

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

GABRIELA NUNES MALYSZ

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA JIGAGEM NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO
COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO**

**Porto Alegre
2018**

GABRIELA NUNES MALYSZ

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA JIGAGEM NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO
COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia na modalidade Acadêmico.

Orientadora: Prof^a. Dra. Ângela Borges Masuero
Orientadora: Prof^a. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Porto Alegre

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-reitor: Jane Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor:

Vice diretor:

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Carlos Torres Formoso

Coordenadora-substituta: Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Malysz, Gabriela Nunes
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA JIGAGEM NAS PROPRIEDADES DO
CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO / Gabriela
Nunes Malysz. -- 2018.
164 f.
Orientadoras: Denise Carpena Coitinho Dal Molin,
Angela Borges Masuero.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil: construção e
infraestrutura, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Agregado graúdo reciclado. 2. Jigagem. 3.
Resíduo de construção e demolição. 4. Variabilidade.
I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II.
Masuero, Angela Borges, orient. III. Título.

GABRIELA NUNES MALYSZ

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA JIGAGEM NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO
COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelas professoras orientadoras e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 18 abril de 2018

Prof^a. Ângela Borges Masuero
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

Prof^a. Denise C. C. Dal Molin
Dra pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof. Dr. Carlos Formoso
Coordenador PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Aguida Gomes de Abreu
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^a. Rejane Maria Candiota Tubino
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Weslei Monteiro Ambrós
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico esse trabalho aos meus pais,
Leonir e Canrober,
que são meu porto seguro,
e ao meu amado Rodrigo
por todo incentivo,
companheirismo e colaboração
no desenvolvimento desse estudo.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, que é uma guerreira, uma leoa, minha fortaleza onde sempre encontrei compreensão, apoio e incentivo. Ao meu pai, um homem íntegro, que é meu exemplo de simplicidade, humildade e honestidade. Minha eterna gratidão aos meus pais e minhas irmãs por todo carinho, amor e amparo em todas as etapas da minha vida.

Ao meu grande amor, Rodrigo, por ter voltado para minha vida depois de longos anos. Muito obrigada pela cumplicidade, pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis, pela ajuda 'pesada' nas fases laboratoriais e por estar sempre presente. Gratidão por todo amor, companheirismo e dedicação aos planos futuros.

Um agradecimento especial às minhas orientadoras, Denise e Ângela, pelo direcionamento da pesquisa, pelo conhecimento transmitido, pela paciência, pela orientação nas tomadas de decisões. Vocês são grandes mestres e conseguem transmitir seus ensinamentos de forma única. Vocês não dão aula, vocês dão um show, conseguem fazer com que temas complexos sejam visualizados, assimilados e compreendidos. Gratidão.

Muito obrigada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, aos laboratórios LAMTAC/NORIE e LAPROM onde foram realizados todo programa experimental, por todo suporte e estrutura. Gratidão aos laboratoristas Airton, Ari e Gerson que foram essenciais para a realização dessa pesquisa. Agradeço ao Weslei Ambrós, pela ajuda, acompanhamento e esclarecimentos de dúvidas quanto aos ensaios realizados com o jigue pneumático. À engenheira Lucília Bernardino da Silva por todo suporte e ajuda nas solicitações e tramites internos.

Aos alunos de iniciação científica, Vanessa Scherer, Henrique Sasso, Luiz Dall'Onder, Yasmin Tamimi, Jéssica Freitas, Bernardo Lassen, Anna Carolina Pietzsch, Leonardo Vier, em especial ao Marcelo Bruxel pelo empenho e dedicação na realização das atividades experimentais, meu muito obrigada.

Aos grandes amigos Felipe Costa, Laura Silvestro, Iago Lopes, pela troca de conhecimento, pela parceria nos estudos e publicações, pela disposição e ajuda acadêmica e pessoal. Vocês foram essenciais nessa caminhada, gratidão por tudo.

Aos colegas do Norie, que se tornaram queridos amigos, muito obrigada por todas as conversas, confraternizações, companheirismo, estudo e apoio. Vocês são o presente surpresa desse mestrado.

Enfim, gostaria de agradecer a todas as pessoas que fizeram parte dessa caminhada, e que de alguma forma contribuíram para que esse estudo acontecesse da melhor maneira possível. Gratidão.

“... eu preferirei sempre aqueles que sonham...
embora se enganem;
Aqueles que esperam... embora, às vezes, suas
esperanças fracassem;
Aqueles que apostam na utopia... embora, em
seguida, fiquem no meio do caminho.
Aposto nos que confiam em que o mundo pode e
deve mudar...”

José Luis Martín Descalzo

RESUMO

O setor construtivo consome uma grande quantidade de recursos naturais, gerando assim, impactos ao meio ambiente. Desde a extração de matérias-primas e fabricação de materiais, até o término da vida útil das edificações, grandes volumes de resíduos são gerados ao longo de toda a cadeia produtiva é proveniente de demolições. Além da grande quantidade de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) contribuir para o crescente volume em aterros, esses são geralmente descartados de forma inapropriada, o que intensifica ainda mais os problemas ambientais causados pela atividade. Estudos vem sendo realizados na busca de alternativas que amenizem esses impactos. A reciclagem desses resíduos e sua utilização como agregado graúdo na confecção de novos concretos vem sendo pesquisada há alguns anos e tem se mostrado uma solução viável em alguns casos. Contudo, a heterogeneidade da composição desse tipo de agregado é apontada como uma das principais restrições ao seu potencial aproveitamento, por gerar grande variabilidade no desempenho dos concretos produzidos com agregado reciclado. Visando a redução das limitações do uso de agregado graúdo reciclado (AGR), esse estudo buscou analisar a utilização do jigge, um equipamento utilizado na área da mineração, o qual realiza separação densitária por meio de aspersão de ar, na seleção de agregados graúdos oriundos da britagem de RCD. Para avaliar o desempenho do equipamento na seleção dos materiais constituintes de AGR, foram moldados corpos de prova de concretos com agregado graúdo reciclado de três fontes distintas antes e após a seleção no jigge, além de concreto de referência com agregado graúdo natural. Com o propósito de mensurar o desempenho dos concretos produzidos, foram realizados ensaios mecânicos e de durabilidade. E buscando um melhor embasamento para as possíveis conclusões, foi realizada análise estatística e comparativa dos resultados. As análises dos ensaios das propriedades mecânicas mostraram que a variabilidade dos agregados reciclados refletiu na inconstância do comportamento dos concretos produzidos com eles, não pode-se perceber um desempenho comum ou uniforme entre as três fontes de agregado reciclado, para os traços produzidos. Para os resultados de módulo de elasticidade se revelou um comportamento atípico na tendência dos resultados, pois com a melhora da matriz, houve decréscimos nos valores de módulo de elasticidade dos traços mais ricos, para a maioria dos agregados reciclados. Para a avaliação de durabilidade, a comparação entre os valores de carbonatação entre os concretos produzidos com agregados reciclados das fontes 1 e 2, jigados e não jigados, mostrou que os agregados que foram processados, geraram concretos com maior permeabilidade às frentes de carbonatação. Contudo, embora alguns estudos apontem bons resultados de separação com jigagem, foi constatado que com a utilização de agregados graúdos reciclados disponíveis no mercado local, para três fontes estudadas, a seleção não conseguiu minimizar a variabilidade das propriedades dos concretos reciclados produzidos com os agregados selecionados.

Palavras-chave: agregado graúdo reciclado, jigagem, resíduo de construção e demolição, variabilidade.

Malysz G. N. **Estudo da influência da jigagem nas propriedades do concreto com agregado graúdo reciclado.** 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

The construction sector consumes a great amount of natural resources, generating, therefore, impacts on the environment. From the extraction of raw materials and their manufacturing to the end of useful life of buildings, large volumes of waste are generated along the entire production chain and also from demolitions. In addition to the large amount of Construction and Demolition Waste (CDW) contribution to the increasing volume of landfills, these are generally discarded inappropriately, which further intensifies the environmental problems caused by the activity. Studies have been carried out in the search for alternatives to reduce these impacts. The recycling of these waste and their use as a large aggregate in the manufacture of new concretes has been researched for some years and proven to be a viable solution in some cases. However, the composition heterogeneity of this type of aggregate is indicated as one of the main restrictions to its potential utilization, since it generates great variability in the performance of the concretes produced with recycled aggregate. In order to reduce the use limitations of recycled aggregate (RA), this study aimed to analyze the use of a jig, an equipment used in mining, which performs density separation through air sprinkling in the selection of large aggregates of CDW crushing. To evaluate the equipment performance in the selection of RA materials, specimens of concrete with recycled aggregate of three different sources were molded before and after the selection in the jig, as well as reference concrete with natural aggregate. In order to measure the performance of the concretes produced, mechanical and durability tests were performed. As well as to seek a better basis for the possible conclusions, a statistical and comparative analysis of the results was performed. The mechanical properties tests analysis showed that the variability of the recycled aggregates reflected in the inconstancy of the behavior of the concrete produced with them; it was not possible to perceive a common or uniform performance between the three sources of recycled aggregate for the mix design produced. For the elasticity modulus results an atypical behavior was revealed in the results trend, because with the matrix improvement, there were value decreases in elasticity modulus of the richest traces, for the majority of the recycled aggregates. For the evaluation of durability, the comparison between the carbonation values among the concretes produced with recycled aggregates of sources 1 and 2, jigged and non-jigged, showed that the processed aggregates generated concretes with greater permeability to the carbonation fronts. Although some studies point to good separation results with jiggling, it was found that with the use of recycled aggregates available in the local market, for the three studied sources, the selection was not able to minimize the variability of the properties of the recycled concretes produced with the selected aggregates.

Keywords: recycled coarse aggregate, jig, construction and demolition waste, variability.

Malysz G. N. **Estudo da influência da jigagem nas propriedades do concreto com agregado graúdo reciclado.** 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	16
1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	21
1.2 OBJETIVOS.....	23
1.3 LIMITAÇÕES	24
1.4 DELIMITAÇÕES	24
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD).....	27
2.1 DEFINIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E COMPOSIÇÃO.....	27
2.2 QUANTIDADE DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO GERADOS	29
2.3 AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE RCD (AGRCD)	31
2.4 A VARIABILIDADE DOS AGREGADOS RECICLADOS	33
2.5 CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO.....	34
2.5.1 Propriedades no estado fresco: massa específica e trabalhabilidade ...	34
2.5.2 Propriedades no estado endurecido: propriedades mecânicas e de durabilidade.....	35
3 MÉTODOS DE SEPARAÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS.....	39
3.1 SEPARAÇÃO POR DENSIDADE.....	39
3.1.1 Método de separação por líquidos densos	39
3.1.2 Método de tratamento através de jigagem	43
3.2 SEPARAÇÃO POR LIXIVIAÇÃO ÁCIDA.....	46
3.3 SEPARAÇÃO AUTOMÁTICA POR SENSORES	46
4 MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	53
4.2 MATERIAIS UTILIZADOS	55
4.2.1 Cimento.....	55
4.2.2 Agregado miúdo natural.....	56
4.2.3 Agregado graúdo natural	58
4.2.4 Agregado graúdo reciclado	60
4.2.4.1 Obtenção de amostras	60
4.2.4.2 Ensaio de separação em jigue	63
4.2.4.3 Constituição.....	66

4.2.4.4	Composição granulométrica e Módulo de Finura.....	73
4.2.4.5	Índice de Forma	78
4.2.4.6	Massa unitária e massa específica	79
4.2.4.7	Absorção de água	84
4.2.5	Água	89
4.3	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	89
4.3.1	Saturação dos Agregados.....	89
4.3.2	Dosagem experimental e definição do traço de referência e dos concretos reciclados	92
4.3.3	Produção dos corpos de prova	94
4.3.4	Propriedades no estado fresco	95
4.4	MÉTODOS DE ENSAIO	96
4.4.1	Propriedades Mecânicas	97
4.4.2	Durabilidade	98
5	ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	104
5.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	104
5.2	DADOS E GRÁFICOS DE DOSAGEM.....	113
5.3	MÓDULO DE ELASTICIDADE	120
5.4	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	129
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	134
6.1	CONCLUSÕES.....	134
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	137
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Coleta de RCD no Brasil e por regiões em 2016, em toneladas/dia	31
Figura 2 - Representação esquemática da separação por líquidos densos realizada por Lovato (2007)	41
Figura 3 - Mecanismos do processo de jigagem, fluidização e sedimentação.....	43
Figura 4 – Descrição do funcionamento do equipamento de separação óptica por cor.....	47
Figura 5 - Representação esquemática do programa experimental.....	51
Figura 6 - Representação esquemática das variáveis independentes	54
Figura 7 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural de quartzo	57
Figura 8 – Curva granulométrica do agregado grão natural basáltico.....	59
Figura 9 – Instalações e equipamentos de processamento do RCD da fonte 1	61
Figura 10 – Instalações e equipamentos de processamento do RCD da fonte 2	62
Figura 11 – Modelo de jigagem de escala laboratorial equipamento Allair® S-500	63
Figura 12 – Detalhe da câmara de separação, formada por gavetas sobrepostas.....	64
Figura 13 – Imagem da câmara de separação destacando a camada ou gaveta inferior, utilizada.....	66
Figura 14 – Imagem dos materiais separados no ensaio de composição.....	68
Figura 15 - Composição dos materiais que constituem os agregados reciclados da fonte 1, sem processamento (a) e jigado (b).....	71
Figura 16 - Composição dos materiais que constituem os agregados reciclados da fonte 2, sem processamento (a) e jigado (b).....	71
Figura 17 - Composição dos materiais que constituem os agregados reciclados da fonte 3, sem processamento (a) e jigado (b).....	72
Figura 18 – Curvas granulométricas dos agregados grãos reciclados da fonte 1.....	74
Figura 19 – Curvas granulométricas dos agregados grãos reciclados da fonte 2.....	75
Figura 20 – Curvas granulométricas dos agregados grãos reciclados da fonte 3.....	76
Figura 21 – Curvas granulométricas dos agregados grãos reciclados das fontes 1, 2 e 3.....	77

Figura 22 – Índice de forma dos agregados graúdos natural e reciclados das fontes 1, 2 e 3, antes e após jigagem.....	78
Figura 23 – Massa específica dos agregados graúdos reciclados das composições das fontes 1,2 e 3.....	81
Figura 24 – Massa específica dos agregados graúdos reciclados das composições das fontes 1,2 e 3.....	81
Figura 25 – Massa unitária dos agregados graúdos reciclados das composições das fontes 1,2 e 3.....	83
Figura 26 – Equipamentos e aparatos utilizados para o ensaio de absorção dos agregados reciclados.....	85
Figura 27 – Taxa de absorção dos agregados graúdos natural e reciclados.....	87
Figura 28 – Ensaio de módulo de elasticidade sendo realizado com extensômetro elétrico	98
Figura 29 – Exemplo visual da mudança de coloração de amostra após aspersão de fenolftaleína	101
Figura 30 – Demonstração da indução de fraturas para os cortes das amostras de carbonatação	102
Figura 31 – Exemplo dos locais de medições de profundidade de carbonatação realizadas no autocad.....	103
Figura 32 – Influência do traço na resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa).....	105
Figura 33 – Resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa) para fonte 1.....	106
Figura 34 – Resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa) para fonte 2.....	106
Figura 35 – Resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa) para fonte 3.....	107
Figura 36 – Detalhes de ruptura de corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão axial.....	108
Figura 37 – Efeito isolado do tratamento da seleção por jigagem na resistência à compressão axial	110
Figura 38 – Efeito isolado do traço na resistência à compressão axial.....	111
Figura 39 – Efeito da interação fonte e tratamento na resistência à compressão axial	111
Figura 40 – Efeito da interação traço e fonte na resistência à compressão axial	112
Figura 41 – Resistência à compressão em função da relação a/c	115

Figura 42 – Influência do processamento e da relação a/c para os traços unitários.....	116
Figura 43 – Relação do consumo de cimento e do traço unitário	117
Figura 44 – Diagrama de dosagem dos concretos aos 28 dias	119
Figura 45 – Médias dos valores de módulo de elasticidade aos 28 dias (GPa).....	121
Figura 46 – Médias dos valores de módulo de elasticidade (GPa) para fonte 1	122
Figura 47 – Médias dos valores de módulo de elasticidade (GPa) para fonte 2.....	123
Figura 48 – Médias dos valores de módulo de elasticidade (GPa) para fonte 3.....	124
Figura 49 – Efeito isolado das fontes de agregado reciclado no módulo de elasticidade ...	125
Figura 50 – Efeito isolado do tratamento realizado nos agregados reciclados no módulo de elasticidade.....	126
Figura 51 – Efeito isolado do traço no módulo de elasticidade	127
Figura 52 – Efeito da interação traço e tratamento no módulo de elasticidade.....	128
Figura 53 – Efeito da interação traço e fonte de agregado reciclado no módulo de elasticidade	129
Figura 54 – Profundidades médias de carbonatação para os concretos com agregados reciclados da fonte 1 e referência.....	131
Figura 55 – Profundidades médias de carbonatação para os concretos com agregados reciclados da fonte 2 e referência.....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química, física e mecânica do cimentos CP IV 32 RS	55
Tabela 2 – Granulometria do agregado miúdo	56
Tabela 3 – Características físicas do agregado miúdo.....	57
Tabela 4 – Granulometria do agregado graúdo.....	58
Tabela 5 – Características físicas do agregado graúdo	59
Tabela 6 - Composição de rcd oriundos de regiões próximas à deste estudo, em porcentagem (%).....	69
Tabela 7 - Composições realizados por outros pesquisadores, em porcentagem (%)	69
Tabela 8 – Composição dos diferentes materiais obtidos nas fontes estudadas, antes e após jigagem, em porcentagem (%).....	70
Tabela 8 – Resultados de ensaios de composição realizados nas amostras pesquisadas ..	73
Tabela 9 – Resultados de ensaios de massa específica realizados por outros pesquisadores	82
Tabela 10 – Taxa de absorção de água percentual em função do tempo de duração do ensaio	88
Tabela 11 – Porcentagens de massa de água em relação à massa seca do agregado, adquiridos na etapa de pré-umidificação.....	91
Tabela 12 – Traço encontrado através da dosagem experimental	93
Tabela 13 – Relações a/c e abatimentos obtidos para cada concretagem.....	94
Tabela 14 – Quantidade de corpos de prova moldados.....	95
Tabela 15 – Massa específica dos concretos produzidos no estado fresco por traço	96
Tabela 16 – Valores adotados para os principais fatores que influenciam nos resultados do ensaio de carbonatação.	100
Tabela 17 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação da resistência à compressão axial (MPa).....	104
Tabela 18 – Análise de variância (anova) para a resistência à compressão	109
Tabela 19 - Dosagem obtida na produção dos concretos	114

Tabela 20 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação do módulo de elasticidade (GPa)	120
Tabela 21 – Resultados da análise de variância (anova) para o módulo de elasticidade...	125
Tabela 22 – Resultados das profundidades médias de carbonatação.....	130

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Massa específica do agregado reciclado	80
Equação 2 - Taxa de absorção de água percentual.....	86
Equação 3 - Taxa de absorção de água percentual.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1:m - quantidade de cimento:agregados, em massa

α - teor de argamassa

γ - massa específica do agregado

A - agregado miúdo

a/c - relação água/cimento

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AGR - Agregado Graúdo Reciclado

AGRCD - Agregado Graúdo Reciclado de Resíduos de Construção e Demolição

AGR1 - Agregado Graúdo Reciclado oriundo da Fonte 1

AGR1J - Agregado Graúdo Reciclado oriundo da Fonte 1 selecionado por jigagem

AGR2 - Agregado Graúdo Reciclado oriundo da Fonte 2

AGR2J - Agregado Graúdo Reciclado oriundo da Fonte 2 selecionado por jigagem

AGR3 - Agregado Graúdo Reciclado oriundo da Fonte 3

AGR3J - Agregado Graúdo Reciclado oriundo da Fonte 3 selecionado por jigagem

ANOVA - Análise de Variância

AGRC – Agregado Graúdo Reciclado de Concreto

c - cimento

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP IV - Cimento Portland Pozolânico

cp's - Corpos-de-Prova

DM - Dimensão Máxima

Ec - Módulo de Elasticidade

EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

f_c - Resistência à compressão Axial

f_{ck} - Resistência Característica do Concreto à Compressão

IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto

IF - Índice de Forma

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo

KPa - Quilo Pascal

KN - Kilo Newton

LAMTAC - Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

LAPROM - Laboratório de Processamento Mineral

MPa - Mega Pascal

MF - Módulo de finura

NBR - Norma Brasileira Regulamentada

NM - Norma Mercosul

NORIE - Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

P - agregado graúdo

pH - Potencial de Hidrogênio

PPGCI - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura

RCD - Resíduo de Construção e Demolição

RSU - Resíduo sólido urbano

1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo é apresentada a introdução ao tema principal dessa dissertação, buscando contextualizar e justificar a sua escolha. Conjuntamente é feita a apresentação dos objetivos do estudo, bem como suas limitações e delimitações. Por fim é descrita a estrutura desenhada para o desenvolvimento e apresentação da pesquisa proposta.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

A expansão urbana e o crescimento populacional impulsionam o setor construtivo. A construção civil é considerada uma das atividades que mais gera impactos ao meio ambiente, através do alto consumo de matérias primas de fontes não renováveis, do consumo elevado de energia tanto na extração, quanto no transporte e processamento de insumos, além da alta emissão de gases poluentes e geração em grande escala de resíduos oriundos de construções, reformas e demolições. Lyle (1994) em seu livro apresenta um capítulo intitulado: Resíduo como um recurso, aonde relata que a primeira dificuldade ou preconceito com a utilização de resíduos é incorporado na própria palavra e que estes devem ser vistos como ótimas fontes de recursos, os quais necessitam apenas de adaptação ou processamento para voltar a serem vistos como matéria prima ou insumo na cadeia produtiva.

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) constituem uma problemática ampla e generalizada em todo o mundo e a reciclagem é, sem dúvida, a melhor alternativa para reduzir o impacto que o ambiente pode sofrer com o alto consumo de matéria prima e a geração desordenada de resíduos. Nos últimos anos a reciclagem de resíduos tem sido incentivada, seja por questões políticas, econômicas ou ecológicas, buscando a redução de áreas de aterro, a minimização do volume de resíduos, redução do consumo de energia e atenuação da emissão de gás carbônico.

De acordo com Angulo (2005), o resíduo de construção e demolição (RCD) é responsável por aproximadamente 50% da massa do resíduo sólido urbano (RSU), o que pode ser considerado uma quantidade significativa de material disponível, e de

fonte crescente, o que torna o estudo da sua utilização viável. Em contrapartida à grande geração de resíduos, atualmente existe a preocupação em encontrar bons agregados naturais próximos a áreas urbanas, considerando que os custos de transporte entre as fontes e os canteiros estão se tornando cada vez mais significativos na composição do orçamento das obras. A incorporação de materiais reciclados como agregados na composição de concretos na construção civil pode trazer vantagens importantes no ponto de vista sustentável, como a diminuição das áreas de aterro de descarte desses materiais, a redução da extração e utilização de agregados naturais oriundos de fontes não renováveis. Além de suprir uma demanda crescente do consumo de materiais, a reciclagem de resíduos de construção e demolição minimizaria também os problemas com o gerenciamento dos resíduos sólidos dos municípios (LEITE, 2001).

Sendo assim, estudos que tenham como objetivo compensar os danos já causados e/ou minimizar os futuros se tornam importantes dentro do cenário em que as fontes geradoras de resíduos são permanentes tendo em vista a crescente necessidade de novas construções e a ocorrência inevitável de reformas, revitalizações e demolições de edificações existentes (CORDEIRO, 2013).

Resíduos de construção e demolição já vem sendo usados há algum tempo em pavimentações, servindo de base e sub-base, e em concretos e blocos com ou sem função estrutural. Contudo, por ser constituído por diferentes materiais, os agregados obtidos do processamento de RCD acabam sendo extremamente variáveis, o que interfere diretamente no comportamento do concreto produzido com eles. Essa circunstância pode dificultar, tornar inviável ou limitar sua reutilização ou reciclagem.

Alguns estudos empregando o uso de equipamentos utilizados pela mineração, como jiques hidráulicos e pneumáticos, para a seleção de resíduos de construção e demolição vem sendo realizados nos últimos anos. Contudo, em sua maioria, as pesquisas publicadas utilizam agregados reciclados feitos em laboratório, ou seja, produziram agregados a partir de tijolos novos, argamassas e concretos confeccionados em laboratório, tendo controle da composição e realizando todo o processo de seleção e britagem para a obtenção dos agregados reciclados utilizados (XING; HENDRIKS, 2006; COELHO E BRITO, 2013; CAZACLIU et al., 2014; ZORTEA,

2014a; ZORTEA, 2014b; SILVA et al.,2015; SAMPAIO et al.,2016; AMBRÓS *et al.*, 2016; CUNHA, 2017; entre outros). Sendo assim, pode-se identificar uma lacuna de conhecimento no que tange pesquisas com agregados reciclados produzidos a partir da britagem de resíduos oriundos efetivamente de construções e demolições, os quais são comercializados já na sua forma final.

Dentro desse contexto, a pesquisa se propõe a estudar a utilização do jigue pneumático, por se tratar de um equipamento que pode ser usado em larga escala, com o objetivo de promover uma rápida separação dos materiais mais nobres, que podem ser usados em substituição ao agregado graúdo natural em concretos estruturais. E assim, através de experimentos laboratoriais, estudar a influência dessa seleção nas propriedades do concreto resultante. Busca-se dessa forma contribuir para a evolução das pesquisas com agregados reciclados e colaborar com as possibilidades de usos mais nobres e economicamente mais vantajosos para esses materiais.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal dessa pesquisa é avaliar a influência do processo de separação por jigagem do agregado graúdo reciclado oriundo de Resíduo de Construção e Demolição, nas propriedades mecânicas e de durabilidade em concretos estruturais.

Os objetivos secundários consistem em:

- a) verificar a influência da separação dos agregados graúdos reciclados através de jigagem nas características dos agregados;
- b) analisar as propriedades do concreto no estado fresco produzidos com agregados graúdos reciclados antes e após separação densitária;
- c) avaliar as propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido (resistência à compressão e módulo de elasticidade) com agregado graúdo reciclado de RCD antes e após a seleção através da utilização de jigue;

- d) verificar a influência da separação dos agregados graúdos reciclados de RCD na durabilidade do concreto através de ensaio de carbonatação;
- e) analisar a variabilidade entre as propriedades dos concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de RCD obtidos em fontes distintas após processamento no jig.

1.3 LIMITAÇÕES

A limitação atribuída a essa pesquisa é referente aos agregados, que foram adquiridos nas condições que são comercializados, distribuídos ou doados, os equipamentos utilizados no beneficiamento e o tipo de britagem não foram avaliados.

1.4 DELIMITAÇÕES

As delimitações atribuídas a essa pesquisa são:

- a) o estudo utilizou agregados graúdos reciclados oriundos de três fontes distintas localizadas no estado do Rio Grande do Sul, nas cidades de Montenegro e Porto Alegre;
- b) o equipamento de mineração, que faz a segregação por densidade, utilizado na pesquisa é de um modelo em específico;
- c) para as pesquisas foi utilizado o cimento CPIV que é o mais consumido e facilmente encontrado no mercado local;
- d) não foi adotado o uso de aditivos;
- e) para a trabalhabilidade dos concretos frescos produzidos foi adotada uma faixa de valores como sendo uma constante;
- f) os ensaios utilizados para avaliar o comportamento dos concretos produzidos com o agregado graúdo reciclado foram: resistência a tração axial, módulo de elasticidade e durabilidade através de carbonatação;

- g) devido a restrições de tempo, a profundidade de carbonatação foi avaliada para duas fontes de agregado graúdo reciclado;
- h) foram adotados parâmetros únicos para o funcionamento do jigue pneumático, para todos os processamentos realizados.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este documento está estruturado em seis capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se a introdução, onde é feita a contextualização e a justificativa, sendo argumentada a importância do tema abordado nesta pesquisa. São citados alguns estudos realizados até o momento sobre o assunto, bem como são expostos os objetivos principal e secundários, limitações e delimitações do estudo.

No segundo capítulo é realizada uma breve revisão bibliográfica sobre o material principal estudado nessa pesquisa, os resíduos de construção e demolição (RCD). Sendo apresentadas informações sobre a definição, classificação e composição dos resíduos, um breve histórico e uma estimativa de quantidades geradas, bem como um panorama sobre a reciclagem desse material. Ainda é discernido sobre agregado graúdo reciclado de resíduos de construção e demolição (AGRCD), suas características e variabilidade, assim como as propriedades dos concretos que utilizam esse tipo de constituinte.

No terceiro capítulo são apresentados os principais métodos e estudos já realizados para separação de partículas: método de separação por líquidos densos, método de tratamento com ácido, técnicas de classificação automática e método de tratamento mecânico.

O programa experimental está detalhado no quarto capítulo, onde é descrito o planejamento experimental com as variáveis de resposta, os fatores controláveis e a matriz experimental utilizadas para o tratamento estatístico do trabalho. Nesse capítulo também são descritos os materiais utilizados, a dosagem experimental e concretagens realizadas, bem como os métodos de ensaio adotados, a fim de satisfazer os objetivos deste trabalho.

O quinto capítulo traz a análise e discussão dos resultados obtidos, conforme o programa experimental, para resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e profundidade de carbonatação. Em seguida, no sexto e último capítulo são expostas as conclusões que a pesquisa obteve e sugestões para trabalhos futuros.

2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

A seguir é apresentada uma revisão bibliográfica que busca servir de embasamento teórico para um melhor entendimento do tema proposto, e que abordará as definições e classificações, o panorama da geração de resíduos, a caracterização e conceitos relacionados ao agregado graúdo reciclado, bem como a variabilidade das suas propriedades e as particularidades já estudadas da utilização desse material em matrizes cimentícias.

2.1 DEFINIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E COMPOSIÇÃO

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são todos os materiais originários dos desperdícios da construção civil ou de demolições. A resolução nº 307 do CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA, 2002), alterada pelas resoluções de número 348/2004, 431/2011, 448/2012 e 469/2015, define Resíduos de Construção Civil (RCC) da seguinte forma:

Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Ainda através do artigo 3º da mesma resolução, os resíduos da construção civil são classificados em quatro classes (CONAMA, 2002):

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 infra-estrutura, 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/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

IV - Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, em sua normativa NBR 15113 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), classifica os diversos tipos de resíduos nas seguintes categorias:

a) Classe A: por potenciais resíduos reutilizáveis como agregados, tendo como origem as demolições e/ou construções, e processos de fabricação de diversos materiais;

b) Classe B: resíduos metálicos, vítreos e não minerais;

c) Classe C: resíduos sem tecnologia de reciclagem disponível para seu reaproveitamento;

d) Classe D: resíduos de alta periculosidade.

A NBR 10004 (ABNT,2004) prescreve a classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus potenciais riscos ambientais em Classe I – perigosos, Classe II A – não perigosos e não inertes, e Classe II B – não perigosos e inertes. Os resíduos de construção e demolição na maioria dos casos podem ser tratados como de classe II A – quando são compostos de materiais não perigosos e não inertes, como componentes minerais não poluentes e inertes quimicamente. Entretanto, em muitos casos, devido à contaminação ou seleção inadequada, estes resíduos podem conter impurezas e contaminantes, provenientes de polímeros, gesso, matéria orgânica, amianto, sílica e diversas substâncias reativas que o tornam não inerte ou perigoso. Sendo assim, podem ser capazes de contaminar o solo e os recursos hídricos e ocasionar riscos à saúde humana.

Pode-se observar que os resíduos da construção civil são compostos de vários materiais, os quais são gerados em quantidades distintas por motivos diversos. Esses também se diferem de acordo com o padrão da construção e a localização da obra, pois geralmente são empregados componentes disponíveis na região.

Quanto à composição dos resíduos de construção e demolição, alguns pesquisadores, como Angulo (2005), realizaram estudos no Brasil, o qual relata em sua tese que a maior parcela encontrada é de origem mineral, como rochas, concretos, argamassas, materiais cerâmicos, sendo que essa fração possui grande variabilidade na sua composição, dependendo da origem da geração do resíduo. Ainda descreve como fator agravante do cenário nacional, o descaso com a reciclagem e a separação adequada dos resíduos, o que dificulta o seu beneficiamento e reutilização. Leite (2001) expõe alguns fatores que determinam a composição média dos resíduos de construção e demolição, como a tipologia usada na construção, as técnicas construtivas existentes no período ou época da concepção da obra e os materiais disponíveis nas proximidades. Portanto, é perceptível que a composição dos materiais que formam os resíduos de construção e demolição é influenciada por diversos parâmetros que são responsáveis pela sua variabilidade.

De modo geral, os resíduos de construção e demolição são constituídos por uma diversificada gama de materiais. Neles podem existir componentes inorgânicos e minerais, como: concretos, argamassas e cerâmicas, e componentes orgânicos, plásticos, materiais betuminosos, entre outros (ANGULO, 2000).

2.2 QUANTIDADE DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO GERADOS

As fontes geradoras de resíduos na construção civil são diversas. Leite (2001) apresenta alguns fatores ou condições que mais impactam ou contribuem para um volume cada vez maior de resíduos no setor construtivo, como a falta de qualidade dos bens e serviços. Esses, além de serem responsáveis por grande parte do desperdício originado durante a etapa de construção, geram patologias e manutenções durante um longo período após a finalização das atividades, acarretando mais consumo de matéria prima e geração de mais resíduos. Ademais,

aponta o déficit no controle e gerenciamento dos processos produtivos dos subprodutos utilizados nas construções; o surgimento de novas concepções arquitetônicas e novos materiais, que fazem com que frequentemente as construções passem por adaptações e modificações, como atividades que contribuem significativamente para a formação do grande volume de resíduos gerados.

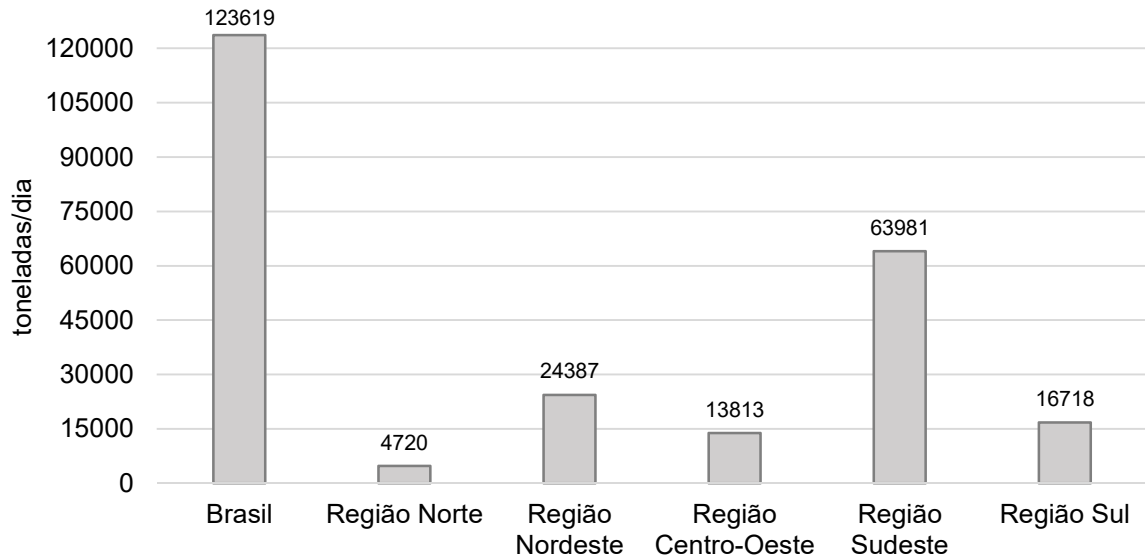
Lovato (2007) argumenta que a origem dos resíduos de construção e demolição também pode ser causada por desastres, através de fenômenos da natureza, como atividades sísmicas e enchentes, sinistros causados pelo homem de forma deliberada ou sem intenção, além das sobras na construção civil geradas pelos processos construtivos ou de demolição. No mesmo estudo a pesquisadora estima que, em nível mundial, cada habitante gera, por ano, entre 130 e 3000 quilogramas desse tipo de resíduo.

Quanto às quantidades de RCD geradas no Brasil, esse número é bastante difícil de quantificar, devido à carência de informações, aos descartes em locais inapropriados e à falta de controle e gerenciamento dos locais que recebem esse tipo de resíduo. A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2018) apresenta, no relatório de 2016, que cerca de 45,1 milhões de toneladas de RCD foram coletadas no território nacional e apresentam um índice de 220 kg/hab/ano. Desses totais, mais de 65% foram gerados apenas nas regiões Sul e Sudeste, como se pode observar na figura 1.

Considerando que grande parte dos resíduos de construção e demolição são depositados em locais ilegais, sem registro ou controle, alguns pesquisadores presumem que esse número seja maior e estimam uma geração média de 500 kg/hab/ano, o que para 2016, considerando o número de habitantes fornecidos pelo IBGE (2018), seria aproximadamente 103 milhões de toneladas para a população brasileira (CONTRERAS *et al.*, 2016). Considerando que no país o consumo de agregados é da ordem de 380 milhões t/ano, se toda a fração mineral dos resíduos de construção e demolição fosse reciclada e reutilizada na forma de agregado, essa quantidade atenderia algo próximo de 27% da demanda de consumo desse setor. Como pode-se perceber o mercado de resíduos é promissor e a sua reciclagem na

composição de concretos se apresenta como uma alternativa viável, por ser capaz de absorver ou consumir grandes volumes de material (ANGULO *et al.*, 2002).

Figura 1 – Coleta de RCD no Brasil e por regiões em 2016, em toneladas/dia



Fonte: ABRELPE, 2018

2.3 AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE RCD (AGRCD)

Prevenção, reutilização e reciclagem são questões de suma importância para o gerenciamento de resíduos. As técnicas de demolição e a gestão dos resíduos de construção e demolição dos edifícios são questões-chave no desenvolvimento da construção sustentável. As técnicas de demolição vêm recebendo atenção e em vários países formam um setor importante, sendo consideradas uma disciplina dentro do campo da engenharia civil, para a qual estão sendo buscadas atividades mais planejadas, objetivando práticas mais seguras (KAMRATH, 2013).

Tendo em vista os problemas ambientais causados pelo setor construtivo e o crescente consumo de matéria prima já escassa em alguns países, vários estudos foram desenvolvidos nos últimos anos com o objetivo de reaproveitar ou reciclar os resíduos gerados pela construção dentro do próprio setor. Algumas utilizações dos resíduos de construção já são bem difundidas, como a produção de concretos magros sem fins estruturais, aproveitamento em base e sub-base de pavimentos, produção de blocos de concreto, entre outros (FONSECA 2002; ANGULO *et al.*, 2003; VIEIRA

e DAL MOLIN, 2004; RAO *et al.*, 2007; CCANZ, 2011; ULSEN, 2011; COELHO E BRITO, 2013; entre outros).

Nos últimos anos, pesquisadores vem estudando as propriedades e características dos agregados reciclados oriundos de RCD na tentativa expandir o conhecimento, a sua aplicabilidade e assim a aumentar utilização desses materiais, buscando integrá-los em usos cada vez mais nobres. Algumas particularidades, como maior quantidade de poros, maior absorção de água e menor resistência se comparados com os agregados naturais, fazem com que sua utilização não seja frequente. Contudo, seu emprego apresenta vantagens relevantes que devem ser evidenciadas, como menor custo de produção e a redução dos impactos ambientais, com a diminuição de áreas de aterro e a atenuação da extração de matéria prima de fontes não renováveis (ANGULO, 2000; JOHN, 2000; SANTOS *et al.*, 2002; XIAO *et al.*, 2005; CABRAL, 2007; BRITO, 2010; ULSEN *et al.*, 2013 entre outros).

Mehta e Monteiro (1994), em estudos mais antigos, já preconizavam que os resíduos gerados pela construção civil são uma fonte economicamente viável de agregados, por serem materiais que ocupam grande parcela da constituição volumétrica do concreto. Ainda, podem receber maior importância quando são analisados locais onde agregados de boa qualidade são escassos e quando o custo de disposição do entulho é incluído na análise econômica. Contudo os autores ressaltam que conhecer suas características físicas, bem como suas interações no concreto, são de extrema importância para a viabilidade de sua utilização.

Os agregados reciclados geralmente apresentam uma grande quantidade de partículas lamelares, principalmente quando são compostos de uma quantidade significativa de materiais cerâmicos. Alguns estudos sobre as propriedades e características dos agregados reciclados têm sido realizados. Como por exemplo, o trabalho publicado por Silva *et al.* (2014), o qual reuniu dados de 116 publicações, sendo analisados 589 agregados reciclados de diferentes tipos, tamanhos e origens. Essas publicações foram escolhidas pelos autores como sendo amostras significativas publicadas no período de 18 anos (de 1996 à 2013) e objetivou representar mais de 20 países de 4 continentes. As conclusões da pesquisa apontam que independentemente do tipo, tamanho e origem do agregado, existe uma relação

entre a absorção de água e a densidade, que ocorre principalmente devido à porosidade do material e que, à medida que a porosidade aumenta, a capacidade de absorção de água aumenta e a densidade diminui. Com base nos dados analisados, os autores propõem que não seja feita uma classificação dos agregados reciclados baseada na sua composição, mas principalmente em suas propriedades físicas.

A importância da realização de ensaios de caracterização dos agregados reciclados oriundos de resíduos de construção e demolição se baseia, não somente na diversidade da natureza dos materiais que o compõem, mas também nas suas características específicas, as quais mais os diferem dos agregados naturais.

2.4 A VARIABILIDADE DOS AGREGADOS RECICLADOS

Estudos realizados indicam que os agregados reciclados possuem grande potencial de utilização como insumo na construção civil, porém, ainda existem barreiras, restrições e insegurança no seu uso, devido à grande variabilidade dos constituintes dos resíduos de construção e demolição.

Ângulo (2000) pesquisou a variabilidade de agregados graúdos reciclados obtidos na cidade de Santo André quanto à constituição, à composição granulométrica, ao índice de forma, à absorção de água e à massa específica. Como conclusões, o autor descreve a presença significativa de variabilidade nos agregados reciclados estudados em todas as propriedades analisadas. Em outro estudo Vieira e Dal Molin (2004) concordam que o grande empecilho técnico para a utilização de RCD em concretos é justamente sua variabilidade.

Cabral (2007), em sua tese, concorda com os autores citados anteriormente e acrescenta que a redução ou controle da heterogeneidade de agregados reciclados pode viabilizar a produção de concretos com maior durabilidade e desempenho mecânico aceitável.

Contudo, para que a aplicação de agregados reciclados possa ser difundida e a sua escolha venha a ser mais recorrente na composição de concretos estruturais, estudos

de processos ou mecanismos que minimizem sua variabilidade são necessários e justificam a importância de pesquisas com esse objetivo (LOVATO, 2007).

2.5 CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO

Nesse item, serão abordadas as principais características das propriedades no estado fresco e no estado endurecido dos concretos com agregados reciclados, que foram estudadas em algumas pesquisas já realizadas.

2.5.1 Propriedades no estado fresco: massa específica e trabalhabilidade

Para Mehta e Monteiro (1994), a massa específica do concreto no estado fresco depende da massa do agregado, da sua porosidade, textura e tamanho. Carrijo (2005) quantificou a variação da massa específica do concreto fresco em função da relação a/c e da massa específica do agregado utilizado, e observou que à medida que se reduz a massa específica do agregado e aumenta a relação a/c, reduz a massa específica do concreto no estado fresco. Já Ferreira (2007) traz a massa específica do concreto no estado fresco como sendo um reflexo da massa específica dos seus componentes, em especial dos agregados, mas também influenciada pelo grau de compactação (existência de ar no interior do concreto) dos mesmos.

Os agregados reciclados de RCD, de modo geral, possuem textura mais áspera e rugosa, proporcionando um maior travamento durante a mistura e dificultando a movimentação entre as partículas. Sendo assim, necessitam mais pasta de cimento para promover a trabalhabilidade e mobilidade necessárias ao concreto no estado fresco. Esses materiais também se caracterizam por apresentar uma quantidade significativa de partículas lamelares, especialmente quando são compostos por uma parcela maior de materiais cerâmicos. O formato e a textura dos grãos têm grande influência nas propriedades do concreto no estado fresco. Essas particularidades podem gerar impactos na consistência do concreto, reduzindo a fluidez do material (MEHTA; MONTEIRO, 1994; LEITE, 2001).

Alaejos e Sanchez (2014) mencionam que a condição saturada superfície seca, para agregados reciclados, diminui a grande variação da consistência dos concretos no estado fresco, possibilitando um melhor controle da trabalhabilidade.

Segundo Coutinho (2000), os agregados graúdos lamelares tornam os concretos ásperos e difíceis de compactar. Em seu estudo, Cordeiro (2013) complementa esse fato e relata que a trabalhabilidade dos concretos produzidos com agregado reciclado é reduzida, principalmente devido à maior porosidade característica destes.

2.5.2 Propriedades no estado endurecido: propriedades mecânicas e de durabilidade

Numerosos estudos já avaliaram as propriedades mecânicas através da resistência à compressão axial em concretos com agregados reciclados. Em geral, essas pesquisas revelam que a resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados é menor do que os valores obtidos para os concretos moldados com agregados naturais, para uma mesma matriz cimentícia e mesmo traço. Ainda descrevem que as razões associadas a esse comportamento estão atreladas às características desse tipo de agregado, como maior porosidade, menor resistência do agregado, formato lamelar, entre outras (SANTOS *et al.*, 2002; ALAEJOS e SÁNCHEZ, 2004; XIAO, 2005; CABRAL, 2007; RAO, 2007; MOREIRA, 2010; SILVA *et al.*, 2014).

Zordan (1997), em seu estudo, chegou a valores de resistência à compressão axial do concreto reciclado, até 50 % inferiores à resistência do concreto de referência. O autor comparou concretos para os quais foi estabelecido como parâmetro de dosagem o índice de abatimento do concreto, ou seja, as relações água/cimento das misturas e os consumos de cimento foram variáveis, da mesma forma que foi realizado o presente estudo.

Santos *et al.* (2002) concluíram, em suas pesquisas, que o agregado reciclado somente causará influência na resistência do concreto, quando a matriz cimentícia for mais resistente que o agregado, quando possivelmente a ruptura por compressão se dará no ponto mais frágil, que nessa hipótese seria no agregado reciclado. Do mesmo

modo, se a matriz do concreto for menos resistente do que os agregados reciclados que compõe o concreto, esses não exercerão grandes influências na resistência mecânica.

Concomitantemente, pesquisas que avaliam o comportamento de agregados dentro de matrizes cimentícias, consideram o ensaio do módulo de elasticidade como parâmetro importante a ser analisado. Essa propriedade mecânica está diretamente relacionada com as particularidades da pasta de cimento hidratada, da zona de transição e do agregado utilizado, e medem a sua capacidade de rigidez. A capacidade de deformação do agregado gráúdo está associada à sua porosidade, textura, forma e composição mineralógica, podendo assim influenciar nas características de restrição à deformação da matriz de concreto (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Autores que investigam concretos produzidos com agregados reciclados relatam que estes apresentam um módulo de elasticidade menor que o dos concretos convencionais. Hansen (1992) teve uma redução de 15 a 40% nos resultados de módulo de elasticidade em seu estudo, ao substituir o agregado gráúdo natural por agregado gráúdo reciclado. Alaejos e Sánchez (2004) encontraram valores de módulo de elasticidade do concreto com resíduo 20% menores do que os valores obtidos para o mesmo concreto produzido com agregado natural.

Geralmente, conforme o consumo de cimento cresce e os valores da relação água/cimento diminuem, os resultados do módulo de elasticidade dos concretos são mais altos. Contudo Rohden (2015), em sua pesquisa, encontrou um comportamento diferente, e demonstrou experimentalmente que a diferença entre o módulo de elasticidade do agregado e da argamassa gera deformações diferenciais dos dois elementos. Ainda constata que essa diferença de deformações implica em tensões na interface argamassa/agregado gráúdo, e que essas são proporcionais à diferença existente entre o módulo de elasticidade do agregado e da argamassa. Ou seja, se o agregado gráúdo utilizado tiver uma rigidez muito abaixo da matriz cimentícia, os resultados gerados por esse concreto podem não alcançar valores tão alto quando os esperados convencionalmente, ou ainda, embora seja melhorada ou enriquecida a

matriz, tal fato pode não garantir uma melhora dos valores para o concreto, caso o agregado graúdo utilizado tenha baixas resistências.

Algumas características inerentes aos agregados oriundos de RCD são influenciadas pelas elevadas taxas de absorção de água e a alta porosidade, atributos que podem impactar na vida útil desses materiais, assim se evidencia a importância da realização de estudos de durabilidade dos concretos que tenham esse tipo de agregado na sua composição (CABRAL, 2007).

Na composição do concreto armado, o concreto fornece uma barreira de proteção para o aço, protegendo-o de agressões externas, além disso, garante o meio alcalino necessário, proporcionando uma proteção química para a armadura. A corrosão das armaduras é considerada como uma das principais causas de danos nas estruturas de concreto armado, e pode ser provocada pela penetração de íons cloreto e/ou gás carbônico. O fenômeno da carbonatação acontece naturalmente nas estruturas de concreto, mediante a presença de determinada concentração de dióxido de carbono e certo teor de umidade na atmosfera. É um processo físico-químico que avança lentamente no interior das estruturas de concreto, através da penetração de gás carbônico da superfície externa para a interna, tendo como principal efeito a redução da alcalinidade do concreto. A diminuição do pH provoca a redução do hidróxido de cálcio na solução, o que altera as condições de estabilidade química do meio alcalino e da camada passiva que protege a armadura. A corrosão produz óxidos e hidróxidos de ferro, que possuem volume maior que as partículas de aço, ocasionando danos, fissuras e podendo comprometer as estruturas de concreto armado. Sendo assim, a durabilidade de uma estrutura de concreto está intimamente associada à permeabilidade da camada superficial, que deve limitar a entrada de substâncias que podem iniciar ou propagar possíveis ações deletérias, como o dióxido de carbono, cloreto, sulfato, água, oxigênio, álcalis, ácidos, entre outros. Na prática, a durabilidade depende da seleção do material, da composição do concreto, bem como do controle durante a concretagem, compactação, acabamento e cura (MEHTA E MONTEIRO, 1994; PAULETTI *et al.*, 2007; CASCUDO E CARASEK, 2011).

Werle (2011) estudou o impacto da porosidade de agregados reciclados de concreto na profundidade de carbonatação de concretos produzidos com esses materiais. A

pesquisadora constatou que essa característica do agregado foi decisiva nos resultados obtidos, sendo que quanto mais poroso era o AGRC utilizado, maiores foram as profundidades de carbonatação atingidas pelos concretos produzidos com eles. Também foi evidenciado na pesquisa que, quanto menor eram as resistências dos agregados reciclados de concreto, maiores foram as velocidades de carbonatação e maiores foram as dispersões de resultados obtidos.

Cabral (2007) pesquisou diversas publicações, envolvendo avaliações de carbonatação de concretos produzidos com agregados reciclados, e constatou que para concretos com traço pobre, espera-se que os concretos com agregados reciclados tenham um pior desempenho, considerando que a matriz e o agregado reciclado serão porosos e permitirão assim a penetração dos agentes agressivos, ao contrário dos agregados naturais, que são menos permeáveis. Ainda, ao comparar concretos de alta resistência e traços ricos produzidos com agregados naturais e agregados reciclados, relatou que o comportamento esperado é de que ambos tenham profundidades de carbonatação semelhantes, considerando que a matriz terá baixa permeabilidade e não permitirá a passagem dos agentes agressivos.

Em condições naturais de exposição (0,03 a 1% de CO₂), o avanço da frente de carbonatação leva vários anos para apresentar resultados passíveis de análise. Por isso, muitas pesquisas são desenvolvidas utilizando um sistema de ensaio acelerado, que submete o concreto a teores elevados de CO₂ e permite um controle rígido de todas as condições de exposição, fornecendo uma resposta rápida do comportamento do material ante a carbonatação. Existe, ainda, uma grande dificuldade no meio técnico de comparar os resultados de pesquisas sobre carbonatação acelerada, devido à grande diversidade dos procedimentos realizados em função da ausência de padronização nos ensaios (CALADO *et al.*, 2015).

3 MÉTODOS DE SEPARAÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS

A variabilidade dos materiais que compõe os resíduos gerados nas atividades de construção e demolição produzem agregados reciclados heterogêneos, o que gera incerteza nas propriedades do concreto resultante produzido com o agregado reciclado. Dentro desse contexto, alguns trabalhos técnicos e científicos estudam métodos de separação de partículas que possam ser utilizados na separação dos diversos tipos de materiais que compõe os agregados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), na tentativa de dar um destino mais nobre aos componentes que tem características melhores.

A seguir, é apresentada uma revisão bibliográfica de métodos de separação de partículas, que foram selecionados por serem considerados os mais relevantes entre os processos que já foram pesquisados para seleção de agregados reciclados.

3.1 SEPARAÇÃO POR DENSIDADE

Nesse item serão apresentados e descritos dois métodos de separação de agregados graúdos reciclados que utilizam a densidade como principal meio para realizar a seleção de materiais.

3.1.1 Método de separação por líquidos densos

A separação em meio denso, também chamado de método de “afunda-flutua”, é um processo de separação gravítica aplicado na separação de partículas, o qual se baseia na diferença de densidade entre um meio fluido e as partículas a serem separadas. O meio denso pode ser constituído de líquidos orgânicos, soluções de sais inorgânicos ou de uma suspensão estável de densidade pré-determinada. A suspensão em meio denso é um sistema heterogêneo constituído de um sólido insolúvel disperso em uma solução aquosa. O meio denso a ser utilizado na separação de minerais deve apresentar uma densidade intermediária entre as partículas a serem

separadas, de maneira que os materiais com densidade inferior flutuem, e aqueles com densidade superior afundem (SILVA, 2012).

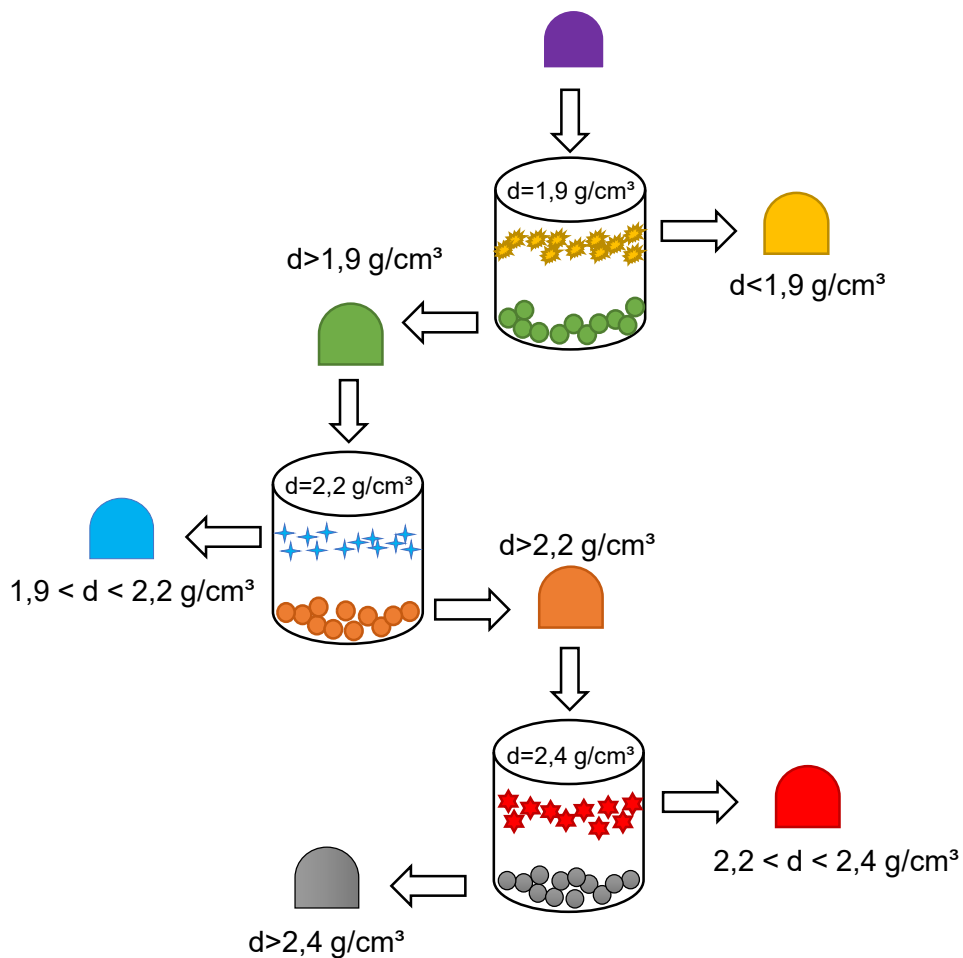
O anexo B da NBR 15116 (ABNT, 2004) estabelece o procedimento de separação por densidades através do uso de líquidos densos, que resumidamente consiste em: peneirar o material e medir sua massa seca, então coloca-se, em um béquer, uma solução de algum líquido de densidade conhecida, como o cloreto de zinco e bromofórmio, e se mistura o material ao líquido cuidadosamente, com o auxílio de um bastão de vidro. Algumas partículas irão afundar e outras flutuar, conforme sua densidade. As partículas flutuantes devem ser retiradas com uma escumadeira. Então, se transfere o líquido do béquer para um segundo recipiente, tomando cuidado para que apenas as partículas flutuantes sejam vertidas com o líquido. Retorna-se o líquido ao primeiro béquer e agita-se novamente. O procedimento de decantação é repetido até que não sobrem partículas flutuantes. O material retirado com a escumadeira deve ser lavado com água e seco em estufa até que a massa fique constante. Determina-se a massa final do material retirado com a escumadeira e calcula-se o percentual de material afundado e flutuado.

Angulo et al. (2004) realizaram um estudo para separação de materiais com massas variando entre 1 e 3 kg, em função do tamanho médio das partículas, as quais foram submetidas à separação por líquidos com densidades de 1,7; 1,9; 2,2; e 2,5 g/cm³. Os líquidos com densidades de 1,7 e 1,9 g/cm³ foram obtidos por dissolução de cloreto de zinco em água e os demais foram obtidos por solução de bromofórmio e álcool etílico. As partículas, quando imersas na solução com peso específico conhecido, foram agitadas levemente, resultando em uma parte do material flutuado e outra afundado. No produto flutuado em 1,9 g/cm³ se concentrou quase a totalidade dos contaminantes, como madeiras, papel e materiais betuminosos. Foi verificado que os agregados com densidade acima de 2,5 g/cm³ eram predominantemente rochas naturais, envolvidas por uma camada de pasta de cimento endurecida, sendo que o teor de pasta endurecida é relativamente baixo. Os agregados com densidade entre 1,9 e 2,5 g/cm³ eram compostos predominantemente por cerâmicas (vermelha e branca) e partículas cimentícias. Os autores concluíram que a separação por líquidos densos se revelou uma técnica importante no estudo dos agregados de RCD reciclados, uma vez que ela permite a separação de partículas com diferentes

porosidades e mineralogia diferenciada. Ainda afirmam, que este método apresenta grande potencial para aplicação como um rápido método de controle de qualidade e de classificação de agregados reciclados.

Lovato (2007) realizou ensaios para classificação densitária, onde as faixas de densidade estabelecidas foram 1,9; 2,2 e 2,4 g/cm³. Os resultados obtidos para os ensaios com agregado graúdo reciclado ficaram dentro do esperado, sendo que a parcela flutuada na solução com densidade de 1,9 g/cm³ concentrou na sua maior parte a cerâmica vermelha e a flutuada na solução com densidade de 2,2 g/cm³ concentrou a maior quantidade de argamassa, já na solução com densidade de 2,4 g/cm³ foram separadas partículas de concreto (flutuadas) e rochas naturais (afundadas), conforme mostra o esquema da figura 2.

Figura 2 - Representação esquemática da separação por líquidos densos realizada por Lovato (2007)



Fonte: adaptada de Lovato (2007)

Os materiais separados no processo foram secos em estufa, foi realizada a pesagem e as amostras de agregados graúdos foram classificadas por faixas de densidade. O ensaio também foi realizado com agregado miúdo, porém foi constatado que em uma parte da amostra as partículas absorveram a solução de bromofórmio, o que alterou sua densidade. Por se tratar de um material muito fino, a retirada das parcelas flutuantes é mais demorada, além disso, uma parte fica aderida nas paredes do recipiente. Apesar de apresentar algumas vantagens, a eficiência do método de afunda-flutua precisa ser melhor avaliada para a caracterização de agregados de RCD. Considerando que porosidades elevadas são características frequentes dos agregados reciclados, a aplicação do método pode resultar na contaminação das partículas do material, e na absorção do líquido utilizado no ensaio, o que promove uma alteração na densidade das partículas da amostra e modifica os resultados do teste (LOVATO, 2007).

Outros autores como Sampaio e Tavares (2005) citam algumas vantagens da separação pelo método dos líquidos densos, como:

- a) permite avaliar a viabilidade de emprego da separação densimétrica dos materiais;
- b) a possibilidade de ser utilizado para pequenas quantidades de material;
- c) apresentar uma maior precisão nos resultados quando comparados a processos como de jigagem (que é descrito no item 3.4), uma vez que a densidade do meio pode ser ajustada;

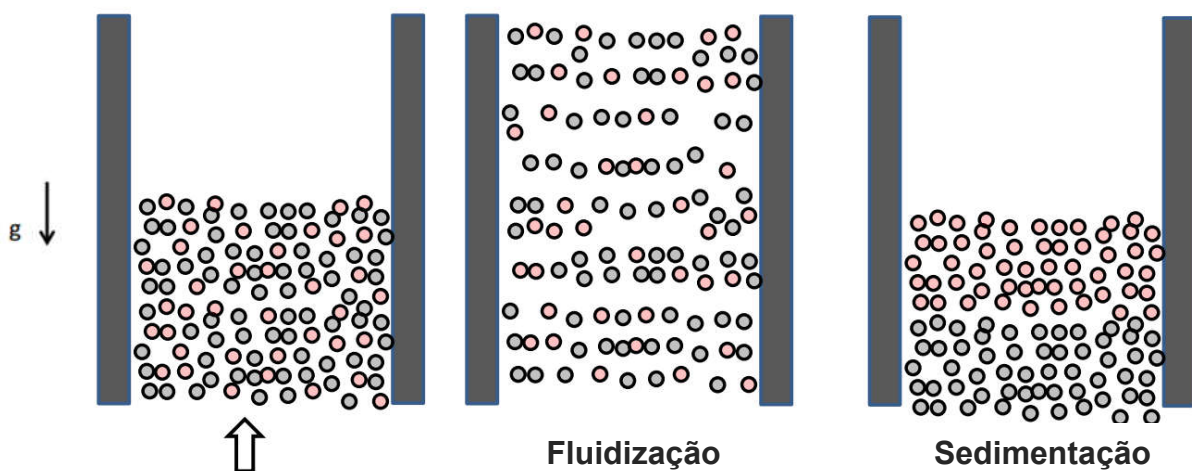
Analisando os trabalhos citados que estudaram a caracterização densimétrica de agregados utilizando o método de líquidos densos, em pesquisas laboratoriais de pequena escala, pode-se perceber a eficiência do método especialmente quando os materiais possuem densidades próximas e ara uma ampla gama de partículas. Por outro lado, os altos custos relacionados à produção e manejo dos líquidos densos tornam o processo inviável na separação em larga escala de agregados reciclados. Outra limitação é o uso na separação de partículas com elevada porosidade, característica que é geralmente encontrada nos materiais que compõe RCD.

Já para grandes quantidades de material, o que seria uma escala real para a separação de agregados reciclados de RCD, os custos com os líquidos utilizados no processamento e as proporções do processo o tornam inviável.

3.1.2 Método de tratamento através de jigagem

Jigagem é um processo de separação de materiais através de equipamento mecanizado, conhecido como Jigue, cujo funcionamento consiste em promover a expansão (dilatação) e contração (compressão) de um leito com partículas, através do uso de um meio fluido, geralmente água ou ar. Através da pulsação do fluido ocorre a formação de camadas estratificadas, cada qual contendo partículas com diferentes densidades, tamanhos e formas. O resultado do processamento é que as partículas são estratificadas em camadas de densidade crescente desde a parte superior até à base, como representado na figura 3, onde na situação (1) um fluxo de fluido pulsante (água ou ar) é fornecido através do meio granular a uma dada frequência (w) e amplitude (A) e após, nos cenários (2) e (3) sucessivos ciclos de fluidização e sedimentação promovem o fenômeno da segregação (SAMPAIO *et al.*, 2016).

Figura 3 - Mecanismos do processo de jigagem, fluidização e sedimentação



Fonte: Sampaio *et al.* (2016)

As tecnologias de processamento à seco, como a jigagem à ar, receberam destaque nos últimos anos devido à vantagem de não usar água no processo, o que oferece importantes benefícios econômicos e ambientais. Os jiques à ar tem duas entradas de fluxo de ar, nas quais o ar é empurrado de baixo para cima e de acordo com seus parâmetros operacionais são capazes de promover a separação de partículas de 1mm até 50mm de tamanho (COELHO E BRITO, 2013).

Angulo (2005) apresenta como uma das conclusões de seu estudo que a separação por densidade pode ser uma técnica mais vantajosa, por se relacionar diretamente com as propriedades físicas dos agregados reciclados e sua porosidade, e assim com a resistência mecânica e durabilidade dos concretos feitos com esse tipo de agregado graúdo.

Por se tratar de uma operação que é usada há longos anos pela mineração (SAMPAIO e TAVARES, 2005), a modernização trouxe melhorias no seu desempenho. Como por exemplo, os jiques com sistema pneumático que utilizam válvulas controladas eletronicamente e de acionamento rápido para entrada e saída de ar. O resultado desse desenvolvimento resultou na ampliação do uso da jigagem, já não mais limitada ao beneficiamento de carvões e minérios, apresentando grande potencial para o uso em processos de reciclagem de resíduos sólidos (PARANHOS *et al.*, 2016).

Alguns benefícios desse método de separação, apontados por Sampaio *et al.* (2016), são a viabilidade de sua utilização devido ao baixo custo de aquisição e manutenção do equipamento; os custos operacionais são relativamente pequenos; o fato do equipamento ser robusto, resistente, e com alta capacidade de processamento; de fácil operação e o bom desempenho na separação de partículas relativamente grandes e com amplos intervalos de tamanho. Além disso, não são utilizados reagentes, o que contribui significativamente para os custos, não gerando resíduos no processo e evitando assim impactos ambientais.

Ao se comparar jiques que utilizam como meio de estratificação o ar e a água, estudos como os realizados por Sampaio e Tavares (2005) revelam que o jique a ar é uma boa opção para os casos onde o material a ser separado não pode ser molhado. Também consideram ser uma alternativa que minimiza os elevados custos ambientais associados ao grande consumo de água dos jiques que a utilizam para realizar o

processamento. Ainda se comparado com o processamento que utiliza água, a jigsaw por ar traz como vantagem a possibilidade de eliminar etapas do processo, como a filtragem e a secagem das partículas após separação, além de dispensar a necessidade de tratamento dos efluentes. Contudo, os autores apontam como desvantagem a baixa eficiência do método quando são processados materiais com baixas granulometrias, com partículas que tenham tamanho abaixo de 2 mm.

Uma pesquisa publicada por Ambrós *et al.* (2016) investigou os efeitos das paredes ou bordas da câmara de estratificação, sobre o processo de estratificação. Foram realizados testes com uma mistura de partículas dos materiais: concreto, tijolo e gesso, com granulometria entre 12 a 20 mm, para três diferentes tempos de jigsaw. Tal pesquisa identificou uma segregação incomum na direção perpendicular às paredes laterais, dando origem a um padrão de segregação horizontal. Em todos os casos, partículas mais pesadas concentraram-se mais no centro do leito de partículas, enquanto partículas mais leves se concentraram ao longo das paredes laterais.

O Estudo realizado por Cazacliu *et al.* (2014) com a utilização de jigsaw a ar, utilizou esse processo com o objetivo de separar partículas de três tipos de materiais, gesso, tijolo e concreto, os quais foram britados e beneficiados em laboratório e selecionados dentro da faixa granulométrica entre 2 e 20mm. Após o processamento, a camada inferior apresentou menos de 1% de concentração de gesso (o qual é considerado um contaminante na composição de agregados) e mais de 90% em massa de partículas de concreto, tido como o material mais nobre e mais denso. Já na camada superior ficou acumulado aproximadamente 80% de gesso em proporção de massa.

Na jigsaw à seco, a densidade do ar exerce pouca influência no processo, ao contrário da velocidade de sua corrente que ergue as partículas do leito. Velocidades de injeção de ar muito altas ocasionam turbulências fortes, o que acaba por arruinar a estratificação; e velocidades muito baixas não proporcionam a movimentação necessária das partículas e expansão do leito, dificultando a separação.

3.2 SEPARAÇÃO POR LIXIVIAÇÃO ÁCIDA

O procedimento de separação de partículas por meio de tratamento com ácido consiste na imersão de materiais em determinada solução ácida por um tempo específico. Pandurangan *et al.* (2016) realizaram um estudo para a segmentação de Agregado Reciclado de Concreto (ARC) através da imersão em meio ácido por 24 horas. Após esse período, os agregados imersos foram lavados em água potável com temperatura ambiente, para remoção da argamassa aderida, e então o agregado foi seco. Neste tratamento, foi medida a quantidade de argamassa que permanece aderida ao agregado graúdo e o valor obtido foi de 2%. A absorção de água encontrada para o agregado reciclado de concreto não tratado foi de 4,58% enquanto que para o ARC tratado com ácido foi de 2,9% tendo assim uma redução de 36,7%.

Segundo o autor, a pesquisa citada apresentou uma boa separação da argamassa do agregado, porém a composição de grande parte dos agregados reciclados é de uma mistura de materiais contendo diversos componentes. A geração de resíduos e os impactos ambientais desse processo também são apontados como dificuldades a sua utilização. Além disso os custos com o processo e o alto consumo de ácido necessitam de grandes investimentos, o que combinado com a proporção necessária para o processamento em larga escala, torna esse método inviável para o beneficiamento de grandes quantidades.

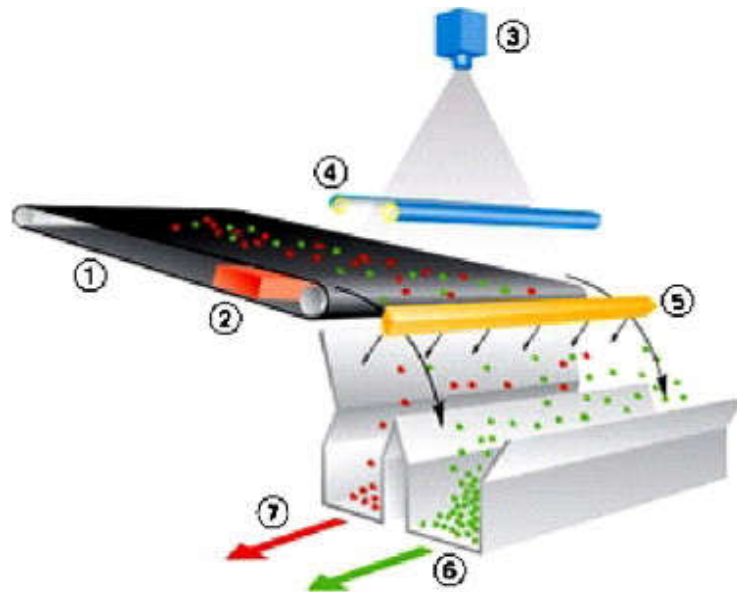
3.3 SEPARAÇÃO AUTOMÁTICA POR SENSORES

Uma técnica de processamento que tem um baixo impacto ambiental é a separação óptica, pois não requer o uso intensivo de energia, nem de água, nem de elementos químicos como os processos apresentados anteriormente. Os equipamentos de separação óptica são compostos de um alimentador vibratório, o qual distribui as partículas sobre os transportadores de correia, que as conduzem até os sensores, para registro das imagens conforme esquema representativo da figura 4. As partículas são identificadas pela cor ou por algum outro parâmetro pré-definido (dependendo do tipo de equipamento disponível) e têm suas posições identificadas. Compressores de ar devidamente posicionados são acionados para desviar o fluxo dessas partículas

predeterminadas, de modo que estas sejam coletadas separadamente das demais (ANGULO, 2013).

Na indústria da mineração a classificação óptica automática foi desenvolvida para facilitar o beneficiamento de diferentes minérios. O uso de dispositivos de triagem óptica está aumentando anualmente, devido a razões como a capacidade de automatizar o processo de triagem, a possibilidade de melhorar a separação (quantidade e precisão), e o aumento da qualidade dos produtos finais em comparação com os métodos de separação tradicionais (NIENHAUS *et al.*, 2014).

Figura 4 – Descrição do funcionamento do equipamento de separação óptica por cor.



Legenda: 1 - Transportador ou Alimentação; 2 - Sensor de Metal; 3 - Câmera; 4 - Iluminação; 5 - Válvulas de ar comprimido; 6 - Concentrado principal; 7 - Rejeito.

Fonte: adaptado de Mulder, De Jong e Feenstra (2007)

Estudos da aplicação de classificação automática na reciclagem de materiais de construção foram descritos por Angulo *et al.* (2013). Os autores realizaram experimentos com a utilização de separação óptica para remoção de resíduos de cerâmica vermelha dos agregados mistos oriundos de resíduos de construção e demolição (RCD), objetivando a redução da porosidade dos agregados reciclados para uso em concreto. Os pesquisadores apontam que a principal vantagem desse tipo de processamento é o uso reduzido de água e energia quando comparado com outros processos industriais. As conclusões desse trabalho apontam que a remoção através da separação óptica da cerâmica vermelha dos agregados reciclados mistos,

pode reduzir as taxas de absorção dos mesmos e que a eficiência da seleção depende da quantidade de cerâmica vermelha presente, onde teores acima de 40% apresentaram uma queda significativa na eficácia e na capacidade de separação desse material. Sendo assim a performance dos resultados ficou atrelada a proporção de materiais que compõe os agregados reciclados, ou seja, a variabilidade dos constituintes restringiu ou promoveu perda de eficiência desse método de seleção.

A pesquisa realizada por Pandurangan *et al.* (2016), no Departamento de Processamento Mineral da RWTH Aachen na Alemanha, utilizou um equipamento que possui sistema óptico com capacidade de reconhecimento de 1 bilhão de cores e um sensor de condutividade especial, que permite a identificação de uma grande variedade de materiais e possui a capacidade de processamento de até 40 t/h. O funcionamento é baseado em separadores automáticos que removem os materiais detectados. Há uma câmera que analisa o tamanho, a forma, a cor e a posição das partículas na correia. Essas informações são usadas na regulação de ejetores que removem partículas isoladas ou permitem a sua passagem. Os resultados obtidos na separação automática por cor trazem que o equipamento se mostrou eficiente para aumentar a qualidade da amostra e evitar a presença de materiais indesejados no lote de resíduo a ser reciclado. O experimento apontou que a separação por cor se mostrou efetiva, principalmente para remoção de madeira de um lote de resíduo de construção e demolição misto, e permitiu uma boa remoção de gesso e vidro. Já para a seleção de materiais com cores semelhantes, como pedras e azulejos o equipamento não se mostrou eficaz. Uma segunda técnica de triagem automática foi estudada no projeto, com base em raios X, a qual apresentou uma separação eficaz entre materiais orgânicos e inorgânicos, bem como a identificação de metais no lote avaliado.

Nos estudos acima mencionados o método tem se mostrado eficaz quando os materiais possuem diferenças significativas no parâmetro definido para a separação, como por exemplo cor e formato. Contudo, por se tratar de um processo que necessita investimentos em equipamentos que utilizam alta tecnologia, os custos de aquisição, operação e manutenção tem se mostrado como barreiras para a popularização e utilização desses equipamentos em larga escala, como para a separação e seleção dos resíduos de construção e demolição.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Ribeiro e Ten Caten (2011) definem pesquisa experimental como sendo uma sequência de ensaios estruturados, que facilita a determinação entre a causa e o efeito de um determinado fenômeno, tendo como alicerce embasamento estatístico que objetiva oferecer maior confiabilidade aos resultados obtidos. Ao se realizar uma pesquisa experimental adequada é possível otimizar os recursos e o tempo empregados no estudo, viabilizando sua realização no âmbito técnico e econômico. Dessa forma, a pesquisa foi pensada e desenvolvida objetivando maior eficiência na realização dos ensaios laboratoriais e análise das informações. Para tanto, foram realizados os seguintes passos sugeridos pelos autores:

a) planejamento final e execução:

- definir os procedimentos para os ensaios (uniformização);
- desenhar planilhas para coleta de dados;
- executar os experimentos e anotar resultados.

b) Procedimentos de ensaio:

- fixar parâmetros do processo não incorporados no experimento;
- observar sempre a mesma sistemática nos ensaios, com a utilização das mesmas máquinas, os mesmos operadores, entre outros;
- elaborar planilhas para coleta de dados.

O programa experimental dessa pesquisa foi elaborado com o objetivo de analisar as propriedades do concreto produzido com agregado graúdo reciclado antes e após o beneficiamento desses agregados por jigagem. Para tal, foram estudadas três fontes distintas de agregados obtidos do processo de britagem de resíduo de construção e demolição. Os fornecedores comercializam ou cedem agregados reciclados com granulometria entre 4,75mm e 25mm, sendo o material necessário para a realização dessa pesquisa obtido por meio de doação.

Foram realizados ensaios de caracterização, com amostras representativas dos agregados, antes e após a jigagem. Sendo selecionados os ensaios de caracterização que são mais comumente realizados em estudos com agregado graúdo, sendo eles: ensaios de análise granulométrica, índice de forma, massa unitária, massa específica, ensaio de absorção de água e de constituição para agregados reciclados. A relevância desses ensaios se justifica no fato de que os resultados obtidos poderão vir a exercer influência, no modo de disposição desses nas matrizes cimentícias, na trabalhabilidade, no consumo de cimento, refletindo assim na consistência e compacidade do concreto resultante e impactando na performance e nos custos dos concretos feitos com esses materiais (COUTINHO, 2000).

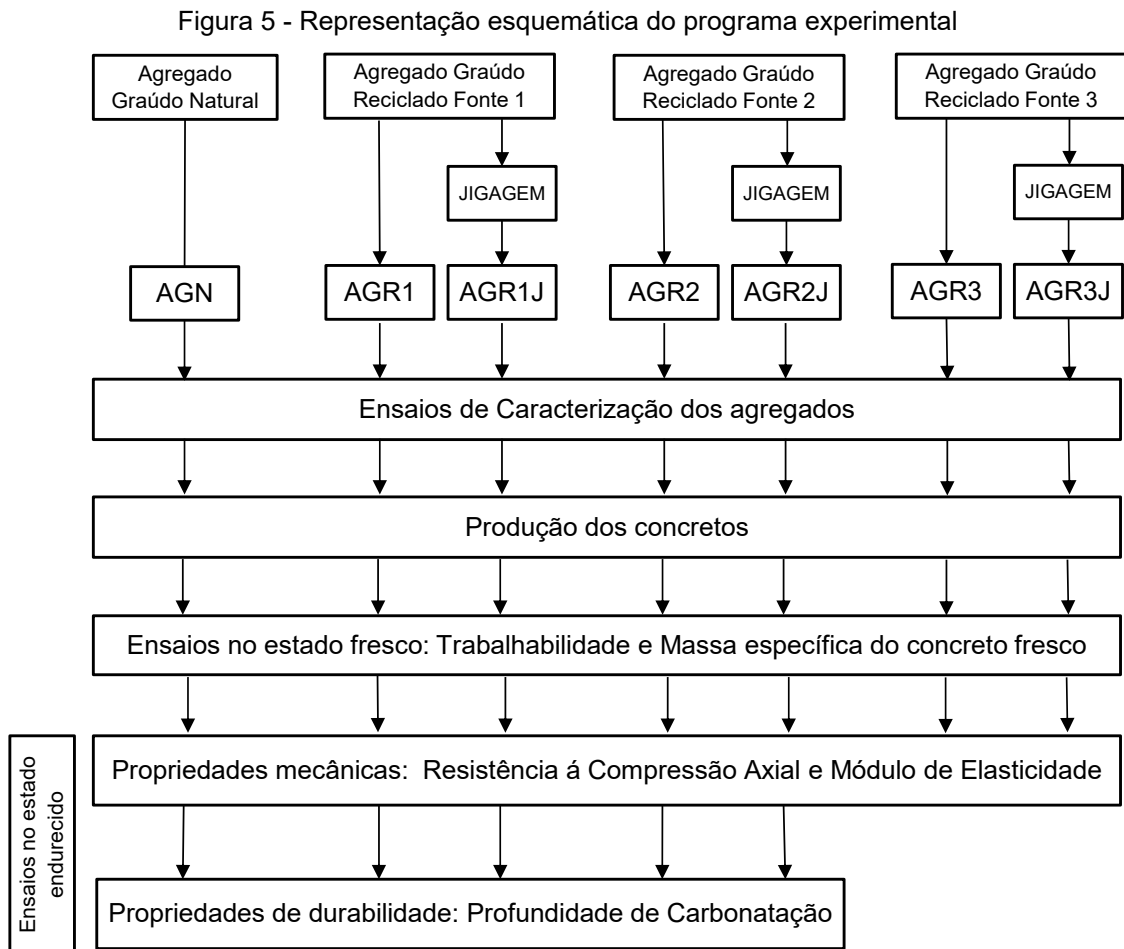
Foram moldados três traços de concreto para cada amostra de agregado reciclado (jigado e não jigado), o que tornou possível, desenhar curvas de dosagem característica de cada família de concreto. Os três traços escolhidos para essa pesquisa, foram composições com matrizes mais resistentes, com o objetivo de averiguar a resistência do agregado reciclado nos concretos reciclados e não a da matriz. Também foi produzido concreto de referência com agregados graúdos naturais, para a realização de análises comparativas.

As propriedades no estado fresco consideradas foram a trabalhabilidade, a qual foi fixada em uma faixa entre 100 +/-20mm e a massa específica do concreto fresco.

Para o estado endurecido foram analisadas as propriedades mecânicas de resistência à compressão, por se tratar de umas das propriedades do concreto mais analisadas, podendo ser considerada um parâmetro capaz de indicar as variações da qualidade entre diferentes tipos de concreto; e o módulo de elasticidade por ser um dos principais parâmetros analisados em estudos envolvendo agregados graúdos. Conjuntamente, no estado endurecido, para analisar a durabilidade dos concretos estudados foi avaliada a profundidade de carbonatação. Como os parâmetros adotados para a realização dos ensaios, impactam diretamente nos resultados, as análises realizadas para as profundidades de carbonatação dessa pesquisa foram comparadas somente umas com as outras, visto não serem encontradas referências que utilizaram os mesmos equipamentos, procedimentos, duração e parâmetros adotados.

A escolha da análise dessas propriedades ocorre em função da variabilidade intrínseca dos agregados reciclados, que pode impactar nos valores de resistência e durabilidade dos concretos produzidos com esses materiais.

A figura 5 traz um esquema do que foi descrito anteriormente, e a nomenclatura adotada para as variedades de agregados reciclados que foram utilizados na pesquisa.



Fonte: elaborada pela autora

A nomenclatura que foi adotada nesse estudo e que está na representação esquemática, é a seguinte:

- AGN: agregado graúdo natural, que nesse estudo foi rocha natural de origem basáltica;
- AGR1: agregado graúdo reciclado obtido na fonte 1;

- AGR1J: agregado graúdo reciclado obtido na fonte 1, que passou por processo de seleção densitária no jigue;
- AGR2: agregado graúdo reciclado obtido na fonte 2;
- AGR2J: agregado graúdo reciclado obtido na fonte 2, que passou por processo de seleção densitária no jigue;
- AGR3: agregado graúdo reciclado obtido na fonte 3;
- AGR3J: agregado graúdo reciclado obtido na fonte 3, que passou por processo de seleção densitária no jigue.

Após a definição do programa experimental, foram desenvolvidas as seguintes etapas de campo e laboratoriais:

- pesquisa e aquisição de resíduos de construção e demolição já britados de 3 fontes distintas;
- peneiramento para certificação da granulometria nominal comercializada, passante na peneira de abertura 25 mm e retido na 4,75 mm;
- beneficiamento ou seleção de uma parte dos agregados reciclados utilizando jigagem;
- caracterização dos agregados naturais e reciclados (antes e após separação no jigue);
- estudo da dosagem do concreto, com a realização de dosagens experimentais para obtenção do teor de argamassa ideal, o qual foi utilizado em todas as concretagens;
- execução dos concretos com agregado natural e reciclados, posterior cura;
- execução dos ensaios propostos;
- avaliação das propriedades escolhidas e análise estatística dos resultados.

A seguir são descritos o planejamento experimental, os materiais e métodos que foram selecionados e adotados para o desenvolvimento dessa pesquisa.

4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para se obter um maior embasamento científico foi realizada análise estatística dos resultados que foram obtidos dos ensaios realizados, os quais estão descritos no item 5.1 e 5.3 desse trabalho.

As variáveis dependentes são parâmetros que podem ser medidos e que permitem quantificar as características de qualidade exigidas. Dessa forma, as variáveis de resposta desse estudo experimental estão relacionadas com as características de desempenho dos concretos estruturais, que são vinculadas ao desempenho mecânico e de durabilidade. Tendo consciência de que os parâmetros que podem quantificar o desempenho dos concretos são diversos, optou-se por estudar as propriedades que são consideradas mais importantes para o alcance dos objetivos deste trabalho, as quais normalmente trazem resultados mais significativos. Sendo assim as variáveis de resposta escolhidas para o estudo foram:

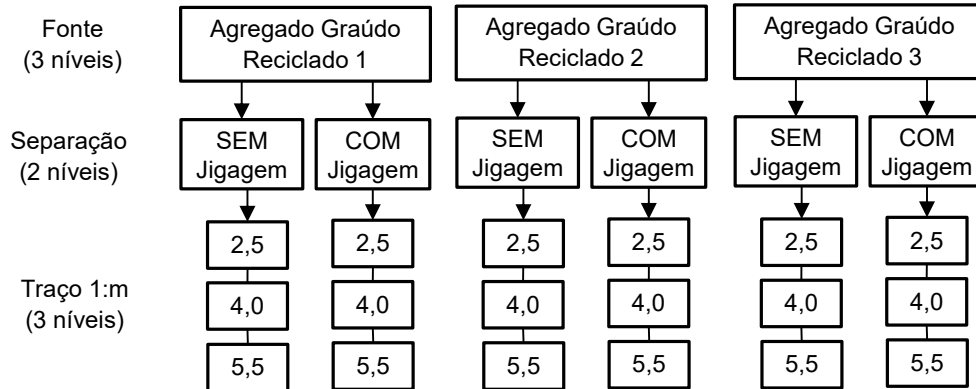
- a) resistência à compressão axial (f_c);
- b) módulo de elasticidade (E_c);
- c) durabilidade analisada através da profundidade de carbonatação.

As três variáveis de resposta foram analisadas para as fontes 1 e 2, enquanto que para a fonte 3 não foram realizados ensaios de durabilidade através da profundidade de carbonatação, devido ao tempo de duração desse ensaio e a demora na obtenção do material da fonte 3.

Os parâmetros do processo considerados como variáveis independentes são os fatores controláveis do processo, que foram escolhidos para serem estudados a vários níveis do experimento, a fim de verificar sua influência sobre os indicadores de desempenho ou variável de resposta. Para esse estudo eles foram: fontes de RCD (3 níveis), a seleção dos agregados graúdos de RCD por jigagem (2 níveis) e o traço unitário considerando a relação aglomerante e agregados 1:m (3 níveis). Sendo assim, foram analisadas 6 combinações para cada fonte de resíduo e realizados 18 traços para o estudo. Buscando um melhor entendimento, a figura 6 traz uma

representação esquemática das variáveis independentes consideradas nas análises estatísticas.

Figura 6 - representação esquemática das variáveis independentes



Fonte: elaborada pelo autor

Também foram moldados concretos com agregado graúdo natural, para os mesmos traço apresentados na figura 6.

A primeira variável de resposta citada está relacionada à validação da pesquisa para fontes distintas de RCD, tendo em vista a grande variabilidade dos agregados graúdos reciclados. Já a segunda, está relacionada com o objetivo principal desse trabalho, e busca analisar o impacto da separação dos materiais por jigagem nas propriedades dos concretos produzidos com esse material. Enquanto a terceira se relaciona com o comportamento distinto entre a matriz do concreto (com diferentes resistências e porosidades) e os agregados graúdos.

Os demais fatores e processos que poderiam ser tomados como fatores variáveis foram fixados, tais como, a idade de execução dos ensaios, a trabalhabilidade do concreto fresco, os parâmetros de ajuste de operação do jigage e a pré-umidificação dos agregados reciclados. Buscando minimizar os fatores de ruído e o erro, os demais parâmetros que podem influenciar os resultados do experimento foram mantidos constantes, tais como o tipo e lote do cimento, o lote do agregado miúdo natural, os equipamentos utilizados, os operadores e executores dos ensaios, entre outros (BOX et al., 2005).

Para o tratamento dos dados se utilizou o método de análise de variância (ANOVA), através do processamento no software Excel, a fim de observar quais fatores

controláveis exercem influência sobre as variáveis de resposta, podendo-se, assim, chegar a conclusões sobre a significância ou não dos mesmos, com um nível de confiabilidade estatística de 95%.

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

A seguir são descritos os materiais utilizados nessa pesquisa, delineando o contorno do estudo.

4.2.1 Cimento

Para essa pesquisa optou-se por utilizar o cimento Portland CP IV 32 RS, que possui adições pozolânicas, por ser um material produzido na região de realização dos ensaios e ser largamente utilizado.

Conforme declaração do fabricante, o cimento utilizado apresenta características físico e químicas de acordo com a NBR 5736 (ABNT, 1991) e NBR 5737 (ABNT, 1992). Possuindo massa unitária de $0,876\text{g/cm}^3$, massa específica de $2,65\text{g/cm}^3$ e demais características conforme ensaios realizados, e enviados pelo fabricante, que são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização química, física e mecânica do cimentos CP IV 32 RS

Ensaio	CPIV32	Unidade	Exigências
Finura (resíduo na peneira 75 μ)	0,32	%	$\leq 8,0$
Finura Blaine	4920	cm ² /g	≥ 3000
Início de pega	405	min	≥ 60
Tempo de fim de pega	520	min	≤ 720
Resistência à compressão 3 dias	22,3	MPa	≥ 10
Resistência à compressão 7 dias	26,2	MPa	≥ 20
Resistência à compressão 28 dias	41,2	MPa	≥ 32
Perda ao fogo (% em massa)	3,78	%	$\leq 4,5$
SO ₃ (% em massa)	2,16	%	$\leq 4,0$
MgO (% em massa)	4,21	%	$\leq 6,5$

Fonte: disponibilizado pelo fabricante

4.2.2 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo utilizado foi a areia de quartzo, de origem natural, proveniente e disponível na região de desenvolvimento do estudo, com granulometria determinada pelo material passante na peneira de abertura de malha #4,75 mm.

A areia foi caracterizada quanto às suas propriedades físicas, segundo os ensaios de determinação da composição granulométrica e módulo de finura conforme a NBR NM 248 (ABNT,2003) massa unitária segundo NBR NM 45 (ABNT,2006) e massa específica descrita na NBR NM 52 (ABNT,2009). Antes da realização dos ensaios de caracterização as amostras foram submetidas ao processo de quarteamento conforme prescreve a NBR NM 27 (ABNT,2001), objetivando que as amostras representassem o mais próximo possível o material na sua totalidade.

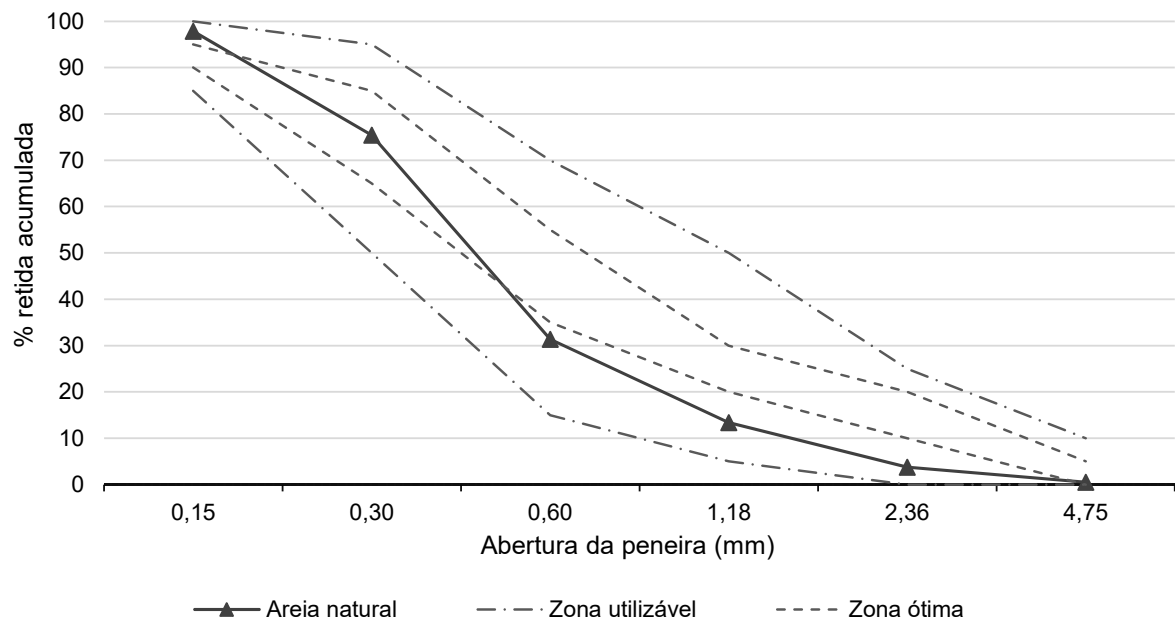
Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE) da UFRGS. Na tabela 2 e na figura 7, são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de granulometria.

Tabela 2 – Granulometria do agregado miúdo

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)			
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa			
			Limites Inferiores		Limites Superiores	
			Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
4,75	1	1	0	0	5	10
2,36	3	4	0	10	20	25
1,18	9	13	5	20	30	50
0,60	18	31	15	35	55	70
0,30	44	75	50	65	85	95
0,15	23	98	85	90	95	100
< 0,15	2	100	100	100	100	100

Fonte: elaborada pela autora

Figura 7 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural de quartzo



Fonte: elaborada pela autora

Conforme pode-se observar na figura 7, a curva granulométrica, que caracteriza o agregado miúdo utilizado, está dentro da zona considerada utilizável.

Os resultados para o módulo de finura, dimensão máxima do agregado, massa específica e massa unitária são apresentados na tabela 3. Pode-se observar que essas características encontradas atendem as exigências estabelecidas pela norma NBR 7211 (ABNT,2009).

Tabela 3 – Características físicas do agregado miúdo

Características avaliadas	Valores	Unidades	Norma
Módulo de Finura	2,23	-	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Dimensão Máxima	2,4	mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa Específica	2,507	g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa Unitária	1,54	g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006)

Fonte: elaborada pela autora

4.2.3 Agregado graúdo natural

O agregado graúdo natural utilizado foi de origem basáltica, com dimensão entre 25 mm e 4,8 mm, oriundo da cidade de Montenegro (RS) e comercializado na região de desenvolvimento do estudo.

Antes da realização dos ensaios de caracterização, as amostras foram submetidas ao processo de quarteamento conforme prescreve a NBR NM 27 (ABNT, 2001), objetivando que as amostras representassem o mais próximo possível o material como um todo. Todos os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE) da UFRGS.

O agregado graúdo natural foi caracterizado quanto às suas propriedades físicas segundo os ensaios de determinação da composição granulométrica e módulo de finura conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), os quais são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Granulometria do agregado graúdo

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)				
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa				
			Zona granulométrica d/D ¹				
			4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
25	0	0	-	0 - 5	5 - 25 ²	87 - 100	-
19	8	8	-	2 - 15 ²	65 ² - 95	95 - 100	-
12,5	75	83	0 - 5	40 ² - 65 ²	92 - 100	-	-
9,50	15	98	2 - 15 ²	80 ² - 100	95 - 100	-	-
6,30	2	100	40 ² - 65 ²	92 - 100	-	-	-
4,75	0	100	80 ² - 100	95 - 100	-	-	-
<4,75	0	100	95 - 100	-	-	-	-

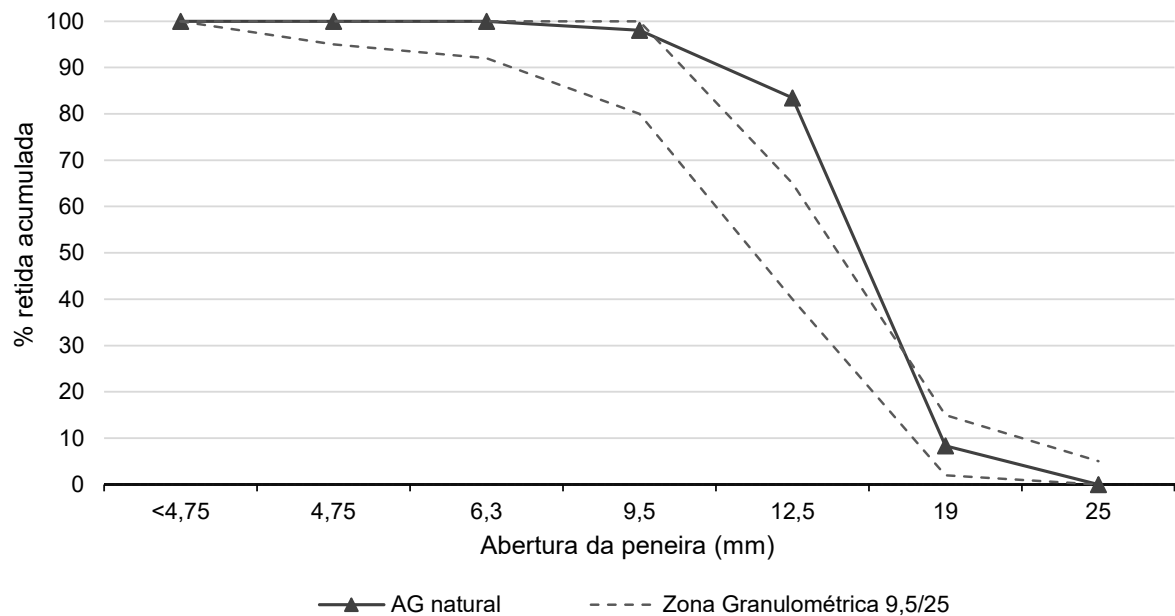
¹ Zona granulométrica correspondente a menor (d) e a maior (D) dimensões de agregado graúdo.

² Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados.

Fonte: elaborada pela autora

A curva granulométrica para o agregado graúdo natural foi desenhada na figura 8, juntamente com o delineamento da zona granulométrica 9,5/25 prescrita pela norma de agregados para concreto.

Figura 8 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural basáltico



Fonte: elaborada pela autora

Foram realizados os ensaios de massa unitária segundo NBR NM 45 (ABNT, 2006), índice de forma prescrito na NBR 7809 (ABNT, 2006), massa específica e absorção descritas na NBR NM 53 (ABNT, 2009), cujos resultados estão na tabela 5.

Tabela 5 – Características físicas do agregado graúdo

Características avaliadas	Valores	Unidades	Normas
Módulo de Finura	7,06	-	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Índice de Forma	2,20	-	NBR 7809 (ABNT, 2006)
Absorção de água	0,023	%	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Dimensão Máxima	25	mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa Específica	2,964	g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Massa Unitária	1,694	g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006)

Fonte: elaborada pela autora

Conforme pode-se observar na tabela 5, para os resultados de granulometria, o agregado graúdo natural não se enquadrou completamente em nenhuma zona granulométrica especificada pela norma, sendo que a zona granulométrica à qual mais se aproximou (9,5/25) foi desenhada na figura 8, juntamente com sua curva granulométrica. Os demais resultados de caracterização física do agregado testado atendem as exigências estabelecidas na norma NBR 7211 (ABNT, 2009). Esses

valores serão utilizados e comentados em comparações com os agregados reciclados e análises posteriores.

4.2.4 Agregado graúdo reciclado

Nesse item é descrita a metodologia adotada para a obtenção e seleção dos agregados graúdos reciclados. Na sequência, são apresentados os ensaios de caracterização que foram realizados e as normativas adotadas, bem como são detalhados os ensaios que não possuem normas específicas atualmente. As respostas obtidas são apresentadas para as fontes de agregado reciclado em separado, e para cada fonte são apresentados os resultados obtidos para os materiais jigados e não jigados, objetivando facilitar uma análise comparativa dos valores.

4.2.4.1 Obtenção de amostras

A aquisição dos agregados reciclados foi feita em aterros, empresas de demolição e organizações não governamentais, as quais recebem ou coletam resíduos de construção e demolição. Essas instituições fazem a retirada visual e manual das impurezas e processam esse material em britadores para posterior comercialização ou doação.

Nessa pesquisa foi nomeada Fonte 1 os agregados graúdos reciclados oriundos de empresa que coleta RCD por meio de caçambas, realiza a britagem do material, e comercializa os agregados reciclados em três faixas granulométricas. Para testes iniciais e análises de procedimentos, foi coletada uma quantidade maior de agregado graúdo na primeira fonte de estudo, sendo que a mesma foi feita com auxílio de pá e o material foi coletado ao longo de toda a altura da pilha. Os agregados reciclados foram acondicionados em 30 sacos próprios para armazenagem e transporte de materiais de construção. Na chegada ao laboratório os sacos foram pesados, sendo que as massas dos mesmos ficaram entre os valores de 30 e 38kg, sendo o total de material coletado próximo a 1 tonelada. A empresa fica localizada na cidade de Montenegro/RS e a coleta foi realizada em maio de 2017.

A figura 9 mostra os equipamentos que foram utilizados para o processamento do resíduo de construção e demolição oriundos da Fonte 1, bem como a disposição dos materiais em pilhas.

Figura 9 – Instalações e equipamentos de processamento do RCD da fonte1



Fonte: elaborada pela autora

Os agregados graúdos reciclados de RCD da Fonte 2, foram obtidos em uma organização não governamental na zona sul da cidade de Porto Alegre no mês de novembro de 2017. A ONG recebe resíduos de construção e demolição da comunidade na qual está inserida, realiza a britagem e faz a doação desse material para a população local. Os agregados reciclados foram coletados com pá e foram acondicionados em 20 sacos para entulho. Ao chegar no LAMTAC/NORIE os sacos foram pesados e as massas de cada um ficaram em valores entre 30 e 36kg, sendo o total aproximadamente 700kg.

Na figura 10 é apresentada uma imagem do local da coleta do material na fonte 2, e os equipamentos que foram utilizados para o processamento do agregado graúdo, e os sacos utilizados para a coleta e transporte dos mesmos.

Figura 10 – Instalações e equipamentos de processamento do RCD da fonte 2



Fonte: elaborada pela autora

Para a terceira fonte de agregados graúdos reciclados, foram adquiridos materiais no mesmo local da Fonte 2, porém em esses foram oriundos do processamento de um lote diferente de resíduo de construção e demolição, britados e coletados no mês de fevereiro de 2018. Para a Fonte 3 foram arrecadados 20 sacos com massas entre 30 e 35 kg, totalizando aproximadamente 700kg.

Foi feita a escolha por fornecedores locais e de regiões próximas, que realizam a britagem dos resíduos, o que além de otimizar a realização da pesquisa, buscou se aproximar da realidade dos agregados graúdos reciclados que são comercializados e/ou utilizados no ramo construtivo.

Todas as amostras coletadas passaram pelo processo de classificação granulométrica, ou seja, todo material britado foi peneirado através de um conjunto de peneiras com a utilização de vibração mecânica, sendo selecionadas as partículas passantes na peneira com abertura de malha de 25mm e retidos na 4,75mm. Isso porque essas dimensões são atribuídas aos agregados graúdos utilizados normalmente em concretos estruturais, de acordo com a NBR 7211(ABNT,2009).

Os agregados graúdos reciclados foram homogeneizados e quarteados através do procedimento descrito na NBR NM 27 (ABNT,2001), a partir do qual foram separadas as quantidades necessárias do material, em massa, para cada um dos ensaios realizados e para posterior confecção dos concretos. Esse procedimento objetivou

que todas as amostras do material fossem representativas do todo, também auxiliando na redução da variabilidade das características dos agregados e dos concretos que serão produzidos com eles. Através dessa técnica foram separadas as amostras (com massa de 58 +/- 2 Kg) de material de cada fonte (em torno de 70% do total), as quais foram transportadas ao Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

4.2.4.2 Ensaio de separação em jigue

O método de separação de partículas selecionado para o desenvolvimento dessa pesquisa foi através a jigagem à ar, o qual foi realizado através da utilização de jigue pneumático. A escolha foi feita por se tratar de um equipamento capaz de processar grandes quantidades de material, por terem estudos que evidenciem seu bom desempenho na seleção de partículas com granulometria próxima as do agregado gráudo e por possuir baixo custo de aquisição e manutenção, o que aumenta as possibilidades do processo ser aplicado em grande escala.

A figura 11 traz a imagem do jigue pneumático modelo AllAir S-500, o qual foi utilizado para o processo de separação densitária dos agregados reciclados gráudos que foram estudados.

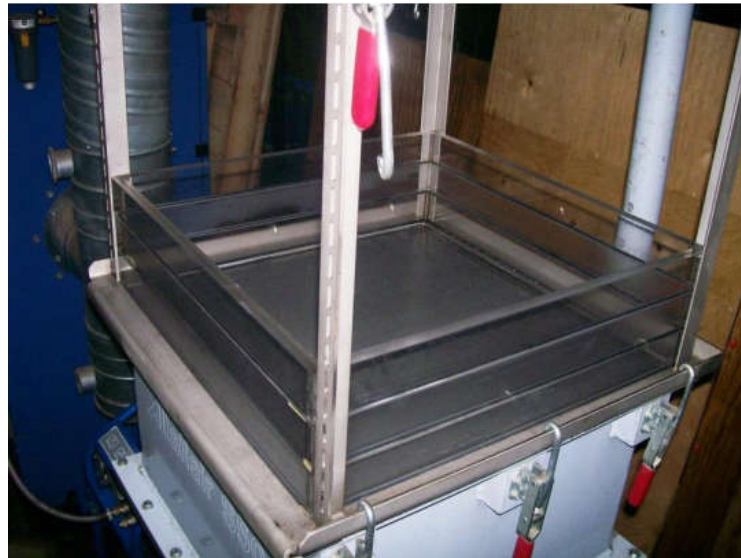
Figura 11 – Modelo jigue de escala piloto modelo AllAir® S-500



Legenda: (1) Unidade de alimentação; (2) painel de controle; (3) câmara de separação; (4) unidade de filtragem de pó/finos. Fonte: Sampaio *et al.*, 2016

Para um melhor entendimento sobre o equipamento, seleção e coleta do material beneficiado, na figura 12 observa-se o compartimento de separação do jig, constituído de gavetas sobrepostas e encaixadas de acrílico (Plexiglass).

Figura 12 – Detalhe da câmara de separação, formada por gavetas sobrepostas



Fonte: AMBRÓS (2017)

A sequência das operações do jig pneumático, que tem o ar com meio de estratificação, descritas por Sampaio e Tavares (2005) são:

- a) selecionar as configurações de funcionamento no quadro de comando e ligar o equipamento;
- b) o ar atmosférico é aspirado através do ventilador centrífugo e pressurizado com um compressor;
- c) o ar, sob pressão, passa pela válvula rotativa que transforma o seu escoamento em um fluxo pistonado;
- d) o fluxo de ar é direcionado, pelas tubulações, para a câmara de estratificação;
- e) após passar pelas partículas, o ar é coletado pelo bocal de exaustão e filtrado, onde o material pulverulento é retido, e o ar é devolvido à atmosfera;

f) caso haja qualquer imprevisto, o funcionamento do jigge pode ser interrompido através de sua chave geral;

g) o coletor de fundo permite remover as partículas, com dimensões menores que a malha da grade de fundo da câmara de estratificação, que penetraram na tubulação de ar;

h) as alíquotas das amostras segregadas são removidas da câmara de estratificação através do arrastamento das caixas sem fundo, que encaixadas, umas sobre as outras, formam o compartimento onde ocorre o processo de segregação durante o processamento.

Conforme descrito por Sampaio e Tavares (2005), o primeiro item da sequência da operação do Jigge diz respeito à seleção das configurações de funcionamento do equipamento. Para realizar essa escolha, foi feita uma busca em trabalhos que realizaram o processo de jigagem com resíduos de construção e demolição, como os publicados por Cazacliu *et al.* (2014), Silva *et al.* (2015), Ambrós (2017), Sampaio *et al.* (2016), Cunha (2017), entre outros. Paralelamente foram realizados testes piloto com os agregados reciclados oriundos da Fonte 1. A partir dos parâmetros já utilizados pelos pesquisadores citados, foram realizados ensaios buscando assim adequar o material processado aos parâmetros de operação do jigge. A análise visual da estratificação das camadas do material, conjuntamente com a experiência do operador do equipamento e os valores anteriormente adotados em outros estudos apontaram para a escolha dos critérios que foram utilizados. Estes parâmetros de operação do equipamento foram introduzidos no quadro de comando e mantidos constantes para as 3 fontes avaliadas. São eles:

a) frequência de 180 rpm, a qual é a taxa de pulsação de ar na câmara de estratificação;

b) taxa de expansão do leito em 70%, que se dá pela potência do fluxo de ar;

c) tempo de ensaio de 120 segundos.

A quantidade de material utilizado em cada processamento no jigge foi aproximadamente 60 Kg e a expectativa após o processamento no jigge era que os

agregados graúdos mais densos fossem depositados na bandeja inferior da qual foram coletados. Nessa pesquisa foi desprezado o efeito de parede, descrito na revisão bibliográfica, que pode ser gerado durante processamento, por se tratar de um tema complexo e por não se ter encontrado uma maneira operacional, e referências de como retirar a amostra de material suprimindo a área próxima ao perímetro da câmara de separação, onde esse fenômeno pode ocorrer (AMBRÓS *et al.*, 2016).

Ao final de cada ensaio, foi realizada a coleta do material da camada inferior da câmara de separação (indicada na figura 13), na qual se esperava ter uma maior concentração do material mais denso da amostra. Após o processamento dos agregados graúdos, a quantidade total coletada, de cada fonte específica, foi novamente homogeneizada e quarteada nas porções necessárias para a realização dos ensaios de caracterização e confecção dos concretos, objetivando que todas as porções de amostras fossem representativas do material.

Figura 13 – Imagem da câmara de separação destacando a camada ou gaveta inferior, utilizada



Fonte: elaborada pela autora

4.2.4.3 Constituição

Os resíduos de construção e demolição geralmente apresentam uma elevada heterogeneidade na sua composição. Por essa razão, foram realizados ensaios de constituição ou composição, com o objetivo de caracterizar as amostras de agregado graúdo reciclado quanto às parcelas oriundas dos diferentes materiais que a compõe.

O ensaio de constituição ou composição foi realizado manualmente através da separação visual dos materiais constituintes de três amostras representativas de cada lote de agregado graúdo reciclado, antes e após jigagem. As amostras foram previamente secas em estufa até a constância de massa, e foram analisados os agregados com granulometria entre 25 e 4,75 milímetros, sendo desconsiderado o material passante nesta última peneira.

As amostras foram pesadas, e ao final cada parcela de material que foi separado foi pesado separadamente. Foram obtidas as porcentagens de massa de cada material constituinte em relação à massa total da amostra. O resultado final foi alcançado através da média das porcentagens obtidas nas análises realizadas por três pessoas distintas, buscando assim um resultado mais assertivo e próximo da realidade dos materiais que formam o lote de agregado graúdo reciclado.

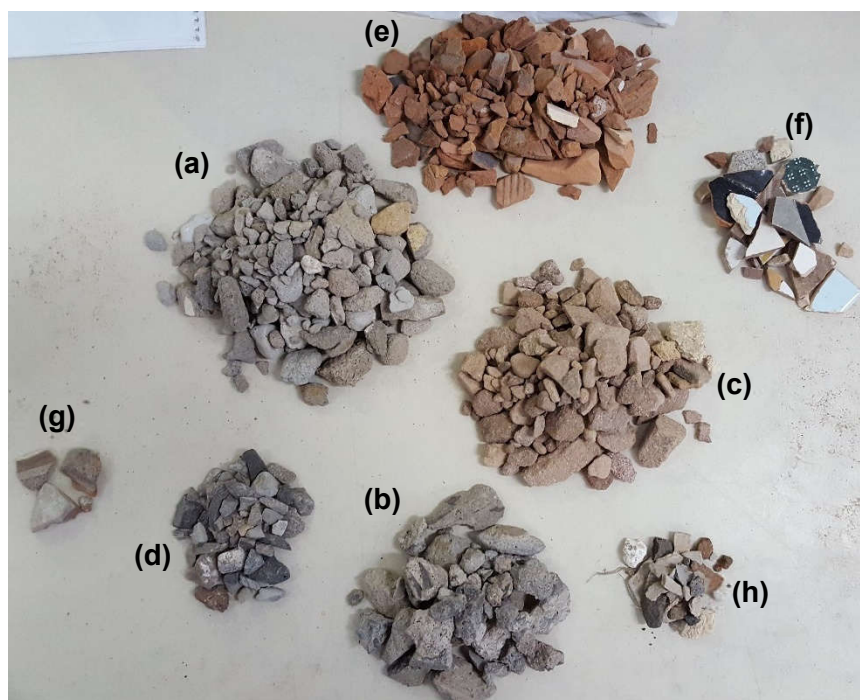
Nessa pesquisa os materiais mais representativos, os quais foram utilizados para a separação e classificação, foram:

- a) argamassa: sendo considerado todo material cimentício constituído de areia e cimento e/ou cal, que visualmente não continha agregados graúdos ou pedrisco;
- b) concreto: todo material composto pela união de areia, cimento e agregado graúdo, cuja identificação fosse possível;
- c) rocha: qualquer fragmento de rocha natural, podendo ter a presença de algum material aglomerante aderido em pouca quantidade, sendo constituído em sua maior parcela de rochas de diversos tipos, exceto arenito;
- d) rocha – arenito: fragmentos de rocha natural que foram identificadas como arenito;
- e) cerâmica: todo material cerâmico não polido, constituído basicamente por tijolos e telhas cerâmicas;

- f) cerâmica – esmaltada ou polida: parcela constituída pelos materiais cerâmicos com pelo menos uma das superfícies polidas e esmaltadas, como azulejos, ladrilhos, telhas cerâmicas esmaltadas, pias e louça sanitária;
- g) misto: agregados que visualmente eram formados por dois materiais, onde não havia a predominância de um deles.
- h) rejeito: outros materiais que não foram classificados anteriormente, sendo considerados contaminantes, tais como madeira, metais, plásticos, amianto, torrões de terra ou de cal, materiais orgânicos, vidro, gesso, carvão, entre outros.

A figura 14 traz a imagem dos materiais que foram separados no ensaio de composição e sua identificação conforme itens apresentados anteriormente.

Figura 14 – Imagem dos materiais separados no ensaio de composição



Legenda: (a) argamassa; (b) concreto; (c) arenito; (d) rocha; (e) cerâmica; (f) cerâmica esmaltada; (g) misto e (h) rejeito. Fonte: elaborada pela autora

Leite (2001) e Lovato (2007) realizaram a caracterização de agregados reciclados da mesma cidade e em regiões próximas da área desse estudo. Leite (2001) realizou o ensaio para duas amostras de um mesmo lote de RCD, enquanto Lovato (2007)

efetuou a análise das composições percentuais de RCD para 3 fontes distintas. Os dados obtidos por elas mostram os diferentes tipos de materiais encontrados e estão resumidos na tabela 6.

Tabela 6 - Composição de RCD oriundos de regiões próximas à deste estudo, em porcentagem (%)

Estudo	Local	Argamassa	Concreto	Cerâmica	Rocha - Outros	Rocha - Arenito	Outros
Leite (2001)	Amostra 1	25,9	15,9	25,9	17,8	14,2	0,4
	Amostra 2	30,6	14,5	26,8	16,4	11,3	0,4
Lovato (2007)	Coleta 1	22,5	26,9	33,2		17,4	-
	Coleta 2	44,2	18,3	35,7		1,8	-
	Coleta 3	34,9	27,3	23,4		14,4	-

Pesquisadores de outros lugares realizaram ensaios de composição em seus estudos e obtiveram resultados cujas as médias estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Composições realizados por outros pesquisadores, em porcentagem (%)

Estudo	n° de amostras	Local	Argamassa	Concreto	Cerâmica não polida	Cerâmica polida	Rocha	Outros
Zordan(1997)	4	Ribeirão Preto -SP	37,4%	21,1%	20,8%	2,5%	17,7%	0,5%
Angulo e John(2002)	36	Santo André - SP	28,2%	43,8%		3,9%	23,0%	1,7%
Medina <i>et al</i> (2015)	1	Glasgow - Escócia		45,6%		5,3%	28,1%	21,0%

Como pode-se perceber, nos ensaios já realizados, a variabilidade na composição das amostras representativas dos lotes de agregados graúdos reciclados é evidenciada, mesmo em amostras da mesma fonte como os resultados apresentados por Leite (2001). Esta autora utilizou uma classificação para as rochas de arenito em separado dos outros tipos de rochas, considerando que os materiais dessa natureza são mais frágeis e tem resistências muito diferentes de outras rochas. Como na coleta dos agregados reciclados da fonte 1 foi identificada a presença significativa de arenito, nessa pesquisa também foi quantificada a fração percentual desse tipo de material.

Em datas mais antigas, Zordan (1997) já identificou diferenças significativas nos materiais considerados como cerâmica não polida e cerâmica polida e esmaltada, e apresenta essas duas frações em separado no seu trabalho. Considerando que os compósitos cerâmicos polidos ou que possuam acabamento esmaltado em uma de suas faces (como azulejos, louça sanitária, telhas esmaltadas), podem apresentar um comportamento diferenciado devido à perda ou redução da aderência, nessa pesquisa essas porções são observadas separadamente.

Na tabela 8 são apresentadas as frações em porcentagem de cada material classificado, para as 3 fontes estudadas e para as parcelas não jigadas e jigadas, conforme nomenclatura apresentada no capítulo 4.

Tabela 8 – Composição dos diferentes materiais obtidos nas fontes estudadas, antes e após jigagem, em porcentagem (%)

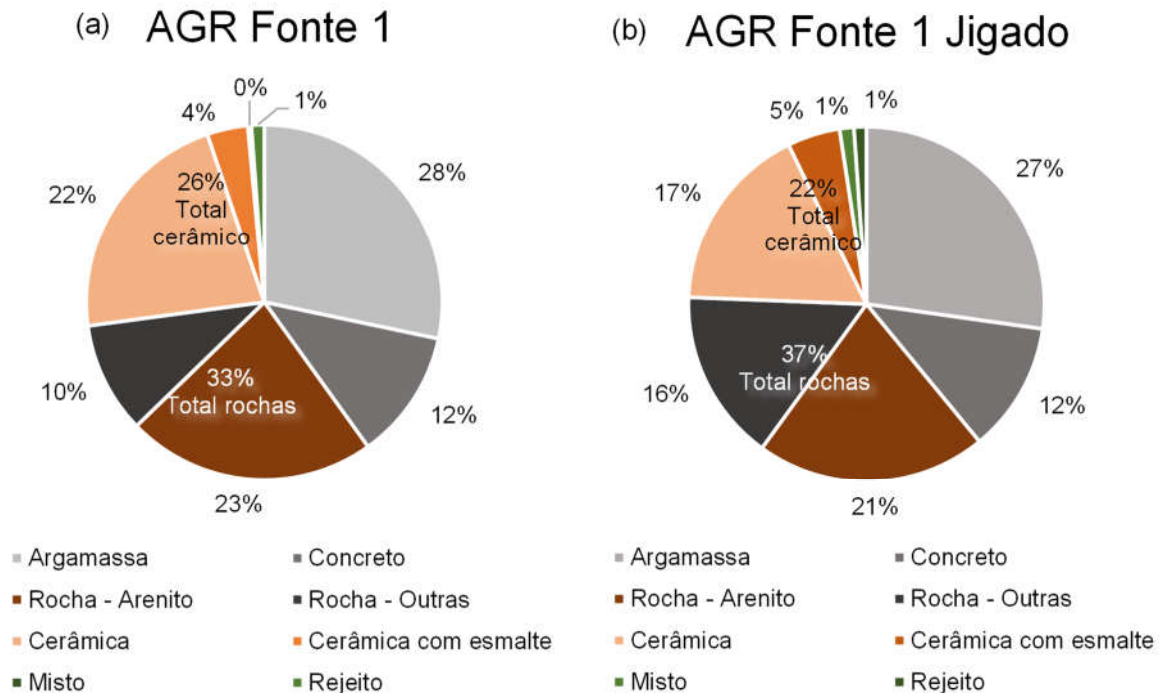
MATERIAL	AGR1	AGR1J	AGR2	AGR2J	AGR3	AGR3J
Argamassa	28,3	27,2	37,5	33,7	29,1	35,3
Concreto	11,8	11,8	4,2	4,8	6,5	6,0
Rochas	32,8	36,6	18,4	21,3	38,7	32,0
<i>Arenito</i>	22,6	20,9	0,8	0,8	14,7	9,8
<i>Outras</i>	10,1	15,6	17,7	20,5	24,0	22,1
Cerâmica	25,6	22,0	37,3	37,7	21,5	21,2
<i>sem esmalte</i>	21,9	17,2	25,6	22,2	10,7	13,9
<i>esfaltada</i>	3,7	4,8	11,7	15,5	10,8	7,3
Misto	0,3	1,3	1,8	1,8	4,0	5,2
Rejeito	1,2	1,1	0,8	0,7	0,2	0,4

Fonte: elaborada pela autora

Pode-se observar que as 3 fontes estudadas possuem composições bem distintas entre si. A fonte 1 apresenta quantidades significativas de arenito e é a que possui maior fração de agregados de concreto. A análise da fonte 2 aponta a presença de uma maior porção de argamassa e material cerâmico, inclusive o esfaltado. Já a fonte 3, embora tenha sido processada e coletada no mesmo local que a fonte 2, em lotes distintos de RCD, não traz características similares a essa; possuindo as quantidades superiores de rochas e material misto das fontes estudadas.

Objetivando uma melhor análise visual do efeito da jigagem na separação dos materiais que compõe os agregados graúdos reciclados, a seguir são apresentados gráficos que ilustram as porções de cada fração dos componentes identificados para cada amostra por fonte (figura 15, figura 16 e figura 17).

Figura 15 - Composição dos materiais que constituem os agregados reciclados da Fonte 1, sem processamento (a) e jigado (b)

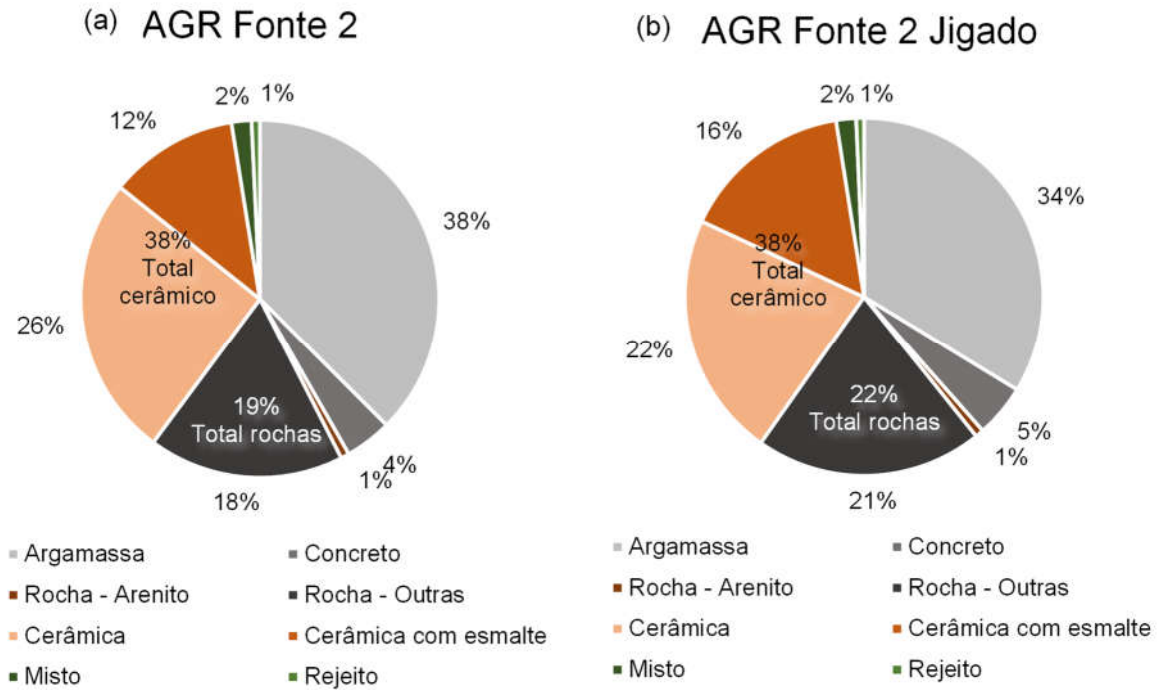


Fonte: elaborada pela autora

Analisando a figura 15 apresentada para a Fonte 1, pode-se identificar reduções nas quantidades totais de material cerâmico e de rochas areníticas, bem como aumento na porção de outras rochas.

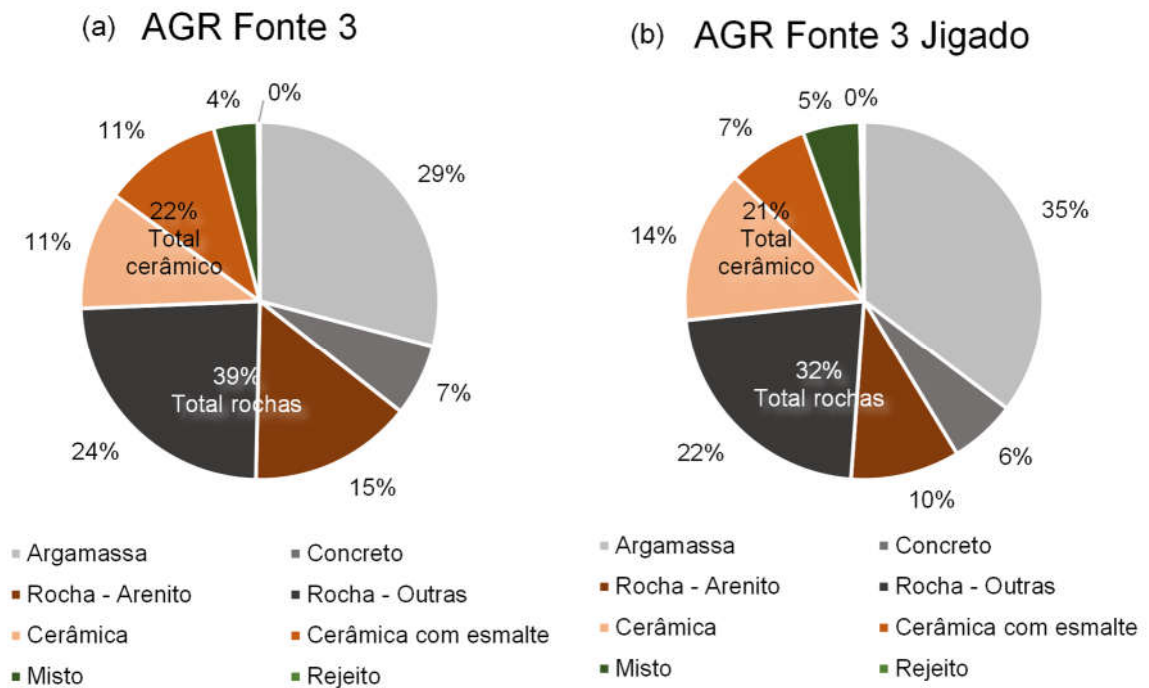
Ao se observar a figura 16, pode-se perceber que a separação por densidade realizada para os agregados graúdos da fonte 2 alcançou melhoras com a redução das porcentagens de argamassa e aumento nas quantidades de material composto em sua maior parte por rochas e concreto. Contudo, expressa aumento nas porções de material cerâmico esmaltado.

Figura 16 - Composição dos materiais que constituem os agregados reciclados da Fonte 2, sem processamento (a) e jigado (b)



Fonte: elaborada pela autora

Figura 17 - Composição dos materiais que constituem os agregados reciclados da Fonte 3, sem processamento (a) e jigado (b)



Fonte: elaborada pela autora

Para os agregados graúdos reciclados da fonte 3, o processo de separação densitária gerou uma redução considerável nos teores de arenito, o que é desejável, entretanto também houve reduções nas quantidades de rochas e concreto e acréscimo de material de argamassa, o que não era esperado.

4.2.4.4 Composição granulométrica e Módulo de Finura

Os ensaios de composição granulométrica foram realizados conforme prescrição da NBR NM 248 (ABNT, 2003), através da qual também se obteve a dimensão máxima característica e o módulo de finura dos agregados naturais e reciclados que foram utilizados nessa pesquisa. Na tabela 8 são expostos os resultados para as análises granulométricas realizadas, as dimensões máximas dos agregados e o módulo de finura para todas as composições estudadas.

Tabela 8 – Resultados de ensaios de composição realizados nas amostras pesquisadas

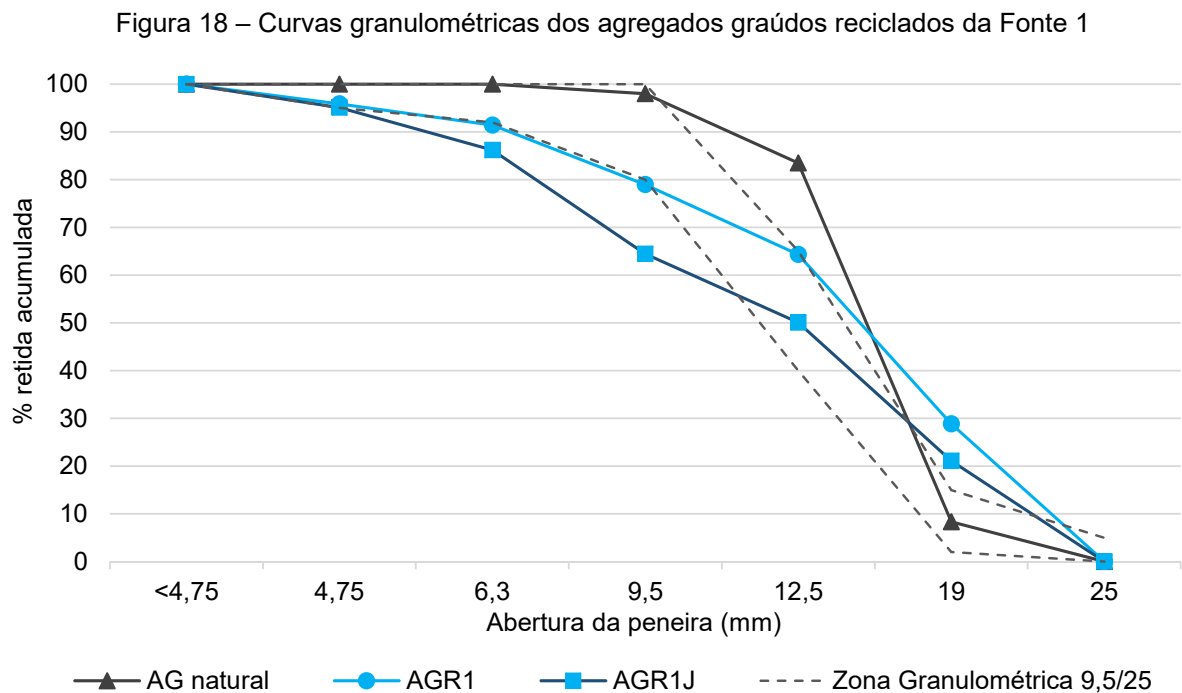
Abertura da peneira (mm)	AG natural		AGR1		AGR1J		AGR2		AGR2J		AGR3		AGR3J	
	% retida	% ac	% retida	% ac	% retida	% ac	% retida	% ac	% retida	% ac	% retida	% ac	% retida	% ac
25	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2
19	8	8	29	29	21	21	3	3	3	4	10	11	7	9
12,5	75	83	35	64	29	50	27	30	28	32	34	45	37	46
9,5	15	98	15	79	14	64	38	68	32	64	28	73	28	74
6,3	2	100	12	91	22	86	29	97	33	97	20	93	23	97
4,75	0	100	4	96	9	95	1	98	1	98	4	97	1	98
<4,75	0	100	4	100	5	100	2	100	2	100	3	100	2	100
MF	7,06		7,04		6,80		6,69		6,66		6,81		6,81	
DM (mm)	25		25		25		19		19		25		25	

Como pode-se observar as dimensões máximas utilizadas para os agregados graúdos das fontes 1 e 3 foram 25 mm, já para a fonte 2 o valor encontrado foi de 19 mm. O módulo de finura é um parâmetro que dá uma noção de tamanho das partículas que compõe os agregados, sendo que quanto maior o seu valor, maior é o tamanho de suas partículas, tendo assim, relação direta com a superfície específica dos grãos.

Analisando os resultados obtidos, pode-se perceber que houve uma pequena redução do módulo de finura de todos os agregados reciclados em comparação ao agregado natural. Tal fato também foi constatado em outras pesquisas como em Cordeiro (2013) e Leite (2001), as quais encontraram valores de módulo de finura, para os agregados reciclados utilizados, bem próximos aos apresentados na tabela 8.

Nas figuras 18, 19 e 20, são apresentadas as curvas granulométricas obtidas para cada fonte de agregado graúdo reciclado (original e jigado), conjuntamente com a curva do agregado natural, com o objetivo de viabilizar uma posterior análise comparativa das características desses materiais.

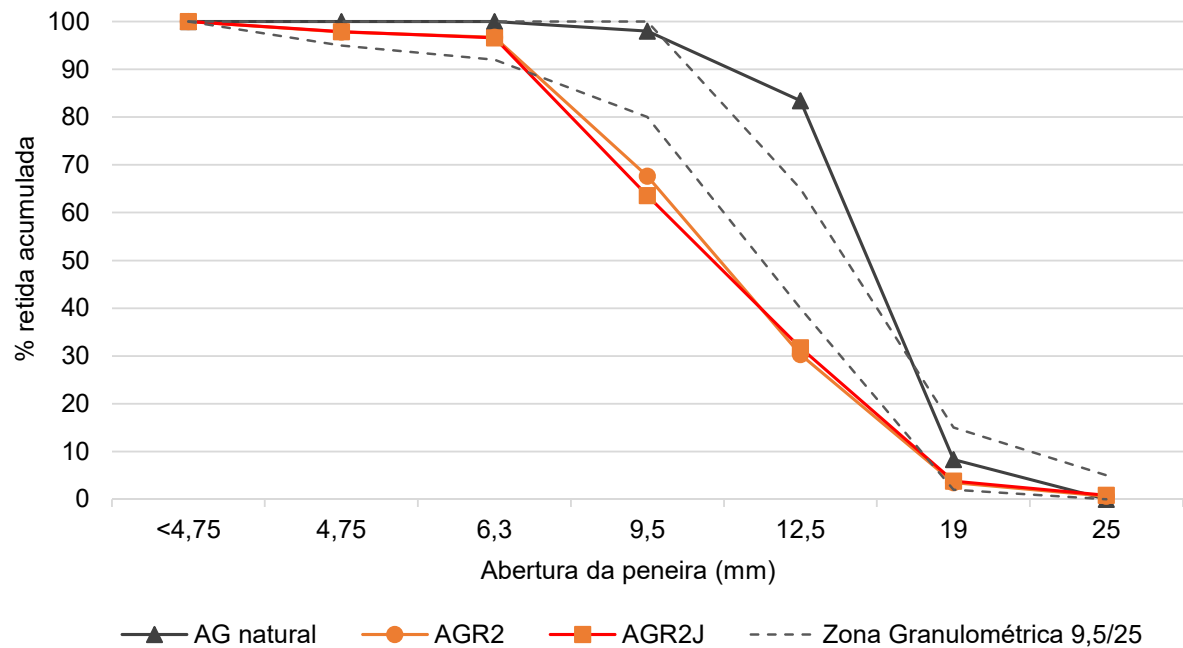
No gráfico da figura 18 pode-se observar que a composição granulométrica do agregado de referência e dos agregados reciclados da fonte 1 se diferem consideravelmente e que para os agregados reciclados há uma melhor uniformidade na distribuição granulométrica, o que pode influenciar no empacotamento das partículas dentro de matriz cimentícia na confecção de concretos.



Fonte: elaborada pela autora

A seguir, são apresentadas, na figura 19, as curvas do agregado utilizado como referência e as dos agregados reciclados obtidos na fonte 2.

Figura 19 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos reciclados da Fonte 2

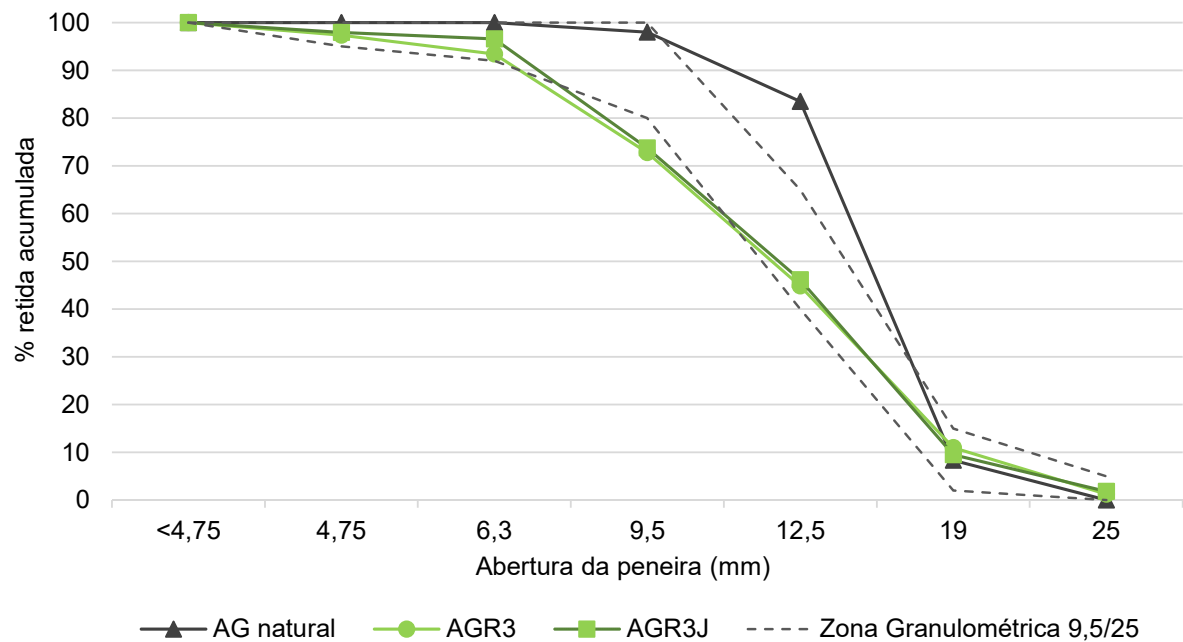


Fonte: elaborada pela autora

Ao se analisar a figura 19, não pode-se constatar diferenças significativas entre os resultados para agregados reciclados, não processados e jigados. Sendo assim, para a fonte 2, o método de separação de partículas utilizado gerou pouca mudança nos parâmetros de granulometria, ou ainda, modificações ou melhorias são pouco perceptíveis nesse ensaio de caracterização.

Para os agregados reciclados oriundos da fonte 3 foram delineadas curvas granulométricas características mostradas na figura 20, onde pode-se visualizar que os resultados obtidos para o ensaio de composição granulométrica ficaram próximos aos limites da zona 9,5/25 indicada pela norma. Quanto às alterações geradas pelo processo de seleção densitária, assim como na fonte 2, essas foram pouco distinguidas entre as amostras AGR3 e AGR3J.

Figura 20 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos reciclados da Fonte 3

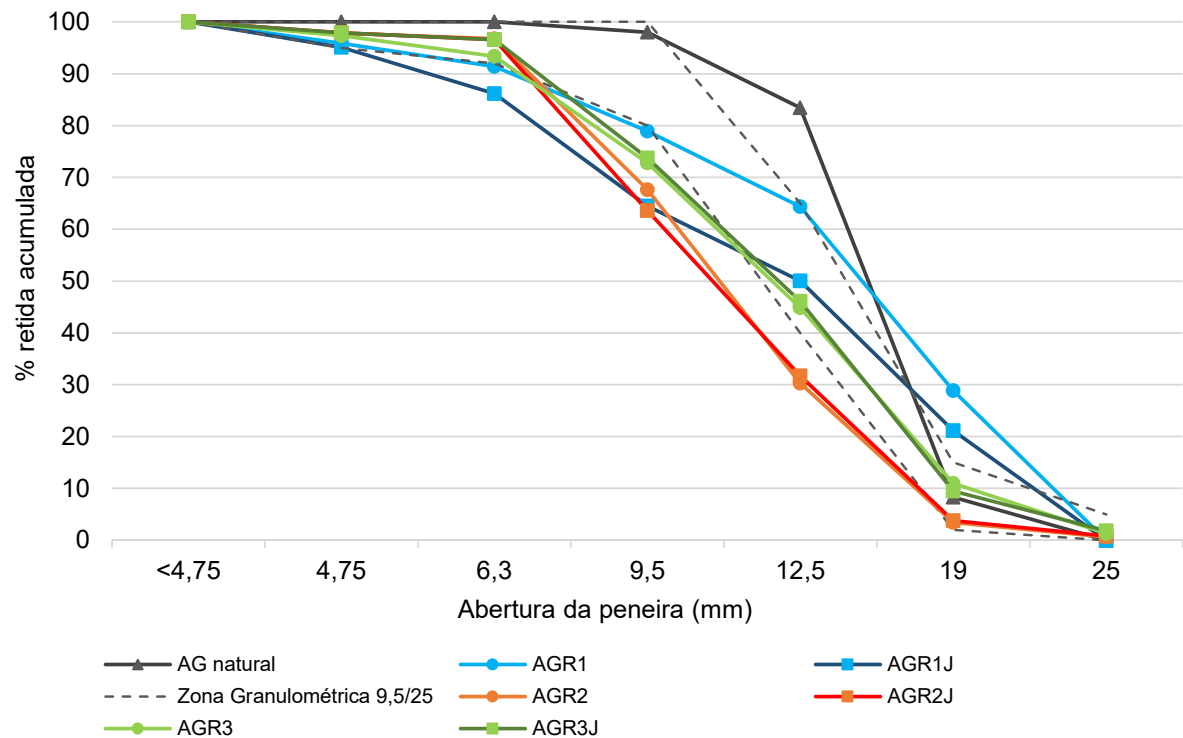


Fonte: elaborada pela autora

Para facilitar a interpretação e comparação da granulometria dos agregados, foi elaborada a figura 21, contendo as curvas granulométricas para cada configuração de agregado reciclado, conjuntamente com os resultados obtidos para o agregado graúdo natural e os limites estabelecidos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Na figura 21, pode-se observar que a seleção densitária mostrou maiores impactos ou resultados mais perceptíveis para a fonte 1, a qual apresenta em sua composição menor quantidade de material de cerâmica esmaltada. Por ser considerado um material de formato lamelar, que possui faces com baixa aderência, esse material pode ter perturbado o processo de separação densitária.

Figura 21 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos reciclados das fontes 1, 2 e 3



Fonte: elaborada pela autora

Assim como para Cabral (2007), a composição granulométrica do agregado natural e de alguns agregados reciclados utilizados na pesquisa não se enquadraram nos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Contudo, independentemente dos agregados graúdos, natural e reciclados, em alguns casos não se incluírem nas faixas de composição granulométrica determinadas por norma, estes foram utilizados sem alterações ou enquadramento de granulometria. Esta escolha teve como propósito o emprego dos agregados reciclados na forma com que eles estão dispostos nas fontes, como são produzidos, evitando impor mais uma etapa de processamento para a sua aplicação.

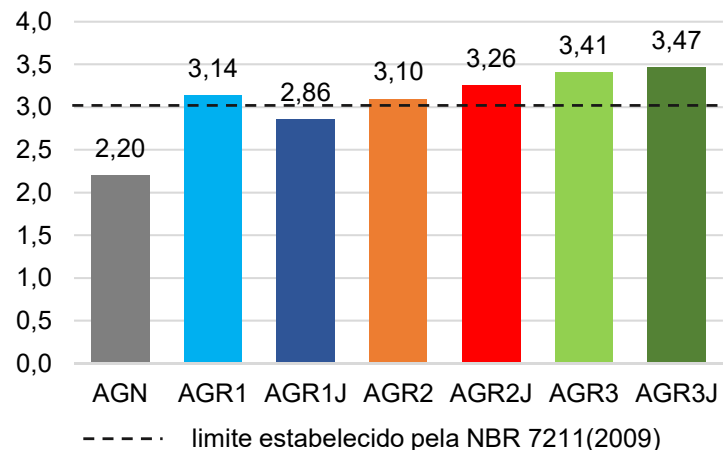
Pesquisa realizada por Zortea (2014b), avaliou processamentos no mesmo equipamento utilizado no presente trabalho, o qual fez a composição de amostras com misturas pré-estabelecidas, e uma delas contendo vidro. Tal estudo verificou que a presença do vidro, com formato lamelar e com superfície contendo baixa aderência, gerou impactos na performance do jigote, travando a operação e não permitindo uma separação mais eficiente, quando comparados com resultados de processamentos com porções que não continham esse tipo de material.

4.2.4.5 Índice de Forma

Para a determinação do índice de forma, foi adotado o método direto baseado em medidas de 200 partículas com o uso de um paquímetro, conforme prescreve a NBR 7809 (ABNT, 2006). O índice de forma é obtido pela razão entre o comprimento máximo e a espessura mínima de todos os grãos medidos, ponderada pela quantidade de grãos retidos em cada fração granulométrica.

Os resultados para esse ensaio são exibidos na figura 22, para todos os agregados graúdos envolvidos na fase experimental desse estudo, juntamente com o limite indicado pela norma como grandeza ideal para utilização em concretos.

Figura 22 – Índice de forma dos agregados graúdos natural e reciclados das fontes 1, 2 e 3, antes e após jigagem



Fonte: elaborada pela autora

Considerando que os agregados com grãos de forma cúbica, tida como a forma ótima para agregados britados, tem índice próximo de 1, os grãos considerados lamelares apresentam valores mais altos, acima de 2, e quanto mais altos forem esses, mais lamelar é a forma do grão. Sendo assim, os valores obtidos indicam que os agregados reciclados podem ser considerados mais lamelares.

Os resultados apresentados pelos agregados natural e da fonte 1 após jigagem são inferiores a 3, sendo esses em conformidade com o prescrito na NBR 7211 (2009) a qual especifica agregados para concreto. Entretanto, para os agregados não jigados das fontes 1, 2 e 3 e os jigados das fontes 2 e 3 os valores obtidos nesse ensaio de

caracterização não se mostram satisfatórios, ficando acima dos limites estabelecido pelas normativas.

Analisando a característica de índice de forma, o processamento realizado no jigge, mostra melhorias para os agregados reciclados oriundo da fonte 1, reduzindo os valores obtidos em 8,9%, e assim selecionando materiais menos lamelares. O mesmo não foi observado para os agregados obtidos nas fontes 2 e 3, os quais tiveram valores para o índice de forma majorados após a separação em 5,2 e 1,8%, respectivamente.

Novamente, a hipótese que pode ser levantada é que, embora todas as fontes apresentassem materias lamelares na sua composição, a fonte 1 é a que menos tem partículas lamelares, o que pode ter influenciado na eficácia do processamento no jigge, conforme também foi constatado na pesquisa de Zortea (2014b).

4.2.4.6 Massa unitária e massa específica

A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, sem considerar os poros permeáveis à água. O ensaio de massa específica adotado foi a metodologia desenvolvida por Leite (2001), por se acreditar ser a mais adequada para agregados graúdos reciclados.

O trabalho descrito pela autora em forma de proposta de norma, utiliza um kitasato com capacidade de 1000ml, balança com precisão mínima de 0,1g e bomba de vácuo. A amostra de agregado é seca em estufa por 24 horas; e após resfriada em temperatura ambiente. Em seguida pesa-se uma quantidade entre 800 e 1000g de material (C), registrando-se essa massa. Coloca-se água, menos que metade da capacidade, no recipiente de vidro (kitasato) e em seguida a amostra do material é adicionada, sendo que a quantidade de água deve ser suficiente para submergir o agregado. O conjunto deve ficar coberto e em repouso por 24 horas, após o tempo é aplicado o vácuo, por pelo menos 15 minutos, agitando o recipiente para promover a saída de ar aprisionado entre os grãos de agregado (conforme ilustrado na figura 23a). Na sequência, acrescenta-se água ao recipiente até enchê-lo completamente, o qual é coberto com uma placa de vidro (figura 24b). Determina-se a massa desse conjunto com a placa de vidro (A). Retira-se o material do recipiente, lavando-o e em seguida o mesmo é preenchido totalmente com água (figura 24c). Novamente, o recipiente

deve ser coberto com a placa de vidro e define-se a massa do conjunto (B). A Equação 1 é usada para determinação da massa específica do agregado reciclado.

$$\gamma = \frac{C}{B-A+C} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

γ (kg/dm³ ou g/cm³) = massa específica do agregado

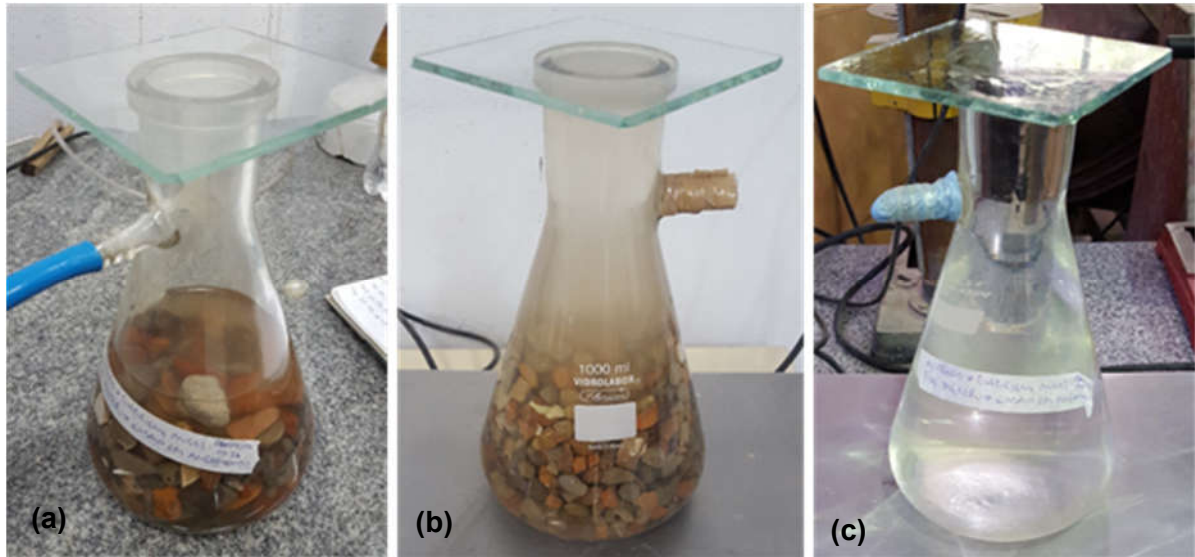
A (g) = massa da amostra + recipiente + água + placa de vidro

B (g) = massa do recipiente + água + placa de vidro

C (g) = massa da amostra seca em estufa

A figura 23 traz imagens das fases principais da realização do ensaio de massa específica, buscando melhor exemplificar o que foi descrito anteriormente. Sendo que a imagem (a) foi obtida durante a aplicação de vácuo, após as 24 horas de imersão dos agregados, onde é possível visualizar o nível de água suficiente que garantiu a submersão de todas os grãos e a mangueira (azul) que foi ligada a bomba de vácuo. Na imagem (b), pode-se observar a fase após a sucção de ar, em que o frasco é preenchido com água e cuidadosamente é colocada a placa de vidro, evitando a formação de bolhas de ar. Em seguida foi obtido a massa desse conjunto. Na imagem (c) é mostrada a última parte do experimento, onde o frasco é preenchido exclusivamente com água, é colocado a placa de vidro evitando a formação de bolhas de ar e é obtida a massa desse conjunto. Para esse ensaio foram realizadas duas repetições, sendo que o resultado é dado pela média desses dois valores.

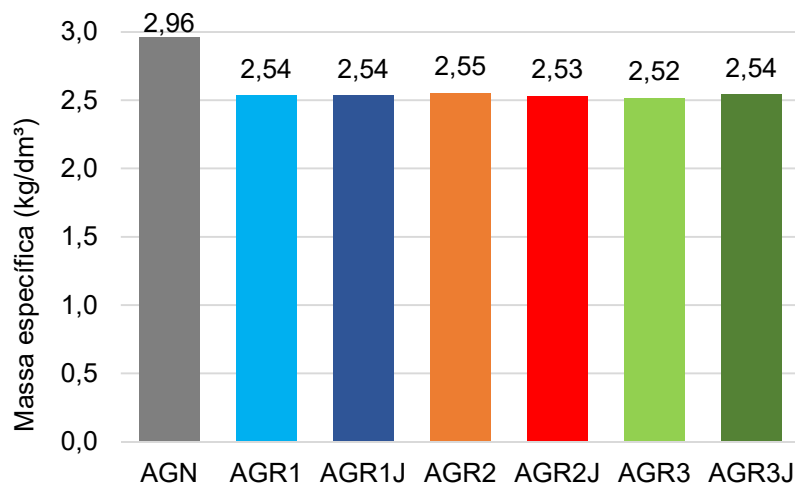
Figura 23 – Massa específica dos agregados graúdos reciclados das composições das fontes 1,2 e 3



Legenda: (a) sucção das bolhas de ar do frasco através de bomba de vácuo; (b) kitasano com agregado graúdo reciclado, preenchido com água; (c) frasco preenchido apenas com água.
Fonte: elaborada pela autora

No gráfico da figura 24 estão ilustradas as respostas encontradas para as massas específicas dos agregados graúdos reciclados, obtidas através do método Leite (2001), conforme descrito anteriormente. Adicionalmente é apresentado o valor obtido para o agregado graúdo natural já apresentado no item 4.2.3, buscando uma referência e comparação da grandeza dos resultados.

Figura 24 – Massa específica dos agregados graúdos reciclados das composições das fontes 1,2 e 3



Fonte: elaborada pela autora

Conforme constatado na maioria das pesquisas envolvendo agregados reciclados, normalmente esses apresentam massa específica inferior à dos agregados naturais,

como por exemplo nos estudos desenvolvidos por Cabral (2007), Lovato (2007) e Cordeiro (2013), cujos valores obtidos e os métodos utilizados estão organizados na tabela 9. Lovato (2007) realizou os ensaios normatizados e o proposto por Leite (2001) para a análise dos agregados reciclados de RCD de três lotes distintos, Cabral (2007) utilizou apenas o método descrito na norma para avaliar agregado graúdo reciclado de concreto, argamassa e cerâmica, separadamente. Já Cordeiro (2013) pesquisou agregados graúdos reciclados confeccionados com concretos com resistência nominal de 15 MPa e 30 MPa.

Tabela 9 – Resultados de ensaios de massa específica realizados por outros pesquisadores

Autores	Tipo	NBR NM 53 (2003/2006) (kg/dm³ ou g/cm³)	Método de Leite, 2001 (kg/dm³ ou g/cm³)
Lovato (2007)	Agregado Natural	2,85	-
	AGR Coleta 1	2,40	2,58
	AGR Coleta 2	2,45	2,57
	AGR Coleta 3	2,58	2,64
Cabral (2007)	Agregado Natural	2,87	-
	AGR Concreto	2,27	-
	AGR Argamasa	2,01	-
	AGR Cerâmica	1,86	-
Cordeiro (2013)	Agregado Natural	2,98	-
	AGR Concreto 15MPa	-	2,71
	AGR Concreto 30MPa	2,28	2,73

Comparando-se os resultados apresentados na figura 24 com os encontrados pelos pesquisadores mostrados na tabela 9, os valores se aproximam dos publicados por Lovato (2007), para o método de Leite (2001), que estudou agregados reciclados de composição mista.

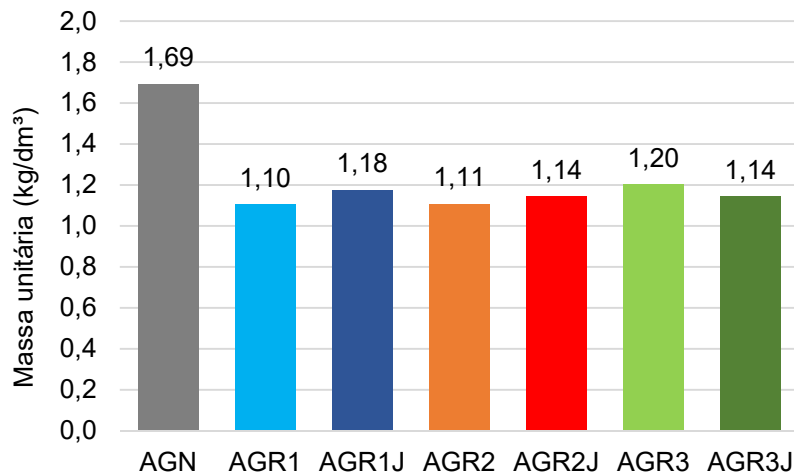
Os valores de massa específica para os agregados graúdos reciclados que foram analisados não apresentam grande diferença entre si, quanto ao processamento realizado para cada fonte ou entre as diferentes fontes. Sendo assim, para esse parâmetro comparativo, a seleção dos agregados reciclados através da jigagem não apresentou melhorias consideráveis.

O ensaio para a determinação da massa unitária foi realizado conforme normativa NBR NM 45 (ABNT, 2006). Os resultados dessa característica dos materiais, pode indicar qual desses apresentará uma melhor distribuição na pasta de cimento,

deixando o menor número de vazios para um determinado volume, influenciando no empacotamento e acomodação dos agregados na mistura dos concretos. De maneira geral quanto maior a massa unitária dos agregados, para uma mesma massa específica, melhor será o empacotamento granular dos agregados nos concretos que eles farão parte (COUTINHO, 2000).

Os valores obtidos para a massa unitária dos agregados utilizados nesse estudo estão colocados no gráfico da figura 25, na qual pode-se observar que para os agregados reciclados, os resultados ficaram entre 1,10 a 1,20 g/cm³. Lovato (2007) realizou ensaios de massa unitária para agregados reciclados de 3 fontes e obteve resultados próximos, entre 1,02 e 1,12 g/cm³.

Figura 25 – Massa unitária dos agregados graúdos reciclados das composições das fontes 1,2 e 3



Fonte: elaborada pela autora

Em comparação ao valor de massa unitária do agregado graúdo natural, os resultados encontrados para todos os agregados reciclados estudados foram inferiores, o que também foi constatado em diversos estudos, tais como Zordan (1997), Leite (2001), Xiao *et al.* (2005), Cordeiro (2013), entre outros. Porém, comparando-se os valores da fonte 1 antes e após a jigagem, pode-se perceber um aumento em torno de 7%, enquanto que para a fonte 2 esse aumento foi mais discreto, próximo a 3%. Esse aumento de grandeza de massa unitária pode ser considerado uma melhoria alcançada através da seleção por jigagem. Contudo, para a fonte 3 é observada uma redução de 5% nos resultados entre os agregados reciclados *in natura* e jigados. Esse ganho, mais percebido na fonte 1 pode ser atribuído, novamente, ao fato de na

constituição dos materiais dessa fonte, haver uma menor quantidade de material lamelar cerâmico, o que pode ter proporcionado uma melhor separação densitária em comparação com as demais fontes (ZORTEA, 2014b).

4.2.4.7 Absorção de água

A determinação da taxa de absorção dos agregados reciclados é importante para o estudo de dosagem dos concretos que utilizarão esse material, pelo fato de o agregado reciclado ser um material que apresenta uma porosidade maior que a do agregado natural (CORDEIRO, 2013). Neste estudo, o método escolhido para avaliar a taxa de absorção foi o apresentado por Leite *et al.* (2011), o qual foi adaptado do método proposto por Leite (2001). Essa metodologia de ensaio apresenta uma melhor aplicabilidade e mostra resultados mais realistas para agregados graúdos reciclados, devido à alta porosidade e à possibilidade de perda de material por desagregação. Por não se tratar de um ensaio normatizado, a seguir o mesmo será descrito.

Os equipamentos necessários para execução desse ensaio são: estufa; caixa de plástico com altura mínima que garanta a imersão do porta amostra; suporte de apoio para sustentar a balança; aparato para imersão; balança hidrostática com precisão de 0,01g e capacidade compatível com a massa de material que será utilizada; dispositivo para manter a peneira suspensa; peneira com abertura da malha de 0,044 mm (para que durante o ensaio não haja perda de massa do material) e espátula de silicone. Na figura 26 pode ser vista a disposição dos equipamentos utilizados para a realização do ensaio.

Figura 26 – Equipamentos e aparatos utilizados para o ensaio de absorção dos agregados reciclados



Fonte: elaborada pela autora

A temperatura do local de ensaio deve estar entre $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e a umidade relativa do ar entre $70 \pm 10\%$. O procedimento consiste em secar em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, por pelo menos 4 horas uma amostra de aproximadamente 1000 g de agregados reciclados. Após esse tempo, o material deve ser colocado em uma peneira com abertura inferior a menor dimensão dos agregados, e essa peneira sob uma bandeja com sílica gel, para que não haja absorção de umidade enquanto o material é mantido no local do ensaio até a estabilização da sua temperatura.

Monta-se sobre a balança o aparato (que consiste em um suporte para sustentação da peneira e a peneira 0,044 mm). Deve-se tarar a balança antes da amostra seca ser colocada e a mesma deve ser capaz de preencher o volume equivalente a três centímetros medidos a partir da base da peneira.

Submerge-se cuidadosamente a amostra, de modo que se tenha uma lâmina d'água para imersão de aproximadamente 1 centímetro. A partir deste instante é monitorado o ganho de massa do material submerso. Antes de cada leitura o recipiente deve ser agitado cuidadosamente com o auxílio de uma espátula de silicone para facilitar a saída do ar aprisionado entre as partículas de agregados. Passado um minuto, contado a partir do momento que a água atinge a altura desejada, anota-se o que será a massa no instante inicial (MSUB I). O monitoramento do ganho de massa do material

é realizado ao longo de 24 horas, efetuando-se leituras consecutivas, conforme os intervalos pré-estabelecidos de 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 180, 360 e 1440 minutos.

A leitura final é medida no tempo de 1440 minutos (MSUB F). Ao término, escoar-se o excesso de água, retirar-se o material com cuidado para evitar perdas, colocando-o em um recipiente resistente a altas temperaturas, o qual deve ser levado à estufa à temperatura de 105+/-5°C, onde permanece até a constância de massa. A massa seca é então pesada, sendo que a perda de material durante o ensaio não deve ser superior a 5%. O ensaio deve ser realizado com duas repetições no mínimo, e o resultado é dado pela média dos valores obtidos. Na Equação 2 e Equação 3 estão, respectivamente, a fórmula para o cálculo da taxa de absorção e da absorção de água percentual em função do tempo de duração do ensaio.

$$ASUB_{(\%)} = \frac{MSUB F - MSUB I}{MSUB I} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde: ASUB (%) = taxa de absorção do material submerso

MSUB F (g) = massa de material submerso no instante final

MSUB I (g) = massa de material submerso no instante inicial

$$An_{(\%)} = \frac{An}{A24} \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

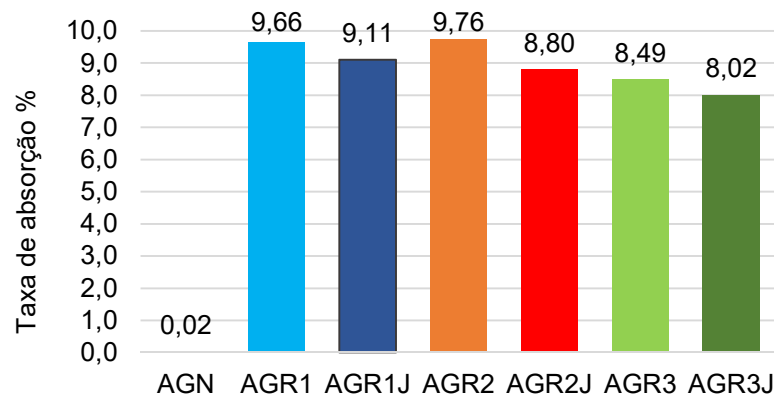
Onde: An (%) = absorção de água percentual no instante n

An (g) = massa de água absorvida no instante n

A24 (g) = massa de água absorvida em 24 horas de ensaio

Os valores obtidos para os ensaios de absorção de todos os agregados graúdos reciclados, descritos anteriormente, estão apresentados no gráfico da figura 27, juntamente com o valor encontrado para o agregado graúdo natural, exibido anteriormente e que foi utilizado como referência.

Figura 27 – Taxa de absorção dos agregados graúdos natural e reciclados



Fonte: elaborada pela autora

O agregado graúdo natural que foi utilizado como referência é de origem basáltica e com porosidade muito baixa, por isso as taxas de absorção para esse tipo de material são extremamente baixas, se comparadas com as taxas alcançadas pelos agregados reciclados. Contudo, confrontando-se os resultados obtidos para cada fonte de agregado graúdo reciclado, antes e após a jigagem, pode-se perceber que houve uma redução nas taxas de absorção, a qual pode ser atribuída à seleção densitária realizada nesses materiais. Também é possível constatar que a redução mais significativa das taxas de absorção é observada na fonte 2, com uma diminuição em torno de 10% para o agregado graúdo jigado.

Os resultados encontrados condizem com os publicados por outros autores, como Cabral (2007) que encontrou uma taxa de 5,65% para agregados reciclados de concreto, 9,52% para agregados de argamassa e 15,62% para agregados de cerâmica. Angulo e John(2002), ao analisarem 36 amostras de um mesmo aterro de RCD, encontraram valores de absorção entre 3,92% e 11,28%. Lovato (2007), ao caracterizar agregados graúdos de RCD mistos, obteve resultados de absorção total após as 24 horas entre 5,1 e 10% para três fontes distintas. Já Cordeiro (2013) avaliou a taxa de absorção de agregados reciclados de concreto e encontrou valores entre 5,55% e 11,12%.

Na Espanha, Alaejos e Sánchez (2004) estudaram lotes de resíduos de concreto e foram caracterizadas 15 amostras de agregados graúdos de concretos reciclados, nas quais os valores de absorção de água variaram de 4,9 a 9,7%. Como pode-se

perceber os valores de taxa de absorção de água são variáveis e dependem da heterogeneidade dos materiais que compõe a amostra.

Moreira (2010) realizou ensaios de absorção de água de agregados graúdos de RCD de duas cidades distintas, e comparou os resultados para os mesmos agregados após o processo de jigagem à ar. Para a cidade de São Paulo, os valores de absorção apresentados foram de 8,41% e de 5,25% para os agregados após a separação por densidade. A autora relatou a mesma melhora, na redução da absorção, para os agregados coletados na cidade de Macaé, de 11,1% para 5,84% após jigagem.

Na tabela 10 estão os resultados da absorção de água percentual em função do tempo de duração do ensaio.

Analisando a tabela 10, pode-se constatar que os níveis mais elevados de absorção ocorrem nos tempo iniciais, sendo que nos 120 minutos do ensaio, todas as amostras alcançaram percentuais acima de 80% em relação à taxa de absorção total. Tal fato levou à escolha do tempo adotado para a saturação dos agregados no processo de pré-saturação que foi realizado e será abordado no capítulo 4.3.1.

Tabela 10 – Taxa de absorção de água percentual em função do tempo de duração do ensaio

Tempo (min)	AGR1	AGR1J	AGR2	AGR2J	AGR3	AGR3J
5	75,79	55,92	62,78	41,90	58,28	48,67
10	77,74	69,95	77,21	52,72	66,78	58,07
15	80,73	74,71	79,71	67,98	72,74	73,45
30	82,25	77,60	83,79	74,47	76,98	82,23
45	85,20	82,18	88,09	79,71	77,55	90,75
60	85,83	83,14	92,38	85,98	78,13	95,48
75	86,56	83,49	93,03	88,79	79,14	96,05
90	87,01	86,10	93,60	91,31	80,45	97,36
105	87,03	87,60	94,22	93,00	80,92	97,76
120	87,08	87,75	94,73	93,14	87,55	98,77
180	88,37	88,65	96,10	93,39	93,77	99,10
360	89,91	94,65	97,79	95,86	95,21	99,63
1440	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: elaborada pela autora

4.2.5 Água

A água utilizada para a produção do concreto, bem como para saturação dos agregados reciclados e realização de determinados ensaios, foi proveniente da rede de abastecimento público da cidade de Porto Alegre no estado do Rio Grande do Sul (Brasil).

4.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Nesse item será descrita a metodologia adotada para o tratamento prévio dos agregados reciclados, a produção dos concretos, bem como a definição dos traços estudados, além da moldagem dos corpos de prova, procedimento de cura dos mesmos, os gráficos de dosagem obtidos e suas propriedades no estado fresco. A fase laboratorial da pesquisa referente à produção dos concretos foi realizada no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE), localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

4.3.1 Saturação dos Agregados

Os agregados graúdos reciclados passaram pela etapa de molhagem ou pré-saturação antes da realização das misturas para confecção do concreto, visando compensar a diferença de absorção existente entre os agregados naturais e os reciclados. Devido à elevada porosidade e conseqüentemente, alta absorção de água dos agregados reciclados, a saturação total dos agregados é realizada para que os mesmos não absorvam a água de amassamento, o que prejudicaria a trabalhabilidade e poderia mascarar o valor real da relação a/c, impactando na hidratação do cimento e assim influenciando no comportamento e nas propriedades dos concretos produzidos. Além disso, após o início da pega do cimento, pode ocorrer a migração da água interna dos poros dos agregados à matriz cimentícia, o que é benéfico pois pode promover uma cura interna do concreto (ANGULO, 2000; LEITE, 2001; CARRIJO, 2005; CCANZ, 2011).

Ferreira (2007) em seu estudo constatou a importância e a influência da pré-saturação de agregados reciclados na produção de concretos estruturais. Contudo, diferentes métodos para a realização da pré-saturação são relatados na bibliografia, desde imersão por 24 horas à pré-umedecimento por aspensão durante 10 minutos. O tempo mínimo de imersão dos agregados foi estimado com base nos estudos de absorção realizados por Cordeiro (2013), que avaliaram diferentes teores de saturação do agregado reciclado e encontraram o valor de 80% como sendo o teor ótimo de saturação para as propriedades mecânicas avaliadas. Paralelamente, a NBR 15116 (ABNT, 2004) recomenda a realização de pré-molhagem dos agregados reciclados com teores próximos a 80% de sua absorção total, para a produção de concretos sem fins estruturais.

Buscou-se estipular um procedimento padrão para todos os agregados reciclados que foram estudados, e com base na taxa de absorção obtida no primeiro ensaio realizado para a fonte 1, foi escolhido o tempo de imersão. Os agregados ficaram submersos por 2 horas, buscando a saturação mínima de 80%. Após foram colocados em uma peneira, com abertura inferior a 0,15mm, para secagem ao ar livre, por um período de 4 horas, até que se obtivesse a condição de saturado com superfície seca. Em seguida pesou-se o material para calcular a quantidade de água presente internamente nos agregados graúdos reciclados. As porcentagens de ganho de massa devido à saturação dos agregados em relação à massa seca inicial são apresentadas na tabela 11, juntamente com as porcentagens em relação às taxas de absorção obtidas no ensaio de absorção dos agregados reciclados.

Tabela 11 – Porcentagens de massa de água em relação à massa seca do agregado, adquiridos na etapa de pré-umidificação

	traço 1:m	% de água absorvida	% em relação à taxa de absorção
AGR1	2,50	6,2	64,2
	4,00	6,0	62,1
	5,50	6,2	64,2
AGR1J	2,50	7,6	83,4
	4,00	7,6	83,4
	5,50	7,6	83,4
AGR2	2,50	7,6	77,8
	4,00	7,1	72,7
	5,50	7,5	77,2
AGR2J	2,50	5,9	66,5
	4,00	6,0	68,3
	5,50	6,2	70,6
AGR3	2,50	4,8	56,9
	4,00	5,0	59,3
	5,50	4,6	54,7
AGR3J	2,50	5,2	64,3
	4,00	4,7	58,9
	5,50	4,8	60,3

Fonte: elaborada pela autora

Percebe-se que cada composição de agregado reciclado teve comportamento diferenciado. Além das taxas de absorção, a composição granulométrica dos grãos, a quantidade de finos e os materiais presentes influenciam na quantidade de água necessária para obtenção da condição dos grãos saturados com superfície seca (SSS).

O que se buscou, inicialmente, foi uma taxa de saturação próxima à 80%. Para tanto os tempos de imersão foram baseados nas taxas de absorção encontradas para o AGR1 e o tempo de secagem superficial foi definido na produção dos concretos com o AGR1. Contudo, a análise do percentual de água retida nos grãos em relação à taxa de absorção de cada um dos agregados, na tabela 11, mostra que somente o AGR1J obteve a saturação almejada. As condições climáticas, como temperatura e umidade relativa do ar durante a pré-molhagem, podem ter influenciado na secagem e saturação dos grãos. Adicionalmente a dificuldade de realização do ensaio de absorção para agregados reciclados, pode ter impactado nos resultados das taxas calculadas, e na variabilidade dos resultados.

4.3.2 Dosagem experimental e definição do traço de referência e dos concretos reciclados

O método de dosagem adotado para realização desse estudo foi o IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), que consiste em ajustar o teor ideal de argamassa fixando o valor do abatimento do tronco de cone (conforme prescrito na NBR NM 67 ABNT, 1998), tendo-o como um parâmetro de controle. Objetivando a produção de diagramas de dosagem, foram feitos três traços de concreto em massa para cada agregado a ser estudado, sendo eles com consumo menor, intermediário e maior de cimento; os quais podem ser denominados, de maneira simplificada, de traço pobre, intermediário e rico. Esse método permite avaliar o impacto do uso dos diferentes tipos de agregados no comportamento do concreto, quantificar o consumo de cimento necessário para se obter determinada resistência para os diferentes tipos de agregados que serão utilizados nesse estudo, permitindo assim comparar as diferentes famílias de concretos produzidos com os diferentes agregados e confrontar o impacto destes no consumo de cimento necessário para se obter determinada resistência. O ajuste da trabalhabilidade foi realizado exclusivamente pela correção da quantidade de água necessária para atingir o abatimento definido para essa pesquisa, fixado em 100 +/- 20mm, ou seja, não foram utilizados aditivos plastificante ou superplastificante para obter a consistência pré determinada.

A mistura dos materiais foi feita em uma betoneira de eixo vertical previamente imprimada com a aplicação de uma mistura de cimento, agregado miúdo natural e água, tanto em seu tambor como em suas pás. A ideia da imprimação é evitar que a argamassa da primeira mistura de concreto seja perdida pelo efeito das paredes da betoneira ou que fique aderida às pás. Logo após, a argamassa de imprimação foi retirada, e descartada, iniciando assim a realização das misturas.

A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi na sequência: cimento, areia e uma quantidade inicial de água, com o objetivo de proporcionar uma espécie de cama para proteger os agregados reciclados, de modo a evitar a quebra dos grãos e alteração da sua granulometria inicial pelo movimento da betoneira, conforme recomendações da pesquisa de Cordeiro (2013).

Foram feitos traços unitários em relação à massa de cimento 1:m, onde m é a soma das quantidades em massa dos agregados graúdo e miúdo.

A dosagem experimental foi realizada com os agregados graúdos reciclados da fonte 1 (AGR1), sendo produzidas misturas para os traços unitários em relação à quantidade em massa de cimento de 1:2,5; 1:4 e 1:5,5. A concretagem iniciou pelo traço intermediário com m igual a 4 e após foram realizadas com os traços rico e pobre, com valores de m iguais a 2,5 e 5,5 respectivamente. O teor de argamassa ideal, definido experimentalmente, foi de 55%.

A determinação da consistência foi realizada através do abatimento do tronco de cone ou *Slump Test*, conforme prescrição da NBR NM 67 (ABNT, 1998), e a quantidade de água utilizada na mistura foi quantificada para o atingimento dos valores definidos de 100 +/- 20mm. Esse parâmetro que quantifica a trabalhabilidade, além de ser necessário para a metodologia utilizada na dosagem, é considerado de suma importância pois impacta diretamente sobre as propriedades do concreto no estado endurecido, sendo o ensaio de maior aplicação para controle da uniformidade da produção de concretos em todo o mundo (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A tabela 12 apresenta os valores do traço unitário em relação às porções em massa de cimento, encontrados no estudo da dosagem experimental, o qual foi utilizado para todas as concretagens realizadas nesta dissertação.

Tabela 12 – Traço encontrado através da dosagem experimental

Traço ($\alpha = 55\%$)	c	a	p
2,5	1	0,93	1,58
4,0	1	1,75	2,25
5,5	1	2,58	2,93

Fonte: elaborada pela autora

Sendo α o teor de argamassa, c grandeza de cimento, a grandeza de agregado miúdo ou areia e p grandeza de agregado graúdo (natural ou reciclado).

O programa experimental englobou a realização de concretagens para os traços unitários em relação à quantidade em massa de cimento 1:2,5; 1:4,0 e 1:5,5 com

agregado graúdo natural (referência) e para os três lotes de agregado graúdo reciclado antes e após processamento no jigge.

Os valores para as relações a/c foram ajustados em cada moldagem, a fim de manter a consistência de 100+/- 20mm. Na tabela 13 são apresentados os valores das relações a/c obtidos e os abatimentos alcançados para cada traço produzido, atendendo a faixa adotada.

Tabela 13 – Relações a/c e abatimentos obtidos para cada concretagem

	Relação a/c			Abatimento (mm)		
	2,5	4,0	5,5	2,5	4,0	5,5
AGN	0,38	0,44	0,53	100	110	100
AGR1	0,38	0,47	0,58	90	90	90
AGR1J	0,37	0,45	0,56	105	90	90
AGR2	0,39	0,47	0,59	100	90	100
AGR2J	0,40	0,48	0,57	105	100	90
AGR3	0,40	0,50	0,57	110	115	95
AGR3J	0,42	0,48	0,59	105	110	115

Fonte: elaborada pela autora

4.3.3 Produção dos corpos de prova

Para cada um dos vinte e um traços definidos, foram moldados seis corpos de prova em formato cilíndrico, com dimensões 10 x 20 cm, para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade; e dois corpos de prova prismáticos com dimensões de 10 x 10 x 35cm, para o ensaio de durabilidade através da profundidade de carbonatação. A confecção dos corpos de prova seguiu os parâmetros estabelecidos pela NBR 5738 (ABNT, 2015) para moldagem e cura. Todos os CPs referentes a um determinado traço de concreto foram moldados simultaneamente. Após concretagem e preenchimento dos moldes metálicos os mesmos foram adensados em mesa vibratória. A preparação dos moldes metálicos foi feita com a limpeza e a aplicação de desmoldante (óleo mineral) com o objetivo de facilitar a desforma dos mesmos.

Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos com saco plástico a fim de evitar a perda de água, sendo mantidos no local de ensaio durante as primeiras 24

horas. Posteriormente foram desmoldados e armazenados em câmara úmida com temperatura controlada de 23+/-2°C e umidade relativa entre 90 a 100% para realização da cura durante o prazo estipulado para a realização dos ensaios em estado endurecido.

Ao todo foram realizadas 21 misturas diferentes e moldados 168 corpos de prova. A tabela 14 mostra a quantidade de amostras necessárias para a pesquisa.

Tabela 14 – Quantidade de corpos de prova moldados

Ensaio		AGN	AGR1	AGR1J	AGR2	AGR2J	AGR3	AGR3J	Norma
Traço unitário (1:m)	m=2,5								
	Resistência à compressão	3	3	3	3	3	3	3	NBR 5739 (ABNT, 2007)
	Módulo de elasticidade	3	3	3	3	3	3	3	NBR 8522 (ABNT, 2008)
	Carbonatação	2	2	2	2	2	2	2	não normatizado
	Sub-total	8	8	8	8	8	8	8	
	m=4,0								
	Resistência à compressão	3	3	3	3	3	3	3	NBR 5739 (ABNT, 2007)
	Módulo de elasticidade	3	3	3	3	3	3	3	NBR 8522 (ABNT, 2008)
	Carbonatação	2	2	2	2	2	2	2	não normatizado
	Sub-total	8	8	8	8	8	8	8	
	m=5,5								
	Resistência à compressão	3	3	3	3	3	3	3	NBR 5739 (ABNT, 2007)
Módulo de elasticidade	3	3	3	3	3	3	3	NBR 8522 (ABNT, 2008)	
Carbonatação	2	2	2	2	2	2	2	não normatizado	
Sub-total	8	8	8	8	8	8	8		
CPs por agregado		24	24	24	24	24	24	24	
Número total de CPs		168							

Fonte: elaborada pela autora

4.3.4 Propriedades no estado fresco

Durante a produção dos concretos foi realizado o ensaio de massa específica do concreto fresco, conforme indicado na NBR 9833 (ABNT, 2008). Essa característica é dada pela relação entre a massa e o volume do concreto fresco (antes do início da pega) previamente adensado, considerando o volume de ar aprisionado.

Na tabela 15 são apresentados os valores da massa específica do concreto fresco, obtidas para cada composição e traço de concreto produzido.

Tabela 15 – Massa específica dos concretos produzidos no estado fresco por traço

Massa específica no estado fresco (g/cm³)			
	2,5	4,0	5,5
AGN	2,39	2,40	2,39
AGR1	2,15	2,15	2,22
AGR1J	2,12	2,19	2,17
AGR2	2,13	2,16	2,17
AGR2J	2,12	2,16	2,17
AGR3	2,16	2,21	2,20
AGR3J	2,13	2,17	2,17

Fonte: elaborada pela autora

Pode-se observar que a massa específica do concreto que foi produzido com agregados reciclados é menor para todos os traços, em relação à do concreto com agregado natural. Esse fato pode ser explicado pela característica dos agregado reciclados possuírem densidades menores. Concomitantemente, nos ensaios de caracterização realizados, os agregados reciclados apresentaram valores de massa específica menores que os resultados obtidos para o agregado natural referência. Então, como esperado, agregados mais leves geraram concretos mais leves, essa constatação também foi percebida por outros autores que realizaram estudos envolvendo agregados reciclados, como Cabral (2007) e Moreira (2010).

Contudo, quando se compara os resultados para os agregados jigados e não jigados de uma mesma fonte, pode-se perceber que não houve aumento expressivo, tendo majorado apenas o valor da massa específica do concreto fresco para a fonte 1 e traço m=4. As demais leituras desse ensaio tiveram reduções ou se mantiveram as mesmas para os agregados processados e não selecionados de uma mesma fonte.

4.4 MÉTODOS DE ENSAIO

A seguir são descritos os métodos que foram utilizados para a realização dos ensaios propostos nessa dissertação. Para análise das propriedades do concreto no estado endurecido foram utilizados os ensaios de propriedades mecânicas através da resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade e ensaios de durabilidade

através da análise da profundidade de carbonatação. Todos os ensaios dessa pesquisa foram realizados no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE), localizado no Campus Centro, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

4.4.1 Propriedades Mecânicas

Para a avaliação da influência do processo de separação densitária do agregado graúdo reciclado no comportamento do concreto endurecido, foram realizados os ensaios mecânicos de determinação da resistência à compressão axial conforme procedimentos prescritos na NBR 5739 (ABNT, 2007) e do módulo de elasticidade segundo a NBR 8522 (ABNT, 2008). A idade padrão adotada para as análises das propriedades mecânicas dos concretos foi a de 28 dias, sendo que todos corpos de prova tiveram as bases previamente retificadas conforme preconizado na NBR NM 77 (ABNT, 1996). Para ambos ensaios foi utilizada a prensa informatizada do modelo EMIC MCT30 PC 200i e tais propriedades foram avaliadas para três corpos de prova por família de concreto produzido.

Antes da realização do ensaio de módulo de elasticidade, para cada traço, foram rompidos previamente os três corpos de prova à compressão axial para a previsão da carga de ruptura. Após foram realizadas as medidas de deformação conforme a aplicação de carregamento específico, no tempo determinado pela normatização do ensaio, utilizando um extensômetro elétrico, conforme ilustrado na figura 28. Para a validação dos resultados, a norma define que deve ser calculada a média de três leituras, sendo que os resultados não devem diferir mais do que 5% dessa média. Caso alguma das três leituras fique fora dessa faixa determinada, o resultado deve ser desconsiderado. Os resultados finais foram obtidos através da média das leituras válidas.

Figura 28 – Ensaio de módulo de elasticidade sendo realizado com extensômetro elétrico



Fonte: elaborada pela autora

4.4.2 Durabilidade

Para análise de durabilidade, foram realizados ensaios de profundidade de carbonatação acelerada pelo método da pulverização de uma solução de fenolftaleína, o qual busca analisar a resistência à penetração ou ingresso de gás carbônico nos corpos de prova conservados em câmara com concentração controlada de CO₂. Para essa análise foram analisadas duas repetições, através de dois corpos de prova prismáticos moldados para cada traço.

O ensaio acelerado tem como objetivo simular as condições propícias para o desenvolvimento das reações de carbonatação no concreto, em um menor intervalo de tempo. Como no Brasil ainda não existem métodos de ensaio normatizados para análise da profundidade de carbonatação, foi realizada uma busca pelas práticas já realizadas (KULAKOWSKI, 2002; ABREU, 2004; PAULETTI, 2004 e WOLF, 2010) no laboratório onde esse ensaio foi realizado, e essas foram alinhadas às possibilidades e disponibilidades locais. Assim foram definidos os procedimentos adotados nessa dissertação e que serão descritos a seguir.

Após a concretagem dos corpos de prova prismáticos com dimensões de 10 x 10 x 35cm, os mesmos foram desmoldados, devidamente identificados e levados para cura

úmida por 21 dias. Conforme relatado por Cascudo e Carasek (2011), antes de serem submetidos à ação do CO₂ e após a cura, os corpos de prova necessitam de um condicionamento, também chamado de sazonalização ou ambientação, que nessa pesquisa foi feita através da permanência por 21 dias em câmara climatizada com umidade relativa de $70 \pm 2 \%$ e temperatura de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Passado o período de ambientação, os corpos de prova receberam nas extremidades de topo e base a aplicação de parafina sólida, com o objetivo de impermeabilizar essas faces para que a carbonatação ocorresse somente nas paredes laterais.

A câmara de carbonatação acelerada utilizada tem capacidade para 144 litros, é vedada e estanque ao meio externo. A alimentação de CO₂ é feita por meio de um fluxo contínuo de gás proveniente de cilindro de gás carbônico que é regulado por válvulas e por um manômetro de coluna, com fluxo de gás é de 10 L/min, o que promove uma concentração de CO₂ de 5%. A câmara permanece em sala climatizada com temperatura ($20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) e umidade relativa controlada ($70 \pm 2 \%$) durante todo o ensaio.

Teve-se o cuidado com a disposição dos corpos de prova na câmara de carbonatação, sendo que os mesmos foram apoiados na menor face (a qual foi impermeabilizada), e se manteve uma distância mínima de 10 cm entre os corpos de prova, buscando promover a circulação de gás carbônico e o contato desse com as faces laterais que foram analisadas.

Os fatores que poderiam influenciar os resultados do ensaio foram fixados, para que fosse possível realizar uma análise comparativa do parâmetro de durabilidade, entre os concretos com agregados graúdos reciclados sem seleção densitária, os selecionados por jigagem e os naturais de referência. A tabela 16 mostra os principais fatores encontrados por Pauletti (2004) que influenciam nos resultados desse ensaio e os valores fixados nesse estudo.

Tabela 16 – Valores adotados para os principais fatores que influenciam nos resultados do ensaio de carbonatação.

Fatores	1:2,5 (traço rico)	1:4,0 Intermediário)	1:5,5 (traço pobre)
tipo de cimento	CP IV 32 RS	CP IV 32 RS	CP IV 32 RS
tempo de cura na câmara úmida	21 dias	21 dias	21 dias
tempo de ambientação (sazonamento)	21 dias	21 dias	21 dias
% de CO ₂	5	5	5
idade de ruptura (em dias)	28, 42, 56	21, 35, 49	14, 21, 28

Fonte: elaborada pela autora

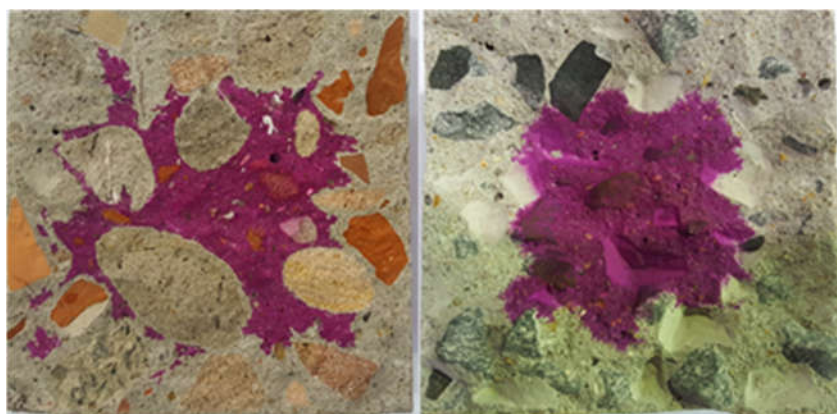
As idades nas quais foram feitas as rupturas e a realizadas as medições do avanço da carbonatação, são apresentadas na tabela 16, e foram arbitradas considerando o tipo de cimento que se utilizou e a relação a/c obtida na dosagem experimental. Sabendo-se que em concretos mais porosos, ou seja, com resistências mais baixas e quantidades menores de cimentos, a penetração do gás carbônico acontece com maior velocidade, a primeira idade de ruptura para o traço mais pobre 1:5,5 foi definida aos 14 dias de exposição e a idade inicial do traço intermediário, 7 dias após a do traço pobre, o primeiro corte do traço rico feito 7 dias após a do traço intermediário. As segundas e terceiras idades de ruptura foram definidas conforme análise dos primeiros cortes, sendo definidos intervalos de 7 dias para o traço 1:5,5; (pois os primeiros cortes já revelavam profundidades significativas de carbonatação) e 14 dias para os demais.

Para determinar a profundidade de carbonatação existem diversas técnicas, entre elas o uso de indicadores químicos. Esses produtos em contato com a solução alcalina do concreto, que é rica em hidróxido de cálcio, adquirem colorações típicas para uma determinada faixa de pH. Pode ser considerado um método colorimétrico e muito utilizado por se tratar de uma técnica simples, de baixo custo, e adequada para pesquisas com fins comparativos como a que é proposta. O indicador utilizado foi fenolftaleína em solução com concentração de 1% dissolvida em álcool etílico, a qual foi aspergida sobre as fatias recém fraturadas dos corpos de prova. A fenolftaleína adquire coloração vermelha carmim com pHs iguais ou superiores a uma faixa aproximada entre 8,0 e 9,8 (conhecida como zona de viragem) e fica incolor ou não provoca mudança de coloração em pHs inferiores. Na prática, considera-se que o

concreto não está carbonatado quando, ao se aspergir a solução de fenolftaleína, ele adquirir em sua superfície a coloração carmim, e caso fique incolor, considera-se a região como sendo concreto carbonatado (PAULETTI, 2009; CASCUDO E CARASEK, 2011).

A figura 29 traz uma amostra com aplicação do indicador escolhido e exemplifica o exposto sobre a mudança de coloração.

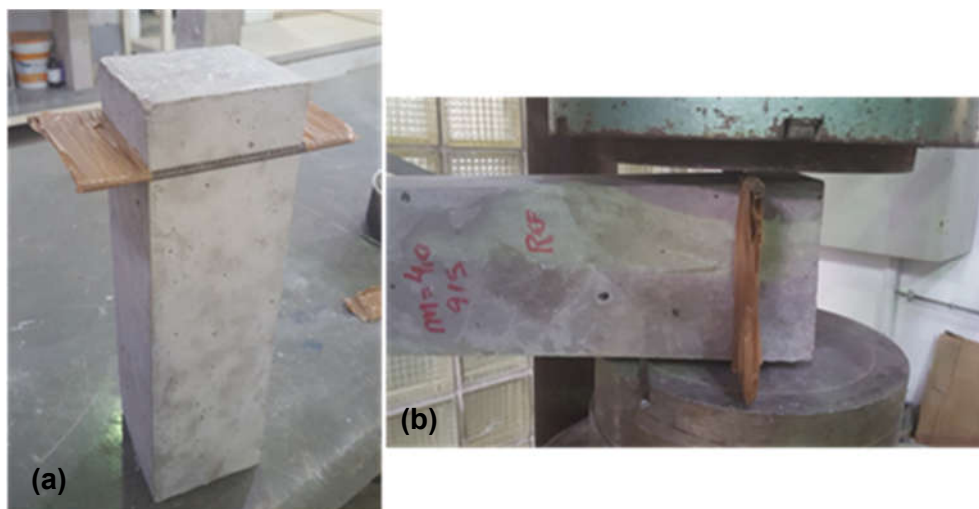
Figura 29 – Exemplo visual da mudança de coloração de amostra após aspersão de fenolftaleína



Fonte: elaborada pela autora

Conforme recomendação de Cascudo e Carasek (2011), a execução das fraturas foi feita com a utilização de uma prensa, a localização da ruptura foi induzida com o posicionamento de barras de aço e fita adesiva para fixação, conforme pode ser visualizado nas imagens da figura 30. Evitando-se assim, o corte do concreto com equipamentos de disco e o umedecimento dos corpos de prova. Buscou-se cortes mais perpendiculares possíveis com as faces do corpo-de-prova, e com a maior planicidade possível, para facilitar a realização das leituras e evitar distorções nas imagens registradas.

Figura 30 – Demonstração da indução de fraturas para os cortes das amostras de carbonatação



Legenda: (a) fixação das barras de aço com fita adesiva; (b) indução da fratura na prensa.

Fonte: elaborada pela autora

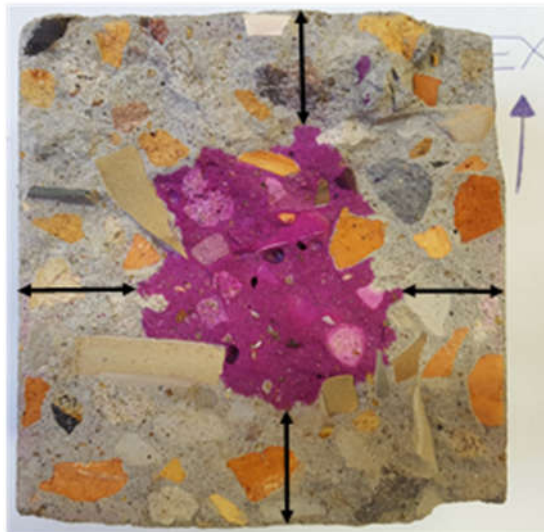
Conforme recomendado por Kulakowski (2002), foi realizada a documentação fotográfica de todas as fatias rompidas, sendo possível, posteriormente, a realização de análises da profundidade de carbonatação através da utilização de softwares. Foram analisados alguns programas para o tratamento das imagens, e foi escolhido o AutoCad para medição das frentes de carbonatação, através de medições entre as bordas de contorno e o início da coloração gerada pelo indicador na argamassa, das amostras colocadas em escala.

Os procedimentos adotados para a obtenção das amostras e realização das medidas de profundidade de carbonatação foram:

- a) de cada corpo-de-prova prismático foram extraídas fatias, de acordo com idades determinadas, por meio de ruptura induzida as quais terão espessuras de aproximadamente 30mm;
- b) após a extração da amostra, sua superfície foi limpa com um pincel para a remoção da poeira e a aspersão do indicador foi feita no máximo um minuto após a realização da fratura, evitando assim, reações de carbonatação através do contato com o gás carbônico presente no ar.
- c) a face que ficou exposta foi novamente selada com parafina para impedir a penetração do CO_2 nessa direção;

- d) os corpos-de-prova retornaram para a câmara de carbonatação logo após a secagem da parafina;
- e) quando a superfície que recebeu a aspensão secou, as amostras foram devidamente identificadas e colocadas sob uma superfície plana em cima de uma folha de papel branca, com o sentido de exsudação (face aberta da forma de moldagem do concreto) voltado para cima e foram registradas imagens das fatias sempre a mesma distância;
- f) as imagens foram colocadas em escala no *software* AutoCad, com a utilização de um paquímetro digital;
- g) em cada uma das quatro faces da amostra, foram realizadas medições, desde a sua extremidade ou borda, até o encontro da coloração do reagente na argamassa, conforme ilustrado na figura 35;

Figura 31 – Exemplo dos locais de medições de profundidade de carbonatação realizadas no AutoCad



Fonte: elaborada pela autora

- h) essas quatro medições de profundidade de carbonatação foram registradas em uma planilha, onde se obteve a média das quatro medidas. O mesmo procedimento descrito foi realizado para as 2 amostras de cada família de concreto produzido. O resultado final foi obtido pela média das duas amostras.

5 ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos através da metodologia descrita no capítulo anterior, juntamente com as análises estatísticas e avaliações comparativas que foram realizadas para os ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e durabilidade através da profundidade de carbonatação.

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

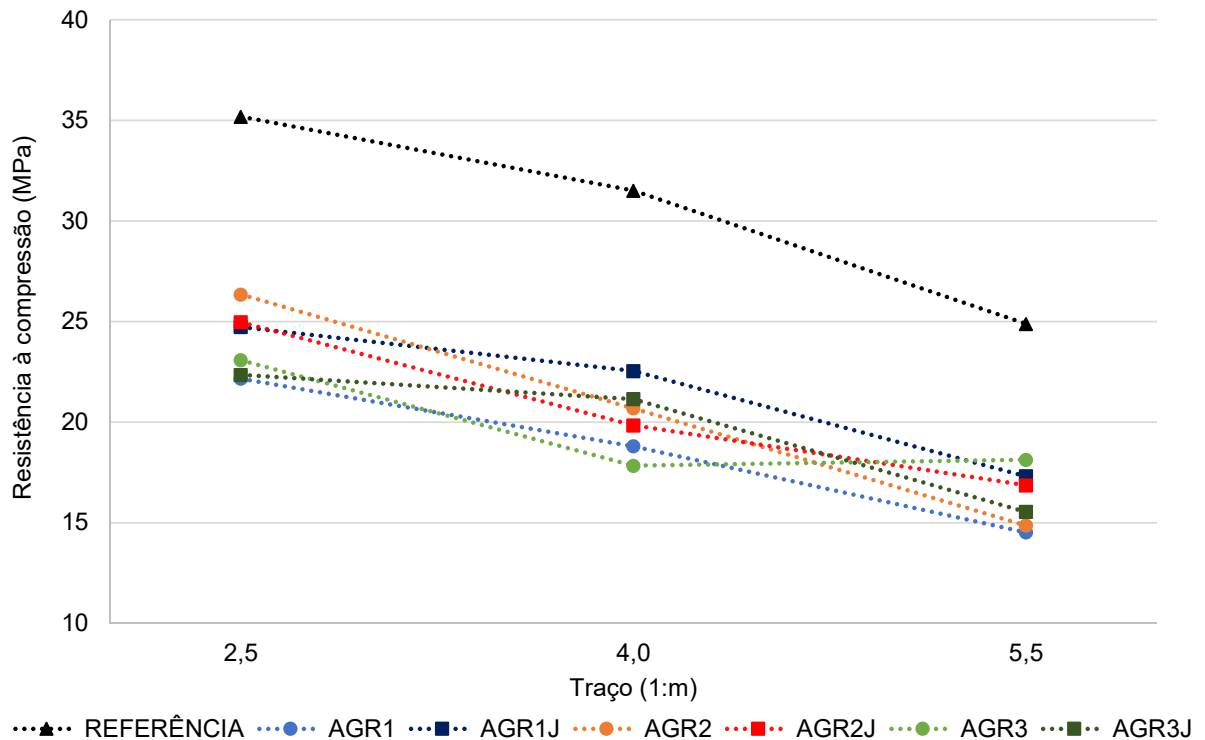
Os resultados atingidos para a resistência à compressão axial, dos concretos produzidos, são apresentados na tabela 17. Cada valor representa a média de três observações experimentais, são descritos o desvio padrão desses resultados e o coeficiente de variação. Para facilitar a análise visual, os valores foram plotados na figura 32. No anexo 1, podem ser visualizados todos os resultados correspondentes a este ensaio.

Tabela 17 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação da resistência à compressão axial (MPa)

Resistência à compressão por traço unitário (MPa)				
Tipo de agregado	Traço unitário	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	C.V (%)
AGN	2,5	35,18	0,96	2,7
	4,0	31,51	1,45	4,6
	5,5	24,88	0,04	0,1
AGR1	2,5	22,16	1,04	4,7
	4,0	18,80	0,57	3,0
	5,5	14,52	1,03	7,1
AGR1J	2,5	24,73	1,63	6,6
	4,0	22,54	0,70	3,1
	5,5	17,30	0,75	4,3
AGR2	2,5	26,35	2,22	8,4
	4,0	20,68	0,41	2,0
	5,5	14,86	1,19	8,0
AGR2J	2,5	24,96	1,44	5,8
	4,0	19,84	0,76	3,8
	5,5	16,86	0,91	5,4
AGR3	2,5	23,08	1,05	4,5
	4,0	17,83	1,55	8,7
	5,5	18,13	1,24	6,8
AGR3J	2,5	22,34	1,80	8,1
	4,0	21,14	1,55	7,3
	5,5	15,54	0,90	5,8

Fonte: elaborada pela autora

Figura 32 – Influência do traço na resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa)



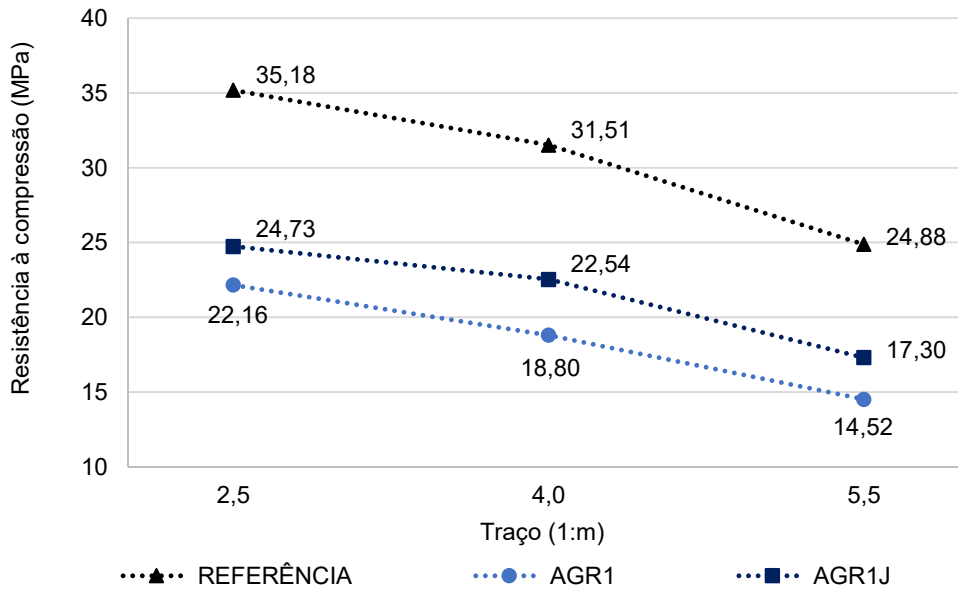
Fonte: elaborada pela autora

Devido à variabilidade dos agregados reciclados, os concretos produzidos com eles também apresentaram inconstância de comportamento, como pode-se perceber não foi constatado um desempenho comum ou uniforme entre as três fontes de agregado reciclado, para os três traços produzidos.

Para melhor observar o efeito da separação por densidade realizada por jigagem, foram elaboradas as figuras 33, 34 e 35, os quais mostram os resultados para a resistência à compressão por fonte de agregado reciclado, com e sem processamento e os valores para o agregado natural de referência.

Na figura 33 estão os resultados para a resistência à compressão axial, aos 28 dias, para a fonte 1. A análise dos valores, para os concretos produzidos com os agregados da fonte 1, revelou um aumento de resistência à compressão dos agregados reciclados jigados em relação aos que não foram selecionados por jigagem, para todos os traços investigados.

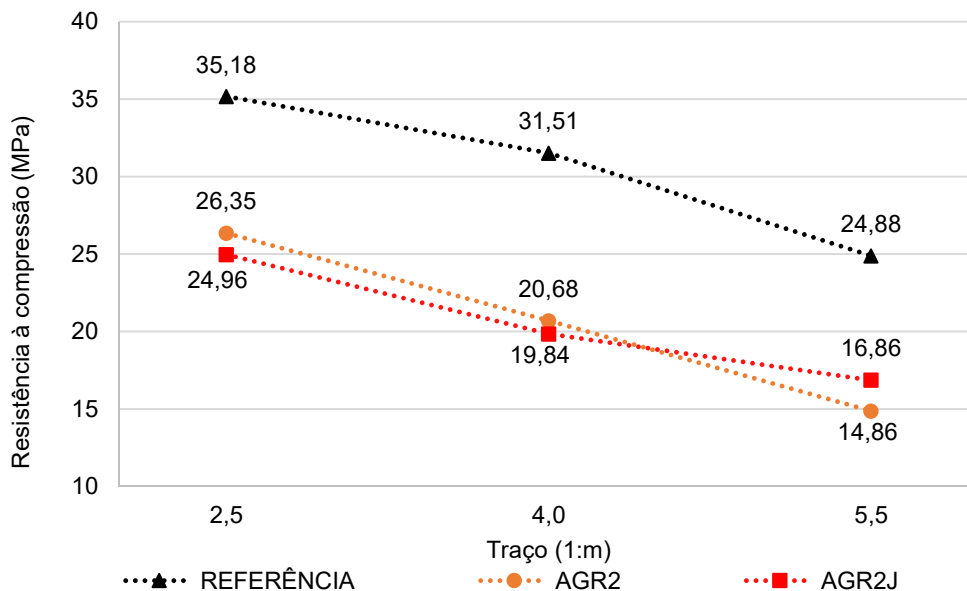
Figura 33 – Resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa) para fonte 1



Fonte: elaborada pela autora

A figura 34 traz os resultados para a resistência à compressão aos 28 dias dos agregados graúdos obtidos na fonte 2, processados no jigue e não processados.

Figura 34 – Resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa) para fonte 2

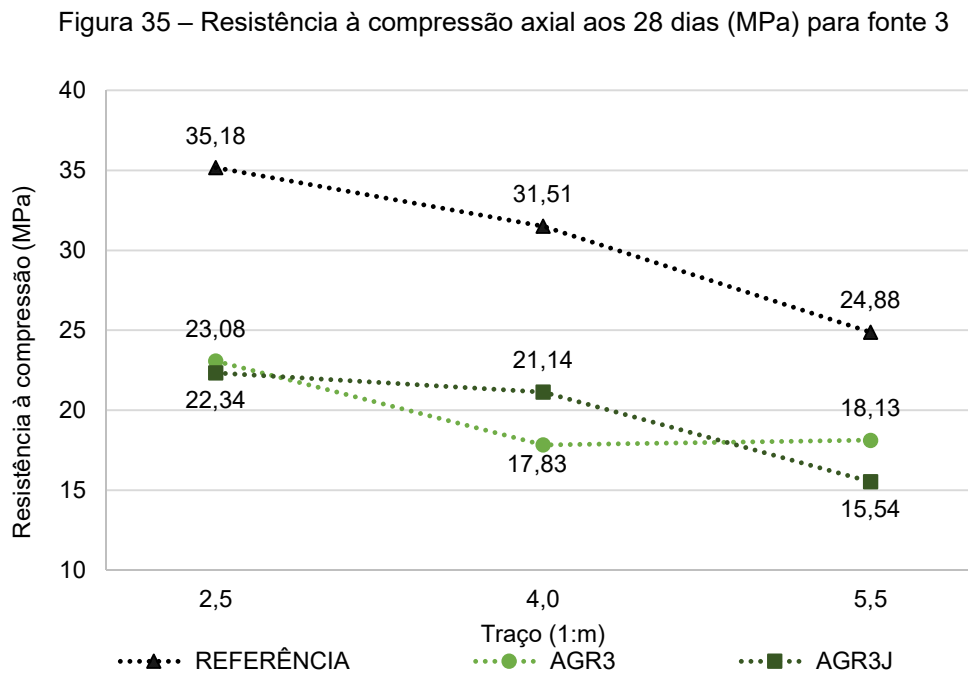


Fonte: elaborada pela autora

Para a fonte 2, os resultados obtidos foram adversos aos que eram esperados, sendo que os agregados que não passaram por seleção densitária apresentaram melhor

desempenho para os traços rico e intermediário; e os agregados selecionados apresentaram melhores resultados apenas para o traço mais pobre em cimento.

Na figura 35, foram expostas as grandezas encontradas para os agregados oriundos da fonte 3, jigados e não jigados.



Fonte: elaborada pela autora

Ao observar os valores mostrados na figura 35, pode-se concluir que o processamento no jigue para os agregados graúdos obtidos na fonte 3 não promoveu melhorias para os traços rico e pobre em cimento, apresentando ganhos para o parâmetro de resistência à compressão axial apenas para o traço intermediário.

Deste modo, somente foram identificados ganhos nos valores de resistência à compressão axial, para todos os traços, com a utilização da seleção densitária dos agregados oriundos da fonte 1. O mesmo não pôde ser afirmado para as fontes 2 e 3, que para alguns traços mostram redução no valor da resistência à compressão. Uma hipótese para esse comportamento pode ser baseada no fato da fonte 1 apresentar uma menor quantidade de material lamelar cerâmico esmaltado ou polido. Tal peculiaridade pode ter gerado interferências no processo de separação densitária, conforme foi possível observar e foi relatado nas informações de caracterização de

composição, granulometria, índice de forma e massa unitária dos agregados reciclados analisados, onde para a fonte 1 puderam ser identificados ganhos e melhorias, diferentemente do observado para as demais fontes.

Na figura 36 são apresentadas imagens de detalhes de ruptura de corpos de prova, que foram utilizados em ensaios de resistência à compressão. Consegue-se observar que a presença de agregados de cerâmica polida ou esmaltada pode ter criado uma zona de pouca aderência entre o agregado e a pasta de cimento, o que gera um comprometimento da resistência à compressão do concreto e aumenta a variabilidade dos resultados para essa propriedade.

Figura 36 – Detalhes de ruptura de corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: elaborada pela autora

Objetivando uma avaliação mais consistente dos dados de resistência à compressão axial, foi realizado um tratamento estatístico com a utilização da análise de variância (ANOVA), os resultados obtidos podem ser visualizados na tabela 18.

Tabela 18 – Análise de Variância (ANOVA) para a resistência à compressão

Fonte de variação	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probab.	Signif.
A: Fonte de AGR	5,58	2	2,79	1,82	17,70%	NÃO
B: Seleção por Jigagem	9,07	1	9,07	5,90	2,02%	SIM
C: Traço	533,99	2	266,99	173,82	0,00%	SIM
AB	22,83	2	11,41	7,43	0,20%	SIM
AC	28,51	4	7,13	4,64	0,40%	SIM
BC	5,84	2	2,92	1,90	16,43%	NÃO
ABC	16,26	4	4,07	2,65	4,91%	SIM
Erro	55,30	36	1,54			
TOTAL	677,37	53				

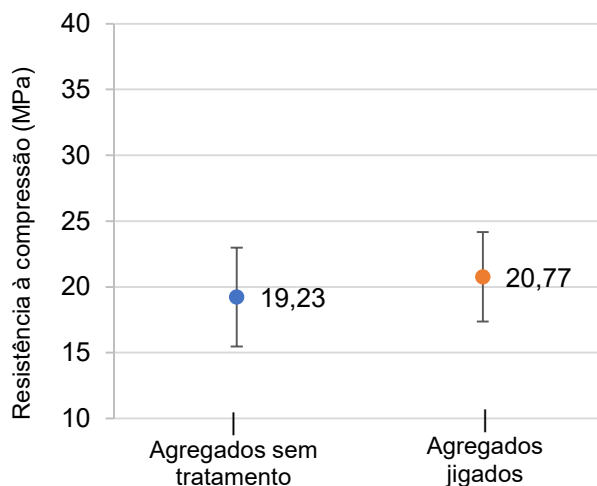
Legenda: SQ: Soma Quadrada, GDL: Grau de Liberdade, MQ: Média Quadrada, Teste F: valor calculado da distribuição de Fisher

Fonte: elaborada pela autora

Para avaliação desse estudo, foi considerado um nível de significância de 5%, somente os fatores ou combinações com probabilidade inferior a 5% são consideradas como significativas, ou seja, que causam alterações na variável de resposta. Sendo assim, pela análise de variância o efeito da fonte dos agregados reciclados não impactou significativamente nos resultados de resistência à compressão axial. Os fatores controláveis avaliados representados pelas letras B e C (processamento e traço, respectivamente) se mostraram significativos, concomitantemente com as interações AB e AC, por isso esses fatores e interações serão mostrados separadamente a seguir. Como as interações de todos os fatores, ou seja ABC, já foram analisadas anteriormente, essas não serão apresentadas novamente.

A figura 37 mostra o efeito isolado da seleção por jigagem na resistência à compressão, através da média e das barras de desvio padrão, de todas observações referentes aos agregados reciclados que não passaram por tratamento, e os agregados reciclados que foram selecionados por jigagem.

Figura 37 – Efeito isolado do tratamento da seleção por jigagem na resistência à compressão axial



Fonte: elaborada pela autora

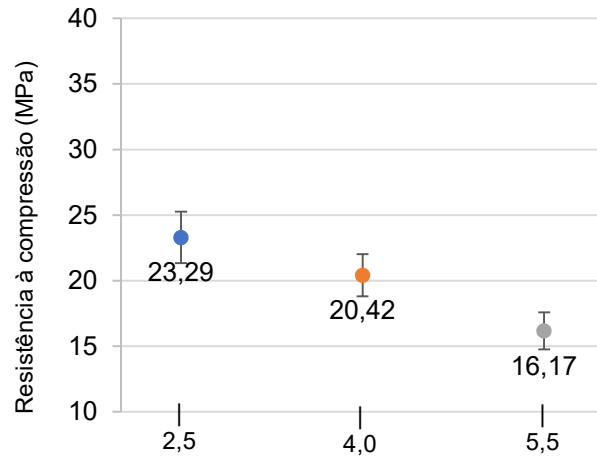
Como pode-se perceber, para todas as fontes e todos os traços produzidos, as médias dos resultados do ensaio de compressão axial para os agregados que foram selecionados por jigagem apresentam valores levemente superiores aos que não passaram por esse processo. A análise de variância apresenta melhora significativa e considera o processamento impactante nos valores para o parâmetro analisado. Conforme exposto na revisão bibliográfica, o processo de jigagem proporciona a seleção dos materiais mais densos, o que separa os agregados mais resistentes, assim os valores de resistência à compressão dos concretos produzidos com os agregados que foram selecionados no jigue foram mais altos do que no caso em que não foram processados.

O efeito isolado causado pelos traços estudados, são mostrados na figura 38, através das médias dos valores de resistência à compressão axial obtidas para cada traço, bem como as barras que representam os desvios padrões calculados.

O conhecimento de que o traço, especialmente as relações água/cimento utilizadas nas misturas de concreto, é impactante para os valores de resistência alcançados pelo concreto no estado endurecido já é consenso no meio científico. Complementando os resultados e justificativas apresentadas, para os resultados de resistência à compressão axial dos concretos por traço utilizado, seu efeito isolado mostra que

conforme mais rico em cimento for o traço (menor relação água/cimento), maiores serão os valores alcançados para as resistências à compressão dos concretos.

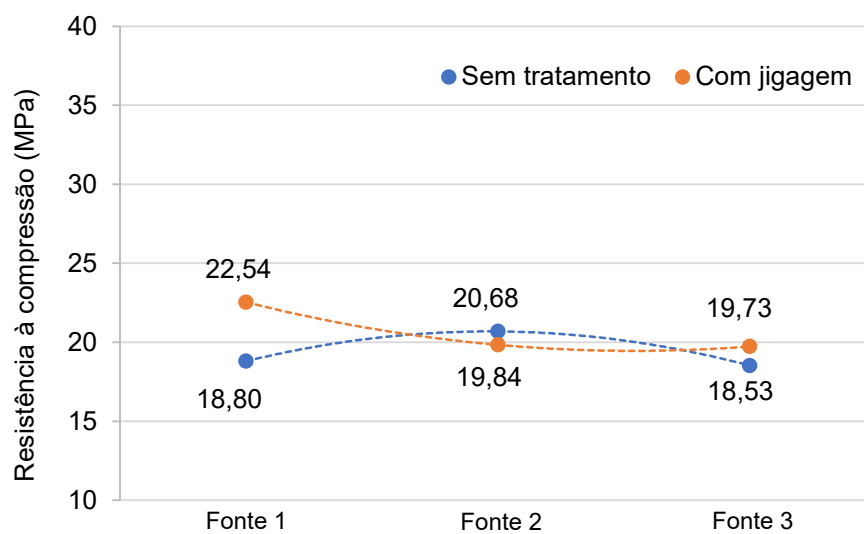
Figura 38 – Efeito isolado do traço na resistência à compressão axial



Fonte: elaborada pela autora

A figura 39 expõe a interação dos efeitos da fonte e da seleção por densidade dos agregados reciclados estudados, em relação à variável de resposta. Pode-se observar que para as fontes 1 e 3, o processo de separação por jigagem gerou ganhos de resistência nos concretos produzidos com os agregados processados, sendo que para a fonte 1 esse aumento foi mais percebido. Contudo, para a fonte 2 houve uma inversão, onde a seleção densitária gerou perdas discretas nos valores de resistência.

Figura 39 – Efeito da interação fonte e tratamento na resistência à compressão axial



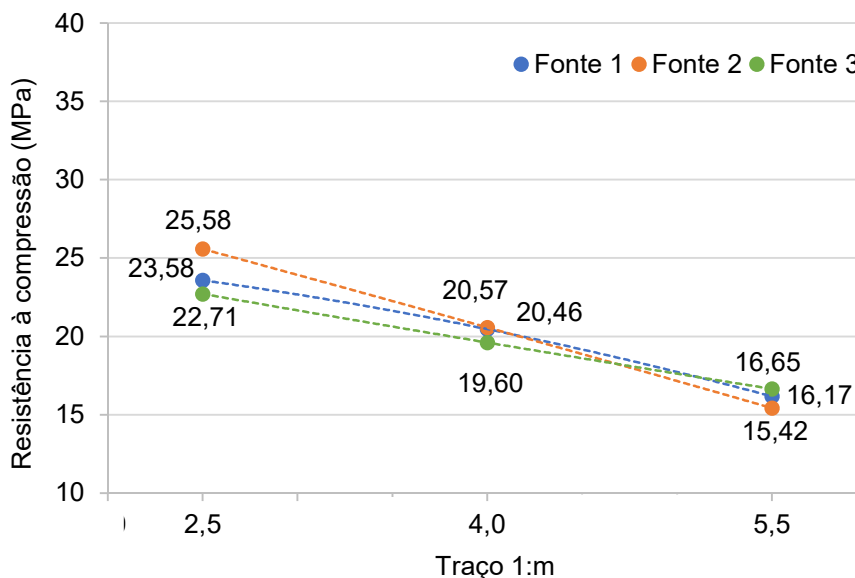
Fonte: elaborada pela autora

A variabilidade dos materiais que compõem os agregados reciclados, já evidenciada nos ensaios de caracterização dos mesmos, juntamente com a dificuldade em promover uma separação eficaz dos seus componentes por jigagem, podem ter influenciado nos resultados, os quais não apresentaram ganhos significativos, tanto quanto esperado, especialmente para as fontes 2 e 3.

Pode-se perceber que a efetividade da jigagem está atrelada à fonte de origem do agregado reciclado, através da composição do RCD e forma de britagem. Ao contrário do que era esperado, a seleção densitária não conseguiu reduzir a variabilidade da resistência à compressão axial dos concretos produzidos com agregados jigados, uma vez que comparando os valores obtidos entre as fontes, não pode-se perceber um comportamento constante ou resultados próximos, entre eles, para essa propriedade mecânica.

Na figura 40 é apresentado o efeito da interação entre os traços estudados, e as fontes nas quais foram obtidos os agregados reciclados.

Figura 40 – Efeito da interação traço e fonte na resistência à compressão axial



Fonte: elaborada pela autora

O que pode-se perceber com a avaliação da figura 40, é que os agregados reciclados apresentam comportamentos diferentes, por serem oriundos da transformação de matérias diversos, onde a variabilidade das suas características, já apresentadas,

geram comportamentos e resultados distintos para a resistência à compressão dos concretos produzidos com esses agregados. Somente nos traços mais ricos é possível comprovar a influência da qualidade do agregado reciclado de RCD. Sendo assim, é perceptível que o limitante para a melhoria da resistência dos concretos produzidos foram os agregados, pois, a melhoria da matriz, com o enriquecimento do traço e conseqüente redução da relação água/cimento, gerou aumentos discretos ou abaixo do esperado.

5.2 DADOS E GRÁFICOS DE DOSAGEM

Nesse item são apresentados alguns dados e informações obtidas referente às dosagens de concreto realizadas. Na tabela 19 estão contidos os dados que foram coletados e calculados, para cada traço produzido, com os quais foram desenhados os gráficos que relacionam as suas principais propriedades e auxiliam na análise do comportamento das famílias de concretos que foram moldados. As comparações entre esses resultados são discutidas a seguir.

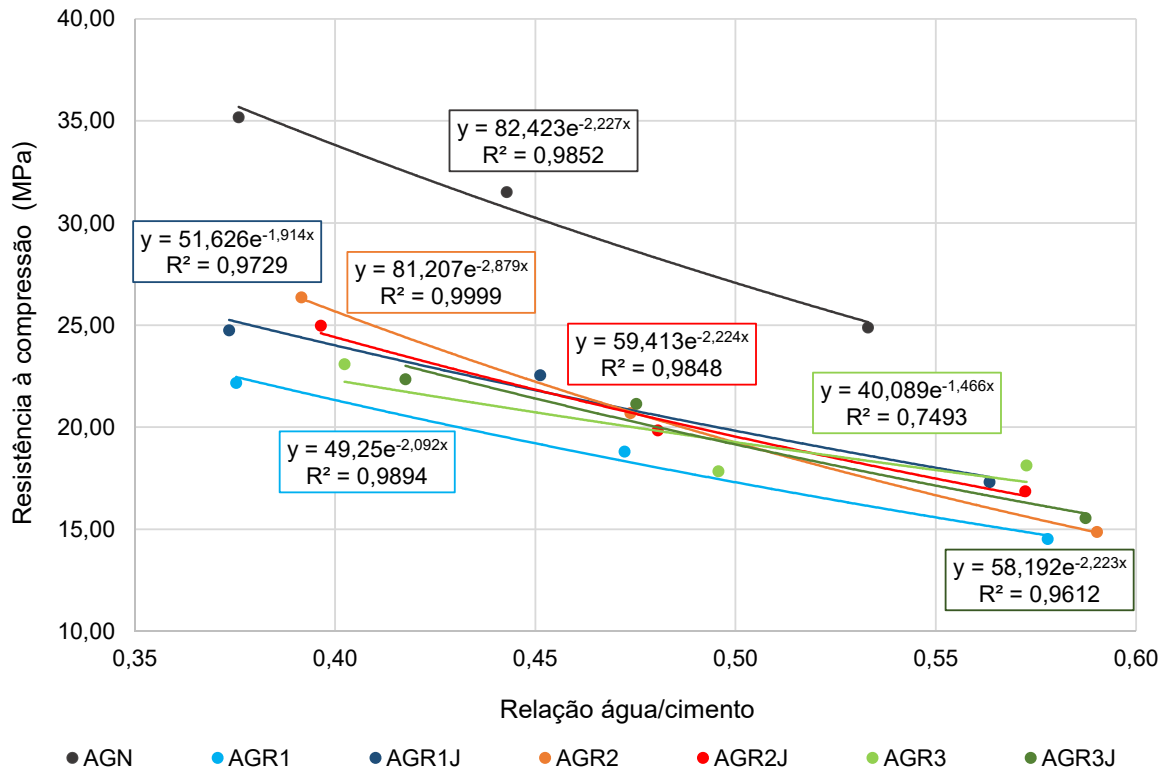
Tabela 19 - Dosagem obtida na produção dos concretos

Tipo de Agregado	Traço Unitário (1:m)	Relação a/c obtida	Resistência à compressão (MPa)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Abatimento (mm)
AGN	2,5	0,38	35,18	554	100
	4,0	0,44	31,51	394	110
	5,5	0,53	24,88	316	100
AGR1	2,5	0,38	22,16	617	90
	4,0	0,47	18,80	439	90
	5,5	0,58	14,52	337	90
AGR1J	2,5	0,37	24,73	548	105
	4,0	0,45	22,54	403	90
	5,5	0,56	17,30	308	90
AGR2	2,5	0,39	26,35	615	100
	4,0	0,47	20,68	439	90
	5,5	0,59	14,86	337	100
AGR2J	2,5	0,40	24,96	545	105
	4,0	0,48	19,84	400	100
	5,5	0,57	16,86	307	90
AGR3	2,5	0,40	23,08	554	110
	4,0	0,50	17,83	402	115
	5,5	0,57	18,13	311	95
AGR3J	2,5	0,42	22,34	545	105
	4,0	0,48	21,14	397	110
	5,5	0,59	15,54	306	115

Fonte: elaborada pela autora

Na figura 41 estão desenhadas as curvas que correlacionam a relação água/cimento em função da resistência à compressão do concreto, que para essa pesquisa foi avaliada aos 28 dias de cura. Quem primeiro reconheceu esta relação de dependência foi Duff Abrams em 1919, que demonstrou, baseando-se em pesquisas laboratoriais, que a resistência do concreto era uma função direta da relação água/cimento (NEVILLE, 1997). A lei de Abrams é uma função descrita por equações exponenciais, as quais são apresentadas no gráfico da figura 41, para cada família de concreto estudada, juntamente com o valor de R-quadrado ou coeficiente de determinação, que indica o quanto o modelo ou equação consegue representar os valores observados. Quanto mais próximo de 1 for essa grandeza, melhor será o ajuste da equação aos resultados obtidos.

Figura 41 – Resistência à compressão em função da relação a/c

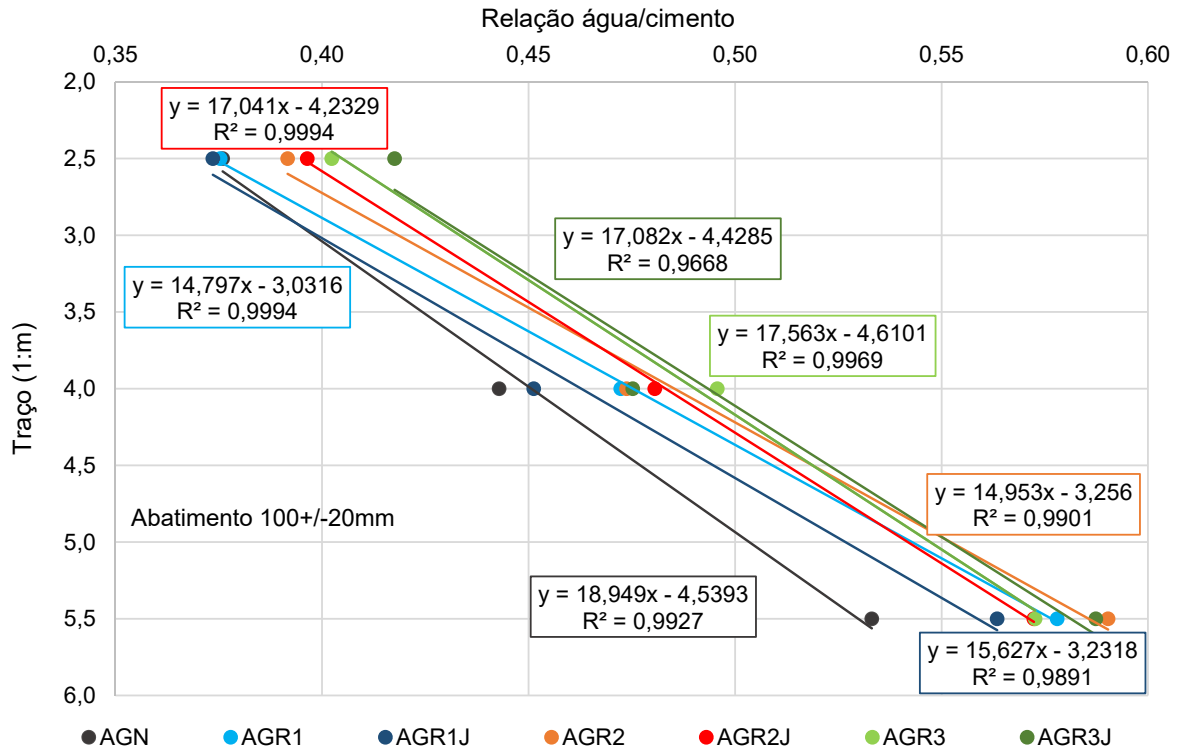


Fonte: elaborada pela autora

Contudo, o que pode-se observar no gráfico da figura 41, é que alguns concretos conseguem ser melhor delineados pela Lei de Abrams, como por exemplo o produzido com AGR2, do que outros, como é o caso do concreto que contém o AGR2J, cujo coeficiente de determinação encontrado foi de 0,7493. Esse fato pode ser atrelado a variabilidade dos resultados, conforme já discutido na análise do ensaio de compressão axial, no item 5.1

Na figura 42 estão relacionados os parâmetros da Lei de Lyse, onde para um dado conjunto de materiais, a consistência do concreto é descrita por uma função linear entre o cimento/agregados secos (1:m) e relação água/cimento (a/c). São apresentadas as equações que descrevem o comportamento dos dados, juntamente com o coeficiente de determinação (R^2), que quantifica o quanto a equação é representativa do conjunto de valores analisados.

Figura 42 – Influência do processamento e da relação a/c para os traços unitários

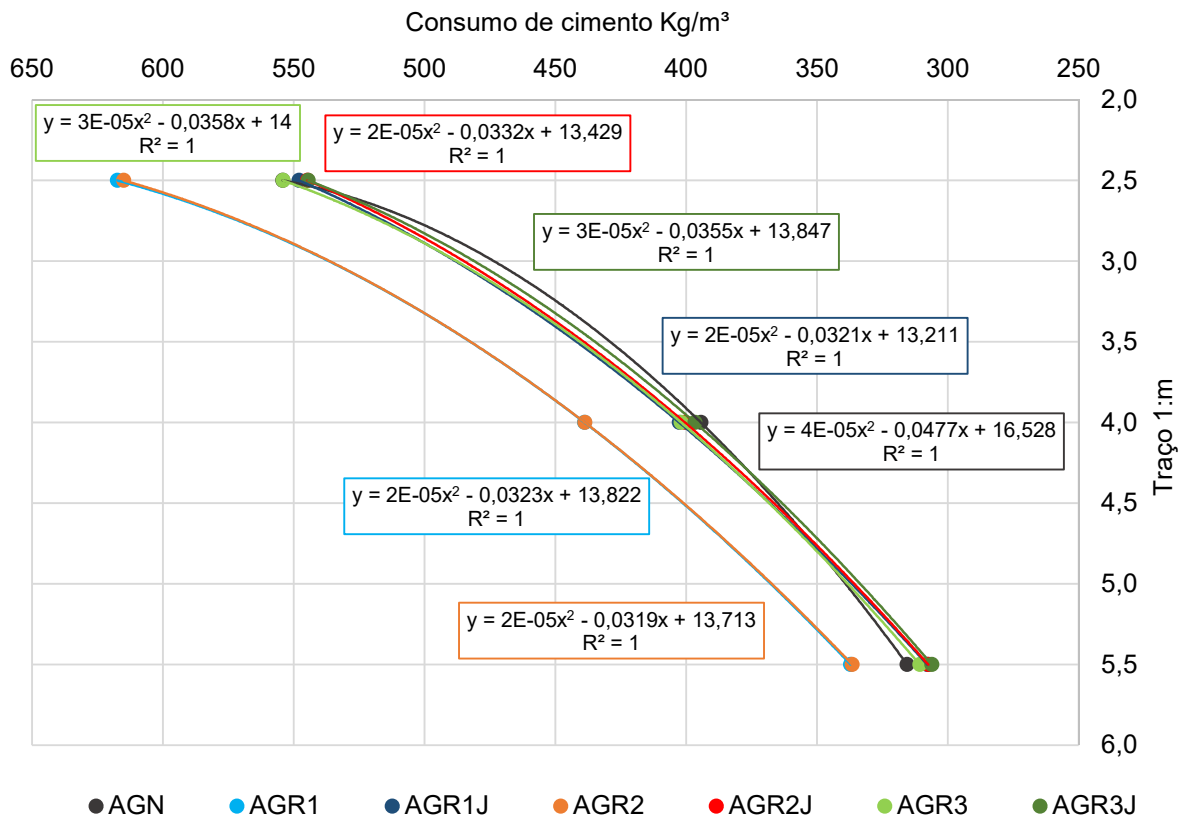


Fonte: elaborada pela autora

Considerando a faixa de valores adotadas para a consistência dos concretos produzidos, pode-se observar que a maioria das composições moldadas apresentaram retas muito próximas para os agregados reciclados, apresentando um distanciamento maior para os valores do agregado natural, e dos agregados oriundos da fonte 1.

O terceiro gráfico que foi elaborado, para compor o diagrama de dosagem dos concretos estudados, está exibido na figura 43 e diz respeito à Lei de Molinari, a qual descreve que o consumo de cimento de um concreto se correlaciona com o valor do traço seco, ou relação entre o cimento/agregados secos, através de uma curva do tipo polinomial. As equações dessas curvas que definem esse comportamento estão apontadas, para cada tipo de concreto, juntamente com o valor do seu R-quadrado respectivo, na figura 43.

Figura 43 – Relação do consumo de cimento e do traço unitário



Fonte: elaborada pela autora

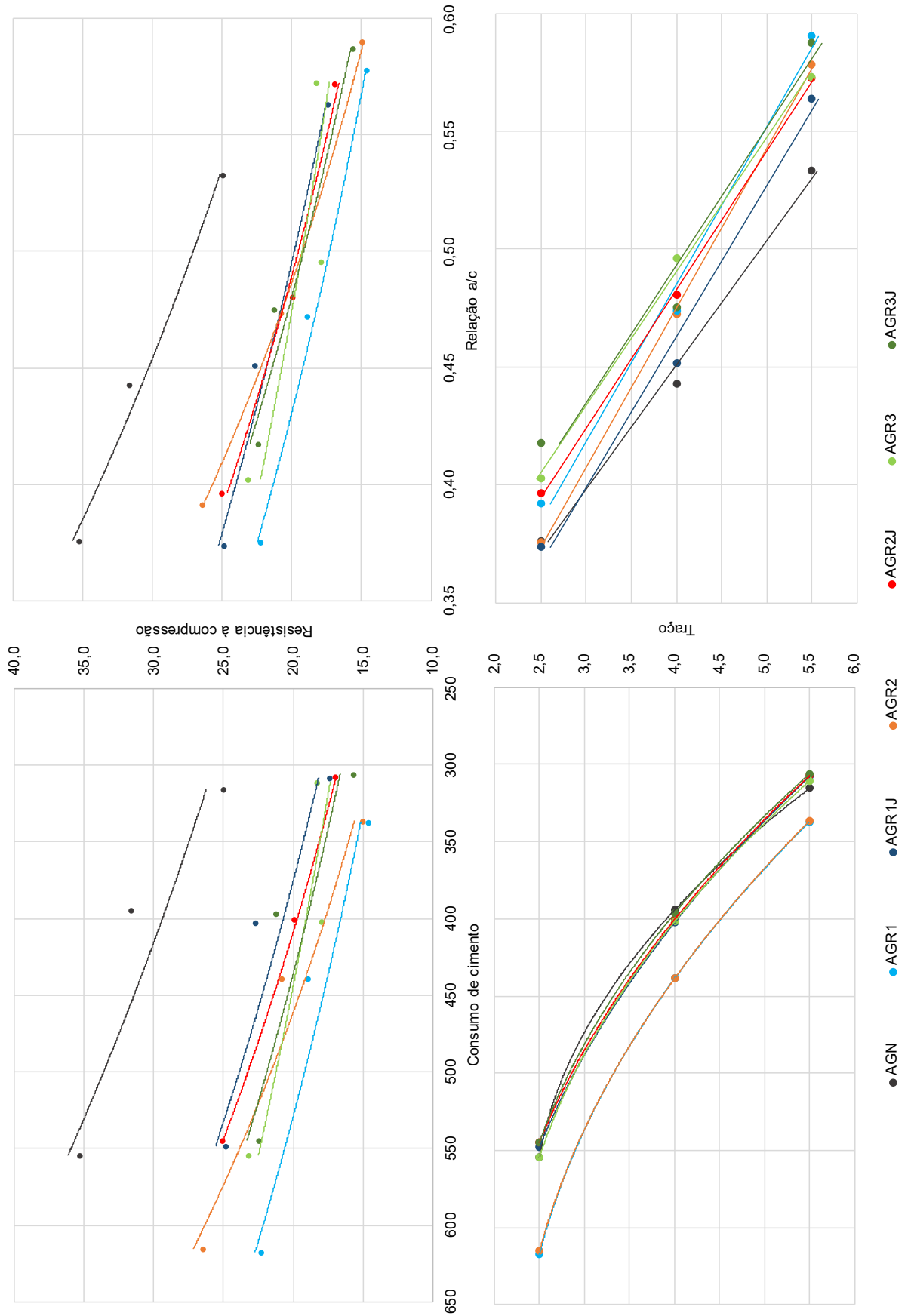
A análise da figura 43, conjuntamente com a tabela 19, indica que houve um maior consumo de cimento para os agregados graúdos reciclados nos traços ricos e intermediários, onde a relação de cimento e agregados secos é de 1:2,5 e 1:4,0, em relação ao agregado natural. A observação visual também mostra que os agregados que mais se destoaram das demais curvas foram os agregados reciclados não jigados das fontes 1 e 2, os quais apresentaram os maiores consumos de cimento para todos os traços moldados.

Da união dos gráficos apresentados nas figuras 41, 42, 43 e do gráfico que relaciona o consumo de cimentos com a resistência à compressão foi construído o diagrama de dosagem, mostrado na figura 44, o qual descreve o comportamento dos concretos produzidos, para os materiais utilizados (cimento, agregado graúdo, agregado miúdo), teor de argamassa e faixa de consistência escolhidos.

Quando se projeta uma determinada resistência à compressão até as curvas das famílias dos concretos, pode-se observar que o consumo de cimento para alcançar

uma mesma resistência, é bem mais elevado para todos os concretos com agregado reciclado em relação ao concreto referência (com agregado graúdo natural). Contudo, para os concretos produzidos com agregados AGR1J e AGR2J, que foram processados no jigue, apresentam curvas de menor consumo de cimento se comparadas aos concretos moldados com os agregados não jigados das fontes 1 e 2.

Figura 44 – Diagrama de dosagem dos concretos aos 28 dias



Fonte: elaborada pela autora

5.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

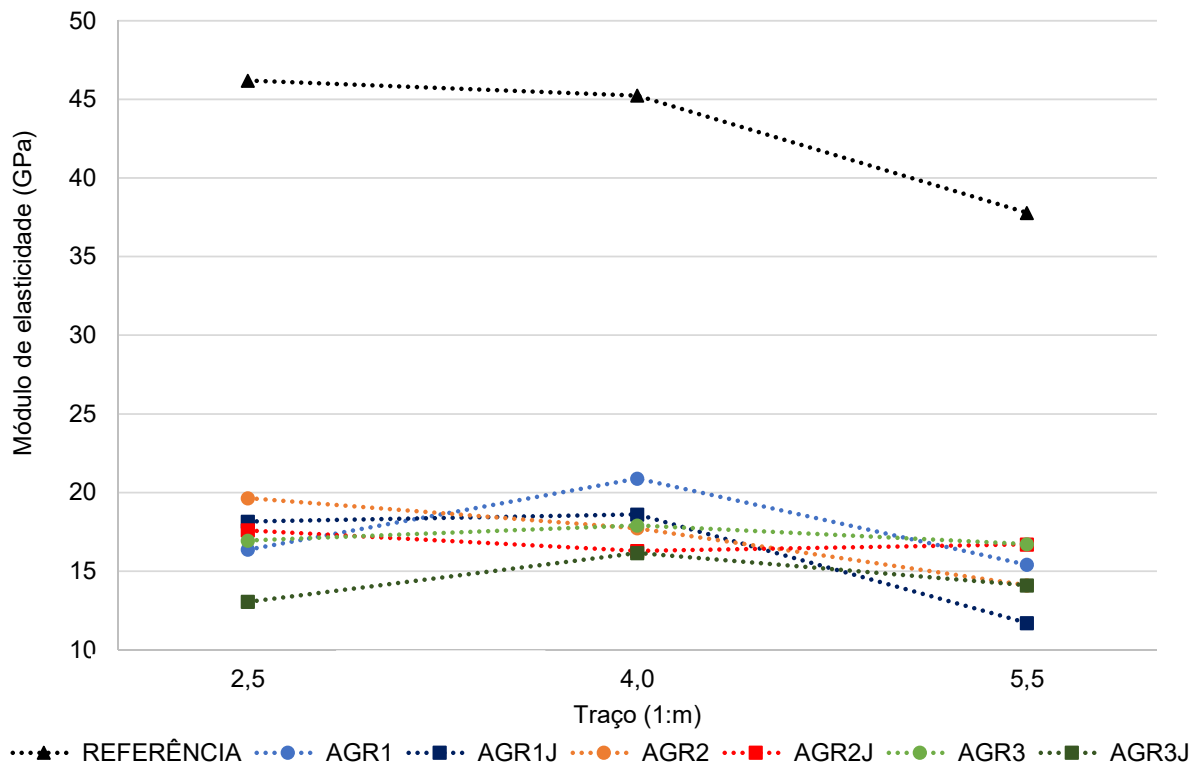
Os valores relativos ao módulo de elasticidade, dos concretos produzidos, são apresentados na tabela 20, onde cada valor representa a média de duas observações experimentais. Foram realizados ensaios com 3 corpos de prova para cada família de concreto, porém, devido à variabilidade dos resultados obtidos, e seguindo a validação dos resultados segundo a norma que regula esse ensaio, somente duas repetições foram validadas. Contudo, uma das restrições impostas pela normativa teve que ser desprezada. Como os corpos de prova foram retificados para alinhamento e nivelamento das bases, a grande maioria ficou com a relação altura/diâmetro menor que 1,98; sendo o intervalo indicado pela norma entre 1,98 e 2,02.

Tabela 20 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação do módulo de elasticidade (GPa)

Módulo de elasticidade por traço unitário (GPa)			
Tipo de agregado	Traço unitário	Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)
AGN	2,5	46,20	3,25
	4,0	45,24	0,98
	5,5	37,78	0,82
AGR1	2,5	16,37	0,90
	4,0	20,89	0,69
	5,5	15,41	0,26
AGR1J	2,5	18,15	1,06
	4,0	18,60	0,57
	5,5	11,70	0,99
AGR2	2,5	19,64	0,25
	4,0	17,73	1,10
	5,5	14,10	0,57
AGR2J	2,5	17,60	1,25
	4,0	16,29	0,06
	5,5	16,70	0,69
AGR3	2,5	16,94	0,21
	4,0	17,91	1,13
	5,5	16,72	0,11
AGR3J	2,5	13,05	0,45
	4,0	16,15	0,71
	5,5	14,10	0,75

Fonte: elaborada pela autora

Figura 45 – Médias dos valores de módulo de elasticidade aos 28 dias (GPa)



Fonte: elaborada pela autora

O gráfico da figura 45 apresenta os valores médios do módulo de elasticidade para todos os concretos estudados. No anexo 2, podem ser visualizados todos os resultados correspondentes a este ensaio.

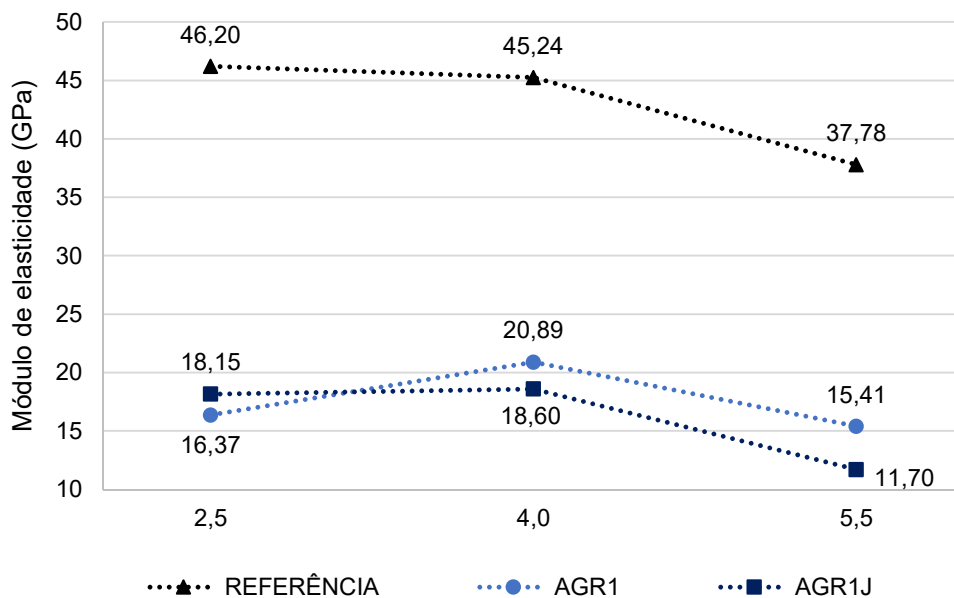
Observando o gráfico dos resultados para o módulo de elasticidade, pode-se constatar um comportamento atípico para a inclinação dos valores esperados. O comportamento provável para a tendência dos valores seria conforme os resultados obtidos para a resistência à compressão axial, onde conforme haja um melhoramento da matriz e um enriquecimento de cimento no traço, aconteça um incremento ou aumento das respectivas respostas. Conforme relatado na revisão bibliográfica do item 2.5.2, Rohden (2015) observou a existência de um desempenho diferente do esperado, o qual foi mais acentuado, quanto maior eram as diferenças das propriedades mecânicas da matriz cimentícia e dos agregados graúdos de um mesmo concreto.

Essa hipótese pode ser levantada, considerando-se que para a maioria dos agregados reciclados ocorreu um aumento nos valores do módulo de elasticidade, com a melhora da matriz, indo do traço pobre para o intermediário, o que não foi registrado com o aumento do traço intermediário para o traço rico. Para os agregados oriundos das fontes 1 e 3, jigados e não jigados, houve uma redução de valores dos concretos com traço 1:2,5 em relação aos obtidos para o traço 1:4,0.

Buscando uma melhor avaliação do comportamento dos resultados do módulo de elasticidade, a seguir serão mostrados as médias dos valores obtidos em separado para cada fonte de agregado reciclado pesquisada.

Na figura 46, estão os valores das médias das observações, para o módulo de elasticidade, alcançados com os concretos produzidos com os agregados vindos da fonte 1 para as configurações, jigado e não processado, além dos resultados do concreto de referência.

Figura 46 – Médias dos valores de módulo de elasticidade (GPa) para Fonte 1



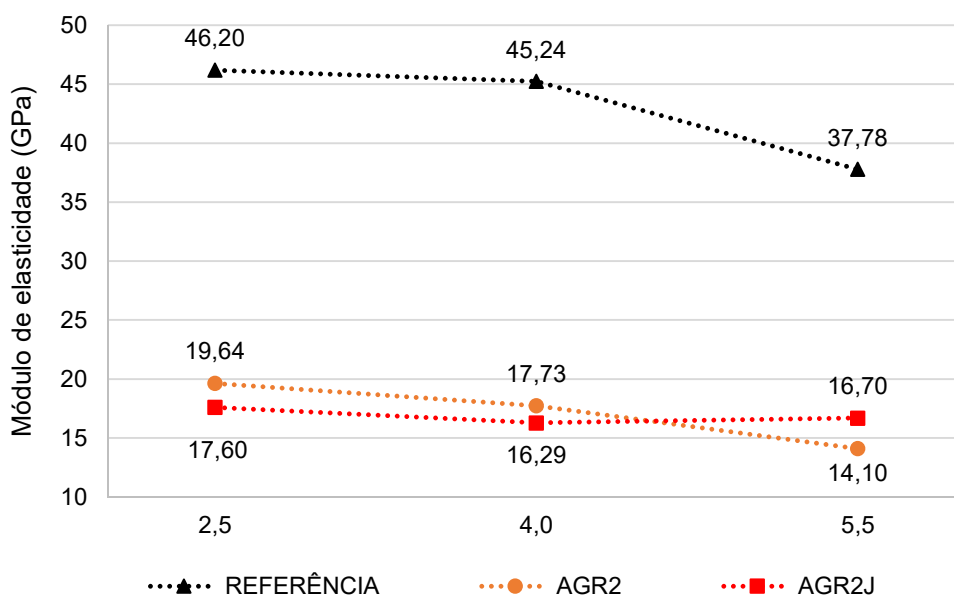
Fonte: elaborada pela autora

Para a fonte 1 ocorreu o comportamento anormal, exposto anteriormente, onde ao promover uma melhora da matriz do traço unitário 1:4,0 para 1:2,5, houve um declínio do módulo de elasticidade ao invés de um aumento da sua grandeza. Contudo, a seleção do agregado graúdo realizada no jigge apontou ganhos nos valores de

módulo de elasticidade, apenas para o traço mais rico, sendo que para os demais traços o processamento gerou perdas dessa propriedade mecânica. Tal fato aponta para uma baixa eficácia da seleção dos agregados graúdos reciclados por jigagem, e para uma inconstância no comportamento dos concretos produzidos.

A figura 47 exibe as médias dos valores do módulo de elasticidade alcançados para os concretos produzidos com os agregados reciclados oriundos da fonte 2.

Figura 47 – Médias dos valores de módulo de elasticidade (GPa) para Fonte 2



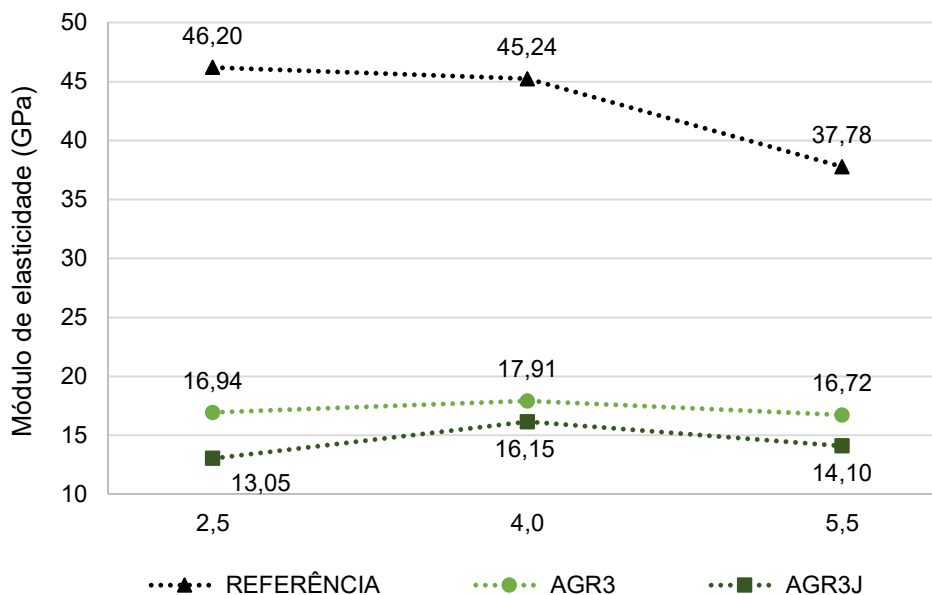
Fonte: elaborada pela autora

Analisando os resultados expostos para a fonte 2, pode-se verificar que essa fonte os dados tiveram um comportamento mais dentro do esperado para o módulo de elasticidade, exceto pelo leve declínio do valor para o agregado jigado do traço pobre para o intermediário.

Para essa fonte o processo de seleção dos agregados reciclados por densidade não apresentou impactos positivos para a propriedade mecânica avaliada, exceto para o traço mais pobre. A explicação pode ser baseada nos ensaios de caracterização dos agregados oriundos dessa fonte, os quais não apontaram melhorias significativas entre as amostras jigadas e não processadas, sendo que essas propriedades influenciam diretamente no módulo de elasticidade do concreto.

Na figura 48 estão os resultados encontrados para o módulo de elasticidade dos concretos moldados com os agregados obtidos da fonte 3, juntamente com os do concreto referência.

Figura 48 – Médias dos valores de módulo de elasticidade (GPa) para Fonte 3



Fonte: elaborada pela autora

Os concretos produzidos com os agregados da fonte 3 apresentaram o mesmo comportamento atípico descrito anteriormente, onde com a melhora do traço de 1:4,0 para 1:2,5 são percebidas reduções nos resultados do módulo de elasticidade, conforme fenômeno relatado na revisão bibliográfica.

Quanto à análise da seleção dos agregados por jigagem, para a fonte 3, a mesma não evidenciou ganhos para os resultados da propriedade mecânica apresentados, inclusive o que pode-se perceber são reduções dos valores para todos os traços executados. Novamente, os ensaios de caracterização dos agregados antes e após jigagem, não mostraram melhoras significativas nas propriedades dos agregados graúdos vindos da fonte 3. Esse fato, atrelado à variabilidade intrínseca desse tipo de agregado, pode ter influenciado no comportamento dos concretos formados por eles.

Com o fim de avaliar estatisticamente a significância da influência das variáveis estudadas, foi realizada análise de variância (ANOVA), cujos os resultados podem ser contemplados na tabela 21.

Tabela 21 – Resultados da Análise de Variância (ANOVA) para o módulo de elasticidade

Fonte de variação	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probab.	Signif.
A: Fonte de AGR	10,17	2	5,08	9,14	0,18%	SIM
B: Seleção por Jigagem	19,86	1	19,86	35,72	0,00%	SIM
C: Traço	62,07	2	31,03	55,81	0,00%	SIM
AB	9,10	2	4,55	8,18	0,30%	SIM
AC	45,57	4	11,39	20,49	0,00%	SIM
BC	0,56	2	0,28	0,51	61,02%	NÃO
ABC	30,72	4	7,68	13,81	0,00%	SIM
Erro	10,01	18	0,56			
TOTAL	188,06	35				

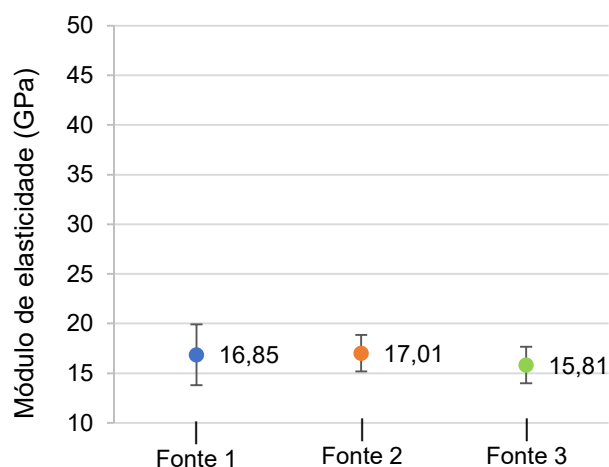
Legenda: SQ: Soma Quadrada, GDL: Grau de Liberdade, MQ: Média Quadrada, Teste F: valor calculado da distribuição de Fisher

Fonte: elaborada pela autora

Na análise da tabela 21, percebe-se que todas as fontes de variação exerceram influência significativa na variável de resposta módulo de elasticidade, considerando um nível de significância de 5%. Conforme relatado da análise de variância para a compressão axial, novamente as interações dos fatores AB e AC se mostraram significativas. A seguir são avaliadas as variáveis controláveis e as interações que se revelaram significativas.

Na figura 49, são apresentados os valores médios do efeito isolado das fontes de agregado reciclado, juntamente com as barras que ilustram os desvios padrões encontrados para os valores observados.

Figura 49 – Efeito isolado das fontes de agregado reciclado no módulo de elasticidade

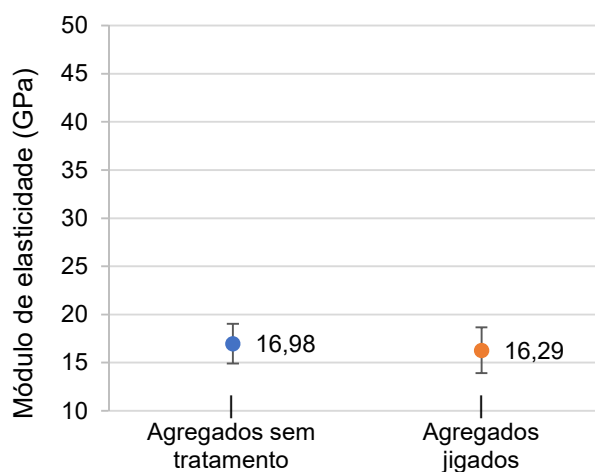


Fonte: elaborada pela autora

A verificação do efeito isolado das fontes nos valores do módulo de elasticidade, reforça a hipótese levantada anteriormente, de que a variabilidade do material tenha gerado perturbações consideráveis nessa propriedade mecânica. Tanto que essa variável de controle se mostrou significativa, ou seja, gerou influência na variável de resposta, fato que não foi observado para a resistência à compressão. A característica do agregado graúdo gerou mais impactos nos resultados de módulo de elasticidade do que nos de resistência à compressão.

A figura 50 apresenta a média dos valores obtidos para com o efeito isolado do tratamento, ou seleção por densidade, realizado nos agregados graúdos reciclados.

Figura 50 – Efeito isolado do tratamento realizado nos agregados reciclados no módulo de elasticidade

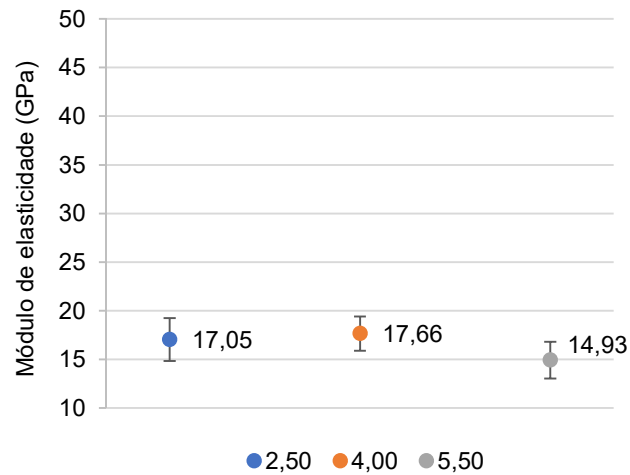


Fonte: elaborada pela autora

A comparação entre as médias do gráfico anterior mostra que o processamento no jigage não promoveu aumento dos valores de módulo de elasticidade dos concretos moldados com os agregados que foram selecionados através dele. Ainda, embora a análise de variância considere que a seleção densitária dos agregados reciclados tenha gerado impactos significativos sobre os resultados do módulo de elasticidade, essa diferença entre as médias dos efeitos isolados pode ser considerada baixa.

No gráfico da figura 51 estão os valores médios e os desvios padrões dos resultados obtidos para o módulo de elasticidade, considerando o efeito isolado do traço (1:m).

Figura 51 – Efeito isolado do traço no módulo de elasticidade



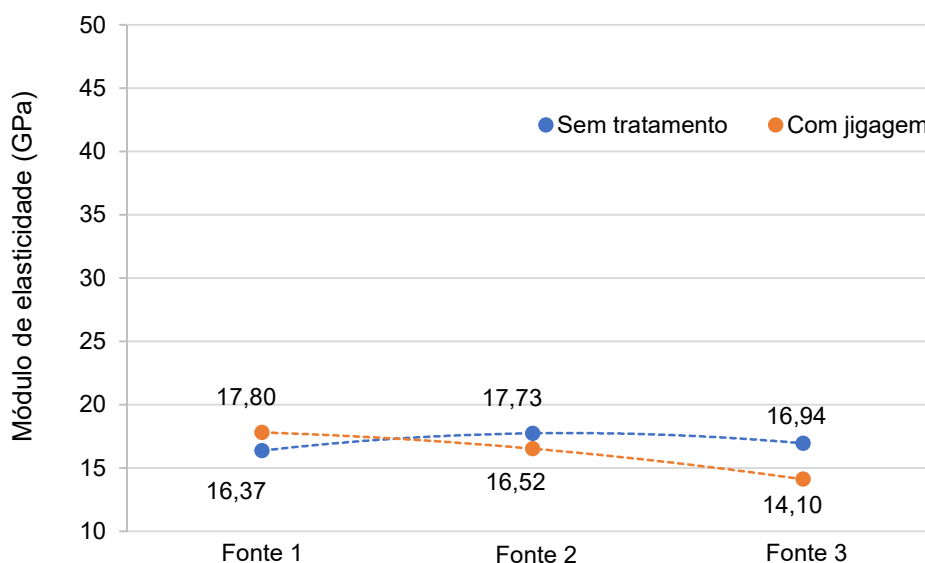
Fonte: elaborada pela autora

A análise do efeito isolado do traço deixa claro novamente a inversão de tendência dos resultados esperados do traço intermediário para o traço rico, e remete à hipótese já descrita anteriormente, de que a diferença de rigidez entre os agregados reciclados e a matriz cimentícia possa ter gerado esse comportamento.

Conforme demonstrado na planilha da ANOVA, as interações entre os fatores controláveis também causaram efeitos significativos na variável de resposta em questão. Por isso, essas interações são apresentadas nos gráficos das figuras 52 e 53.

A figura 52 mostra a interação do efeito do traço, e do tratamento realizado nos agregados reciclados, através das médias dos resultados do módulo de elasticidade observados para cada composição.

Figura 52 – Efeito da interação traço e tratamento no módulo de elasticidade



Fonte: elaborada pela autora

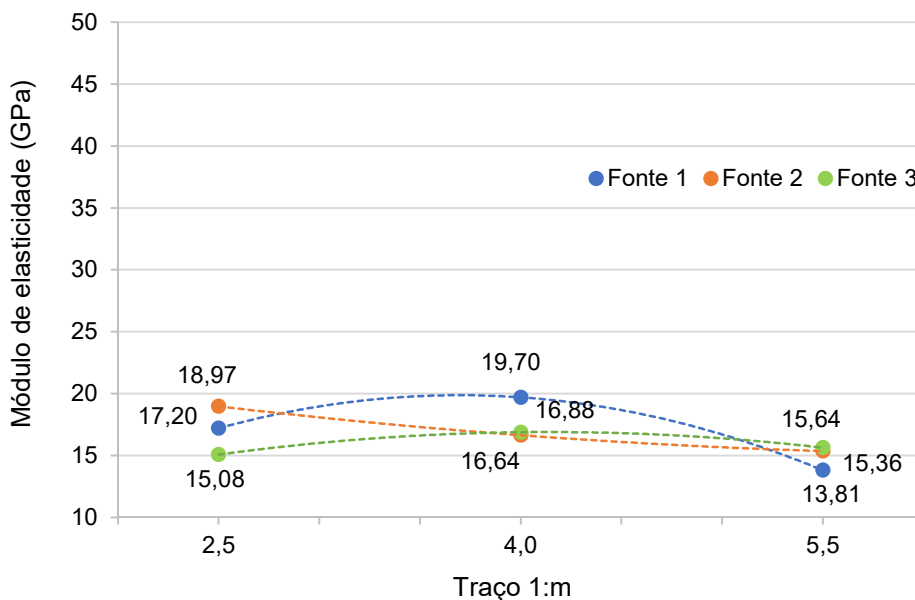
A partir da análise do gráfico da figura 52, constata-se que, considerando as médias dos valores do módulo de elasticidade, apenas a fonte 1 apresentou melhorias promovidas pela separação densitária realizada. O que indica, mais uma vez, que o processamento no jigge não se mostrou eficiente para os agregados obtidos nas fontes 2 e 3.

Ao contrário do que era esperado a seleção densitária não fez com que fossem observadas reduções na variabilidade dos resultados de módulo de elasticidade entre as fontes de agregados graúdos reciclados jigados. Novamente, a fonte de origem do agregado reciclado impactou na seleção dos agregados e assim nos resultados obtidos para o módulo de elasticidade dos concretos produzidos com eles.

Na figura 53 é apresentado o gráfico da interação dos fatores controláveis traço e fonte de agregado reciclado, através dos valores médios do módulo de elasticidade encontrados para cada configuração. Pode-se observar que para cada traço uma fonte diferente alcançou o valor mais alto para o módulo, o que leva a perceber que os agregados de cada fonte não geraram um comportamento constante. Também é possível perceber que apenas para a fonte 2 a melhora do traço gerou um crescimento proporcional dos resultados, desempenho que não é constatado para as demais fontes. Novamente a variabilidade das propriedades dos agregados reciclados pode

ter gerado perturbações no comportamento do módulo de elasticidade dos concretos produzidos com esse tipo de material.

Figura 53 – Efeito da interação traço e fonte de agregado reciclado no módulo de elasticidade



Fonte: elaborada pela autora

Contudo, embora dos valores para o módulo de elasticidade, no geral, não tenham apresentado um desempenho dentro do esperado, seu comportamento atípico tem explicações plausíveis na bibliografia estudada, as quais podem ser baseadas na considerável diferença de rigidez entre a pasta e os agregados reciclados, e na heterogeneidade dos materiais que geram variabilidade no comportamento dos concretos reciclados.

5.4 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Para analisar indiretamente a durabilidades dos concretos produzidos com agregados reciclados, foram realizados ensaios e medições de profundidades de carbonatação, conforme descrito na metodologia, para os concretos produzidos com agregado natural, e os agregados reciclados oriundos das fontes 1 e 2, jigados e não processados. As medidas obtidas, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados para cada corpo de prova avaliado, estão expostos no anexo 3.

Na tabela 22 são apresentados os valores médios das profundidades de carbonatação, em milímetros, os quais foram obtidos para cada tipo de agregado, considerando os traços e idades de exposição ao dióxido de carbono que foram definidos na metodologia.

Tabela 22 – Resultados das profundidades médias de carbonatação

Profundidades médias de carbonatação (mm)						
Traço	Idades	AGN	AGR1	AGR1J	AGR2	AGR2J
5,5	14	9,34	9,81	17,55	15,59	17,99
	21	11,93	16,23	21,50	19,26	19,57
	28	16,20	26,65	25,77	27,87	25,64
4,0	21	6,21	2,08	11,77	12,30	18,52
	35	10,71	11,24	20,16	20,52	26,54
	49	13,68	17,44	25,06	24,05	39,80
2,5	28	2,33	0,20	7,45	7,24	12,42
	42	3,50	0,54	11,33	13,04	14,76
	56	7,53	2,38	14,95	15,44	20,66

Fonte: elaborada pela autora

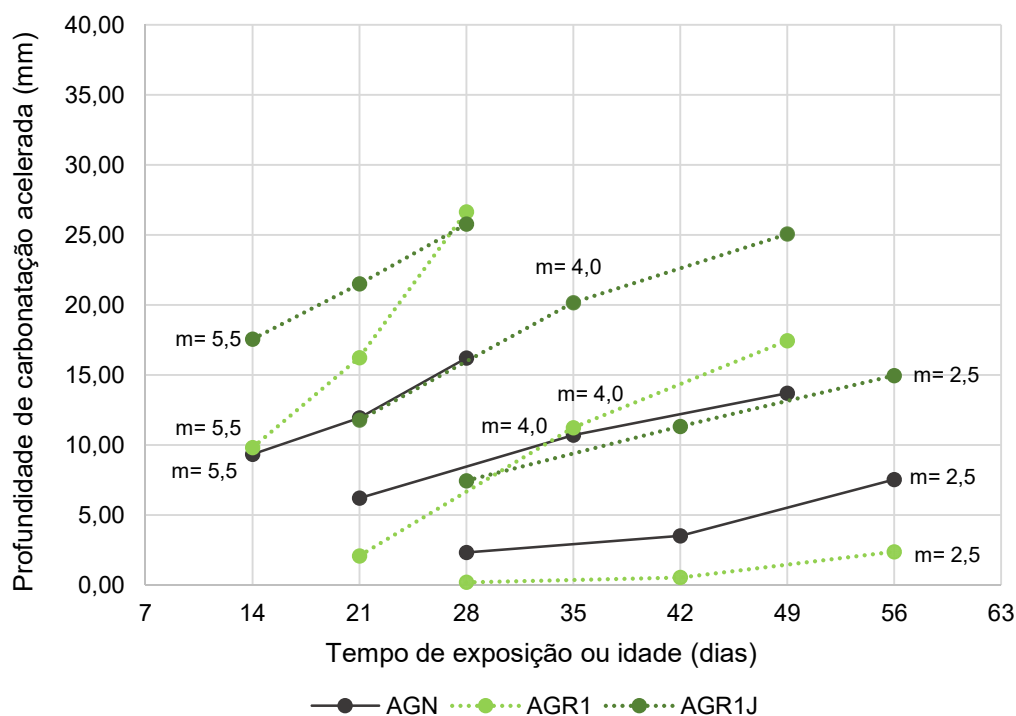
Pode-se perceber que as frentes de carbonatação tiveram um comportamento contínuo e evolutivo no decorrer do tempo de exposição na câmara de carbonatação, sendo essa velocidade variável para cada concreto estudado.

Como esperado e relatado na revisão bibliográfica, para o traço mais pobre em cimento, e conseqüentemente maior relação água/cimento, o concreto com agregado Pnatural apresentou resultados menores de alcance do gás carbônico em relação a todos os concretos reciclados. Da mesma forma, para os demais traços, o concreto com agregado natural apresentou valores inferiores de penetração de gás carbônico, exceto para alguns resultados registrados com agregados da fonte 1. Para o traço rico, o concreto produzido com agregados graúdos reciclados da fonte 1, sem seleção por densidade, apresentou profundidades menores para todas as leituras.

Pode-se levantar a hipótese de que a quantidade de material fino aderido aos agregados reciclados e gerados no manuseio dos mesmos, por ser um material de baixa granulometria, possa ter gerado um efeito filer, alterando o sistema de poros formados na matriz, tornando-a assim, menos permeável aos agentes agressivos.

Os dados da tabela 22 foram plotados em gráficos, a fim de facilitar as comparações do efeito da seleção densitária dos agregados graúdos reciclados, nas profundidades de carbonatação observadas. Na figura 54, estão as médias das profundidades de carbonatação medidas nos corpos de prova de concreto confeccionados com os agregados graúdos da fonte 1, selecionados e não jigados e com o agregado natural de referência.

Figura 54 – Profundidades médias de carbonatação para os concretos com agregados reciclados da fonte 1 e referência



Fonte: elaborada pela autora

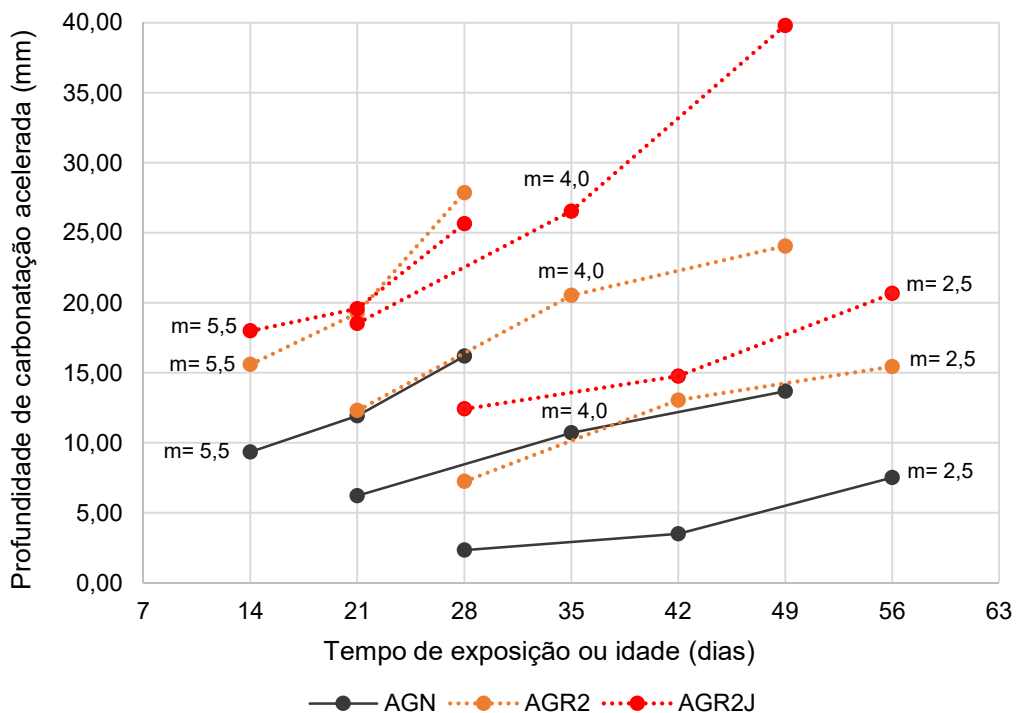
A análise visual da figura 54, mostra que para a fonte 1, o processo de seleção no jigge não trouxe melhorias nos resultados do ensaio de durabilidade realizado. Pode-se observar que para o mesmo traço, e para a maior parte das idades de exposição, o AGR1 obteve valores menores de alcance dos efeitos da carbonatação, quando comparados aos resultados dos agregados jigados dessa mesma fonte, e em algumas observações, inferiores aos do concreto com o agregado natural.

Se a hipótese do efeito fíler gerado pelos finos dos agregados reciclados for verdadeira, o processamento no jigge poderia interferir nesse comportamento, pois durante a operação de jigagem, o fluxo de ar ascendente utilizado para promover o

movimento das partículas e o sistema de exaustão, fazem com que grande parte das partículas finas seja removida da amostra. Uma nuvem de poeira foi formada durante o funcionamento do jig e o depósito do exaustor continha uma grande quantidade de material leve e pulverulento. Essa retirada do material fino presente na amostra e aderido aos agregados, pode ter provocado a diferença nos resultados dos agregados reciclados vindos da mesma fonte.

Na figura 55 foram colocados os resultados médios obtidos para o ensaio de profundidade de carbonatação para os concretos moldados com os agregados reciclados da fonte 2, e com o agregado natural, cujos valores são usados como referência.

Figura 55 – Profundidades médias de carbonatação para os concretos com agregados reciclados da fonte 2 e referência



Fonte: elaborada pela autora

A verificação dos resultados encontrados nos ensaios de carbonatação acelerada, para os agregados obtidos na fonte 2, mostra que conforme relatado na bibliografia, os concretos reciclados registraram profundidades de carbonatação maiores se comparados com o concreto referência.

Quanto a separação dos agregados graúdos reciclados através da jigagem, assim como o comportamento revelado na fonte 1, os agregados que foram processados geraram concretos que possibilitaram maior avanço da frente de carbonatação, ou seja, a utilização da jigagem na seleção dos AGR, para o parâmetro durabilidade, apresentou perdas na maioria das avaliações comparativas com os agregados do mesmo lote, os quais não passaram pelo processamento no jigue.

A comparação dos concretos produzidos com os agregados jigados das duas fontes, mostra que a seleção através da jigagem não foi capaz de reduzir a variabilidade das propriedades de durabilidade, avaliadas nesse estudo indiretamente pela profundidade de carbonatação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O alto consumo de materiais da construção civil, juntamente com a busca pelo desenvolvimento sustentável, tem motivado a realização de estudos para utilização de resíduos de construção e demolição. A reciclagem dentro da própria cadeia produtiva apresenta-se como uma alternativa para economizar os recursos naturais que são matéria-prima do setor construtivo, além de uma possibilidade de redução de custos e de volumes de resíduos gerados e descartados.

Pesquisas com a utilização de agregados reciclados já vem sendo desenvolvidas, há alguns anos, contudo, a variabilidade dos materiais que os compõe e suas propriedades tem se mostrado como entraves para sua utilização em larga escala.

De acordo com o exposto, esse estudo se propôs a investigar a utilização de um equipamento utilizado na mineração, o jigge à ar, na melhoria das propriedades do concreto com agregado graúdo reciclado, oriundos de três fontes comerciais de agregado. A seguir serão apresentadas as principais conclusões as quais essa pesquisa aponta, para os tipos e quantidades de materiais utilizados, procedimentos e técnicas de execução adotados. Contudo, no decorrer da pesquisa, surgiram comportamentos, resultados e hipóteses que levaram a sugestões de investigações complementares e temas para estudos futuros, os quais também são expostos a seguir.

6.1 CONCLUSÕES

A realização dos ensaios de caracterização dos agregados graúdos reciclados, antes e após a jigagem, os quais mostraram resultados diferentes para as três fontes estudadas, foram importantes para entender as respostas das propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos produzidos com eles. A análise de composição apresentou diferentes quantidades e tipos de materiais em cada fonte, sendo que a jigagem dos agregados, mostrou resultados mais expressivos para os agregados obtidos na fonte 1. Observou-se a presença de uma quantidade significativa de material cerâmico polido ou esmaltado nas fontes 2 e 3.

A granulometria dos agregados estudados revelou que a maioria encontra-se na zona utilizável, segundo norma regulamentadora, exceto o agregado natural e o agregado reciclado da fonte 1 (AGR1). Para esse parâmetro, a jigagem teve efeito positivo nos agregados vindos da fonte 1, os quais antes da seleção estavam fora dos limites aceitáveis de utilização e após o processamento mostraram curvas granulométricas dentro dos contornos de utilização. Contudo para as fontes 2 e 3, a separação densitária não gerou impactos significativos nas composições granulométricas dos agregados.

A realização dos ensaios de índice de forma dos agregados reciclados revelou redução das partículas lamelares para os agregados da fonte 1, não mostrando impactos significativos para os AGR das fontes 2 e 3. Para os valores de massa unitária, conforme esperado, todos os agregados reciclados apresentaram valores inferiores ao agregado referência, sendo que os agregados graúdos reciclados que foram jigados obtiveram valores levemente maiores para as fontes 1 e 2, sendo que para a fonte 3 foi observado uma redução para essa propriedade. As avaliações da massa específica, além de mostrarem redução nos resultados dos agregados reciclados em comparação ao agregado natural, revelaram que a seleção densitária não gerou impactos significativos para as três fontes estudadas.

Quanto as taxas de absorção os valores para os agregados reciclados encontrados foram maiores do que o determinado para o agregado natural. Contudo, o processo de jigagem proporcionou reduções discretas nas taxas de absorção dos agregados reciclados que foram processados, sendo que as reduções encontradas foram entre 6 e 10%.

Nos ensaios realizados com os concretos produzidos com os agregados estudados pode-se observar que a massa específica do concreto no estado fresco, com agregados reciclados, é menor para todos os traços, em relação do concreto com agregado natural. Contudo, quando os resultados dos concretos com os agregados jigados e não jigados de uma mesma fonte foram comparados, pode-se perceber que não houve aumentos expressivos, e em alguns traços tiveram reduções, e em outros as leituras se mantiveram as mesmas para os agregados processados e não selecionados de uma mesma fonte.

A trabalhabilidade dos concretos foi mensurada através de ensaios de consistência, e foi obtida através da adição de água (sendo determinante para o cálculo da relação água/cimento). Os valores alcançados para essa propriedade foram considerados como um parâmetro constante dentro de um intervalo de 100 +/- 20mm.

A variabilidade dos agregados reciclados, refletiu na inconstância do comportamento dos concretos produzidos com eles, não sendo possível perceber um desempenho comum ou uniforme entre as três fontes de agregado reciclado, que foram jigados e para os três traços produzidos.

Para a propriedade mecânica de resistência à compressão axial, todos os resultados obtidos para os concretos produzidos com agregados reciclados foram menores do que com o agregado referência, conforme era previsto. A seleção densitária refletiu em ganhos de resistência à compressão dos concretos produzidos com os agregados oriundos da fonte 1, para todos os traços, de 12 à 20%. Porém para as demais fontes não foi observado um comportamento uniforme, havendo inclusive perdas de resistência para os concretos produzidos com agregados reciclados que foram jigados.

Embora a análise de variância tenha apresentado ganhos significativos e tenha considerado o processamento no jigage impactante nos valores para resistência à compressão, estudos complementares devem ser realizados no intuito de avaliar a viabilidade da implantação do processo, juntamente com o ganho que esse pode proporcionar.

A variabilidade dos materiais que compõem os agregados graúdos reciclados, a qual foi percebida nos ensaios de caracterização, e a dificuldade em promover uma separação eficaz dos materiais, podem ter influenciado na variabilidade dos resultados de resistência de compressão axial. Foi levantada a hipótese que pode ser o motivo pelo qual a jigagem não tenha sido efetiva, que é a presença de material lamelar cerâmico esmaltado ou polido, o qual pode ter gerado interferências no processo de separação densitária. Sendo assim, a seleção por jigagem, dos agregados graúdos reciclados não proporcionou a melhoria dos resultados de resistência à compressão axial dos concretos produzidos com esses agregados.

Para o módulo de elasticidade, os resultados obtidos para os concretos reciclados foram bem abaixo dos encontrados para o concreto referência, fato que é comumente encontrado em pesquisas que envolvem agregados de RCD. Porém a análise revelou um comportamento atípico na tendência dos resultados, pois com o enriquecimento do traço e melhora da matriz, houve decréscimos nos valores de módulo de elasticidade dos traços unitários 1:2,5 para a maioria dos agregados reciclados.

Ainda, os valores para o módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregado reciclado não apresentaram comportamentos uniformes, esse fato pode ser atrelado à variabilidade intrínseca desse tipo de agregado. Contudo, como os concretos reciclados produzidos com agregados que passaram pelo processo de jigagem também não obtiveram resultados proporcionais de aumento de módulo de elasticidade, não se pode concluir que a jigagem tenha minimizado a variabilidade das propriedades dos concretos reciclados produzidos nessa pesquisa.

As análises realizadas para avaliar a durabilidade dos concretos mostraram menores profundidades de carbonatação para os concretos com agregados reciclados obtidos na fonte 1, para os traços mais ricos em cimento. Porém para as demais leituras, e para todos os traços e idades da fonte 2, o concreto de referência se mostrou menos permeável à penetração do gás carbônico.

A comparação entre os valores de carbonatação entre os concretos produzidos com agregados reciclados das fontes 1 e 2, jigados e não jigados, mostrou que os agregados que foram processados geraram concretos com maior permeabilidade às frentes de carbonatação. Sendo assim, para o parâmetro de durabilidade, a utilização da jigagem na seleção dos agregados graúdos reciclados, adotados nessa pesquisa, não apromoveu melhorias, como também não conseguiu minimizar a variabilidade das propriedades dos concretos produzidos com agregados reciclados oriundos das diferentes fontes estudadas.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Levando em consideração que o jigage é um equipamento utilizado para separação densitária de minérios, os quais possuem formatos e texturas próprias, ao se buscar

sua utilização com outros materiais, mostrou-se importante um estudo da aplicabilidade ou da sua eficácia para a seleção dos materiais que compõem os agregados graúdos reciclados que são comercializados. Identificou-se uma possível interferência no processamento em amostras que continham material cerâmico de formato lamelar. Sendo assim, foi identificada a necessidade de estudos mais aprofundados que envolvam a seleção por jigagem de materiais lamelares como vidro, azulejo, cerâmica polida.

Outra sugestão para estudos futuros seria a realização de seleções de agregados graúdo no jigage por faixas granulométricas, pois pode ser que o intervalo granulométrico escolhido, possa ter impactado na separação dos agregados reciclados.

Uma investigação mais ampla dos impactos da diferença de rigidez entre os agregados e a matriz cimentícia, mostrou-se importante para buscar entender os fenômenos que ocorrem e que podem limitar o uso dos agregados reciclados em concretos estruturais ou de alto desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais**. São Paulo. 92 p. 2017. Disponível em <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2018.

ABREU, A.G. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

ALAEJOS, P. G.; SÁNCHEZ, M. J. Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete. In: International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures. **Proceedings**. Barcelona, Espanha. 2004. p. 693-702.

AMBRÓS, W.M.; CAZACLIU B. G.; SAMPAIO C.H.; Wall effects on particle separation in air jigs. **Powder Technology** 301 (2016) 369–378

AMBRÓS, W. M.; SAMPAIO C.H.; CAZACLIU B. G.; MILTZAREK G. L.; MIRANDA L. R. Usage of air jigging for multi-component separation of construction and demolition waste. **Waste Management**. v.60, p. 75-83, feb, 2017.

AMBRÓS, W. M. **Novos aspectos da estratificação de partículas em jiges descontínuos**. 2017. 179 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANGULO, S.C; JOHN, V.M. Requisitos para a execução de aterros de resíduos de construção e demolição. **Câmara Ambiental da Construção**. São Paulo. 2002.p15.

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

ANGULO, S.C; MIRANDA, L.F.R; JOHN, V.M. Building new opportunities construction and demolition waste management in Brazil. **Waste management World**, London, p.47-57, Mar/Apr 2003.

ANGULO S. C. *et al.* Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos. In: I conferência latino-americana de construção sustentável, X encontro nacional de tecnologia do ambiente construído 18-21 julho 2004, São Paulo.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**. Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro. 2001.

_____. **NBR NM 45**. Agregado - Determinação da massa unitária e dos espaços vazios. Rio de Janeiro. 2006.

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

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

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

_____. **NBR NM 77**. Concreto - Preparação das bases dos corpos-de-prova e testemunhos cilíndricos para ensaio de compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR NM 248**. Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5736**. Cimento Portland Pozolânico - especificação. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5737**. Cimento Portland resistentes à sulfatos - especificação. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5738**. Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739**. Concreto - ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7211**. Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009.

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

_____. **NBR 8522**. Concreto – Determinação do módulo de deformação estático e diagrama tensão-deformação – Método de ensaio. Rio de Janeiro.2008.

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

_____. **NBR 10004**. Resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 15113**. Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – aterros – diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

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

BRITO, J.; ALVES, F. Concrete with recycled aggregates: the portuguese experimental research. **Materials and Structures**. Abr. 2010.

BOX, G. P.; HUNTER S. J. E HUNTER W. G. **Statistics for experimenters: design, discovery, and innovation**. Edition: 2nd (second). Michigan(USA). Wiley-Interscience, 2005.

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**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2007.

CALADO, C. *et al.* Durability Indicators Comparison for SCC and CC in Tropical Coastal Environments. **Materials**, v. 8, n. 4, p.1459-1481, 2015.

CAZACLIU *et al.* The potential of using air jigging to sort recycled aggregates. **Journal of Cleaner Production** v. 66 p. 46-53, 2014.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto**. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e tecnologia**, p. 849-885. São Paulo: Arte interativa. 2011.

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

CCANZ. Best practice guide for the use of recycled aggregates in new concrete. Publications: **Cement and Concrete Association of New Zealand**; 2011.p49.

COELHO, A; BRITO J. de. Preparation of concrete aggregates from construction and demolition waste (CDW). Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste. Capítulo 9. **Civil and Structural Engineering** 2013, Pages 210–245.

COELHO A.; BRITO J. de Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal, part I and part II. **Waste Management** v.33 p. 1258–1267. Feb. 2013.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução no 307**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF, 2002.

CORDEIRO, L. de N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

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

COUTINHO, A. **Fabrico e propriedades do betão**. Vol. I, II e III, LNEC, Lisboa, 2000.

CUNHA, M. G. C. **Viabilidade do uso de RCD proveniente da geração dos concretos convencional e Alta Resistência através da utilização do jigge como agente do beneficiamento**. 2017. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, RS, 2017.

FERREIRA, L. M. M. **Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão. Influência da pré-saturação**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa; 2007

FONSECA, F. B. **Desempenho estrutural de paredes de alvenaria de blocos de concreto de agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

HANSEN, T. – **Recycling of demolished concrete and masonry**. Report of technical committee 37-DRC, Demolition and Reuse of Concrete, Taylor & Francis, London. 1992.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **ESTIMATIVAS DA POPULAÇÃO RESIDENTE NO BRASIL E UNIDADES DA FEDERAÇÃO COM DATA DE REFERÊNCIA EM 1º DE JULHO DE 2016**. Acesso em 13 de dezembro de 2017. Rio de Janeiro. Disponível para download em ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2017/estimativa_TCU_2017_20180207.pdf. Acesso em: 13 mar. 2018.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102 p. Tese (livre docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

KAMRATH P., GmbH P. K. I. Demolition techniques and production of construction and demolition waste (CDW) for recycling In: PACHECO-TORGAL F et al.. **Handbook**

of Recycled Concrete and Demolition Waste. 1st Edition. Germany. Woodhead Publishing, 2013. cap. 8 p. 186 - 209 .

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa.** Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e demolição.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001. p.270.

LEITE, M. B.; CORDEIRO, L.N.P; MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. Proposta de adaptação do procedimento proposto por Leite (2001) para determinação da absorção de agregados reciclados de resíduo de construção demolição. In CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 7º, 2011, Fortaleza. **Anais CINPAR**, 2011.

LYLE, J. T. **Regenerative Design for Sustainable Development.** New York (USA). John Wiley & Sons.1994.

LOVATO P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para a utilização em concreto.** 2007.180p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, BR-RS, 2007.

MEDINA C. *et al.* Effect of the constituents (asphalt, clay materials, floating particles and fines) of construction and demolition waste on the properties of recycled concretes. **Construction and Building Materials.** v. 79, p. 22–33, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

MOREIRA L. H. H. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010. P.92

MULDER, E.; DE JONG, T. P. R.; FEENSTRA, L. Closed Cycle Construction: an integrated process for the separation and reuse of C&D waste. **Waste Management**, v. 27, n. 10, p. 1408- 1415, May 2007.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 2° ed. São Paulo: Pini, 1997.

NIENHAUS, K., PRETZ, T., WOTRUBA, H., 2014. Sensor Technologies: Impulses for the Raw Materials Industry. Shaker Verlag GmbH, Aachen, **ISBN 978-3-8440-2563-7**, p. 476.

PARANHOS R.S. *et al.* A sorting method to value recycled concrete. **Journal of Cleaner Production** v.112 p. 2249 – 2258, 2016.

PANDURANGAN K.; DAYANITHY A.; ON PRAKASH S. Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 212–221, May 2016.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. Dissertação (mestrado em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado a arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 7, p. 7-20, 2007.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. Tese (doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RAO, A.; JHA, K.; MISRA, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, no 50, p. 71–81, 2007.

RIBEIRO, J.L.D. e TEN KATEN, C.S., **Projeto de Experimentos – Série monográfica Qualidade** – FEENGE / UFRGS – PPGEP. 2011.

ROHDEN, A. B. **Contribuição aos métodos de dosagem de concretos de alta resistência a partir do entendimento da influência dos agregados na mistura**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SAMPAIO C. H, CAZACLIU B. G., MILTZAREK G. L., HUCHET F., GUEN L., PETTER C. O., PARANHOS R., AMBRÓS W. M., OLIVEIRA M. L. S. Stratification in air jigs of concrete/brick/gypsum particles. **Construction and Building Materials** v. 109, p. 63–72, Feb 2016.

SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. **Beneficiamento gravimétrico**: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005

SANTOS, J.; BRANCO, F.; BRITO, J. (2002) – Mechanical properties of concrete with coarse recycled concrete aggregates. **Sustainable Building** 2002, paper 047, Oslo.

SILVA A. C. **Concentração física de minerais**: Separação em meio denso. Curso de Especialização em Tratamento de Minérios. Notas de Aula 03/12/2012.

SILVA, R. B da; ANGULO, S. C.; PILEGGI, R. G.; SILVA, C. O. Concretos secos produzidos com agregados reciclado de RCD separados por densidade. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.15, n. 4, p. 335-349, out./dez. 2015.

SILVA, R.V., BRITO, J., DHIR, R.K., 2014. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Constr. Build. Mater.** V.65, p.201-217.

ULSEN, C. **Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. p.171

ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. p.222.

ULSEN C.; KAHN H.; HAWLITSCHKE G.; MASINI E. A.; ANGULO S.C. Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. **Waste Management**. v.33, p. 656–662, jul 2013.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 47-63, 2004.

WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. de S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 213-228, abr./jun. 2011.

XIAO, J.; LI, J; ZHANG, Ch. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**, Vol. 35, pg. 1187-1194, 2005.

XING, Weihong; HENDRIKS, Charles. Decontamination of granular wastes by mining separation techniques. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, n. 8, p.748-753, jan. 2006. Elsevier BV.

WOLF, J. **Influência do teor de calcário na carbonatação de argamassas de cimento branco**. Tese (doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. Campinas. 1997. 140p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP.

ZORTEA, F. **Características mecânicas de concretos produzidos com materiais cerâmicos reciclados: estudo da redução da variabilidade usando separação dos agregados por densidade**. 2014. 94f. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

ZORTEA, J. **Agregados reciclados de resíduos de construção e demolição: remoção de contaminantes por separação por densidade para utilização em concreto**. 2014. 105f. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

ANEXO 1 – PLANILHA DE COLETA DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTENCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Resistência à compressão axial - Referência Brita - cura úmida 28 dias - 06/06/2017 - Bases retificadas

	h1 (mm)	h2 (mm)	h méd	D1 (mm)	D2 (mm)	D méd	MPa	kN	Tipo de ruptura	Arquivo	Ordem	h/D	Fator de Correção	Resistência a Compressão (MPa)		
m=2,5	1	193,49	193,03	193,26	100,11	100,37	100,24	34,41	271,6	A	2410	4	1,93	0,9944	34,22	
	2	193,82	193,99	193,91	100,96	99,25	100,11	36,14	284,5	A	2410	5	1,94	1,0000	36,14	
	3	194,28	194,44	194,36	99,93	99,88	99,91	35,18	275,8	A	2411	6	1,95	1,0000	35,18	
								Média	35,18	275,8					Média	35,18
								Desvio Padrão	0,87	6,58					Desvio Padrão	0,96
m=4,0	1	192,30	192,12	192,21	100,13	100,02	100,08	34,12	268,4	A	2410	1	1,92	0,9936	33,90	
	2	195,34	195,89	195,62	100,97	99,08	100,03	31,51	247,6	A	2410	2	1,96	1,0000	31,51	
	3	195,17	195,31	195,24	100,15	100,50	100,33	31,28	247,2	A	2410	3	1,95	1,0000	31,28	
								Média	31,51	247,6					Média	32,23
								Desvio Padrão	1,58	12,13					Desvio Padrão	1,45
m=5,5	1	190,60	190,86	190,73	100,17	99,73	99,95	25,04	196,4	A	2410	7	1,91	0,9928	24,86	
	2	193,11	192,68	192,90	100,89	98,86	99,88	25,02	196,0	A	2410	8	1,93	0,9944	24,88	
	3	192,62	192,72	192,67	100,81	99,78	100,30	25,09	198,3	D	2410	9	1,92	0,9936	24,93	
								Média	25,04	196,4					Média	24,89
								Desvio Padrão	0,04	1,23					Desvio Padrão	0,04

Resistência à compressão axial - AGR1 - cura úmida 28 dias - 01/06/2017 - Bases retificadas																
	h1 (mm)	h2 (mm)	h méd	D1 (mm)	D2 (mm)	D méd	MPa	kN	Tipo de ruptura	Arquivo	Ordem	h/D	Fator de Correção	Resistência a Compressão (MPa)		
m=2,5	1	196,67	196,32	196,49	101,09	100,33	100,71	22,05	175,6	C	2400	4	1,95	1,0000	22,05	
	2	196,03	196,51	196,27	100,67	100,24	100,45	22,16	175,6	B	2400	5	1,95	1,0000	22,16	
	3	197,89	197,52	197,70	100,03	100,12	100,07	23,90	187,9	B	2400	6	1,98	1,0000	23,90	
								Média	22,70	179,7					Média	22,70
								Desvio Padrão	1,04	7,10					Desvio Padrão	1,04
m=4,0	1	194,95	195,48	195,21	99,43	100,12	99,77	18,8	147	A	2400	1	1,96	1,0000	18,80	
	2	195,35	194,46	194,90	100,00	99,63	99,82	18,1	141,6	A	2400	2	1,95	1,0000	18,10	
	3	194,56	194,13	194,35	100,68	100,46	100,57	19,34	153,6	A	2400	3	1,93	0,9944	19,23	
								Média	18,75	147,4					Média	18,71
								Desvio Padrão	0,62	6,01					Desvio Padrão	0,57
m=5,5	1	192,54	192,51	192,52	99,38	99,88	99,63	14,32	111,6	A	2400	7	1,93	0,9944	14,24	
	2	193,83	193,54	193,68	100,36	99,947	100,15	14,6	115,0	A	2400	8	1,93	0,9944	14,52	
	3	193,32	193,23	193,28	100,24	100,48	100,36	16,23	128,4	A	2400	9	1,93	0,9944	16,14	
								Média	15,05	118,3					Média	14,97
								Desvio Padrão	1,03	8,88					Desvio Padrão	1,03

Resistência à compressão axial - AGR1J - cura úmida 28 dias - 11/10/2017 - Bases retificadas

	h1 (mm)	h2 (mm)	h méd	D1 (mm)	D2 (mm)	D méd	MPa	kN	Tipo de ruptura	Arquivo	Ordem	h/D	Fator de Correção	Resistência a Compressão (MPa)	
m=2,5	1	195,66	195,76	195,71	100,28	99,88	100,08	26,52	208,6	A	2605	4	1,96	1,00	26,52
	2	196,02	196,07	196,05	100,63	99,65	100,14	23,26	183,2	B	2605	5	1,96	1,00	23,26
	3	194,40	194,23	194,32	99,81	99,86	99,84	24,73	193,6	A	2605	6	1,95	1,00	24,73
								Média	24,73	193,6					Média
							Desvio Padrão	1,63	12,77					Desvio Padrão	1,63
m=4,0	1	194,77	194,75	194,76	100,30	99,82	100,06	23,09	181,6	C	2605	1	1,95	1,00	23,09
	2	195,29	195,05	195,17	100,96	99,62	100,29	21,70	171,4	A	2605	2	1,95	1,00	21,70
	3	195,94	196,38	196,16	99,68	99,98	99,83	22,54	176,4	A	2605	3	1,96	1,00	22,54
								Média	22,54	176,4					Média
							Desvio Padrão	0,70	5,10					Desvio Padrão	0,70
m=5,5	1	195,94	196,24	196,09	100,34	100,28	100,31	16,20	128,0	A	2605	7	1,95	1,00	16,20
	2	196,41	196,23	196,32	100,25	99,60	99,925	17,30	135,7	A	2605	8	1,96	1,00	17,30
	3	193,75	193,89	193,82	100,3	99,54	99,92	17,62	138,2	A	2605	9	1,94	1,00	17,62
								Média	17,30	135,7					Média
							Desvio Padrão	0,75	5,32					Desvio Padrão	0,75

Resistência à compressão axial - AGR2 - cura úmida 28 dias - 20/12/2017 - Bases retificadas															
		h1 (mm)	h2 (mm)	h méd	D1 (mm)	D2 (mm)	D méd	MPa	kN	Tipo de ruptura	Arquivo	Ordem	h/D	Fator de Correção	Resistência a Compressão (MPa)
m=2,5	1	195,72	195,99	195,86	100,06	100,22	100,14	27,50	216,6	A	2821	4	1,96	1,00	27,50
	2	193,84	193,64	193,74	100,3	99,87	100,085	23,21	182,6	A	2821	5	1,94	1,00	23,21
	3	195,62	195,48	195,55	99,51	100,96	100,24	26,35	207,9	B	2821	6	1,95	1,00	26,35
								Média	26,35	207,9					Média
							Desvio Padrão	2,22	17,66					Desvio Padrão	2,22
m=4,0	1	196,47	196,50	196,49	99,90	99,93	99,915	20,46	160,4	A	2821	1	1,97	1,00	20,46
	2	194,71	194,62	194,67	99,96	99,89	99,925	20,68	162,2	A	2821	2	1,95	1,00	20,68
	3	195,88	195,50	195,69	100,39	99,62	100,005	21,25	166,9	A	2821	3	1,96	1,00	21,25
								Média	20,68	162,2					Média
							Desvio Padrão	0,41	3,36					Desvio Padrão	0,41
m=5,5	1	196,03	196,20	196,12	100,61	100,51	100,56	13,16	104,5	B	2821	7	1,95	1,00	13,16
	2	193,4	193,70	193,55	99,98	99,83	99,905	14,86	116,5	A	2821	8	1,94	1,00	14,86
	3	193,75	193,82	193,79	99,98	101,18	100,58	15,54	123,5	A	2821	9	1,93	0,99	15,45
								Média	14,86	116,5					Média
							Desvio Padrão	1,23	9,59					Desvio Padrão	1,19

Resistência à compressão axial - AGR2J - cura úmida 28 dias - 28/12/2017 - Bases retificadas

	h1 (mm)	h2 (mm)	h méd	D1 (mm)	D2 (mm)	D méd	MPa	kN	Tipo de ruptura	Arquivo	Ordem	h/D	Fator de Correção	Resistência a Compressão (MPa)	
m=2,5	1	195,17	195,28	195,23	99,81	99,60	99,705	23,32	182,1	A	2841	4	1,96	1,00	23,32
	2	195,52	195,77	195,65	100,2	100,28	100,24	24,96	197,0	A	2841	5	1,95	1,00	24,96
	3	196,86	196,82	196,84	99,9	99,92	99,91	26,20	205,4	A	2841	6	1,97	1,00	26,20
								Média	24,96	197,0					Média
							Desvio Padrão	1,44	11,80					Desvio Padrão	1,44
m=4,0	1	196,75	196,93	196,84	100,30	99,82	100,06	20,77	163,3	A	2841	1	1,97	1,00	20,77
	2	196,86	196,44	196,65	100,18	100,06	100,12	19,27	151,7	C	2841	2	1,96	1,00	19,27
	3	195,19	195,44	195,32	99,88	100,12	100,00	19,84	155,8	A	2841	3	1,95	1,00	19,84
								Média	19,84	155,8					Média
							Desvio Padrão	0,76	5,88					Desvio Padrão	0,76
m=5,5	1	195,22	195,03	195,13	100,32	99,42	99,87	15,40	120,6	A	2841	7	1,95	1,00	15,40
	2	197,42	196,50	196,96	100,98	100,07	100,53	16,86	133,8	A	2841	8	1,96	1,00	16,86
	3	196,65	196,17	196,41	99,49	100,56	100,03	17,05	134,0	A	2841	9	1,96	1,00	17,05
								Média	16,86	133,8					Média
							Desvio Padrão	0,91	7,68					Desvio Padrão	0,91

Resistência à compressão axial - AGR3 - cura úmida 28 dias - 07/03/2018 - Bases retificadas

	h1 (mm)	h2 (mm)	h méd	D1 (mm)	D2 (mm)	D méd	MPa	kN	Tipo de ruptura	Arquivo	Ordem	h/D	Fator de Correção	Resistência a Compressão (MPa)	
m=2,5	1	197,27	197,22	197,25	100,11	99,97	100,04	23,08	181,4	A	3042	4	1,97	1,00	23,08
	2	196,08	196,18	196,13	99,95	100,20	100,075	23,96	188,5	A	3042	5	1,96	1,00	23,96
	3	196,88	196,84	196,86	100,42	100,39	100,41	21,87	173,2	B	3042	6	1,96	1,00	21,87
								Média	23,08	181,4					Média
							Desvio Padrão	1,05	7,66					Desvio Padrão	1,05
m=4,0	1	194,95	194,80	194,88	100,45	100,60	100,53	20,37	161,7	A	3042	1	1,94	1,00	20,37
	2	194,75	194,69	194,72	100,24	99,60	99,92	17,57	137,8	A	3042	2	1,95	1,00	17,57
	3	197,02	197,07	197,05	99,67	100,01	99,84	17,83	139,6	A	3042	3	1,97	1,00	17,83
								Média	17,83	139,6					Média
							Desvio Padrão	1,55	13,31					Desvio Padrão	1,55
m=5,5	1	194,04	193,88	193,96	100,40	99,43	99,92	18,53	145,3	A	3042	7	1,94	1,00	18,53
	2	195,24	195,39	195,32	100,14	99,91	100,03	16,21	127,4	A	3042	8	1,95	1,00	16,21
	3	196,25	196,14	196,20	100,31	100,14	100,23	18,13	143,0	A	3042	9	1,96	1,00	18,13
								Média	18,13	143,0					Média
							Desvio Padrão	1,24	9,74					Desvio Padrão	1,24

Resistência à compressão axial - AGR3J - cura úmida 28 dias - 07/03/2018 - Bases retificadas

	h1 (mm)	h2 (mm)	h méd	D1 (mm)	D2 (mm)	D méd	MPa	kN	Tipo de ruptura	Arquivo	Ordem	h/D	Fator de Correção	Resistência a Compressão (MPa)	
m=2,5	1	197,31	197,47	197,39	100,1	99,85	99,975	19,73	154,9	A	3053	4	1,97	1,00	19,73
	2	195,21	195,03	195,12	99,98	99,91	99,945	22,34	175,3	A	3053	5	1,95	1,00	22,34
	3	196,37	196,37	196,37	100,59	100,25	100,42	23,18	183,6	A	3053	6	1,96	1,00	23,18
							Média	22,34	175,3						Média
						Desvio Padrão	1,80	14,77						Desvio Padrão	1,80
m=4,0	1	195,74	195,85	195,80	100,37	100,10	100,24	21,78	171,9	A	3053	1	1,95	1,00	21,78
	2	198,12	197,96	198,04	100,67	99,91	100,29	21,14	167,0	A	3053	2	1,97	1,00	21,14
	3	196,16	196,04	196,10	99,96	99,95	99,96	18,84	147,8	A	3053	3	1,96	1,00	18,84
							Média	21,14	167,0						Média
						Desvio Padrão	1,55	12,74						Desvio Padrão	1,55
m=5,5	1	194,41	194,33	194,37	99,94	100,34	100,14	15,49	122,0	B	3053	7	1,94	1,00	15,49
	2	194,71	194,57	194,64	100,34	100,08	100,21	17,08	134,7	A	3053	8	1,94	1,00	17,08
	3	195,99	195,86	195,93	100,68	100,44	100,56	15,54	123,4	A	3053	9	1,95	1,00	15,54
							Média	15,54	123,4						Média
						Desvio Padrão	0,90	6,96						Desvio Padrão	0,90

**ANEXO 2 – PLANILHA DE COLETA DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE
MÓDULO DE ELASTICIDADE**

Módulo de elasticidade - Referência Brita - cura úmida 28 dias - 06/06/2017 - Bases retificadas													
	h1 (mm)	h2 (mm)	h méd	D1 (mm)	D2 (mm)	D méd	GPa	GPa (norma)	Tipo de ruptura	Arquivo	Ordem	h/D	
m=2,5	3	194,28	194,44	194,36	99,93	99,88	99,91	35,10		A	2411	4	1,95
	4	193,08	193,00	193,04	100,11	100,39	100,25	43,90	43,90	B	2411	5	1,93
	5	194,69	194,78	194,74	99,56	100,17	99,87	<u>48,50</u>	<u>48,50</u>	B	2411	6	1,95
								Média	43,90	46,20			
							Desvio Padrão	6,81	3,25				
m=4,0	4	192,30	192,12	192,21	100,13	100,02	100,08	44,55	44,55	A	2412	1	1,92
	5	195,34	195,89	195,62	100,97	99,08	100,03	45,93	45,93	D	2413	2	1,96
	6	195,17	195,31	195,24	100,15	100,50	100,33	<u>20,97</u>		D	2414	3	1,95
								Média	44,55	45,24			
							Desvio Padrão	14,03	0,98				
m=5,5	5	190,60	190,86	190,73	100,17	99,73	99,95	37,20	37,20	D	2415	7	1,91
	6	193,11	192,68	192,90	100,89	98,86	99,88	4,53		D	2417	8	1,93
	7	192,62	192,72	192,67	100,81	99,78	100,30	<u>38,36</u>	<u>38,36</u>	D	2418	9	1,92
								Média	37,20	37,78			
							Desvio Padrão	19,21	0,82				

Módulo de elasticidade - AGR1 - cura úmida 28 dias - 01/06/2017 - Bases retificadas													
	h1 (mm)	h2 (mm)	h méd	D1 (mm)	D2 (mm)	D méd	GPa	GPa (norma)	Tipo de ruptura	Arquivo	Ordem	h/D	
m=2,5	4	196,53	197,46	196,99	98,9	100,61	99,75	26,73		A	2401	4	1,97
	5	195,39	195,68	195,54	100,71	99,01	99,86	15,73	15,73	D	2401	5	1,96
	6	195,16	195,55	195,35	100,62	98,80	99,71	<u>17,00</u>	<u>17,00</u>	A	2401	6	1,96
								Média	17,00	16,37			
							Desvio Padrão	6,02	0,90				
m=4,0	4	194,20	194,29	194,24	101,00	99,52	100,26	20,40	20,40	A	2403	1	1,94
	5	193,95	194,48	194,22	99,18	99,88	99,53	21,37	21,37	D	2403	2	1,95
	6	194,77	194,34	194,56	100,61	99,59	100,10	<u>14,50</u>		A	2403	3	1,94
								Média	20,40	20,89			
							Desvio Padrão	3,72	0,69				
m=5,5	4	194,05	193,41	193,73	99,48	100,24	99,86	15,22	15,22	A	2404	7	1,94
	5	194,05	193,64	193,84	101,07	99,95	100,51	15,40	15,40	A	2405	8	1,93
	6	193,77	193,55	193,66	100,89	99,59	100,24	<u>15,59</u>	<u>15,59</u>	D	2405	9	1,93
								Média	15,40	15,40			
							Desvio Padrão	0,19	0,19				

Módulo de elasticidade - AGR1J - cura úmida 28 dias - 11/10/2017 - Bases retificadas													
	h1 (mm)	h2 (mm)	h méd	D1 (mm)	D2 (mm)	D méd	GPa	GPa (norma)	Tipo de ruptura	Arquivo	Ordem	h/D	
m=2,5	5	196,57	196,60	196,59	100,25	100,29	100,27	17,40	17,40	A	2608	4	1,96
	6	194,05	197,33	195,69	100,42	100,35	100,39	23,20		A	2608	5	1,95
	7	196,97	196,92	196,95	100,69	99,99	100,34	18,90	18,90	A	2608	6	1,96
								Média	18,90	18,15			
							Desvio Padrão	3,01	1,06				
m=4,0	4	194,89	194,71	194,80	100,29	100,22	100,26	18,20	18,20	B	2607	1	1,94
	5	195,20	195,38	195,29	100,24	100,82	100,53	17,20		A	2607	2	1,94
	6	196,98	196,84	196,91	100,87	100,87	100,87	19,00	19,00	A	2607	3	1,95
								Média	18,20	18,60			
							Desvio Padrão	0,90	0,57				
m=5,5	4	197,22	197,03	197,13	100,84	99,70	100,27	12,40	12,40	A	2409	7	1,97
	5	193,72	193,37	193,55	100,89	99,41	100,15	14,70		A	2409	8	1,93
	6	195,65	195,90	195,78	100,33	99,76	100,05	11,00	11,00	C	2409	9	1,96
								Média	12,40	11,70			
							Desvio Padrão	1,87	0,99				

Módulo de elasticidade - AGR2 - cura úmida 28 dias - 20/12/2017 - Bases retificadas													
	h1 (mm)	h2 (mm)	h méd	D1 (mm)	D2 (mm)	D méd	GPa	GPa (norma)	Tipo de ruptura	Arquivo	Ordem	h/D	
m=2,5	5	198,34	198,24	198,29	100,57	99,44	100,01	19,82	19,82	A	2825	4	1,98
	6	195,74	195,96	195,85	99,95	99,87	99,91	18,32		C	2826	5	1,96
	7	197,64	197,57	197,61	99,86	99,63	99,75	19,46	19,46	A	2828	6	1,98
								Média	19,46	19,64			
							Desvio Padrão	0,78	0,25				
m=4,0	5	196,65	196,81	196,73	100,87	99,19	100,03	16,95	16,95	A	2822	1	1,97
	6	196,35	196,70	196,53	100,03	99,63	99,83	21,85		A	2823	2	1,97
	7	198,15	197,86	198,01	100,25	100,20	100,23	18,51	18,51	A	2824	3	1,98
								Média	18,51	17,73			
							Desvio Padrão	2,50	1,10				
m=5,5	5	193,75	193,82	193,79	99,98	101,18	100,58	13,70	13,70	A	2829	7	1,93
	6	196,31	196,41	196,36	100,08	100,00	100,04	5,03		A	2830	8	1,96
	7	196,26	196,09	196,18	100,00	100,25	100,13	14,50	14,50	A	2831	9	1,96
								Média	13,70	14,10			
							Desvio Padrão	5,25	0,57				

Módulo de elasticidade - AGR2J - cura úmida 28 dias - 28/12/2017 - Bases retificadas													
	h1 (mm)	h2 (mm)	h méd	D1 (mm)	D2 (mm)	D méd	GPa	GPa (norma)	Tipo de ruptura	Arquivo	Ordem	h/D	
m=2,5	5	197,93	197,14	197,54	99,89	100,55	100,22	16,71	16,71	A	2842	4	1,97
	6	197,00	196,71	196,86	99,75	100,48	100,12	18,48	18,48	B	2843	5	1,97
	7	196,50	196,30	196,40	101,31	99,36	100,34	<u>13,73</u>		A	2844	6	1,96
								Média	16,71	17,60			
							Desvio Padrão	2,40	1,25				
m=4,0	5	193,47	193,77	193,62	100,66	99,74	100,20	16,24	16,24	A	2845	1	1,93
	6	196,65	196,44	196,55	100,56	99,28	99,92	48,02		A	2846	2	1,97
	7	197,53	197,34	197,44	100,02	99,46	99,74	<u>16,33</u>	<u>16,33</u>	A	2847	3	1,98
								Média	16,33	16,29			
							Desvio Padrão	18,32	0,06				
m=5,5	5	195,00	194,9	194,95	99,94	99,74	99,84	16,21	16,21	A	2848	7	1,95
	6	197,41	197,15	197,28	100,04	99,81	99,93	11,20		A	2849	8	1,97
	7	196,45	195,87	196,16	99,97	100,26	100,12	<u>17,18</u>	<u>17,18</u>	A	2850	9	1,96
								Média	16,21	16,70			
							Desvio Padrão	3,21	0,69				

Módulo de elasticidade - AGR3 - cura úmida 28 dias - 07/03/2018 - Bases retificadas													
	h1 (mm)	h2 (mm)	h méd	D1 (mm)	D2 (mm)	D méd	GPa	GPa (norma)	Tipo de ruptura	Arquivo	Ordem	h/D	
m=2,5	5	196,89	196,81	196,85	100,74	99,76	100,25	14,51		A	3047	4	1,96
	6	196,10	196,22	196,16	99,70	99,76	99,73	16,79	16,79	A	3048	5	1,97
	7	197,04	196,96	197,00	100,46	100,45	100,46	<u>17,09</u>	<u>17,09</u>	A	3049	6	1,96
								Média	16,79	16,94			
							Desvio Padrão	1,41	0,21				
m=4,0	5	196,25	196,31	196,28	99,83	99,72	99,78	18,71	18,71	B	3043	1	1,97
	6	195,59	195,70	195,65	101,04	99,88	100,46	17,11	17,11	A	3044	2	1,95
	7	194,42	194,40	194,41	99,38	100,48	99,93	<u>20,28</u>		A	3045	3	1,95
								Média	18,71	17,91			
							Desvio Padrão	1,59	1,13				
m=5,5	5	197,53	197,23	197,38	100,4	100,15	100,28	16,79	16,79	A	3050	7	1,97
	6	196,30	196,35	196,33	99,62	99,52	99,57	5,72		A	3051	8	1,97
	7	195,34	195,17	195,26	100,36	100,12	100,24	<u>16,64</u>	<u>16,64</u>	A	3052	9	1,95
								Média	16,64	16,72			
							Desvio Padrão	6,35	0,11				

Módulo de elasticidade - AGR3J - cura úmida 28 dias - 07/03/2018 - Bases retificadas													
	h1 (mm)	h2 (mm)	h méd	D1 (mm)	D2 (mm)	D méd	GPa	GPa (norma)	Tipo de ruptura	Arquivo	Ordem	h/D	
m=2,5	5	196,40	196,40	196,40	99,86	100,31	100,09	13,36	13,36	A	3058	4	1,96
	6	195,99	195,99	195,99	100,38	99,09	99,74	6,77		A	3059	5	1,97
	7	194,95	194,95	194,95	99,94	99,85	99,90	12,73	12,73	C	3060	6	1,95
								Média	12,73	13,05			
							Desvio Padrão	3,64	0,45				
m=4,0	5	194,51	194,46	194,49	99,37	100,46	99,92	19,41		A	3055	1	1,95
	6	196,28	196,11	196,20	100,19	100,68	100,44	15,65	15,65	A	3056	2	1,95
	7	196,84	196,77	196,81	100,70	99,75	100,23	16,65	16,65	A	3057	3	1,96
								Média	16,65	16,15			
							Desvio Padrão	1,95	0,71				
m=5,5	5	193,25	192,91	193,08	100,12	99,76	99,94	16,73		A	3061	7	1,93
	6	196,78	196,92	196,85	100,03	99,42	99,73	13,57	13,57	A	3062	8	1,97
	7	194,37	194,42	194,40	100,02	99,88	99,95	14,63	14,63	A	3063	9	1,94
								Média	14,63	14,10			
							Desvio Padrão	1,61	0,75				

ANEXO 3 – PLANILHA DE COLETA DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Referência - Agregado graúdo natural

Traço 1:m	faces idades		Profundidades mínimas (mm)				Média por CP	Desvio padrão por CP	Coeficiente de variação	Média Total
			1	2	3	4				
m = 5,5	14 dias	CP1	9,86	11,79	9,07	8,55	9,47	1,42	15%	9,34
		CP2	7,95	12,07	8,88	9,54	9,21	1,76	19%	
	21 dias	CP1	12,21	12,19	16,02	9,64	12,20	2,63	22%	11,93
		CP2	13,15	12,28	9,16	11,02	11,65	1,73	15%	
	28 dias	CP1	16,71	16,82	12,90	23,57	16,77	4,44	26%	16,20
		CP2	15,83	15,58	15,68	10,76	15,63	2,47	16%	
m = 4,0	21 dias	CP1	5,43	5,00	4,04	7,02	5,22	1,24	24%	6,21
		CP2	8,21	4,68	6,18	9,02	7,20	1,97	27%	
	35 dias	CP1	7,96	10,36	9,84	10,37	10,10	1,14	11%	10,71
		CP2	15,77	11,84	10,78	8,24	11,31	3,13	28%	
	49 dias	CP1	11,23	12,70	11,26	16,02	11,98	2,25	19%	13,68
		CP2	14,47	16,30	13,65	18,66	15,39	2,22	14%	
m = 2,5	28 dias	CP1	0,78	1,66	1,05	2,66	1,36	0,83	62%	2,33
		CP2	2,12	2,37	4,25	4,63	3,31	1,28	39%	
	42 dias	CP1	2,95	4,32	3,76	2,09	3,36	0,97	29%	3,50
		CP2	3,06	8,70	4,24	2,78	3,65	2,74	75%	
	56 dias	CP1	6,88	6,37	9,31	8,23	7,56	1,33	18%	7,53
		CP2	5,97	7,89	9,01	7,10	7,50	1,28	17%	

Agregado graúdo reciclado Fonte 1

Traço 1:m	faces idades		Profundidades mínimas (mm)				Média por CP	Desvio padrão por CP	Coeficiente de variação	Média Total
			1	2	3	4				
m = 5,5	14 dias	CP1	6,75	2,09	14,38	12,54	9,65	5,61	58%	9,81
		CP2	12,45	16,98	7,49	3,47	9,97	5,88	59%	
	21 dias	CP1	16,87	27,00	19,53	18,50	19,02	4,49	24%	16,23
		CP2	9,71	11,41	15,55	15,48	13,45	2,94	22%	
	28 dias	CP1	21,17	23,67	29,10	28,10	25,89	3,73	14%	26,65
		CP2	27,75	27,06	30,79	21,69	27,41	3,79	14%	
m = 4,0	21 dias	CP1	4,57	5,60	0,68	1,45	3,01	2,38	79%	2,08
		CP2	0,00	0,00	2,28	3,08	1,14	1,58	139%	
	35 dias	CP1	0,81	8,89	8,78	28,88	8,84	11,97	136%	11,24
		CP2	13,08	12,63	14,44	14,20	13,64	0,87	6%	
	49 dias	CP1	21,34	19,82	13,15	15,93	17,88	3,72	21%	17,44
		CP2	14,59	19,42	22,71	4,49	17,01	7,94	47%	
m = 2,5	28 dias	CP1	0,00	0,00	0,59	0,29	0,15	0,28	194%	0,20
		CP2	0,00	0,16	0,34	0,53	0,25	0,23	91%	
	42 dias	CP1	0,00	0,00	0,71	1,02	0,36	0,52	145%	0,54
		CP2	0,00	2,46	0,55	0,88	0,72	1,06	148%	
	56 dias	CP1	0,82	1,21	3,76	4,28	2,49	1,76	71%	2,38
		CP2	4,70	2,61	1,92	1,85	2,27	1,33	59%	

Agregado gráudo reciclado Fonte 1 jigado

Traço 1:m	faces idades		Profundidades mínimas (mm)				Média por CP	Desvio padrão por CP	Coeficiente de variação	Média Total
			1	2	3	4				
m = 5,5	14 dias	CP1	17,11	19,29	15,66	17,26	17,19	1,49	9%	17,55
		CP2	14,24	16,55	19,53	19,28	17,92	2,50	14%	
	21 dias	CP1	18,70	18,70	30,68	23,94	21,32	5,68	27%	21,50
		CP2	22,91	20,45	25,85	19,34	21,68	2,89	13%	
	28 dias	CP1	26,90	25,07	19,79	29,74	25,99	4,19	16%	25,77
		CP2	27,90	27,37	19,76	23,73	25,55	3,77	15%	
m = 4,0	21 dias	CP1	14,04	10,55	10,09	19,14	12,30	4,18	34%	11,77
		CP2	12,36	10,14	10,05	14,02	11,25	1,91	17%	
	35 dias	CP1	23,81	12,84	20,95	21,59	21,27	4,80	23%	20,16
		CP2	19,31	18,06	18,77	20,47	19,04	1,02	5%	
	49 dias	CP1	25,34	28,84	27,08	25,87	26,48	1,55	6%	25,06
		CP2	17,97	25,56	24,02	23,25	23,64	3,30	14%	
m = 2,5	28 dias	CP1	7,26	4,51	11,42	6,06	6,66	2,96	44%	7,45
		CP2	8,67	7,44	8,14	8,32	8,23	0,52	6%	
	42 dias	CP1	8,04	10,32	12,81	15,90	11,57	3,37	29%	11,33
		CP2	10,79	13,70	11,02	11,16	11,09	1,36	12%	
	56 dias	CP1	15,05	15,09	19,74	13,68	15,07	2,65	18%	14,95
		CP2	14,33	12,72	16,35	15,34	14,84	1,55	10%	

Agregado gráudo reciclado Fonte 2

Traço 1:m	faces idades		Profundidades mínimas (mm)				Média por CP	Desvio padrão por CP	Coeficiente de variação	Média Total
			1	2	3	4				
m = 5,5	14 dias	CP1	17,87	19,32	13,44	15,76	16,82	2,56	15%	15,59
		CP2	13,36	12,01	15,37	18,46	14,37	2,80	20%	
	21 dias	CP1	20,61	22,20	15,55	16,57	18,59	3,18	17%	19,26
		CP2	20,34	19,53	14,31	23,83	19,94	3,93	20%	
	28 dias	CP1	20,88	22,64	28,23	27,27	24,96	3,55	14%	27,87
		CP2	30,74	30,81	31,67	23,16	30,78	3,98	13%	
m = 4,0	21 dias	CP1	10,09	10,72	12,19	10,13	10,43	0,98	9%	12,30
		CP2	14,53	14,60	11,43	13,81	14,17	1,49	10%	
	35 dias	CP1	22,90	20,62	17,86	15,29	19,24	3,31	17%	20,52
		CP2	21,62	21,36	21,99	23,10	21,81	0,77	4%	
	49 dias	CP1	23,44	23,01	22,69	20,16	22,85	1,48	6%	24,05
		CP2	25,12	25,37	26,88	24,89	25,25	0,90	4%	
m = 2,5	28 dias	CP1	7,12	7,90	8,79	5,83	7,51	1,25	17%	7,24
		CP2	6,29	6,78	9,99	7,16	6,97	1,66	24%	
	42 dias	CP1	13,11	13,01	12,25	14,74	13,06	1,05	8%	13,04
		CP2	13,19	13,76	12,86	9,37	13,03	1,99	15%	
	56 dias	CP1	15,00	12,88	19,95	13,92	14,46	3,13	22%	15,44
		CP2	16,82	16,02	18,02	15,56	16,42	1,08	7%	

Agregado graúdo reciclado Fonte 2 jigado										
Traço 1:m	faces idades		Profundidades mínimas (mm)				Média por CP	Desvio padrão por CP	Coeficiente de variação	Média Total
			1	2	3	4				
m = 5,5	14 dias	CP1	18,27	18,30	20,71	15,34	18,29	2,20	12%	17,99
		CP2	18,66	18,71	16,72	14,58	17,69	1,96	11%	
	21 dias	CP1	20,28	19,10	18,98	22,32	19,69	1,55	8%	19,57
		CP2	18,10	18,43	20,48	21,30	19,46	1,56	8%	
	28 dias	CP1	25,61	25,86	24,95	23,33	25,28	1,14	5%	25,64
		CP2	25,73	26,28	27,39	18,47	26,01	4,06	16%	
m = 4,0	21 dias	CP1	21,36	21,29	23,62	16,92	21,33	2,80	13%	18,52
		CP2	14,79	16,64	12,87	17,76	15,72	2,15	14%	
	35 dias	CP1	16,92	22,70	28,09	34,31	25,40	7,43	29%	26,54
		CP2	27,79	27,59	32,92	24,08	27,69	3,64	13%	
	49 dias	CP1	38,19	34,85	36,14	32,66	35,50	2,32	7%	39,80
		CP2	45,90	45,48	42,71	40,47	44,10	2,54	6%	
m = 2,5	28 dias	CP1	10,20	12,92	13,63	16,97	13,28	2,78	21%	12,42
		CP2	12,91	12,70	10,44	1,30	11,57	5,47	47%	
	42 dias	CP1	10,14	11,42	17,11	16,55	13,99	3,54	25%	14,76
		CP2	11,75	13,89	17,16	19,36	15,53	3,38	22%	
	56 dias	CP1	20,23	19,88	22,23	21,81	21,02	1,16	6%	20,66
		CP2	18,30	19,98	20,62	22,15	20,30	1,59	8%	