), observa-se uma disparidade entre estas amostras e as demais, podendo ser justificado pela sua composição. A Figura 36 apresenta a massa específica do agregado graúdo de granulometria # 20,0 - 40,0 (mm). É observado que, com exceção da amostra Am-07G40 coletada em agosto de 2015 por Faria *et al.* (2015), demais amostras apresentaram massa específica variando entre 2,2 g/cm³ e 2,4 g/cm³.

Figura 35 - Massa específica do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm))



Fonte: Autor.

Na Tabela 16 é apresentada a análise estatística, para os ensaios de massa específica dos agregados reciclados de RCD. Semelhante aos resultados obtidos para massa unitária, é observado nesta tabela maior variabilidade para a areia reciclada e a brita nº2, onde o CV encontrado foi de 4,74% e 4,5%, respectivamente. Novamente justificamos esta variabilidade pela composição dos RCD, que podem ter origem em trabalhos rodoviários, escavações, sobras de demolições e diferentes obras.

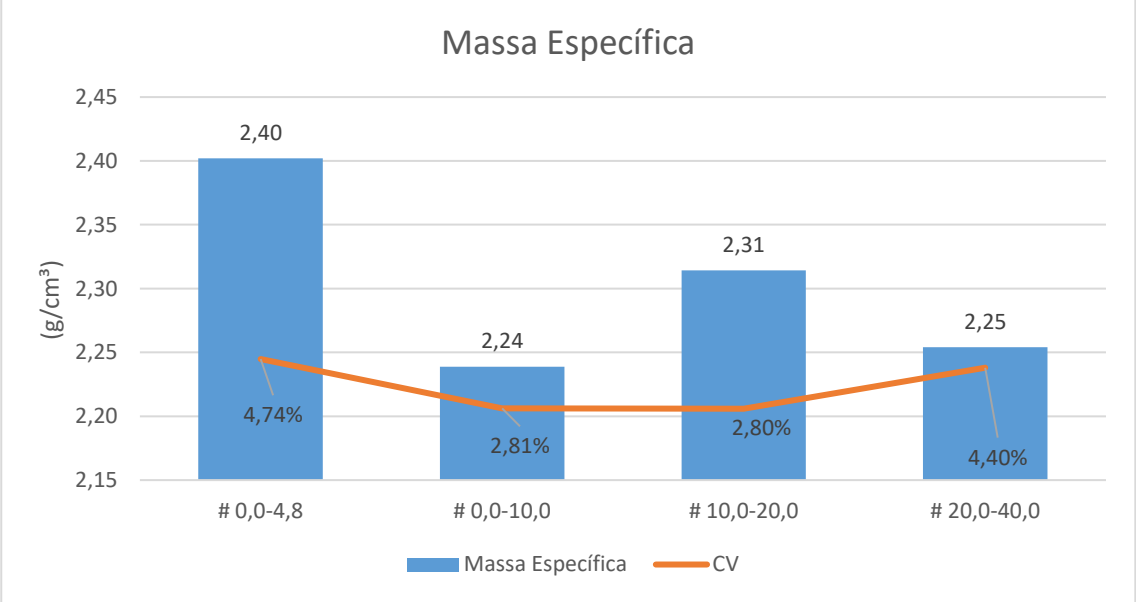
Tabela 16 - Coeficiente de variação em função da massa específica dos agregados reciclados de RCD

	# 0,0-4,8	***# 0,0-10,0***	***# 10,0-20,0***	***# 20,0-40,0***
Média (g/cm³)	2,40	2,24	2,31	2,25
Erro padrão	0,05	0,02	0,02	0,04
Desvio padrão	0,11	0,06	0,06	0,10
CV	4,74%	2,81%	2,80%	4,40%

Fonte: Autor.

Na Figura 37 são apresentados os valores médios e coeficiente de variação para a massa específica dos agregados reciclados de RCD. A areia reciclada obteve maior valor médio para massa específica, impulsionada pela amostra Am-01AR, coletada em 2014 pelo laboratório L.A. Falcão Bauer. O pedrisco obteve menor valor médio para massa específica, impulsionado pela amostra Am-06G10. Em relação ao coeficiente de variação, o pedrisco apresentou menor variabilidade.

Figura 36 - Coeficiente de variação em função da massa específica



Fonte: Autor.

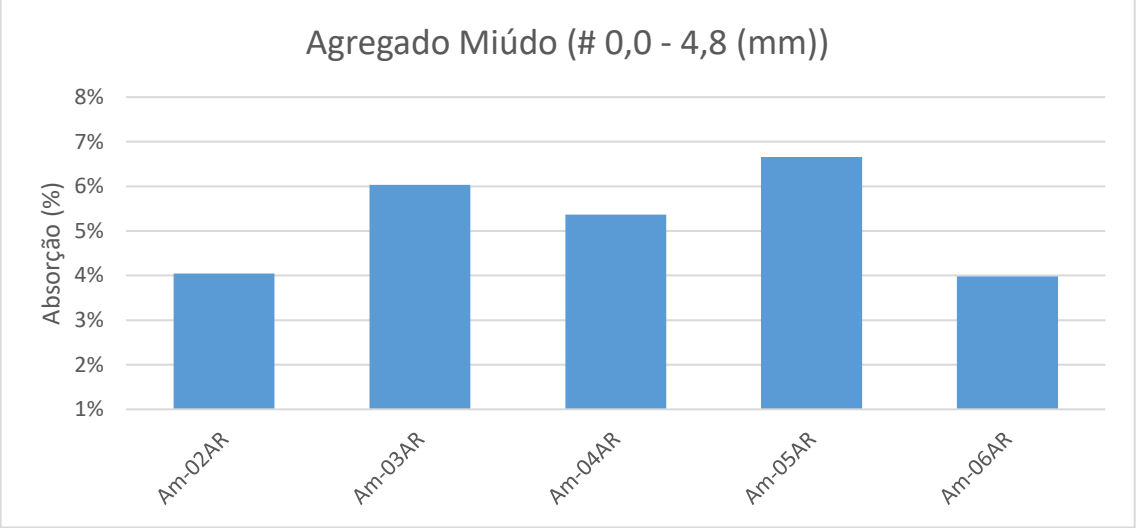
Os valores médios para massa específica ficaram bem próximo aos valores encontrados por Juan (2001), 2,01 g/cm³ ~ 2,30 g/cm³, ficaram abaixo, porém não tão

distante, dos valores encontrados por Leite (2001), Buttler (2003) e Cabral (2007)[11], onde foram verificados valores variando entre 2,27 g/cm³ e 2,56 g/cm³. Em relação aos agregados naturais

5.1.6 Absorção de Água

Na Figura 38 é apresentada a absorção de água da areia reciclada, onde é observada variação nestes valores entre 4,0% e 6,7%, sendo que das 5 amostras coletadas, 3 amostras apresentaram absorção superior a 5,0%.

Figura 37 - Absorção do agregado miúdo (# 0,0 - 4,8 (mm))

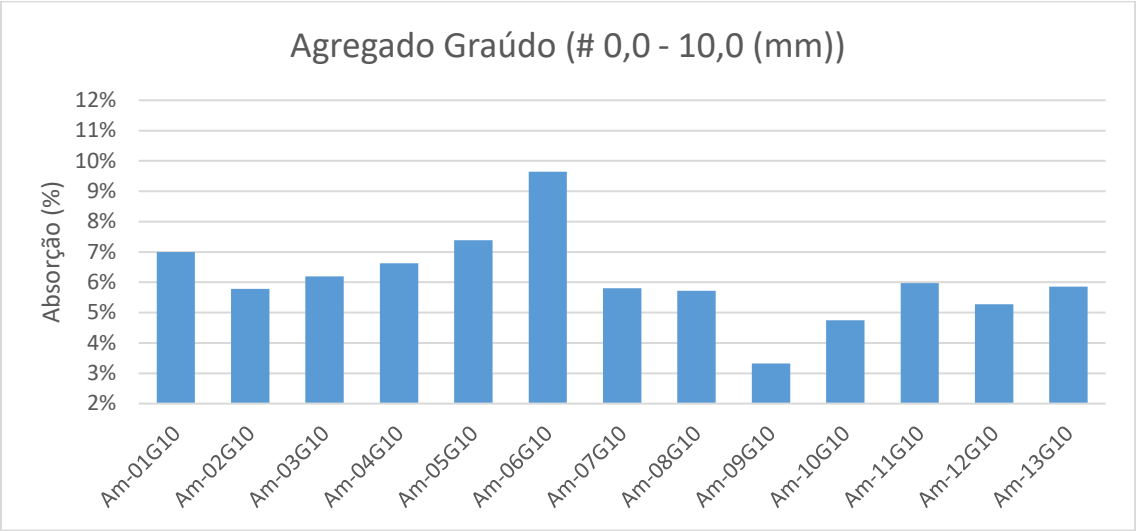


Fonte: Autor.

A amostra Am-02AR, coletada em março de 2017 por este autor, além de apresentar menor teor de material pulverulento, apresentou massa específica superior às amostras Am-03AR, Am-04AR e Am-05AR, apontando para um menor teor de vazios e consequentemente menor absorção de água. A Figura 39 apresenta a absorção de água para o agregado graúdo reciclado pedrisco. É possível observar que entre as 12 amostras, 8 obtiveram absorção inferior a 6%, e que apenas a amostra Am-09G10 obteve absorção inferior a 4%.

[11] Os resultados dos ensaios apresentados e discutidos por Leite (2001), Juan (2001), Buttler (2003) e Cabral (2007) está melhor detalhado e discutido no capítulo 2, seção 2.3, deste trabalho.

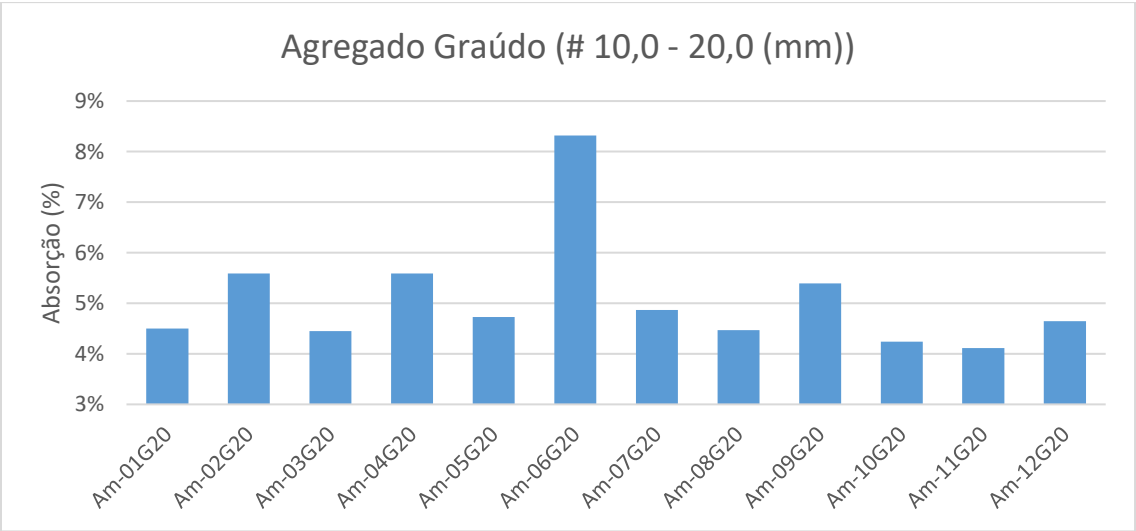
Figura 38 - Absorção do agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm))



Fonte: Autor.

No ensaio de caracterização, apresentado na seção 5.1.1 deste capítulo, a amostra Am-09G10 apresentou teor de rochas superior ao teor de argamassa, justificando assim a menor absorção de água frente às demais amostras. A amostra Am-06G10 apresentou menor massa específica, quando comparada as demais amostras. Na Figura 40 é apresentada a absorção de água do agregado reciclado brita nº1. Nesta figura observa-se que, com exceção da amostra Am-06G20 coletada em 2015, todas as amostras obtiveram valores em 4% e 5,6%.

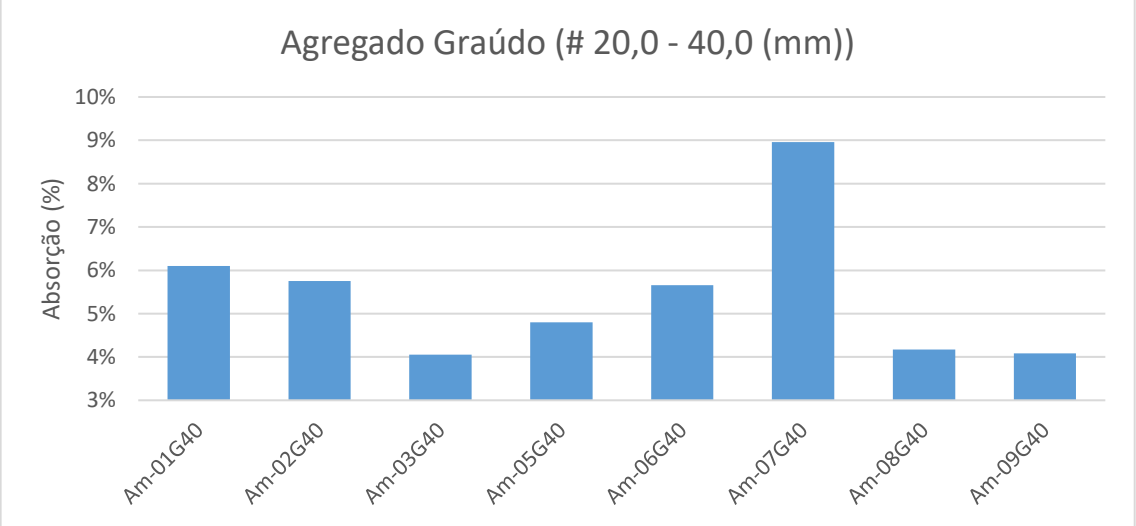
Figura 39 - Absorção do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm))



Fonte: Autor.

A amostra Am-11G20, coletada em novembro de 2017, apresentou maior massa unitária frente as demais amostras, portanto menor volume de vazios e melhor arranjo entre as partículas, justificando a menor absorção de água, em relação às demais amostras. A amostra Am-06G20, coletada em julho de 2015, apresentou menores resultados nos ensaios de massa unitária e massa específica, o que pode ser causado por maior presença de materiais cimentícios com elevada porosidade. Na Figura 41 é apresentada a absorção de água do agregado graúdo reciclado brita nº2. Nesta figura verifica-se que os resultados ficaram acima de 4% para todas as amostras, semelhante aos demais agregados graúdos reciclados.

Figura 40 - Absorção do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm))



Fonte: Autor.

As amostras que apresentaram menor absorção de água foram Am-03G40 coletada em julho de 2015 e Am-09G40 coletada em maio de 2017, ambas as amostras apresentaram maior massa específica, em comparação às demais amostras. A amostra Am-03G40 apresentou menor resultado no ensaio de teor de material pulverulento, enquanto a amostra Am-09G40 apresentou maior valor no ensaio de massa específica. A amostra Am-07G40 coletada em agosto de 2015, apresentou maior absorção de água frente as demais amostras. No ensaio de massa específica, esta amostra apresentou o pior resultado em relação as demais amostras, indicando para uma maior presença de materiais porosos.

Na Tabela 17 é apresentado a análise estatística para o ensaio de absorção de água dos agregados reciclados de RCD. Todas as faixas granulométricas apresentaram elevados CV.

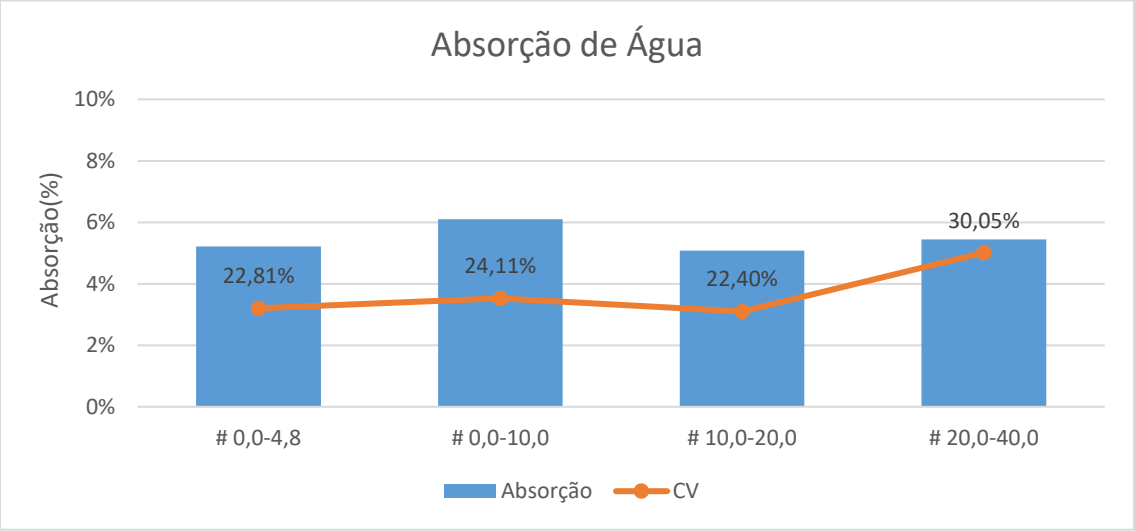
Tabela 17 - Coeficiente de variação em função da absorção de água dos agregados reciclados de RCD

	# 0,0-4,8	***# 0,0-10,0***	***# 10,0-20,0***	***# 20,0-40,0***
Média	5,22%	6,10%	5,08%	5,45%
Erro padrão	0,53%	0,41%	0,33%	0,58%
Desvio padrão	1,19%	1,47%	1,14%	1,64%
CV	22,81%	24,11%	22,40%	30,05%

Fonte: Autor.

Na Figura 42 são apresentados os valores médios e coeficiente de variação para a absorção de água dos agregados reciclados de RCD. O pedrisco e a brita nº2 obtiveram maior absorção de água e maior coeficiente de variação.

Figura 41 - Coeficiente de variação em função da absorção de água



Fonte: Autor.

Os valores apresentados na Figura 42, acima, demonstram menor absorção de água quando comparados com valores obtidos por Leite (2001), Buttler (2003), Juan (2004) e Boehme (2013), ambos detalhados no capítulo 2.

No Apêndice D – Gráficos Correlacionando diferentes Resultados de Ensaios dos Agregados Reciclados de RCD, são apresentadas as Figuras D1 e D2, onde são correlacionados a absorção de água, massa específica e teor de material pulverulento, nos agregados reciclados de RCD. Com base Na Figura D1, observa-se uma correlação moderada (R^2=0,7) entre absorção e massa específica, podendo afirmar que a absorção decresce linearmente com o aumento da massa específica. Conforme observado por Angulo (2000) a redução da absorção se dá com o aumento do teor das fases concreto e rocha, que naturalmente absorvem menos água e apresentam maior massa específica.

É sabido que o teor de material pulverulento, assim como a composição granulométrica, exerce influência sobre a absorção de água dos agregados, pois além de alterar o volume relativo ocupado por este, determina a quantidade de água necessária para a molhagem dos sólidos presentes em sua composição, diante disto, tentou-se buscar uma correlação entre o teor de materiais pulverulentos e a absorção de água. Foi encontrado uma correlação fraca (R^2>0,1) entre absorção de água e o teor de material pulverulento, para os agregados reciclados de RCD, podendo ser verificado na Figura D2 (Apêndice D – Gráficos Correlacionando diferentes Resultados de Ensaios dos Agregados Reciclados de RCD).

5.2 Influências dos Agregados Reciclados de RCD nas Propriedades do Concreto no Estado Fresco

No presente estudo, para o concreto no estado fresco estão sendo analisadas a trabalhabilidade, perda de abatimento, massa específica e teor de ar incorporado.

5.2.1 Abatimento de Cone de Tronco

No Quadro 08 são apresentadas as composições dos traços de concreto, contendo agregados reciclados e naturais e os resultados do slump test para as respectivas amostras coletadas. Conforme detalhado no capítulo 4.4, o abatimento inicial projetado foi de (70$\pm$20) mm, são observados valores elevados de abatimento para as misturas contendo o agregado reciclado brita nº1, foram observados também

que das 25 misturas de concreto realizadas, apenas 14 misturas atenderam ao abatimento especificado.

Quadro 08 - Composição das misturas de concreto com agregado reciclado e ensaios de abatimento

SLUMP TEST							
		100% RCD - B0	**100% RCD - B1**	**70% RCD/ 30% NAT**	**50% RCD/ 50% NAT**	**30% RCD/ 70% NAT**	
Composição do Traço	Areia RCD	20,0	20,0	14,0	10,0	6,0	Quantidades (kg)
	Brita Nº0 RCD	28,5	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Brita Nº1 RCD	0,0	28,5	20,0	14,3	8,6	
	Cimento CPIII	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	
	Areia Natural	0,0	0,0	6,0	10,0	14,0	
	Brita Nº1 Nat.	0,0	0,0	8,6	14,3	20,0	
	Água	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	
	Aditivo	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Coleta das Amostras	08/03/2017	10,0	50,0	90,0	15,0	70,0	**Slump Test (mm)**
	08/05/2017	115,0	185,0	45,0	-	60,0	
	29/05/2017	90,0	150,0	80,0	50,0	97,0	
	11/11/2017	61,0	150,0	11,0	61,0	41,0	
	25/11/2017	78,0	69,0	66,0	52,0	62,0	

Fonte: Autor.

Na Figura 43 pode ser observado no ensaio de abatimento do cone de tronco, a mistura de concreto utilizando-se as amostras Am-10G10 e Am-03AR, onde o resultado encontrado foi zero. Esta figura trata da mistura contendo 100% RCD B0, com amostras coletadas em 08/05/2017. O concreto apresentou consistência seca impossibilitando seu manuseio, esta mistura foi descartada, exigindo a execução de novo traço de concreto.

Figura 42 - Abatimento de mistura de concreto com agregado graúdo reciclado de granulometria # 0,0 - 10,0 (mm)

Fonte: Autor.

Na Figura 44 é apresentado o ensaio de abatimento do cone tronco para mistura contendo as amostras Am-09G40 e Am-03AR, onde a medida encontrada é superior ao valor especificado na carta traço. Conforme pode ser observado na Figura 44, este concreto apresentou perda acentuada de abatimento, logo nos primeiros 30 minutos onde houve redução de 185mm para 95mm. Nos 30 minutos seguintes, a perda de abatimento foi de 75mm.

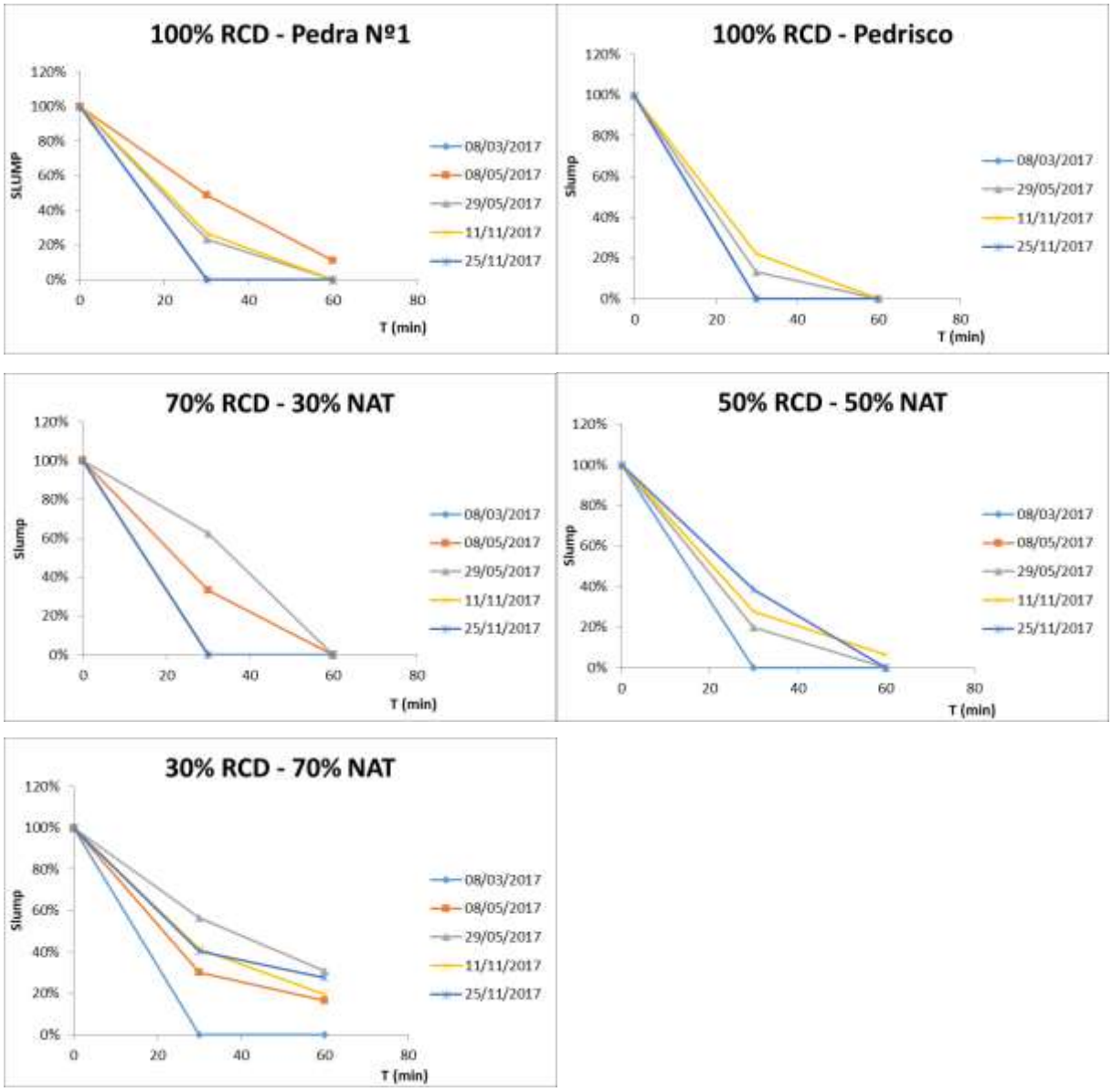
Figura 43 - Abatimento de mistura de concreto com agregado graúdo reciclado de granulometria # 10,0 - 20,0 (mm)

Fonte: Autor.

Na Figura 45 é apresentada a perda de trabalhabilidade para as misturas de concreto contendo diferentes proporções de agregado reciclado. Nesta figura são comparadas misturas de concreto contendo, em sua composição, 100%, 70%, 50% e

30% de agregados reciclados de RCD. É observado todas as misturas apresentaram elevada perda de abatimento nos primeiros 30 minutos.

Figura 44 - Perda de abatimento para diferentes misturas de concreto com agregado reciclado de RCD



Fonte: Autor.

Mesmo fazendo a pré-saturação dos agregados reciclados e adicionando aditivo superplastificantes, o abatimento inicial de algumas misturas ficaram abaixo do especificado, sendo também registrado misturas que apresentaram abatimento inicial igual a zero. É observada em misturas de concreto utilizando até 50% de agregados graúdos e miúdos reciclados, perda significativa da trabalhabilidade nos primeiros 30

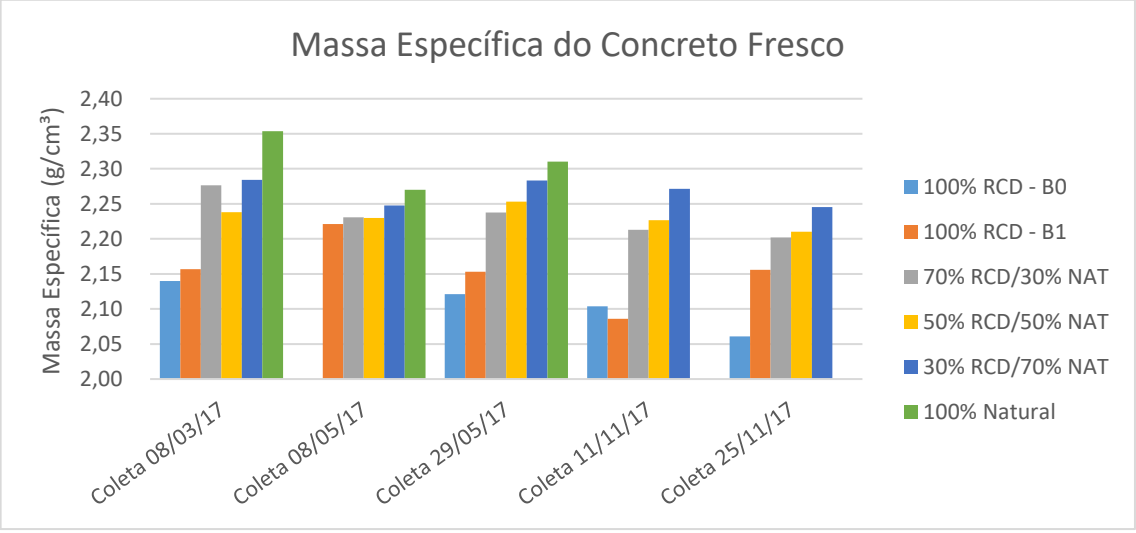
minutos. As misturas de concreto contendo 30% de agregados reciclados de RCD obtiveram melhor desempenho, que as demais misturas, registrando perda de trabalhabilidade de 70% ao longo de 60 minutos, enquanto que na mistura de referência essa perda foi de 60%.

Segundo Neville (2013), não existe um método de aceitação geral para medir diretamente a trabalhabilidade. Ainda segundo este autor, a trabalhabilidade está correlacionada a medida de abatimento, desta forma entende-se que trabalhabilidade do concreto fica comprometido, quando não se alcança um bom adensamento na sua mistura.

5.2.2 Massa Específica do Concreto no Estado Fresco

A Figura 46 apresenta a massa específica para as diferentes misturas de concreto em função das diferentes misturas de concreto. É observado um ganho expressivo na massa específica para misturas com menor quantidade de agregados reciclados.

Figura 45 - Massa específica das misturas de concreto no estado fresco

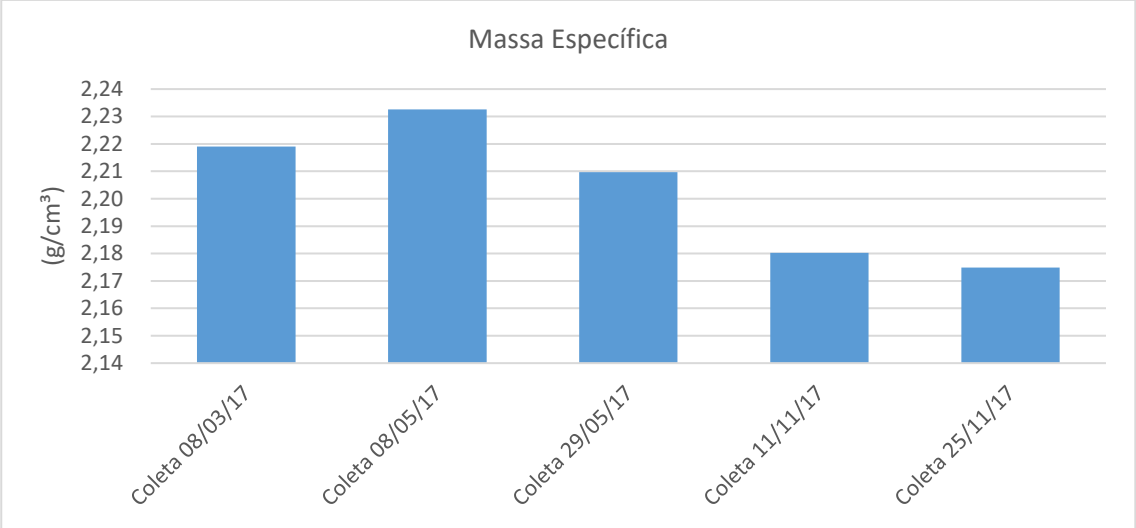


Fonte: Autor.

Os piores resultados observados ficaram para as misturas onde foram substituídos 100% dos agregados por agregados reciclados de RCD, e onde se fez uso do pedrisco. O pedrisco, nos ensaios de massa específica e absorção de água, apresentaram os piores resultados. As misturas com maior massa específica foram

as que utilizaram maior concentração de agregados naturais, no caso as misturas 30%RCD/70%NAT. Na Figura 47 é apresentado os valores médios para massa específica em função das datas de coletas dos agregados reciclados de RCD.

Figura 46 – Valores médios para massa específica das misturas de concreto no estado fresco



Fonte: Autor.

São observados que as misturas de concreto com maior massa específica, fazem uso de agregados coletados em maior de 2017. Para os agregados graúdos reciclados coletados nesta data verificamos baixo teor de material pulverulento, elevados resultados de massa unitária e massa específica, e baixos resultados nos ensaios de absorção de água, quando comparados aos demais agregados.

Na Tabela 18 é apresentado a análise estatística para os resultados do ensaio de massa específica das misturas de concreto no estado fresco. Observa-se maior coeficiente de variação para misturas com maior concentração de agregados reciclados.

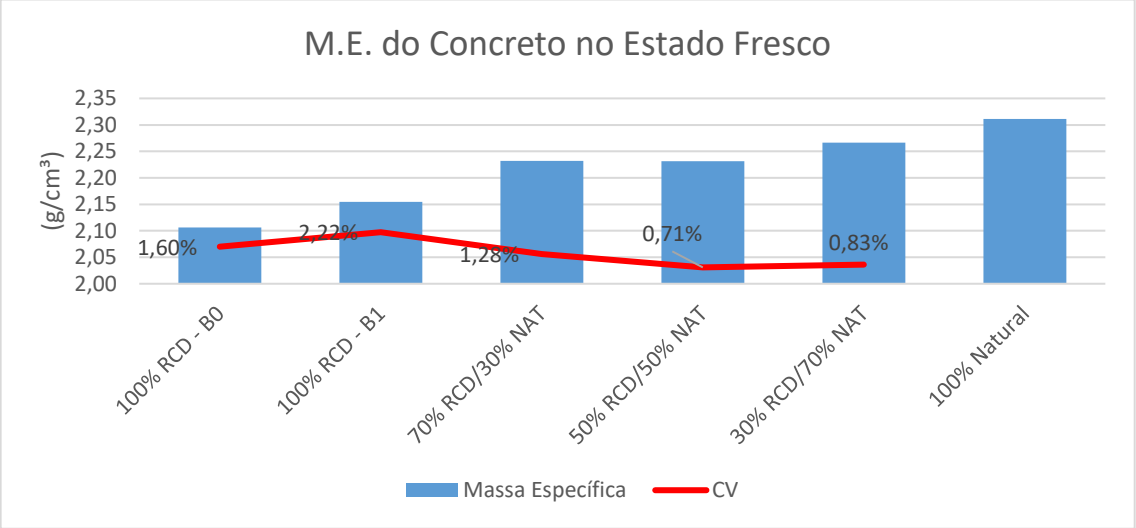
Tabela 18 - Coeficiente de variação em função da massa específica do concreto

	100% RCD - B0	***100% RCD - B1***	***70% RCD/ 30% NAT***	***50% RCD/ 50% NAT***	***30% RCD/ 70% NAT***
Média (g/cm³)	2,11	2,15	2,23	2,23	2,27
Erro padrão	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
Desvio padrão	0,03	0,05	0,03	0,02	0,02
CV	1,60%	2,22%	1,28%	0,71%	0,83%

Fonte: Autor.

A Figura 48 apresenta os valores médios e coeficiente de variação para as misturas de concreto produzido com agregados reciclados. Confirmando a informação de diversos autores, misturas com maior proporção de agregados naturais apresentam maior massa específica.

Figura 47 - Coeficiente de variação em função da massa específica do concreto no estado fresco



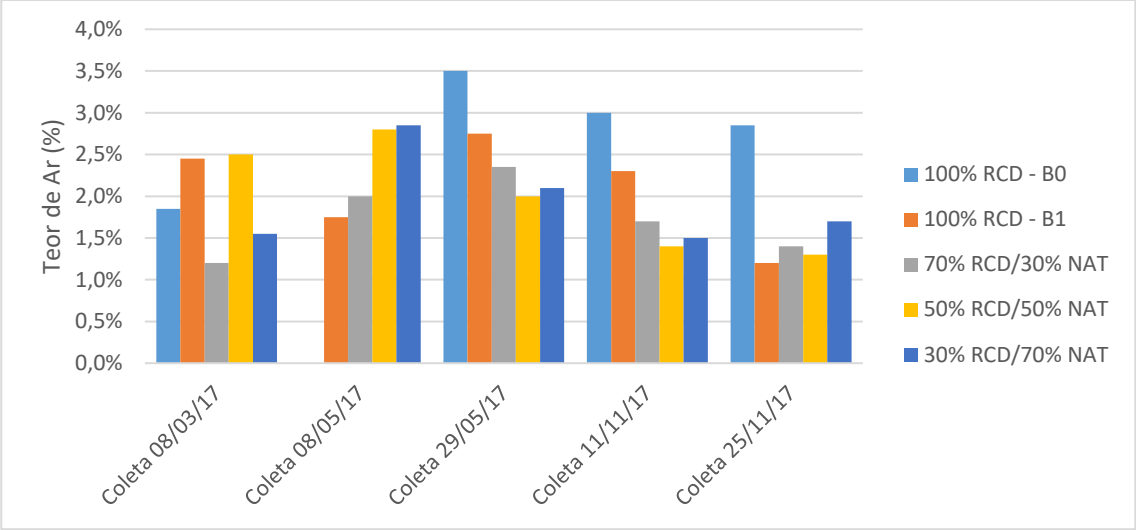
Fonte: Autor.

Para Mehta *et al.* (1994), a massa específica do concreto no estado fresco depende da massa específica do agregado e da sua porosidade, relação observada na pesquisa desenvolvida por Tenório (2007). Na Figura 48 é observado uma redução da massa especifica do concreto produzido com agregado reciclado, em relação ao traço de referência, da ordem 2%, para misturas com apenas 30% de agregados reciclados, chegando a 8%, para misturas com 100% de agregados reciclados. Buttler (2003), em sua pesquisa, observou nos ensaios de massa específica das misturas de concreto contendo agregado reciclados, que estes obtiveram resultados 5% menores que as misturas de concreto contendo apenas agregados naturais.

5.2.3 Teor de Ar-Incorporado

Na Figura 49 é apresentado o teor de ar incorporado nas diferentes misturas de concreto. O teor de ar incorporado ao concreto apresentou variação entre 1,0% e 3,5%, de acordo a mistura de concreto. Também foi observado variação no teor de ar incorporado ao concreto, quando relacionado com a data das coletas das amostras de agregado reciclado.

Figura 48 - Teor de Ar Incorporado nas misturas de concreto contendo diferentes proporções de agregados reciclados de RCD



Fonte: Autor.

As misturas que fizeram uso do agregado reciclado pedrisco obtiveram maior teor de ar incorporado, com exceção da primeira data de coleta. No ensaio de caracterização física dos agregados graúdos reciclados, o pedrisco apresentou o maior teor de material pulverulento, menor massa unitária e menor massa específica.

Na Tabela 19 é apresentado a análise estatística para os resultados de ensaio do teor de ar incorporado nas misturas de concreto no estado fresco. Observa-se maior variabilidade para misturas que faz uso do agregado graúdo pedrisco, seguido das misturas de concreto com substituição de 50% dos agregados reciclados por agregado natural.

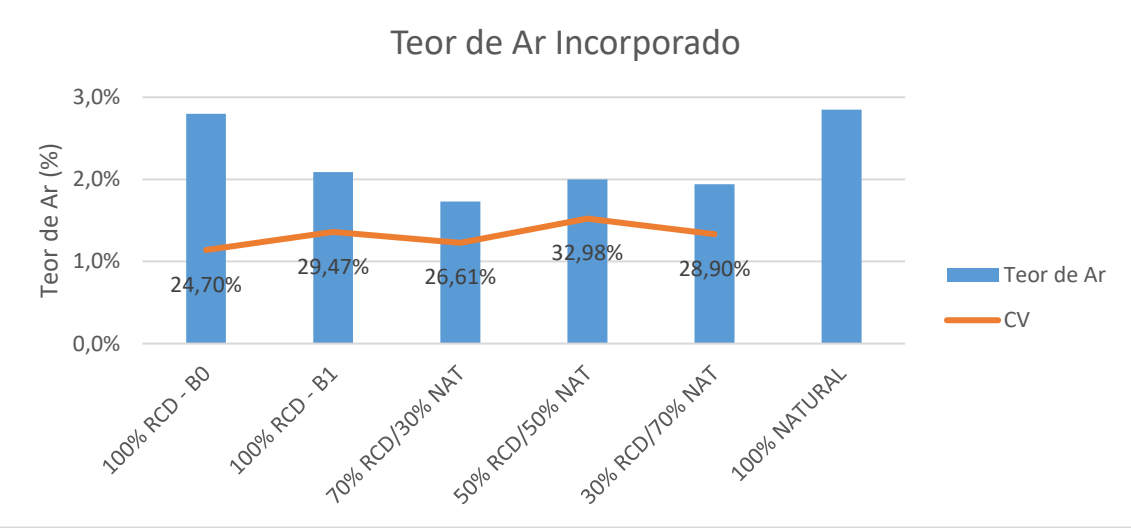
Tabela 19 - Coeficiente de variação em função do teor de ar incorporado ao concreto no estado fresco

	100% RCD - B0	***100% RCD - B1***	***70% RCD/ 30% NAT***	***50% RCD/ 50% NAT***	***30% RCD/ 70% NAT***
Média	2,80%	2,09%	1,73%	2,00%	1,94%
Erro padrão	0,35%	0,28%	0,21%	0,29%	0,25%
Desvio padrão	0,69%	0,62%	0,46%	0,66%	0,56%
CV (%)	24,70%	29,47%	26,61%	32,98%	28,90%

Fonte: Autor.

A Figura 50 apresenta os valores médios e CV para as misturas de concreto produzido com agregados reciclados. Todas as misturas de concreto, contendo agregados reciclados de RCD, obtiveram menor teor de ar incorporado que a mistura de referência, onde são utilizados apenas agregados naturais.

Figura 49 - Coeficiente de variação em função do teor de ar incorporado ao concreto no estado fresco



Fonte: Autor.

De acordo com Metha *et al.* (1994) os resultados observados acima podem ter origem em diversos fatores, entre eles na relação água cimento, no adensamento da mistura de concreto, nas características dos agregados, porém observamos que as misturas que apresentaram maior teor de ar incorporado coincidem com as coletas que apresentaram maior quantidade de material asfáltico em sua composição.

No Apêndice E – Gráficos Correlacionando diferentes Resultados de Ensaios das Misturas de Concreto Contendo Agregados Reciclados de RCD, são apresentadas as Figuras E1 e E2, demonstrando a correlação entre teor de ar incorporado, o slump test e massa específica do concreto no estado fresco. Foi observado uma correlação muito fraca (R^2<0,01) entre o teor de ar incorporado e o slump das misturas de concreto. Para os resultados de massa específica e teor de ar incorporado, foi observado correlação moderada (R^2=0,6) verificando que existe uma relação de proporcionalidade, onde quanto maior o teor de ar incorporado, menor a massa específica.

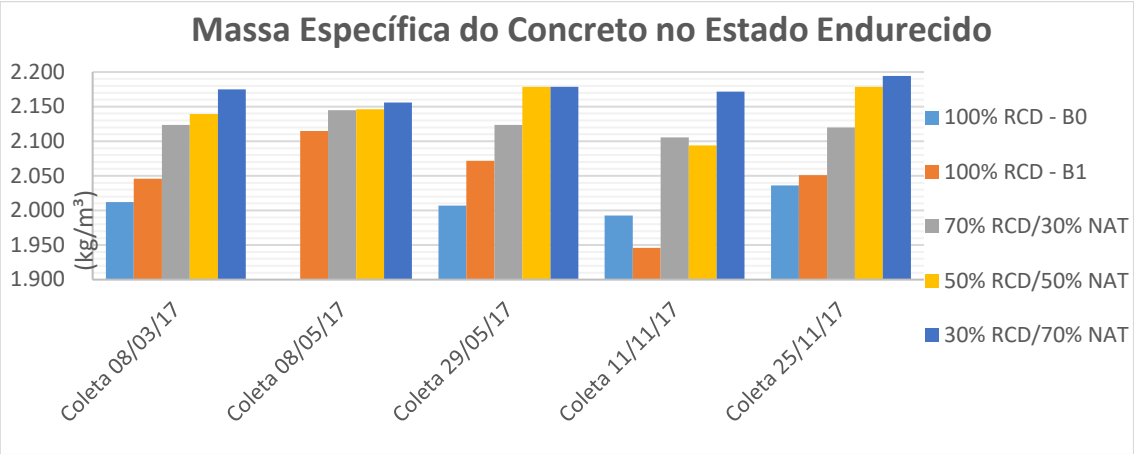
5.3 Influências dos Agregados Reciclados de RCD nas Propriedades do Concreto no Estado Endurecido

Nas propriedades do concreto no estado endurecido, são analisados a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade longitudinal dinâmico, absorção de água por capilaridade, massa específica e penetração de cloretos.

5.3.1 Massa Específica do Concreto no Estado Endurecido

A Figura 51 apresenta a massa específica das diferentes misturas de concreto, no estado endurecido. As misturas de concreto obtiveram valores entre 1.900 kg/m³ e 2.200 kg/m³ para massa específica, sendo que as misturas de concreto contendo 70% de agregados naturais, além de possuírem maior massa específica apresentaram menor variação de seus respectivos valores em relação às datas das coletas das amostras.

Figura 50 - Massa específica do concreto no estado endurecido



Fonte: Autor.

Na Tabela 20 é apresentado a análise estatística dos ensaios de massa específica do concreto no estado endurecido. É observado baixa variabilidade nos resultados dos ensaios, porém as misturas que apresentaram maior CV são as que fazem uso do agregado reciclado graúdo brita nº1. Novamente é notado que as misturas com maior teor de agregados naturais apresentaram menor CV.

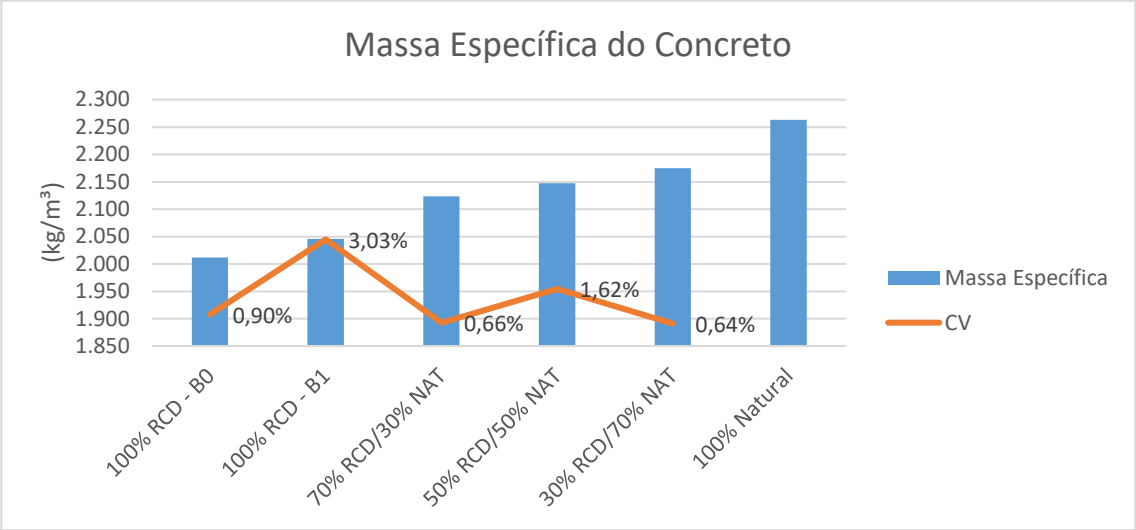
Tabela 20 - Coeficiente de variação em função da massa específica do concreto no estado endurecido

	100% RCD - B0	***100% RCD - B1***	***70% RCD/ 30% NAT***	***50% RCD/ 50% NAT***	***30% RCD/ 70% NAT***
Média	2.011,91	2.045,82	2.123,36	2.147,42	2.175,06
Erro padrão	9,04	27,72	6,26	15,59	6,20
Desvio padrão	18,09	61,99	13,99	34,86	13,86
CV	0,90%	3,03%	0,66%	1,62%	0,64%

Fonte: Autor.

A Figura 52 apresenta os valores médios e o CV para os ensaios de massa específica do concreto no estado endurecido.

Figura 51 - Coeficiente de variação em função da massa específica concreto



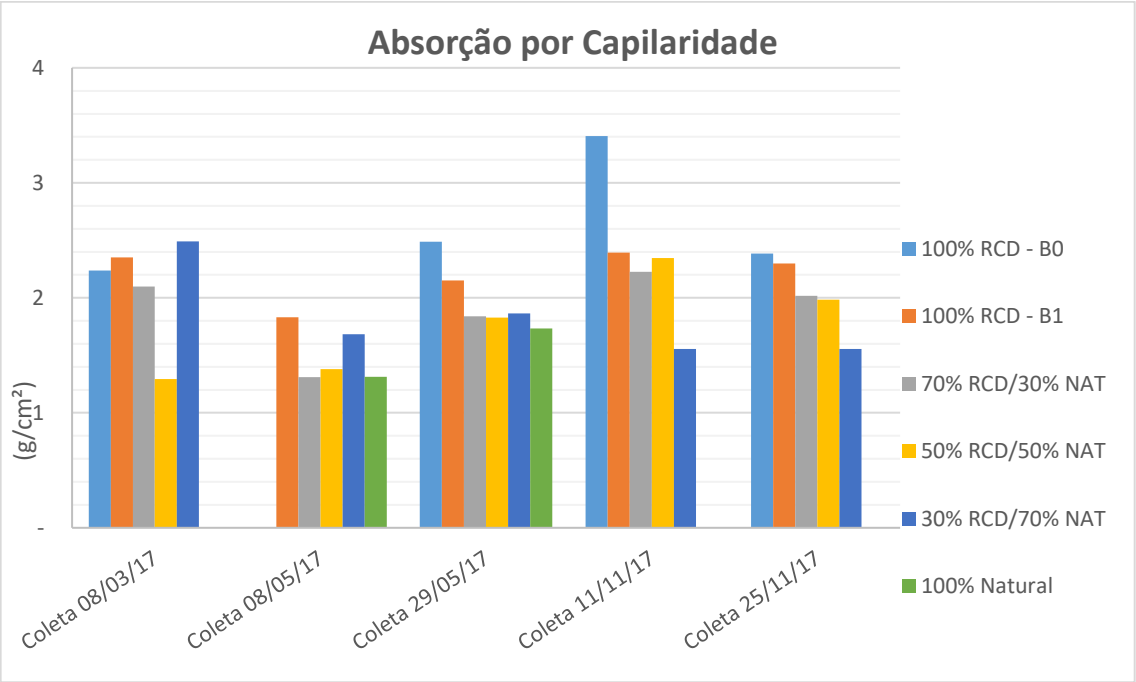
Fonte: Autor.

No Apêndice E – Gráficos Correlacionando diferentes Resultados de Ensaios das Misturas de Concreto Contendo Agregados Reciclados de RCD, é apresentado através da Figura E3, a relação existente entre a massa específica do concreto, no estado endurecido, e o teor de ar incorporado ao concreto, medido no estado fresco. Nesta figura é possível notar uma redução da massa específica em misturas com maior teor de ar incorporado, embora tenha-se verificado uma correlação fraca (R^2<0,2). Conforme observado por Neville (2013), o teor de vazios reduz a massa específica do concreto, afetando significamente e negativamente a sua resistência.

5.3.2 Absorção de Água por Capilaridade

A Figura 53 apresenta a absorção de água por capilaridade para as diferentes misturas de concreto fabricadas com agregados reciclados de RCD e faz comparação com a mistura de referência. É possível observar discrepância no resultado da mistura 100%RCD-B0, fabricado com agregados reciclados coletadas em 11/11/2017.

Figura 52 - Absorção de água por capilaridade



Fonte: Autor.

Na Tabela 21 é apresentado a análise estatística para os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade do concreto. Observa-se maior CV para misturas com 50% de agregado natural, seguido das misturas com 70% de agregado natural.

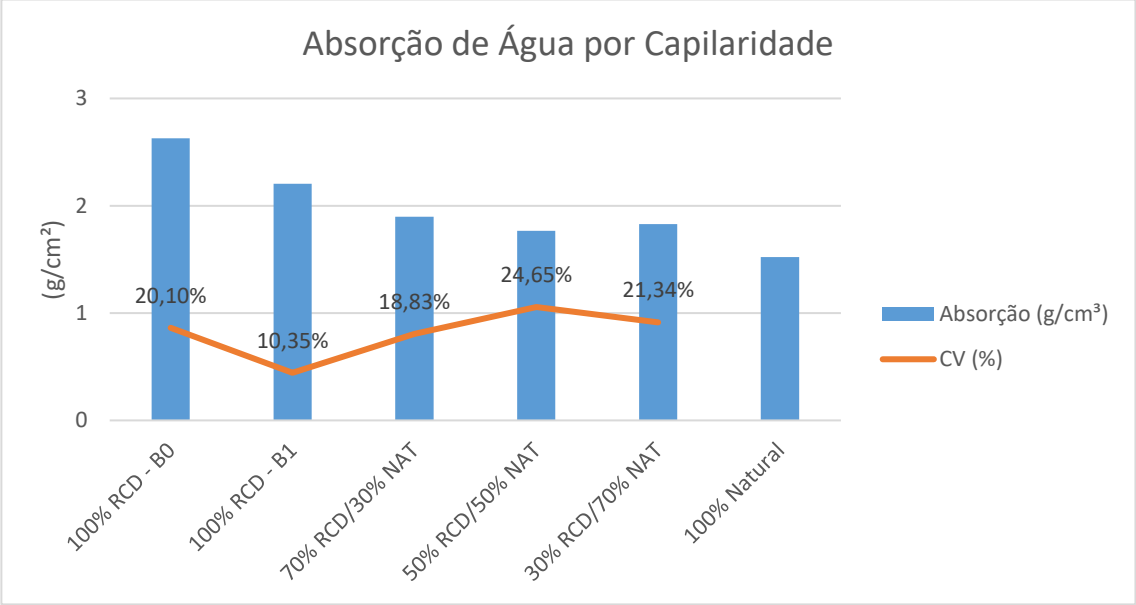
Tabela 21 - Coeficiente de variação em função da absorção de água por capilaridade

	100% RCD - B0	***100%RCD - B1***	***70% RCD/ 30% NAT***	***50% RCD/ 50% NAT***	***30% RCD/ 70% NAT***
Média (g/cm³)	2,63	2,20	1,90	1,77	1,83
Erro padrão	0,26	0,10	0,16	0,19	0,17
Desvio padrão	0,53	0,23	0,36	0,44	0,39
CV	20,10%	10,35%	18,83%	24,65%	21,34%

Fonte: Autor.

É apresentado na Figura 54 o CV para a absorção de água por capilaridade do concreto. O maior valor médio de absorção por capilaridade foi observado nas misturas que faz uso do pedrisco como agregado graúdo. Para as demais misturas de concreto, observa-se que quanto maior o teor de agregados naturais na mistura, menor é a taxa de absorção de água por capilaridade.

Figura 53 - Coeficiente de variação em função da absorção de água por capilaridade para diferentes misturas de concreto



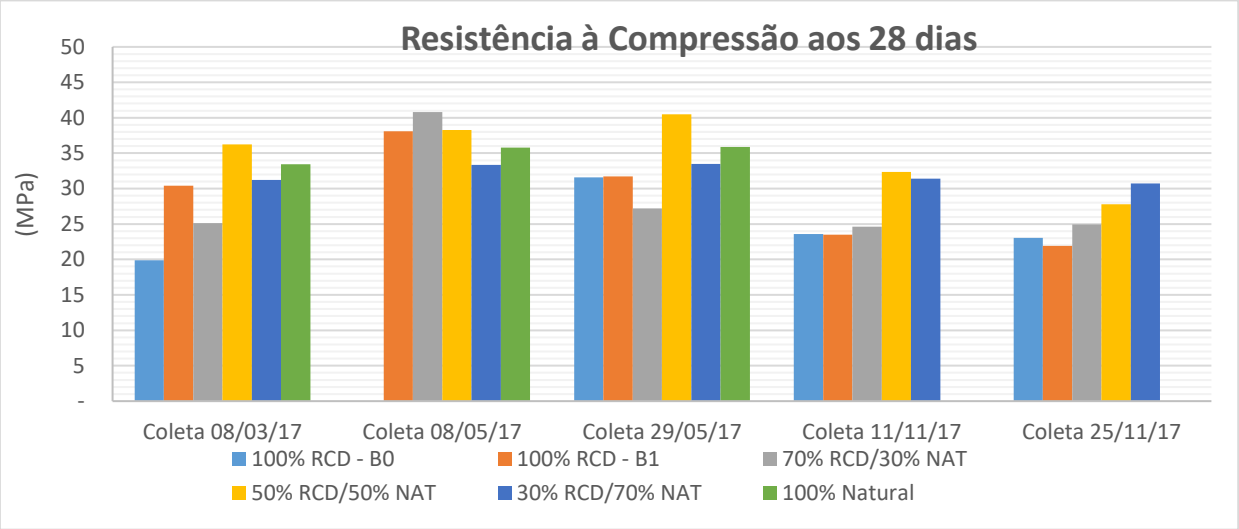
Fonte: Autor.

A elevada absorção de água da mistura de concreto que faz uso de pedrisco como agregado graúdo, foi impulsionada pela amostra Am-12G10. Nesta amostra foi observado, além do elevado teor de argamassa (64,88%) em sua composição, elevado teor de material betuminoso, próximo de 8% de sua massa.

5.3.3 Resistência à Compressão

Na Figura 55 são apresentados os valores para resistência à compressão das misturas de concreto com diferentes proporções agregados, graúdos e miúdos, reciclados de RCD. Os resultados observados para as misturas contendo 50% de agregados reciclados de RCD, são superiores ao concreto de referência, contendo 100% de agregados naturais.

Figura 54- Resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Autor.

A origem, e as respectivas datas de coleta, dos agregados reciclados utilizados nas misturas de concreto influenciaram no seu comportamento mecânico. Nota-se, na coleta de 08/05/2017, que a misturas de concreto com maior teor de agregados naturais apresentaram menor resistência quando comparado às misturas com maior proporção de agregados reciclados. Analisando as informações apresentadas na caracterização dos agregados reciclados, verifica-se também que nesta data de coleta, os agregados reciclados apresentaram maior teor de concreto em suas composições. Ainda na Figura 55, das quatro misturas de concreto fabricadas utilizando o agregado graúdo pedrisco, três misturas não atenderam a resistência de projeto (25 MPa). Para as misturas de concreto que faz uso de 100% dos agregados reciclados brita nº1, duas misturas não atenderam a resistência de projeto.

A Tabela 22 apresenta a análise estatística para os resultados dos ensaios a resistência à compressão do concreto aos 28 dias. Observa-se maior coeficiente de variação para misturas com 70% de agregado reciclado.

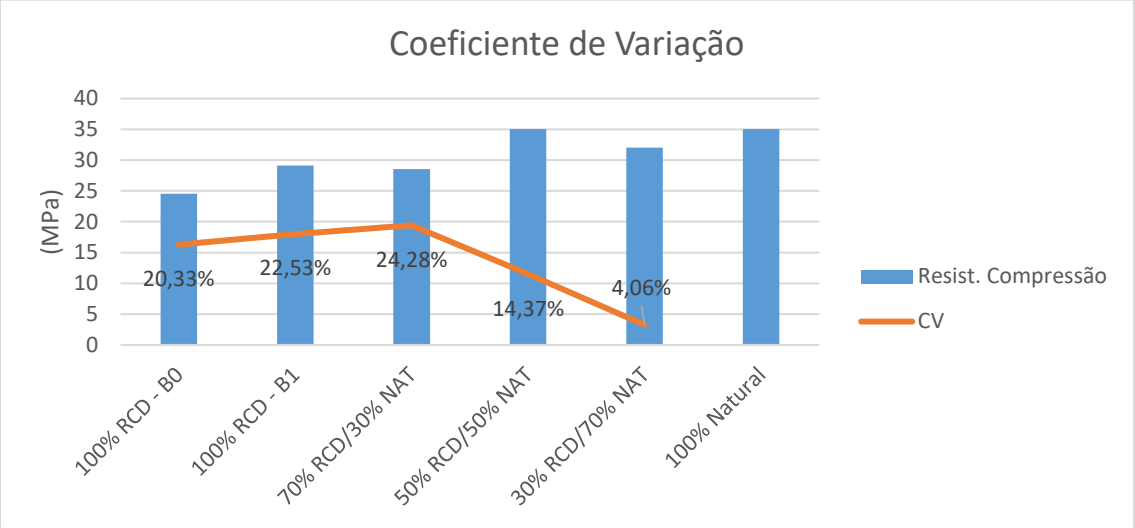
Tabela 22 - Coeficiente de variação em função da resistência à compressão

	100% RCD - B0	***100% RCD - B1***	***70% RCD/ 30% NAT***	***50% RCD/ 50% NAT***	***30% RCD/ 70% NAT***
Média	24,53	29,13	28,55	35,02	32,04
Erro padrão	2,49	2,93	3,10	2,25	0,58
Desvio padrão	4,99	6,56	6,93	5,03	1,30
CV	20,33%	22,53%	24,28%	14,37%	4,06%

Fonte: Autor.

São apresentados na Figura 56 os valores médios para a resistência à compressão do concreto aos 28 dias e o CV entre estas. Observa-se que o concreto com 50% de agregado reciclado, possui valores médios iguais ao concreto de referência.

Figura 55 - Coeficiente de variação em função da resistência à compressão do concreto aos 28 dias



Fonte: Autor.

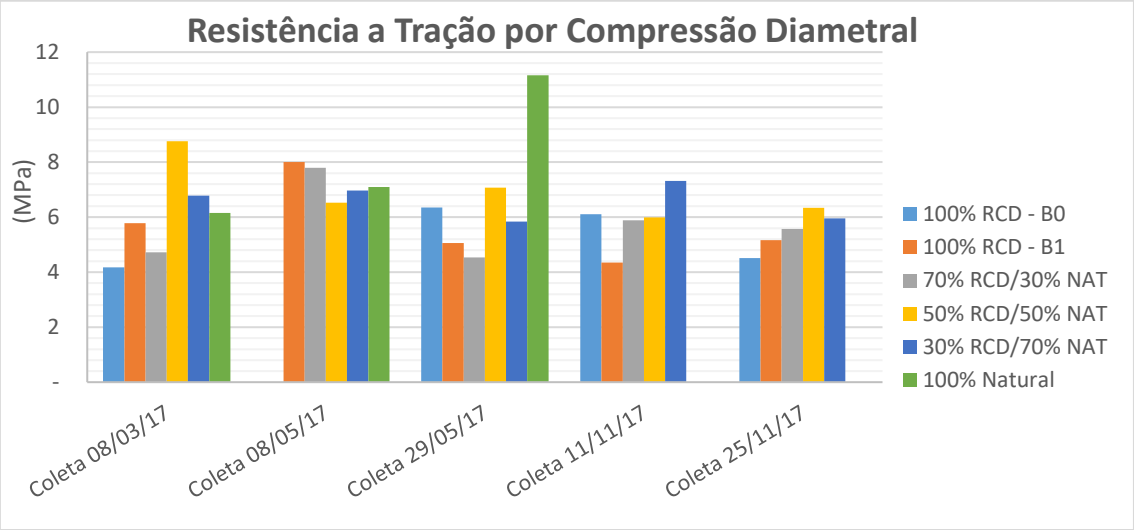
Nas Figuras E4, E5 e E6, no Apêndice E – Gráficos Correlacionando diferentes Resultados de Ensaios das Misturas de Concreto Contendo Agregados Reciclados de RCD, tentou-se buscar uma correlação entre os resultados dos ensaios de resistência a compressão, teor de material betuminoso, teor de impurezas e teor de rochas, ambos presentes nos agregados reciclados de RCD. Foi notado correlação fraca (R^2=0,2) entre resistência a compressão e teor de material betuminoso, porém fica evidente que o teor de material betuminoso afeta a resistência do concreto. O mesmo se observa para a correlação entre teor de impurezas presente na composição dos agregados reciclados e resistência a compressão.

A correlação entre o teor de rochas, presente na composição dos agregados reciclados, e o ganho de resistência do concreto, também apresentou resultado fraco (R^2=0,2). Porém, nota-se um ganho de resistência mecânica nas misturas de concreto que faz uso de agregados reciclados com maior teor de rochas.

5.3.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Figura 57 apresenta a resistência à tração por compressão diametral. As misturas de concreto apresentaram resistência variando entre 4 MPa e 9 MPa. Algumas misturas obtiveram resistência maior que o concreto de referência, produzido com 100% do agregado graúdo e miúdo natural.

Figura 56 - Resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autor.

Analisando os resultados apresentados na Figura 57, verificamos que o concreto com 50% de agregado reciclado apresentou bons resultados, quando comparado aos demais traços. A Tabela 23 apresenta a análise estatística para a resistência à tração por compressão diametral do concreto. Quanto menor o teor de agregados reciclados, menor o Coeficiente de Variação e maior a resistência à tração por compressão.

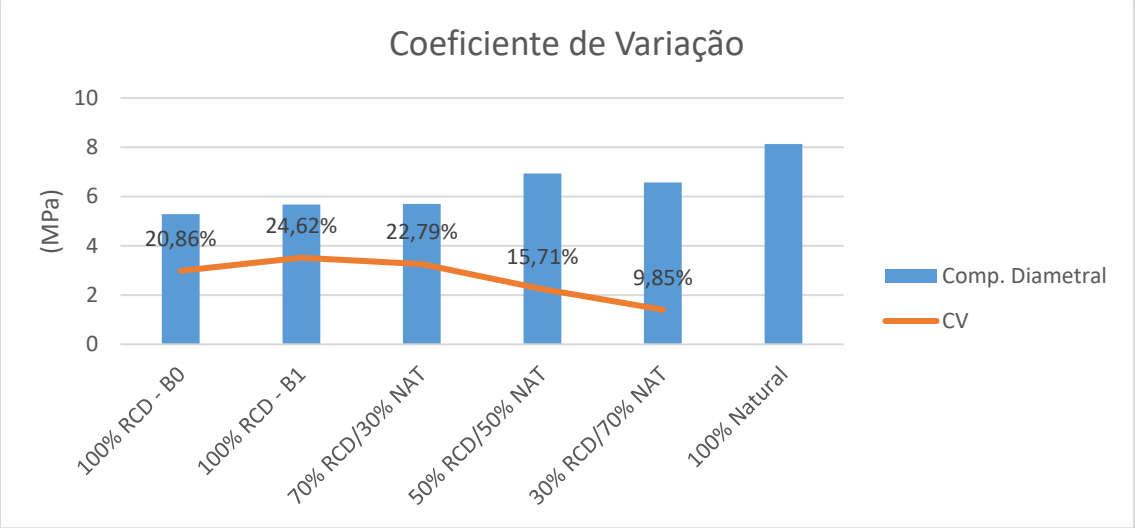
Tabela 23 - Coeficiente de variação em função da resistência à tração por compressão diametral

	100% RCD - B0	***100% RCD - B1***	***70% RCD/ 30% NAT***	***50% RCD/ 50% NAT***	***30% RCD/ 70% NAT***
Média	5,29	5,67	5,70	6,94	6,57
Erro padrão	0,55	0,62	0,58	0,49	0,29
Desvio padrão	1,10	1,40	1,30	1,09	0,65
CV	20,86%	24,62%	22,79%	15,71%	9,85%

Fonte: Autor.

São apresentados na Figura 58 os valores médios para a resistência à tração por compressão diametral do concreto após 28 dias e o CV entre estes. No ensaio de resistência à tração por compressão diametral, o teor de agregado reciclado na mistura de concreto exerce grande influência no CV.

Figura 57 - Coeficiente de variação em função da resistência à tração por compressão diametral

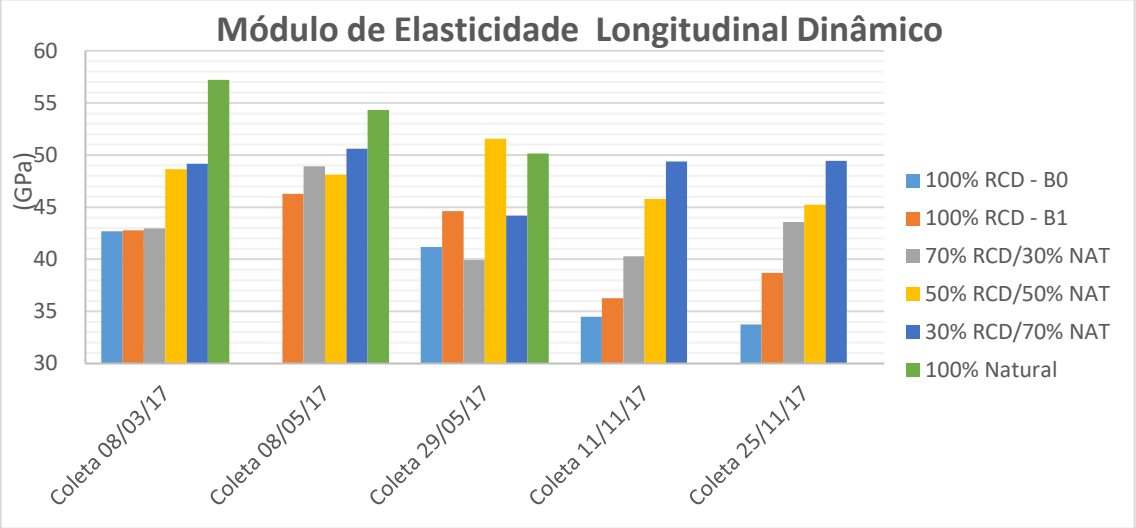


Fonte: Autor.

5.3.5 Módulo de Elasticidade Longitudinal Dinâmico

A Figura 59 apresenta o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico. As misturas de concreto com 100% agregado natural apresentaram melhor módulo, conforme já se esperava, seguido das misturas contendo 30% de agregados reciclados de RCD.

Figura 58 - Módulo de elasticidade longitudinal dinâmico



Fonte: Autor.

A Tabela 24 apresenta a análise estatística dos resultados do ensaio para determinação o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico do concreto. É observado maior coeficiente de variação para o concreto com agregado reciclado graúdo pedrisco.

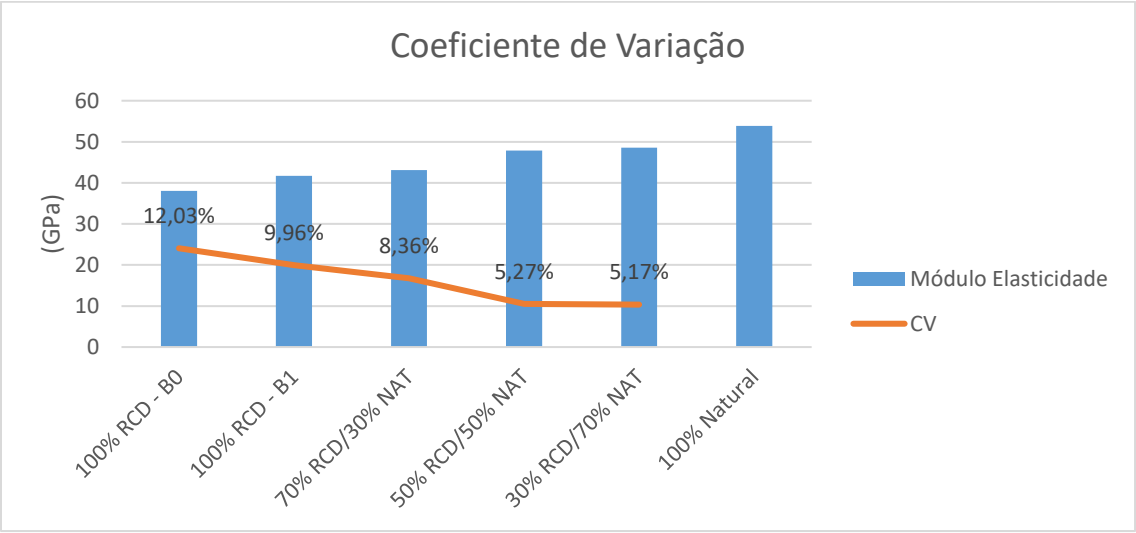
Tabela 24 - Coeficiente de variação em função do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico

	100% RCD - B0	***100% RCD - B1***	***70% RCD/ 30% NAT***	***50% RCD/ 50% NAT***	***30% RCD/ 70% NAT***
Média	38,03	41,74	43,13	47,87	48,56
Erro padrão	2,29	1,86	1,61	1,13	1,12
Desvio padrão	4,57	4,16	3,61	2,53	2,51
CV	12,03%	9,96%	8,36%	5,27%	5,17%

Fonte: Autor.

São apresentados na Figura 60 os valores médios para o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico e o CV das respectivas misturas. É observado a influência positiva do teor de agregados naturais para os resultados deste ensaio.

Figura 59 - Coeficiente de variação em função do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico



Fonte: Autor.

No Apêndice E – Gráficos Correlacionando diferentes Resultados de Ensaios das Misturas de Concreto Contendo Agregados Reciclados de RCD, pode ser observado através da Figura E7 a existência de correlação moderada (R^2=0,6) entre o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico e a resistência a compressão do concreto.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na análise realizada nas amostras dos agregados reciclados de RCD, obtidos na Unidade de Valorização de Resíduos do Grajaú S.A., foram constatados:

- Nos ensaios de caracterização, as concentrações de materiais não minerais variaram entre 0,95% e 8,85%, as concentrações de cerâmica variaram entre 0,72% e 3,96%. O teor médio de impureza encontrado foi de 3,19%.
- Ainda sobre os ensaios de caracterização fora observada elevada variabilidade, entre as respectivas coletas, nos teores de argamassa, rochas, materiais cerâmicos, e impurezas. Esta variabilidade influenciou no comportamento mecânico das misturas de concreto. Foram verificadas influência, desta variabilidade, no teor de ar incorporado, na massa específica e nas resistências mecânicas do concreto.
- Na análise granulométrica das amostras de agregados reciclados de RCD, embora grande parte das amostras não tenham atendido aos limites especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009), não fora verificada influência no comportamento mecânico e nas demais propriedades do concreto fabricados com estas amostras.
- Para o teor de material pulverulento, foram observados influência de sua variabilidade na absorção de água dos agregados reciclados, e consequentemente na perda de abatimento do concreto.
- Em relação a massa específica, os agregados reciclados apresentaram resultados inferiores ao das rochas comumente utilizadas na fabricação de concretos, porém a variabilidade entre os resultados mostrou-se baixos, o mesmo ocorre para a massa unitária.
- Na análise da absorção de água dos agregados reciclados de RCD, foram verificados CV entre 23% e 30%, demonstrando elevada variabilidade. Esta característica possui relação direta com a perda de abatimento do concreto e com o seu comportamento mecânico.

Tratando das propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de RCD, pode se afirmar:

- A perda de abatimento está relacionada a absorção do dos agregados reciclados e ao teor de material pulverulento.
- O Teor de ar incorporado ao concreto está diretamente relacionado ao teor de impurezas.
- A massa específica do concreto está relacionada a massa específica dos agregados reciclados, bem como ao teor de rochas contido em sua composição.
- A resistência à compressão do concreto está relacionada ao teor de rochas e ao teor de impurezas na composição dos agregados reciclados de RCD.

Ainda tratando das propriedades do concreto produzido com agregados reciclados:

- Trabalhando melhor o traço, realizando a pré-saturação dos agregados e utilizando aditivos superplastificantes é possível obter misturas de concreto com excelente trabalhabilidade e perdas de abatimento compatíveis às misturas realizadas com agregados naturais.
- Os concretos fabricados com agregados reciclados apresentaram resistência à compressão similar às misturas de concreto utilizando agregados naturais.
- Os concretos fabricados utilizando 50% de agregados reciclados apresentaram módulo de elasticidade longitudinal dinâmico com valores próximos, embora menores, aos concretos fabricados com 100% de agregados naturais.
- Observando os resultados obtidos é possível a fabricação de concreto estrutural com a utilização de agregados reciclados de RCD.
- Tratando exclusivamente desta pesquisa, o melhor traço encontrado foi o que utilizou 50% de agregados reciclados e 50% de agregados naturais, pois apresentou melhor ganho de resistência quando comparado ao traço de referência.

REFERÊNCIAS

_____. Ministério das Cidades. Panorama dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) no Brasil. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2005. Disponível em: <https://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/Panorama_dos_residuos_da_construcao_no_Brasil.pdf>. Acesso em 10/02/2018.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução Conama no 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, 17 de julho de 2002.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução Conama no 348, de 16 de agosto de 2004.Altera a Resolução Conama no 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Diário Oficial da União, Brasília, 17 ago. 2004.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução Conama no 448, de 18 de janeiro de 2012. Altera a Resolução Conama no 307, de 5 de julho de 2002. Diário Oficial da União, Brasília, 19 de janeiro de 2012.

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

_____. NBR 5734: Peneiras para ensaio – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

_____. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. NBR 5739: Concreto Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. NBR 6465: Determinação da abrasão Los Angeles de agregados - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

_____. NBR 7211: Agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. NBR 7218: Determinação do teor de argila em torrões nos agregados - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. NBR 7219: Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

_____. NBR 7220: Avaliação das impurezas orgânicas das areias para concreto - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

_____. NBR 7221: Ensaio de qualidade de areia - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

_____. NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. NBR 8802: Concreto – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. NBR NM 248: Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. NBR NM 26: Agregados-amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. NBR NM 27: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

_____. NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. NBR NM 45: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. NBR NM 46: agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75um, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. NBR NM 47: concreto: determinação do teor de ar em concreto fresco – método pressométrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

_____. NBR NM 51: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. NBR NM 52: Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. NBR NM 53: Agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

_____. NBR NM-ISO 3310-2: Peneiras de ensaio: Requisitos técnicos e verificação - Parte 2: Peneiras de ensaio de chapa metálica perfurada. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2007. Abrelpe, 2007. Disponível em:<http://www.abrelpe.org.br/downloads/Panorama2007.pdf>.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2010. Abrelpe, 2010. Disponível em:<http://www.abrelpe.org.br/downloads/Panorama2010.pdf>.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2011. Abrelpe, 2011. Disponível em:<http://www.abrelpe.org.br/downloads/Panorama2011.pdf>.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012. Abrelpe, 2012. Disponível em:<http://www.abrelpe.org.br/downloads/Panorama2012.pdf>.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2013. Abrelpe, 2013. Disponível em:<http://www.abrelpe.org.br/downloads/Panorama2013.pdf>.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014. Abrelpe, 2014. Disponível em:<http://www.abrelpe.org.br/downloads/Panorama2010.pdf>.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015. Abrelpe, 2015. Disponível em:<http://www.abrelpe.org.br/downloads/Panorama2010.pdf>.

ALMEIDA, S. M. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante. Belo Horizonte, 2012. 213p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.

ALVES, L. A. *et al*. Uma breve discussão do papel da gestão integrada dos resíduos de construção e demolição (RCD) para transformá-los em recursos. Revista Para Onde!?. V. 8 n.2. Rio Grande do Sul: UFRS, 2014: Disponível em: <http://seer.ufrgs.br/index.php/paraonde/issue/view/2746> Acesso em 10/04/2017.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. Mercado: Perspectivas para o Setor de Agregados. ANEPAC. São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.anepac.org.br/agregados/mercado>. Acesso em: 26 ago. 2018.

AMOSTRAGEM de Agregados e Redução Amostra (NBR NM 26: 2009 E NBR NM 27:2001), 2018. Disponível em: http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/07/passo-passo-amostragem-de-agregados-e.html. Acesso em 03 mar. 2018.

ANGULO, S. C. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos. São Paulo, 2005. 167p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica de São Paulo. Departamento de Engenharia e Construção Civil.

ANGULO, S. C. Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. São Paulo, 2000. 155p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica de São Paulo. Departamento de Engenharia e Construção Civil.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto com agregados reciclados. In: ISAIA, G. C. (ed.). Concreto: Ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, 2011. cap. 47, p. 1731. 1712 p.

BAUER, E.; PEREIRA, A. H. A. F.; LEAL, A. C. F. S. Valores do módulo de elasticidade de concretos comerciais da região do distrito federal. Juiz de Fora, 2012. XIV encontro nacional de tecnologia do ambiente construído.

BAUER, L. A. F. (Coord.). Materiais de construção, 1. Revisão técnica de João Fernando Dias. 5. ed. revisada. Rio de Janeiro, LTC, 2016. 488p.

BLUMENSCHEIN, R. N. A sustentabilidade na cadeia produtiva da indústria da construção. Brasília, 2004. 263p. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília. Centro de Desenvolvimento Sustentável.

BOEHME, L. *et al*. Assessment of water reducing admixture in concrete with recycled aggregates. ResearchGate. jun. 2013.

BUTTLER, A. M. Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. São Paulo, 2003. 199p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas.

CABRAL, A. E. B. Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD. São Carlos, 2007. 280p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.

CASTRO, C. X. Gestão de resíduos na construção civil. Belo Horizonte, 2012. 54p. Monografia (Especialização). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia de Materiais de Construção.

EDER, E. S. Estudo da variabilidade de agregados reciclados provenientes da UVR Construção Civil Grajaú-SP. São Paulo, 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade São Judas Tadeu.

FAGURY, S. C.; GRANDE, F. Mazzeo. Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) - aspectos gerais da gestão pública de São Carlos/SP. Exacta, São Paulo, vol. 5, n. 1, 2007, pp. 35-45. Disponível em: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81050104. Acesso em: 18/02/2018.

FARIA, B. G; MANCILHA. J. C. M. Estudo da variabilidade de agregado de reciclado de construção civil proveniente da central de tratamento de resíduos da construção civil Grajaú-SP. São Paulo, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade São Judas Tadeus.

FERNANDEZ, J. A. B. Resíduos Sólidos da Construção Civil, Brasília, 2012. Relatório de Pesquisa. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, IPEA.

FERREIRA, F. (Org.). Distribuição Normal. Estatística Geral. São Paulo, 2009. 18 p. Disponível em: <http://estatisticageral.blogspot.com/2009/05/distribuicao-normal.html>. Acesso em: 1 set. 2018.

HERRMANN, H. Análise da cadeia produtiva de agregados minerais para obras de construção civil e de infraestrutura, Brasília, 2012. Relatório Técnico. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, ABDI.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da Construção. In: Seminário de Resíduos Sólidos e Domiciliares, São Paulo, 2016. Resíduos Sólidos e Domiciliares. CETESB.

JOSEPH, M. *et al*. Water absorption variability of recycled concrete aggregates. Magazine of concrete research, 2015.

JUAN, M. S. Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estrutural. Madrid, 2004. 514p. Tese (Doutorado). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canale y Puertos. Departamento de Ingeniería Civil.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Influence of attached mortar contente on the properties of recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials, 2009.

LEITE, B. M. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Porto Alegre, 2001. 290p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LEVINE, D.M.; BERENSON, M.L.; STEPHAN, D. Estatística: teoria e aplicações. Usando Microsoft Excel em português. Tradução de Teresa Cristina Padilha de Souza. Sergio da Costa Cortes (ver. Técnica). Rio de Janeiro: LTC, 2000.

LEVY, S. M. Materiais reciclados na construção civil. In: ISAIA, G. C. (Org.). Materiais de Construção Civil: e princípios de ciência e engenharia de materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, 2010. cap. 52, p. 1689. 1773 p.

MARANHÃO, F. L. The Production Variability of Recycled Aggregate in a Large Plant: Case Study. Elsevier. Fev. 2016.

MARTINS, A. S. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante. Belo Horizonte, 2012. 213p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. Tradução de Paulo Roberto do Lago Helene (Coord.) *et al*. São Paulo: Pini, 1994.

MIRANDA, L. F. R. Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos Classe A da construção civil. São Paulo, 2005. 441p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana.

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

NEVILLE, A. M. Tecnologia do concreto. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PADOVAN, R. G. Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto. São Leopoldo, 2013. 155p. Dissertação (Mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

ROMANO, R. C. O.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Propriedades do concreto no estado fresco. In: ISAIA, G. C. (ed.). Concreto: Ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, 2011. cap. 13, p. 453. 1712 p.

SCHNEIDER, Dan Mocher. Deposições Irregulares de Resíduos da Construção Civil na Cidade de São Paulo. São Paulo, 2003. 131p. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. Faculdade de Saúde Pública.

SHEHATA, L. C. D. Propriedades elasto-plásticas do concreto. In: ISAIA, G. C. (ed.). Concreto: Ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, v. 1, 2011. cap. 18, p. 653. 1712 p.

STANDARD TEST METHOD FOR PULSE VELOCITY TROUGH CONCRETE. Designation: C597 - 09. ASTM International, 2000. 4 p.

TENÓRIO, J. J. L. Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção demolição visando aplicações estruturais. Maceió, 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia.

WIENS, I. K.; HAMADA, J. Gerenciamento de resíduos da construção civil – uma introdução à legislação e implantação. In. Simpósio de Engenharia de Produção, 13., 2006, Bauru. Empreendedorismo e Sustentabilidade nos Sistemas Produtivos. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2006. p. 374-384.

APÊNDICE A – Nomenclatura dos Agregados Reciclados de RCD

Tabela A 1 - Nomenclatura adotada para os agregados reciclados de RCD.

Amostra	Granulometria	Data da Coleta	Fonte
Am-01AR	# 0 - 4,8	Dez./14	L.A. Falcão Bauer, 2014
Am-02AR	# 0 - 4,8	Mar./17	Autor
Am-03AR	# 0 - 4,8	Mai./17	Autor
Am-04AR	# 0 - 4,8	Mai./17	Autor
Am-05AR	# 0 - 4,8	Nov./17	Autor
Am-06AR	# 0 - 4,8	Nov./17	Autor
Am-01G10	# 0 - 10 (Graúdo)	Dez./14	L.A. Falcão Bauer, 2014
Am-02G10	# 0 - 10 (Graúdo)	Jun./15	Eder, 2015
Am-03G10	# 0 - 10 (Graúdo)	Jul./15	Faria *et al.*, 2015
Am-04G10	# 0 - 10 (Graúdo)	Jul./15	Eder, 2015
Am-05G10	# 0 - 10 (Graúdo)	Jul./15	Faria *et al.*, 2015
Am-06G10	# 0 - 10 (Graúdo)	Jul./15	Eder, 2015
Am-07G10	# 0 - 10 (Graúdo)	Ago./15	Faria *et al.*, 2015
Am-08G10	# 0 - 10 (Graúdo)	Set./15	Faria *et al.*, 2015
Am-09G10	# 0 - 10 (Graúdo)	Mar./17	Autor
Am-10G10	# 0 - 10 (Graúdo)	Mai./17	Autor
Am-11G10	# 0 - 10 (Graúdo)	Mai./17	Autor
Am- 12G10	# 0 - 10 (Graúdo)	Nov./17	Autor
Am- 13G10	# 0 - 10 (Graúdo)	Nov./17	Autor
Am-01G20	# 10 - 20	Dez./14	L.A. Falcão Bauer, 2014
Am-02G20	# 10 - 20	Jun./15	Eder, 2015
Am-03G20	# 10 - 20	Jul./15	Faria *et al.*, 2015
Am-04G20	# 10 - 20	Jul./15	Eder, 2015
Am-05G20	# 10 - 20	Jul./15	Faria *et al.*, 2015
Am-06G20	# 10 - 20	Jul./15	Eder, 2015
Am-07G20	# 10 - 20	Ago./15	Faria *et al.*, 2015
Am-08G20	# 10 - 20	Set./15	Faria *et al.*, 2015
Am-09G20	# 10 - 20	Mar./17	Autor
Am-10G20	# 10 - 20	Mai./17	Autor
Am-11G20	# 10 - 20	Nov./17	Autor
Am-12G20	# 10 - 20	Nov./17	Autor
Am-01G40	# 20 - 40	Dez./14	L.A. Falcão Bauer, 2014
Am-02G40	# 20 - 40	Jun./15	Eder, 2015
Am-03G40	# 20 - 40	Jul./15	Faria *et al.*, 2015
Am-04G40	# 20 - 40	Jul./15	Eder, 2015
Am-05G40	# 20 - 40	Jul./15	Faria *et al.*, 2015
Am-06G40	# 20 - 40	Jul./15	Eder, 2015
Am-07G40	# 20 - 40	Ago./15	Faria *et al.*, 2015
Am-08G40	# 20 - 40	Set./15	Faria *et al.*, 2015
Am-09G40	# 20 - 40	Mai./17	Autor

Fonte: Autor.

APÊNDICE B – Composição Gravimétrica dos Agregados Reciclados de RCD

Quadro B 1- Composição gravimétrica dos agregados reciclados de RCD

Amostras	Argamassa	Rocha	Cerâmica branca	Cerâmica vermelha	Vidros	Betume	Aço	Gesso	Origem orgânica
Am-09G10	**43,14%**	**53,55%**	**0,49%**	**0,22%**	**0,00%**	**2,50%**	**0,08%**	**0,00%**	**0,00%**
Am-10G10	**82,76%**	**13,51%**	**0,22%**	**0,89%**	**0,09%**	**1,17%**	**0,00%**	**0,06%**	**1,30%**
Am-11G10	**33,30%**	**63,98%**	**0,52%**	**0,53%**	**0,34%**	**1,19%**	**0,00%**	**0,09%**	**0,06%**
Am-12G10	**64,88%**	**24,60%**	**1,73%**	**0,86%**	**0,00%**	**7,91%**	**0,00%**	**0,01%**	**0,00%**
Am-13G10	**54,38%**	**35,90%**	**1,98%**	**1,50%**	**0,01%**	**6,22%**	**0,00%**	**0,01%**	**0,00%**
Am-09G20	**40,35%**	**55,52%**	**1,07%**	**1,38%**	**0,00%**	**1,44%**	**0,18%**	**0,05%**	**0,00%**
Am-10G20	**29,56%**	**69,07%**	**0,22%**	**0,20%**	**0,00%**	**0,95%**	**0,00%**	**0,00%**	**0,00%**
Am-11G20	**52,46%**	**41,98%**	**1,71%**	**0,94%**	**0,00%**	**2,29%**	**0,00%**	**0,05%**	**0,00%**
Am-12G20	**46,08%**	**41,11%**	**2,49%**	**1,47%**	**4,22%**	**4,50%**	**0,00%**	**0,00%**	**0,13%**
Am-09G40	**72,75%**	**21,92%**	**1,04%**	**0,91%**	**0,31%**	**2,81%**	**0,21%**	**0,05%**	**0,00%**

Fonte: Autor.

APÊNDICE C – Análise Granulométrica dos Agregados Reciclados de RCD

Quadro C 1 - Análise granulométrica do agregado graúdo (# 0,0 - 10,0 (mm))

Peneira (mm)	Porcentagem que Passa (%)													Limites Utilizável	
	Am-01G10	Am-02G10	Am-03G10	Am-04G10	Am-05G10	Am-06G10	Am-07G10	Am-08G10	Am-09G10	Am-10G10	Am-11G10	Am-12G10	Am-13G10	Inferior Utilizável	Superior Utilizável
#12,5mm	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,0
#9,5mm	98,0	98,0	97,8	97,5	97,9	97,7	98,4	99,5	89,3	84,7	82,1	95,3	85,9	98,0	85,0
#6,3mm	81,0	98,0	97,8	97,5	97,9	97,7	98,4	99,5	89,3	84,7	82,1	95,3	85,9	60,0	35,0
#4,75mm	71,0	72,7	70,5	66,1	70,9	70,8	74,0	72,7	5,1	12,7	0,8	16,2	5,5	20,0	0,0
#2,36mm	50,0	54,2	52,2	57,7	53,6	64,0	53,3	53,2	0,4	1,4	0,5	5,5	1,2	5,0	0,0
#1,18mm	33,0	40,8	39,8	52,6	40,8	58,8	39,2	39,1	0,2	0,8	0,5	3,6	0,9	5,0	0,0
#0,6mm	21,0	28,5	28,8	48,8	29,2	54,2	28,0	27,8	0,2	0,7	0,5	2,7	0,7	5,0	0,0
#0,3mm	11,0	17,4	18,3	45,7	17,9	49,4	17,1	17,0	0,2	0,6	0,5	1,9	0,6	5,0	0,0
#0,15mm	5,0	7,9	8,8	43,4	8,6	45,7	7,8	7,7	0,2	0,4	0,3	1,1	0,3	5,0	0,0

Fonte: Autor.

Quadro C 2 - Análise granulométrica do agregado graúdo (# 10,0 - 20,0 (mm))

Peneira (mm)	Massa que Passa (%)												Limite Utilizável	
	Am-01G20	Am-02G20	Am-03G20	Am-04G20	Am-05G20	Am-06G20	Am-07G20	Am-08G20	Am-09G20	Am-10G20	Am-11G20	Am-12G20	Inferior Utilizável	Superior Utilizável
#25,0mm	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	100	95
#19,0mm	97,0	96,0	98,3	93,0	94,8	98,0	96,0	97,5	100,0	89,5	81,5	86,4	98	85
#12,5mm	27,0	26,0	46,0	12,0	28,3	20,0	30,4	34,5	100,0	89,5	81,5	86,4	60	35
#9,5mm	4,0	7,0	21,3	3,0	12,2	4,0	13,3	13,4	30,2	3,2	6,4	2,6	20	0
#6,3mm	3,0	7,0	21,3	3,0	12,2	4,0	13,3	13,4	30,2	3,2	6,4	2,6	8	0
#4,75mm	2,0	2,0	8,9	2,0	1,9	1,0	2,5	1,8	4,8	0,1	0,7	0,5	5	0
#2,36mm	2,0	2,0	8,9	2,0	1,9	1,0	2,5	1,8	1,3	0,1	0,5	0,3	5	0
#1,18mm	2,0	2,0	8,9	2,0	1,9	1,0	2,5	1,8	1,0	0,1	0,5	0,3	5	0
#0,6mm	2,0	2,0	8,9	2,0	1,9	1,0	2,5	1,8	1,0	0,1	0,4	0,3	5	0
#0,3mm	2,0	2,0	8,9	2,0	1,9	1,0	2,5	1,8	0,8	0,1	0,4	0,2	5	0
#0,15mm	2,0	2,0	8,9	2,0	1,9	1,0	2,5	1,8	0,5	0,0	0,2	0,2	5	0
Fundo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0

Fonte: Autor.

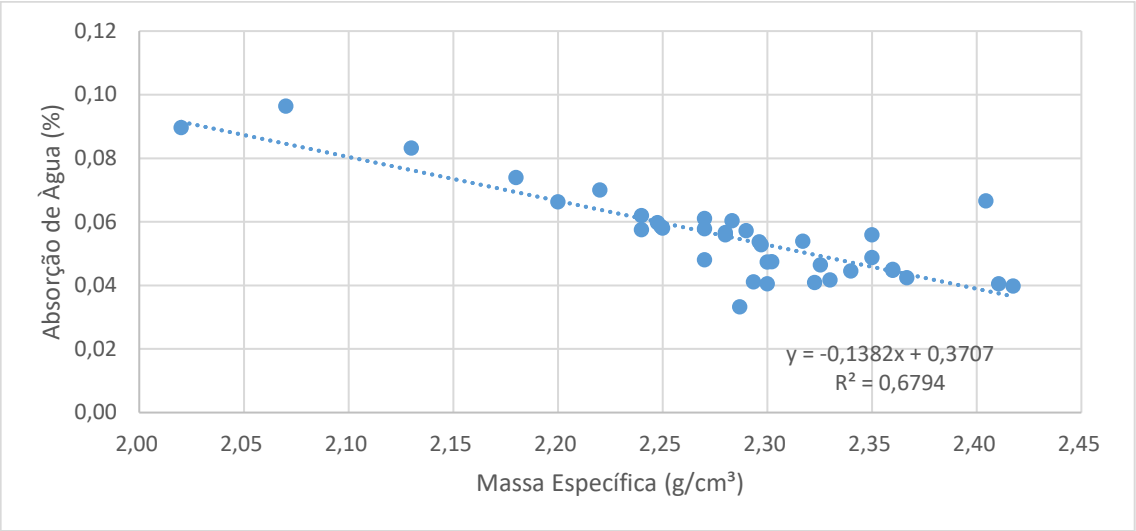
Quadro C 3 - Análise granulométrica do agregado graúdo (# 20,0 - 40,0 (mm))

Peneira (mm)	Massa que Passa (%)									Limite Utilizável	
	Am-01G40	Am-02G40	Am-03G40	Am-04G40	Am-05G40	Am-06G40	Am-07G40	Am-08G40	Am-09G40	Inferior Utilizável	Superior Utilizável
#50,0mm	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,0
#37,5mm	99,0	99,0	99,7	99,0	99,4	100,0	100,0	99,6	100,0	95,0	70,0
#31,5mm	89,0	90,0	91,4	82,0	86,9	91,0	97,7	98,0	100,0	25,0	0,0
#25,0mm	59,0	44,0	57,7	41,0	57,8	45,0	79,7	83,5	99,5	13,0	0,0
#19,0mm	19,0	12,0	22,8	9,0	23,6	10,0	29,7	37,3	75,0	5,0	0,0
#12,5mm	3,0	12,0	22,8	9,0	23,6	10,0	29,7	37,3	75,0	5,0	0,0
#9,5mm	2,0	1,0	3,8	1,0	0,9	3,0	1,1	3,5	0,7	5,0	0,0
#6,3mm	1,0	1,0	3,8	1,0	0,9	3,0	1,1	3,5	0,7	5,0	0,0
#4,75mm	1,0	1,0	3,2	1,0	0,6	3,0	0,9	3,0	0,5	5,0	0,0
#2,36mm	1,0	1,0	3,2	1,0	0,6	3,0	0,9	3,0	0,5	5,0	0,0
#1,18mm	1,0	1,0	3,2	1,0	0,6	3,0	0,9	3,0	0,5	5,0	0,0
#0,6mm	1,0	1,0	3,2	1,0	0,6	3,0	0,9	3,0	0,4	5,0	0,0
#0,3mm	1,0	1,0	3,2	1,0	0,6	3,0	0,9	3,0	0,3	5,0	0,0
#0,15mm	1,0	1,0	3,2	1,0	0,6	3,0	0,9	3,0	0,1	5,0	0,0

Fonte: Autor.

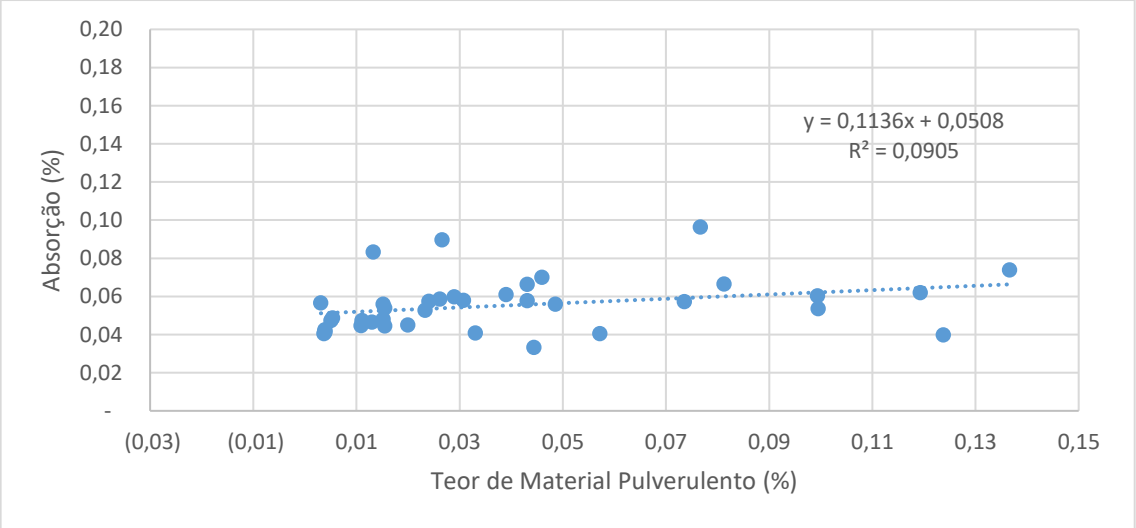
APÊNDICE D –Gráficos Correlacionando diferentes Resultados de Ensaios dos Agregados Reciclados de RCD

Figura D 1 - Correlação entre a absorção de água e a massa específica



Fonte: Autor.

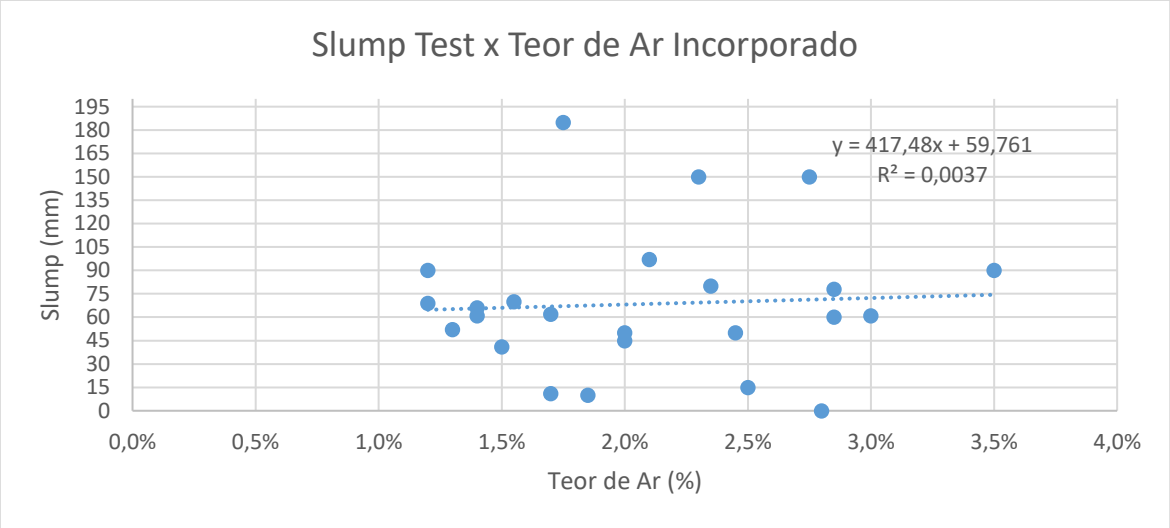
Figura D 2 - Correlação entre absorção de água e teor de material pulverulento



Fonte: Autor.

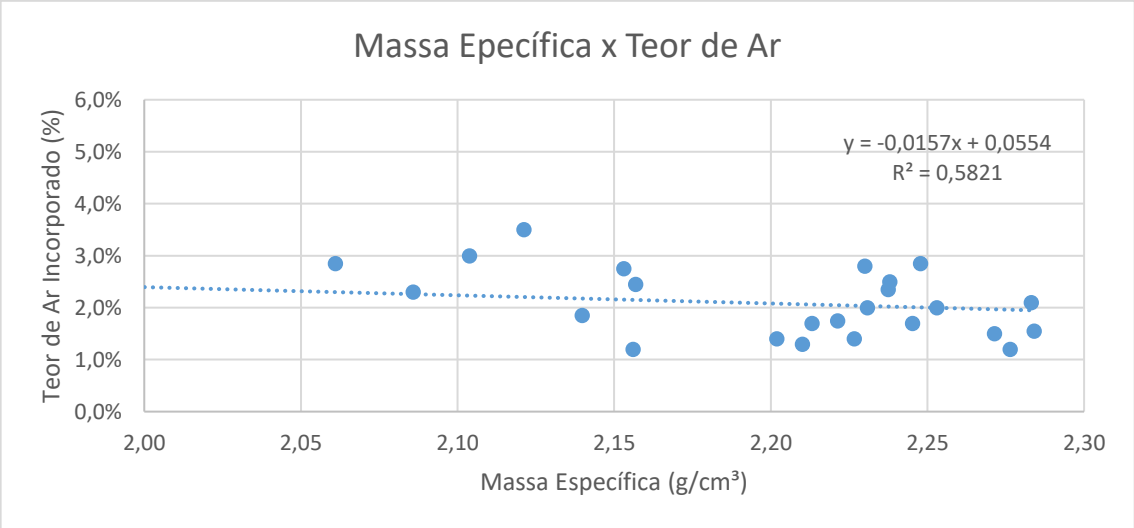
APÊNDICE E –Gráficos Correlacionando diferentes Resultados de Ensaios das Misturas de Concreto Contendo Agregados Reciclados de RCD

Figura E 1 - Correlação entre o slump test e o teor de ar incorporado



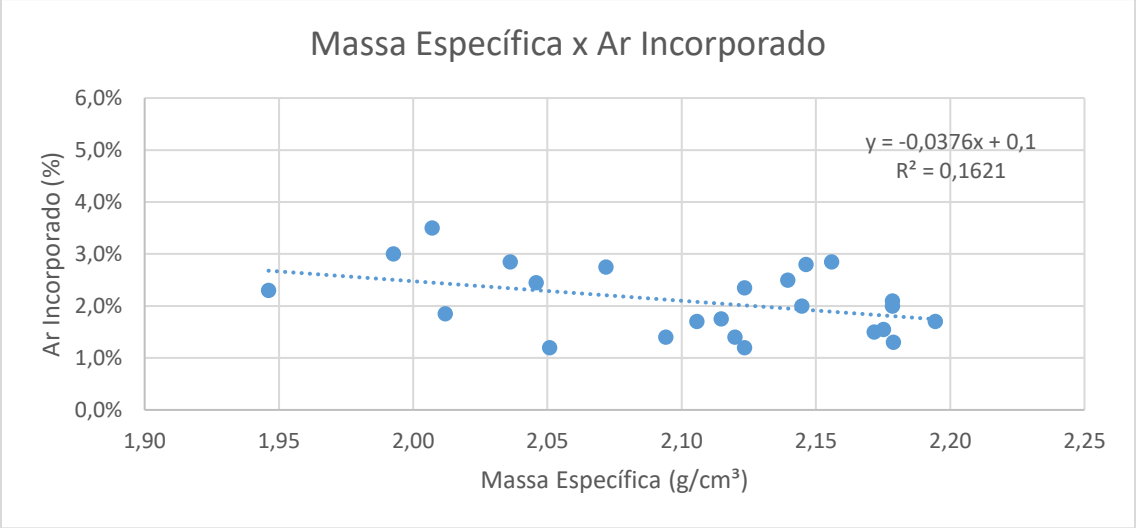
Fonte: Autor.

Figura E 2 - Correlação entre teor de ar incorporado e massa específica do concreto no estado fresco



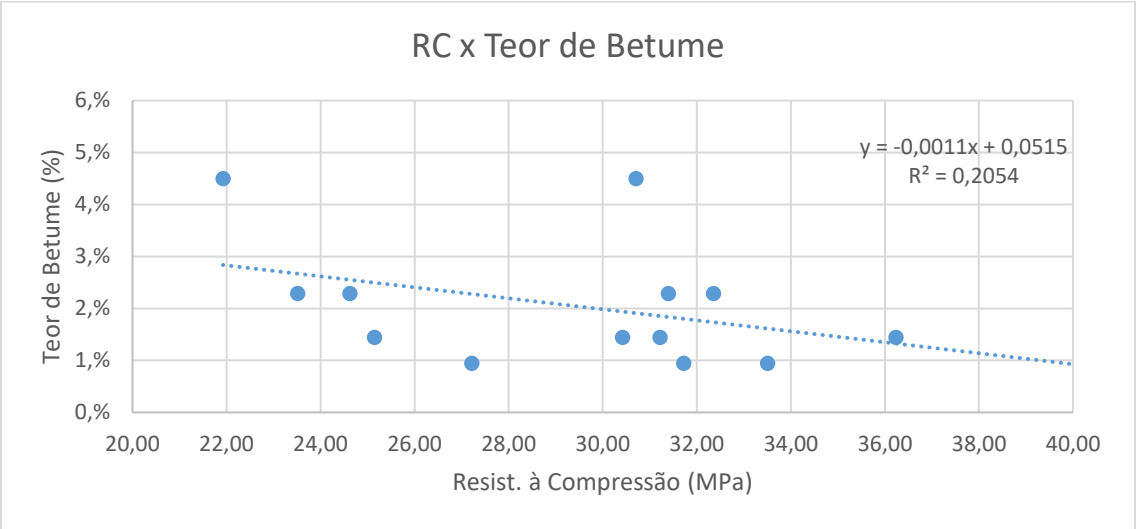
Fonte: Autor.

Figura E 3 - Correlação entre a massa específica do concreto no estado endurecido e o teor de ar incorporado



Fonte: Autor.

Figura E 4 - Correlação entre a resistência à compressão e o teor de material betuminoso presente nos agregados reciclados



Fonte: Autor.

Figura E 5 - Correlação entre a resistência à compressão e o teor de impurezas presente nos agregados reciclados

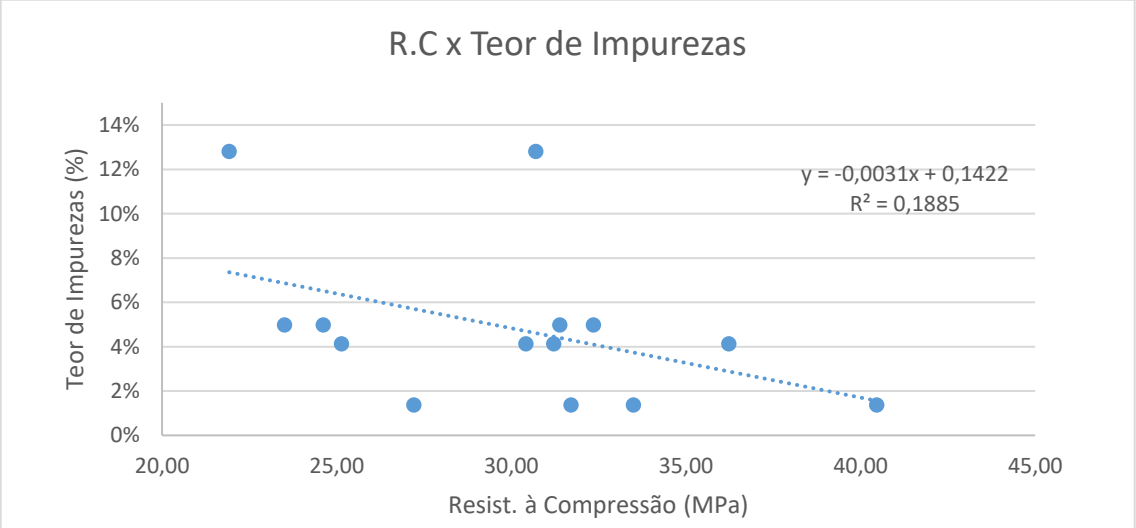
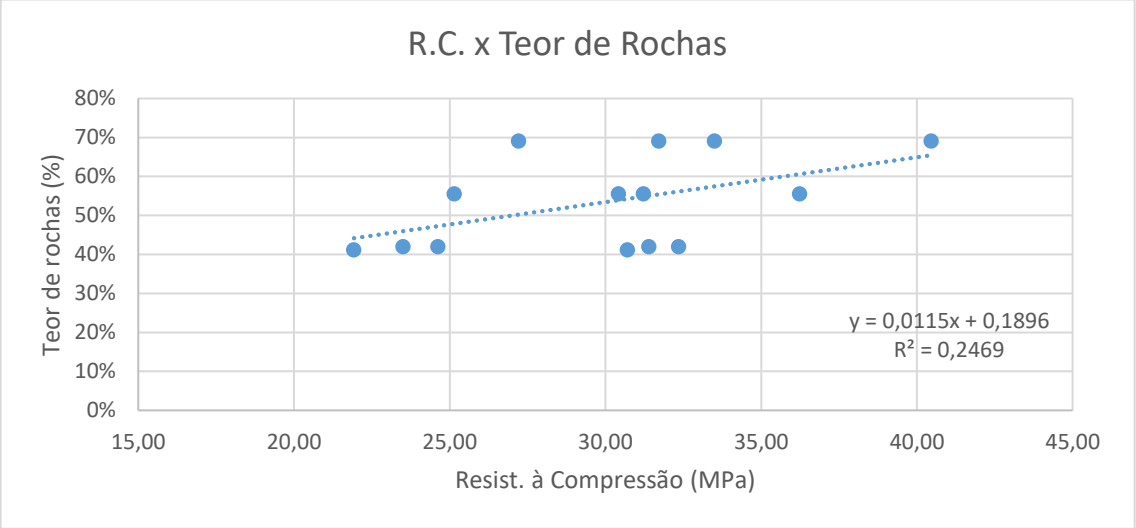
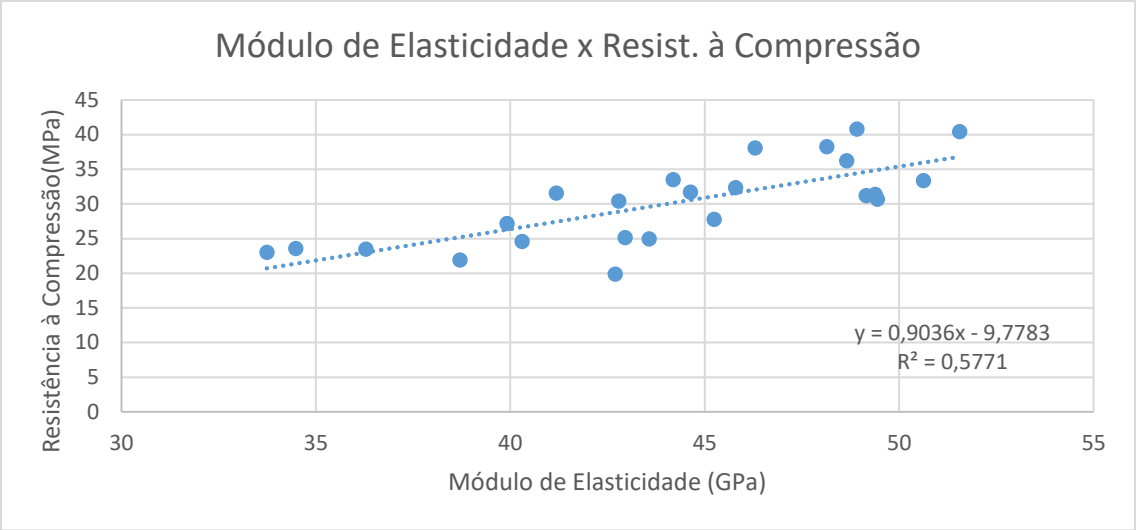


Figura E 6 - Correlação entre a resistência à compressão e o teor de rochas presente nos agregados reciclados



Fonte: Autor.

Figura E 7 - Correlação entre o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico e a resistência à compressão



Fonte: Autor.

APÊNDICE F – Resultados da Análise de Variância dos Ensaios Realizados nos Agregados Reciclados

Tabela F 1 – Resumo da análise de variância do ensaio de caracterização dos agregados reciclados de RCD.

Grupo	*Contagem*	*Soma*	*Média*	*Variância*
Argamassa	10	5,20	0,52	0,03
Rocha	10	4,21	0,42	0,03
Cerâmica branca	10	0,11	0,01	0,00
Cerâmica vermelha	10	0,09	0,01	0,00
Vidros	10	0,05	0,00	0,00
Betume	10	0,31	0,03	0,00
Aço	10	0,00	0,00	0,00
Gesso	10	0,00	0,00	0,00
Origem orgânica	10	0,01	0,00	0,00

Fonte: Autor.

Tabela F 2 – Análise de variância do ensaio de caracterização dos agregados reciclados de RCD

Fonte da variação	*SQ*	*gl*	*MQ*	*F*	*valor-P*	*F crítico*
Entre grupos	3,38	8	0,42	58,80	1,48E-30	2,05
Dentro dos grupos	0,58	81	0,01			
Total	3,96	89				

Fonte: Autor.

Tabela F 3 – Resumo da análise de variância do ensaio de análise granulométrica da areia reciclada de RCD

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
#9,5mm	6	600,00%	100,00%	0,00%
#6,3mm	6	597,00%	99,50%	0,02%
#4,75mm	6	586,06%	97,68%	0,07%
#2,36mm	6	487,62%	81,27%	0,18%
#1,18mm	6	373,17%	62,20%	0,24%
#0,6mm	6	273,21%	45,53%	0,31%
#0,3mm	6	161,13%	26,86%	0,24%
#0,15mm	6	60,68%	10,11%	0,05%

Fonte: Autor.

Tabela F 4 – Análise de variância do ensaio de análise granulométrica da areia reciclada de RCD

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,16	7	0,73	529,86	2,36E-37	2,24
Dentro dos grupos	0,05	40	0,00			
Total	5,21	47				

Fonte: Autor.

Tabela F 5 – Resumo da análise de variância do ensaio de análise granulométrica do agregado graúdo pedrisco reciclado de RCD

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
#12,5mm	13	1300	100	0
#9,5mm	13	1222	94,00	37,84
#6,3mm	13	1205,03	92,69	48,767
#4,75mm	13	609,00	46,84	1034,84
#2,36mm	13	447,00	34,38	731,711
#1,18mm	13	350,20	26,93	490,78
#0,6mm	13	271,13	20,85	347,47
#0,3mm	13	197,59	15,19	266,09
#0,15mm	13	136,96	10,53	240,77

Fonte: Autor.

Tabela F 6 – Análise de variância do ensaio de análise granulométrica do agregado graúdo pedrisco reciclado de RCD

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	138504	8	17313,03	48,71	2,092E-32	2,02
Dentro dos grupos	38379,7	108	355,36			
Total	176884	116				

Tabela F 7 – Resumo da análise de variância do ensaio de análise granulométrica do agregado graúdo brita nº1 reciclado de RCD

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
#25,0mm	12	1199,85	99,98	0,00
#19,0mm	12	1127,94	93,99	30,56
#12,5mm	12	581,52	48,462	991,79
#9,5mm	12	120,52	10,04	73,47
#6,3mm	12	119,52	9,96	74,65
#4,75mm	12	28,16	2,34	5,73
#2,36mm	12	24,23	2,014	5,27
#1,18mm	12	23,88	1,99	5,33
#0,6mm	12	23,75	1,97	5,36
#0,3mm	12	23,52	1,96	5,42
#0,15mm	12	22,92	1,91	5,57

Fonte: Autor.

Tabela F 8 – Análise de variância do ensaio de análise granulométrica do agregado graúdo brita nº1 reciclado de RCD

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	174579,9	10	17457,99	159,60	9,90924E-65	1,91
Dentro dos grupos	13235,18	121	109,38			
Total	187815,18	131				

Fonte: Autor.

Tabela F 9 – Resumo da análise de variância do ensaio de análise granulométrica do agregado graúdo brita nº2 reciclado de RCD

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
#50,0mm	9	900,00	100,00	0,00
#37,5mm	9	895,60	99,51	0,19
#31,5mm	9	825,90	91,77	34,01
#25,0mm	9	567,26	63,03	409,17
#19,0mm	9	238,29	26,48	418,07
#12,5mm	9	222,29	24,70	476,43
#9,5mm	9	17,02	1,89	1,49
#6,3mm	9	16,02	1,78	1,57
#4,75mm	9	14,14	1,57	1,25
#2,36mm	9	14,14	1,57	1,25
#1,18mm	9	14,14	1,57	1,25
#0,6mm	9	14,00	1,56	1,28
#0,3mm	9	13,84	1,54	1,33
#0,15mm	9	13,72	1,52	1,37

Fonte: Autor.

Tabela F 10 – Análise de variância do ensaio de análise granulométrica do agregado graúdo brita nº2 reciclado de RCD

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	190074,39	13	14621,11	151,78	1,1101E-64	1,81
Dentro dos grupos	10789,29	112	96,33			
Total	200863,68	125				

Fonte: Autor.

Tabela F 11 – Resumo da análise de variância do ensaio de teor de materiais pulverulentos dos agregados reciclados de RCD

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
# 0,0-4,8	5	0,46	0,09	0,00
# 0,0-10,0	13	0,70	0,05	0,00
# 10,0-20,0	13	0,18	0,01	0,00
# 20,0-40,0	9	0,18	0,02	0,00

Fonte: Autor.

Tabela F 12 – Análise de variância do ensaio de teor de materiais pulverulentos dos agregados reciclados de RCD

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,029	3	0,01	15,19	1,51E-06	2,87
Dentro dos grupos	0,023	36	0,00			
Total	0,051	39				

Fonte: Autor.

Tabela F 13 – Resumo da análise de variância do ensaio de massa unitária dos agregados reciclados de RCD

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
# 0,0-4,8	6	8,0	1,3	1,4%
# 0,0-10,0	13	17,1	1,3	0,5%
# 10,0-20,0	12	14,7	1,2	0,5%
# 20,0-40,0	8	9,6	1,2	1,0%

Fonte: Autor.

Tabela F 14 – Análise de variância do ensaio de massa unitária dos agregados reciclados de RCD

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,112	3	0,03	5,38	0,00	2,87
Dentro dos grupos	0,24	35	0,00			
Total	0,35	38				

Fonte: Autor.

Tabela F 15 – Resumo da análise de variância do ensaio de massa específica dos agregados reciclados de RCD

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
# 0,0-4,8	6	14,41	2,40	0,01
# 0,0-10,0	13	29,10	2,23	0,00
# 10,0-20,0	12	27,77	2,31	0,00
# 20,0-40,0	8	18,03	2,25	0,00

Fonte: Autor.

Tabela F 16 –Análise de variância do ensaio de massa específica dos agregados reciclados de RCD

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,13	3	0,04	6,52	0,00	2,87
Dentro dos grupos	0,23	35	0,01			
Total	0,35	38				

Fonte: Autor.

Tabela F 17 – Resumo da análise de variância do ensaio de absorção de água dos agregados reciclados de RCD

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
# 0,0-4,8	5	0,26	0,05	0,00
# 0,0-10,0	13	0,79	0,06	0,00
# 10,0-20,0	12	0,61	0,05	0,00
# 20,0-40,0	8	0,44	0,06	0,00

Fonte: Autor.

Tabela F 18 – Análise de variância do ensaio de absorção de água dos agregados reciclados de RCD

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,00	3	0,00	1,27	0,29	2,88
Dentro dos grupos	0,00	34	0,00			
Total	0,01	37				

Fonte: Autor.

APÊNDICE G – Resultados da Análise de Variância dos Ensaios Realizados nos Concretos fabricados com Agregados Reciclados

Tabela G 1 – Resumo da análise de variância do ensaio de abatimento do concreto fabricado com agregados reciclados de RCD

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
100% RCD - B0	5	354	70,8	1541,70
100% RCD - B1	5	604	120,8	3380,70
70% RCD/30% NAT	5	292	58,4	987,30
50% RCD/50% NAT	4	178	44,5	409,67
30% RCD/70% NAT	5	330	66	413,50

Fonte: Autor.

Tabela G 2 – Análise de variância do ensaio de abatimento do concreto fabricado com agregados reciclados de RCD

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	16006,7	4	4001,68	2,87	0,05	2,90
Dentro dos grupos	26521,8	19	1395,88			
Total	42528,5	23				

Fonte: Autor.

Tabela G 3 – Resumo da análise de variância do ensaio de massa específica do concreto no estado fresco

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
100% RCD - B0	4	8,43	2,11	0,00
100% RCD - B1	5	10,77	2,15	0,00
70% RCD/30% NAT	5	11,16	2,23	0,00
50% RCD/50% NAT	5	11,16	2,23	0,00
30% RCD/70% NAT	5	11,33	2,27	0,00

Fonte: Autor.

Tabela G 4 – Análise de variância do ensaio de massa específica do concreto no estado fresco

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,08	4	0,02	20,10	1,29487E-06	2,90
Dentro dos grupos	0,02	19	0,00			
Total	0,10	23				

Fonte: Autor.

Tabela G 5 – Resumo da análise de variância do ensaio de teor de ar incorporado

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
100% RCD - B0	4	11,2	2,8	0,48
100% RCD - B1	5	10,45	2,09	0,38
70% RCD/30% NAT	5	8,65	1,73	0,21
50% RCD/50% NAT	5	10	2	0,44
30% RCD/70% NAT	5	9,7	1,94	0,31

Fonte: Autor.

Tabela G 6 – Análise de variância do ensaio de teor de ar incorporado

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,82	4	0,70	1,97	0,14	3
Dentro dos grupos	6,80	19	0,36			
Total	9,61	23				

Fonte: Autor.

Tabela G 7 – Resumo da análise de variância do ensaio de massa específica em corpos de prova de concreto

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
100% RCD - B0	4	8047,63	2011,91	327,14
100% RCD - B1	5	10229,12	2045,82	3842,96
70% RCD/30% NAT	5	10616,80	2123,36	195,66
50% RCD/50% NAT	5	10737,12	2147,42	1215,34
30% RCD/70% NAT	5	10875,32	2175,06	192,10

Fonte: Autor.

Tabela G 8 – Análise de variância do ensaio de massa específica em corpos de prova de concreto

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	87395,11	4	21848,78	18,23	2,66806E-06	2,90
Dentro dos grupos	22765,64	19	1198,19			
Total	110160,75	23				

Fonte: Autor.

Tabela G 9 – Resumo da análise de variância do ensaio de absorção de água por capilaridade

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
100% RCD - B0	4	10,52	2,63	0,28
100% RCD - B1	5	11,02	2,20	0,05
70% RCD/30% NAT	5	9,49	1,90	0,13
50% RCD/50% NAT	5	8,83	1,77	0,19
30% RCD/70% NAT	5	9,15	1,83	0,15

Fonte: Autor.

Tabela G 10 – Análise de variância do ensaio de absorção de água por capilaridade

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,22	4	0,56	3,61	0,02	2,90
Dentro dos grupos	2,93	19	0,15			
Total	5,15	23				

Fonte: Autor.

Tabela G 11 – Resumo da análise de variância do ensaio de resistência à compressão após 28 dias

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
100% RCD - B0	4	98,12	24,53	24,87
100% RCD - B1	5	145,67	29,13	43,07
70% RCD/30% NAT	5	142,75	28,55	48,05
50% RCD/50% NAT	5	175,12	35,02	25,34
30% RCD/70% NAT	5	160,19	32,04	1,69

Fonte: Autor.

Tabela G 12 – Análise de variância do ensaio de resistência à compressão após 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	280,82	4	70,21	2,44	0,08	2,90
Dentro dos grupos	547,23	19	28,80			
Total	828,05	23				

Fonte: Autor.

Tabela G 13 – Resumo da análise de variância do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
100% RCD - B0	4	21,15	5,29	1,22
100% RCD - B1	5	28,37	5,67	1,95
70% RCD/30% NAT	5	28,51	5,70	1,69
50% RCD/50% NAT	5	34,69	6,94	1,19
30% RCD/70% NAT	5	32,84	6,57	0,42
100% Natural	3	24,41	8,14	7,08

Fonte: Autor.

Tabela G 14 – Análise de variância do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	20,35	5	4,07	2,20	0,09	2,68
Dentro dos grupos	38,80	21	1,85			
Total	59,15	26				

Fonte: Autor.

Tabela G 15 – Resumo da análise de variância do ensaio de módulo de elasticidade longitudinal dinâmica

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
100% RCD - B0	4	152,10	38,03	20,92
100% RCD - B1	5	208,70	41,74	17,30
70% RCD/30% NAT	5	215,65	43,13	13,01
50% RCD/50% NAT	5	239,37	47,87	6,38
30% RCD/70% NAT	5	242,78	48,56	6,30

Fonte: Autor.

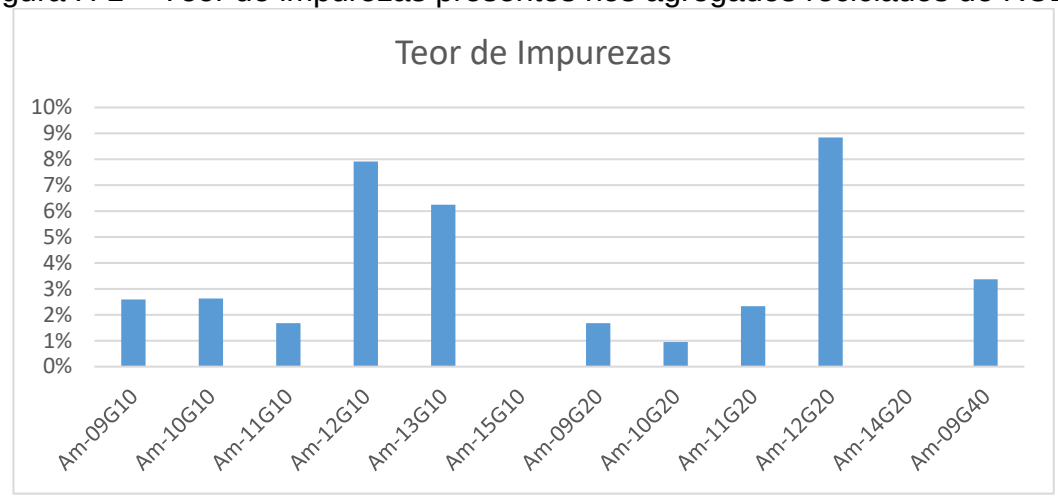
Tabela G 16 – Análise de variância do ensaio de módulo de elasticidade longitudinal dinâmica

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	350,68	4	87,67	7,10	0,00	2,90
Dentro dos grupos	234,67	19	12,35			
Total	585,35	23				

Fonte: Autor.

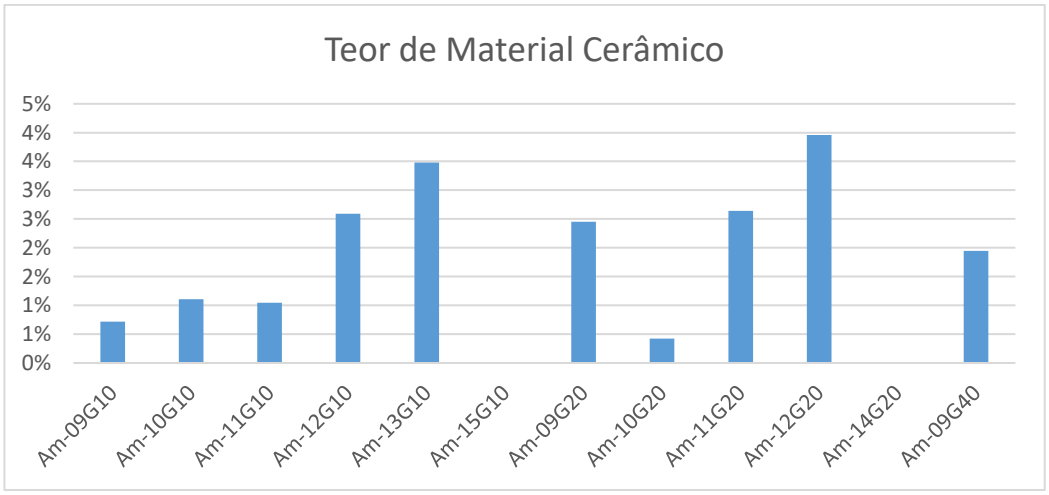
APÊNDICE H – Teor de Impurezas e Teor de Materiais Cerâmicos.

Figura H 1 – Teor de impurezas presentes nos agregados reciclados de RCD



Fonte: Autor.

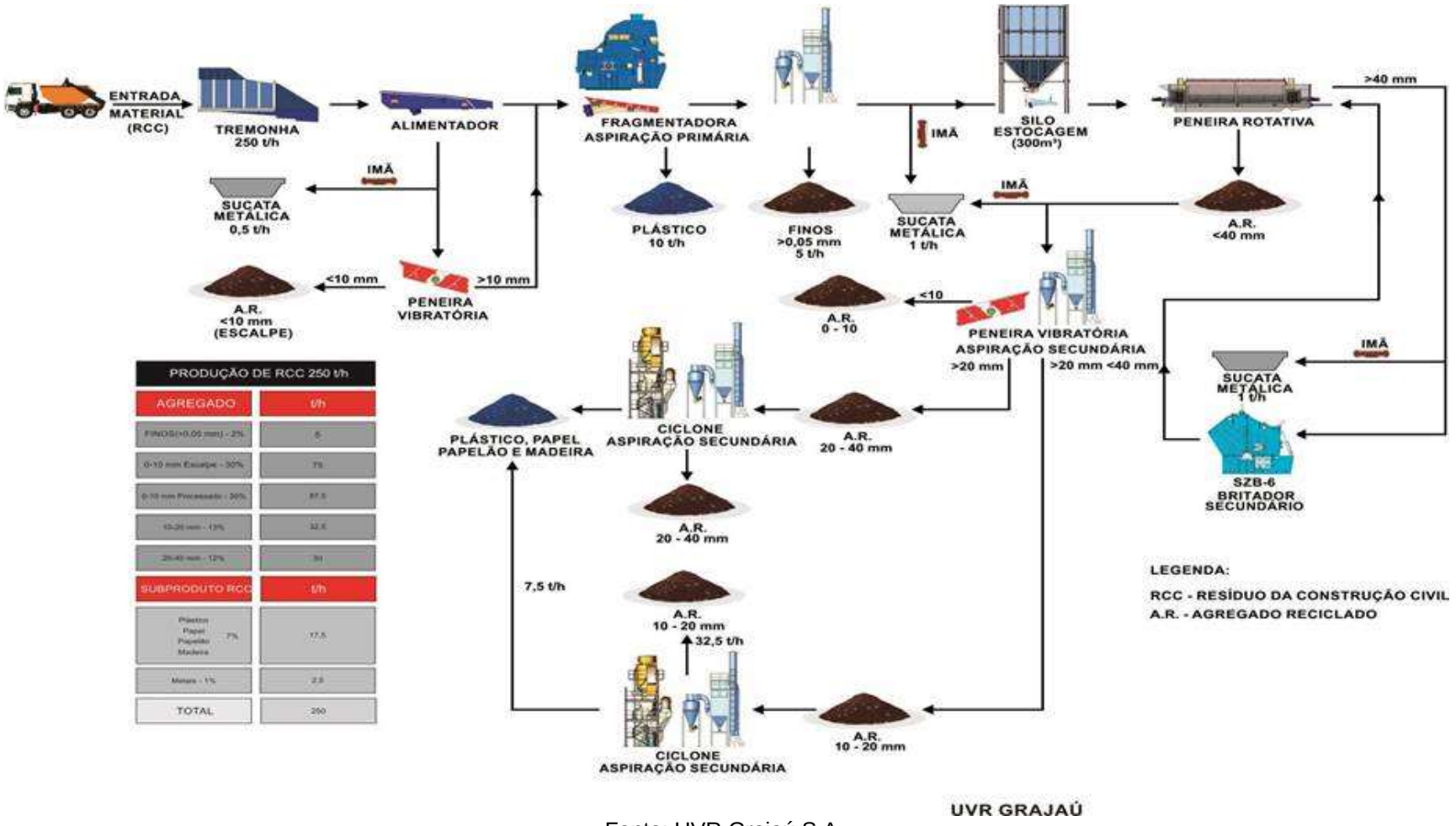
Figura H 2 – Teor de materiais cerâmicos presentes nos agregados reciclados de RCD



Fonte: Autor.

ANEXO A - Fluxograma da UVR Grajaú S.A.

Figura AA 1 – Fluxograma de funcionamento da Unidade de Valorização de Resíduos Grajaú S.A.



Fonte: UVR Grajaú S.A.