

**Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura**

Rafaela Schumacher de Campos Matos

**Avaliação do efeito da jigagem em diferentes faixas
granulométricas sobre as características do agregado graúdo
reciclado de RCD e as propriedades do concreto**

Porto Alegre
2020

RAFAELA SCHUMACHER DE CAMPOS MATOS

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA JIGAGEM EM DIFERENTES
FAIXAS GRANULOMÉTRICAS SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO
RECICLADO DE RCD E AS PROPRIEDADES DO
CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia

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

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

Porto Alegre
2020

RAFAELA SCHUMACHER DE CAMPOS MATOS

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA JIGAGEM EM DIFERENTES
FAIXAS GRANULOMÉTRICAS SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO
RECICLADO DE RCD E AS PROPRIEDADES DO
CONCRETO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Materiais de Construção, e aprovada em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2020.

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

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

Prof^ª. Angela Borges Masuero
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ana Carolina Badalotti Passuello (UFRGS)
PhD pela Universitat Rovira i Virgili, Espanha

Prof. Mônica Batista Leite (UEFS)
PhD pela University of California, Estados Unidos

Prof. Weslei Monteiro Ambrós (UFRGS)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio incondicional, e a todos que acreditam que a pesquisa tem o poder de mudar o mundo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que desde sempre são meus exemplos de que sucesso é fruto de trabalho duro.

Meu muito obrigada por serem meus maiores incentivadores e pelo amor incondicional.

Ao meu amor, Ricardo, pelo apoio, compreensão e paciência. É motivador saber que tenho ao meu lado alguém tão sensacional.

Às minhas amigas de vida, que sempre me fizeram ter certeza da minha capacidade e força.

A todos os colegas da Engenhosul, em especial aos chefes Aquiles, Marco e Helmar, pela compreensão das minhas ausências e da minha dedicação, que precisou ser dividida nos últimos anos, sem deixar de acreditar e confiar no meu trabalho.

Um enorme agradecimento à professora Denise, minha orientadora neste trabalho e em diversos outros momentos que nem imagina. Obrigada pela confiança, pela parceria e por todo o carinho.

À professora Rejane, pela coorientação, por todo o auxílio prestado no LAPROM e por todo o conhecimento compartilhado.

A todos os professores do PPGCI/NORIE, por todo o aprendizado e pela forma com que foram capazes de tornar essa caminhada mais leve.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e aos laboratórios LAMTAC/NORIE e LAPROM, por todo suporte e estrutura disponibilizados para a realização da parte experimental do trabalho.

Aos laboratoristas Airton, Ari e Adalberto, por toda a ajuda física, emocional, e por todo o conhecimento transmitido, que foram essenciais para a realização dessa pesquisa.

Ao Weslei Ambrós, pela disponibilidade de tempo para acompanhamento e esclarecimentos a respeito do funcionamento do jigue pneumático.

A todos os bolsistas de iniciação científica do NORIE, em especial ao Lucas Figueiredo, por pegar junto comigo e ser meu braço direito em todas as etapas das atividades laboratoriais;

Aos colegas do NORIE, por todo o companheirismo e apoio.

À CAPES, pelo apoio financeiro ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que essa pesquisa acontecesse da melhor maneira possível.

“Subo o monte da vida
E cada passo,
É um pedaço
De mim mesmo
Que deixo no caminho,
Como marcas vivas do meu ser,
Que é para se ver
Como foi bem longa a caminhada (...)
Subo sem descanso e sem parar
Atrás de uma ilusão que vai fugindo!
E vou indo,
Cego de esperança,
Na confiança
De ver o meu sonho
Tornar-se realidade.”

(Álvaro Brandão de Campos Matos)

RESUMO

A indústria da construção civil é grande consumidora de recursos naturais através da extração de matérias-primas não renováveis. Além disso, é responsável pela geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), comumente descartados de forma inapropriada, resultando em grandes impactos ambientais. Por isso, torna-se necessária a busca de alternativas que diminuam esse impacto, visando à prática da sustentabilidade. Estudos vêm sendo realizados com o objetivo de viabilizar a reciclagem deste resíduo através da sua utilização como agregados na produção de novos concretos. Porém, suas elevadas porosidade e heterogeneidade provocam uma grande variação nas propriedades do agregado, agindo como restrições ao seu potencial aproveitamento, uma vez que os concretos produzidos com RCD apresentam características mecânicas também variáveis. Assim, a fim de melhorar a qualidade destes agregados, esse estudo se propôs a aprimorar a utilização do jigage a ar, equipamento utilizado na mineração que realiza separação densitária dos grãos, eliminando a variável do tamanho do grão na eficácia da separação por meio do peneiramento do material em pequenas faixas granulométricas, e testando o material gerado como agregado graúdo na produção de novos concretos. Para isso, foram moldados corpos de prova de concretos com três tipos de agregados graúdos reciclados (não jigado, jigado na granulometria completa e jigado em faixas granulométricas reduzidas), além de um concreto referência produzido com agregado graúdo natural (AGN). Com o objetivo de avaliar a relação entre o processamento do RCD e o desempenho dos concretos, foi realizada a caracterização dos agregados, ensaios mecânicos de resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água por capilaridade, buscando uma estimativa de durabilidade. Para uma maior confiabilidade, foi realizada uma análise estatística e comparativa dos resultados obtidos. Os ensaios de caracterização dos agregados mostraram que a jigagem é um método eficaz para a seleção dos agregados reciclados, aumentando valores de massa específica e reduzindo sua lamelaridade, resultados que foram ainda mais acentuados nos materiais jigados em faixas granulométricas menores. Ainda, o processamento dos materiais na granulometria completa apresentou uma melhora nas características mecânicas dos concretos em relação aos que foram produzidos com agregados não jigados, mas o peneiramento do RCD antes da jigagem apresentou vantagens do ponto de vista de sustentabilidade apenas para a produção de concretos com resistências até 20 MPa, sendo capaz de reduzir o consumo de cimento em relação aos concretos de mesma resistência produzidos com AGN. Para resistências acima dos 20 MPa, o peneiramento do RCD só se mostrou efetivo nos ensaios de absorção, reduzindo os valores e chegando mais perto dos resultados dos concretos produzidos com agregado natural, enquanto os acréscimos na resistência à compressão e no módulo de elasticidade em geral não se mostraram significativos.

Palavras-chave: Resíduo de Construção e Demolição. Jigagem. Agregado Graúdo Reciclado. Concreto Reciclado.

ABSTRACT

The construction industry is a major consumer of natural resources through the extraction of non-renewable raw materials. It is responsible for the generation of Construction and Demolition Waste (CDW), commonly disposed of in an inappropriate manner, resulting in environmental impacts, becoming necessary the search for alternatives that reduce this impact, aiming sustainable practices. Studies have been carried out in the search to turn the recycling of this waste possible through its use as aggregates in the production of new concretes, but its high porosity and heterogeneity causes a huge variation in its composition characteristics, becoming a restriction to its potential use, since the concrete produced with CDW has mechanical characteristics that are also variable. In order to improve the quality of the aggregates, this study aimed to improve the use of air jigging, an equipment used in mining that performs dense separation of grains, eliminating the grain size variable in the performance of separation by sieving the material in small granulometric ranges, and testing the material generated as a coarse aggregate in the production of new concrete. Concretes were made with three types of recycled aggregates (non jigged, jigged in full granulometry and jigged in granulometric strips), in addition to a reference concrete produced with natural aggregate. To evaluate the relation between the CDW processing and the performance of the concrete, characterization of the aggregates and mechanical tests on the concretes were performed. To seek a better basis for the possible conclusions, a statistical and comparative analysis of the results obtained was performed. The characterization tests of the aggregates showed that jigging is an effective method for the selection of recycled aggregates, even more when jigging in granulometric bands. Still, the processing of the materials in the complete granulometry showed an improvement in the mechanical characteristics of the concretes in relation to those produced with non-jigged aggregates, but the sieving of the CDW before the jigging showed sustainability advantages only for the production of concretes with strengths up to 20 MPa, being able to reduce cement consumption in relation to the concrete with the same resistance produced with natural aggregates. For higher strengths, the screening of the CDW was only effective in the absorption tests, reducing the values and getting closer to the results of the concretes produced with natural aggregate, while the increases in the compressive strength and in the elasticity modulus in general were not showed significant.

Palavras-chave: Construction and demolition waste. Jigging. Recycled Coarse Aggregate. Recycled Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Composição do RCD em (a) Salvador, BA; (b) Porto Alegre, RS; (c) Itatinga, SP; (d) Maceió, AL.	20
Figura 2- Etapas do processo de jigagem	29
Figura 3- Influência dos diferentes tipos de partículas no beneficiamento gravimétrico.....	32
Figura 4- Programa experimental.....	36
Figura 5 - Variáveis independentes	38
Figura 6 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	42
Figura 7 - Britagem do RCD no aterro	45
Figura 8- Composição do RCD coletado em aterro de Porto Alegre, sendo (A) lote 01, coletado em março/2019 e (B) lote 02, coletado em junho/2019.....	46
Figura 9 - Peneiramento do material	48
Figura 10 - Jigue AllAir® S-500.....	49
Figura 11- Composição das amostras após a jigagem, sendo (A) AGRJ e (B) AGRPJ.....	52
Figura 12 - Comparação entre composições das amostras de RCD	53
Figura 13- Curva granulométrica ajustada a todas as amostras.....	55
Figura 14- Resultados médios do índice de forma das amostras.....	56
Figura 15 - Etapas do ensaio de massa específica - (a) registro da massa inicial "C"; (b) amostra submersa no kitasato; (c) aplicação de vácuo; (d) registro da massa do conjunto kitasato+amostra+água "A"; (e) registro da massa do conjunto kitasato+água "B"	58
Figura 16 – Resultados médios de massa específica dos agregados	59
Figura 17 – Resultados médios de massa unitária dos agregados	60
Figura 18 - Média dos resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias	70
Figura 19 - Efeito isolado do peneiramento na resistência à compressão axial	73
Figura 20 - Efeito isolado da jigagem na resistência à compressão axial	74
Figura 21 - Efeito combinado jigagem x traço unitário.....	75
Figura 22 - Efeito combinado peneiramento x jigagem x traço unitário.....	76
Figura 23 - Resistência à compressão axial em função da relação a/c	78
Figura 24 - Relação água/cimento em função do traço unitário.....	79
Figura 25 - Traço unitário em função do consumo de cimento.....	80
Figura 26 - Diagrama de dosagem dos concretos aos 28 dias	81
Figura 27 - Média dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias.....	84
Figura 28 - Efeito isolado do peneiramento no módulo de elasticidade	87
Figura 29 - Efeito isolado da jigagem no módulo de elasticidade.....	88
Figura 30- Efeito combinado jigagem x traço unitário no módulo de elasticidade.....	89
Figura 31 – Média dos resultados do ensaio de absorção por capilaridade por tempo de contato com a água aos 28 dias	91
Figura 32 - Distribuição de água nos corpos de prova, sendo (A) AGN 1:3,5; (B) AGN 1:5,0; (C) AGN 1:6,5; (D) AGRPJ 1:3,5; (E) AGRPJ 1:5,0; (F) AGRPJ 1:6,5; (G) AGRJ 1:3,5; (H) AGRJ 1:5,0; (I) AGRJ 1:6,5; (J) AGR 1:3,5; (K) AGR 1:5,0; (L) AGR 1:6,5.....	92
Figura 33 - Alturas médias de ascensão da água no corpo de prova após 72h de ensaio.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do RCD em diferentes estados do Brasil.....	21
Tabela 2- Ensaio realizado	40
Tabela 3- Caracterização do cimento CP IV 32 RS	41
Tabela 4 - Composição granulométrica do agregado miúdo	42
Tabela 5 - Características físicas do agregado miúdo	43
Tabela 6 - Características físicas do agregado graúdo natural	44
Tabela 7 - Composição granulométrica do AGR	54
Tabela 8 - Percentual de saturação dos agregados	62
Tabela 9- Traços unitários para o teor de argamassa ideal de 54%.....	63
Tabela 10- Relações a/c e abatimentos dos concretos	64
Tabela 11 - Quantidade de corpos de prova	65
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de massa específica no estado fresco (g/cm ³).....	66
Tabela 13- Resultados do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias	69
Tabela 14 – ANOVA: Efeito da interação agregado x traço unitário na resistência à compressão axial.....	71
Tabela 15- Características de dosagem dos concretos.....	77
Tabela 16 - Consumo de cimento para as resistências à compressão de 20MPa e 25 MPa	82
Tabela 17 - Médias dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias.....	84
Tabela 18 - ANOVA: Efeito combinado agregado x traço unitário no módulo de elasticidade	85
Tabela 19 - Média dos resultados do ensaio de absorção por capilaridade por tempo de contato com a água aos 28 dias	90
Tabela 20 - Média das alturas de ascensão capilar após 72h de ensaio.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1:m – proporção de cimento:agregados, em massa

α - teor ideal de argamassa seca

γ - massa específica do agregado

a/c - relação água/cimento

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

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

AGN – Agregado Graúdo Natural

AGR – Agregado Graúdo Reciclado

AGRJ – Agregado Graúdo Reciclado Jigado

AGRPJ – Agregado Graúdo Reciclado Peneirado e Jigado

ANOVA – Análise de Variância

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP IV – Cimento Portland Pozolânico

CP – Corpo de Prova

DM – Dimensão Máxima

E_c – Módulo de Elasticidade

EE - Escola de Engenharia

f_c - Resistência à compressão axial

GPa – Giga Pascal

IF – Índice de Forma

kg - Quilograma

kN – Quilo Newton

LAMTAC – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

LAPROM – Laboratório de Processamento Mineral

m³ - metro cúbico

mm: milímetros

MF – Módulo de Finura

MPa – Mega Pascal

NBR - Norma Brasileira Regulamentada

NORIE – Núcleo Orientado para Inovação da Edificação

pH - Potencial de Hidrogênio

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

RCC - Resíduo de Construção Civil

RCD - Resíduo de Construção e Demolição

RS – Rio Grande do Sul

RSU - Resíduo Sólido Urbano

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	11
1.2	PRESSUPOSTOS	13
1.3	QUESTÕES DE PESQUISA	14
1.4	OBJETIVOS DA PESQUISA	14
1.5	DELIMITAÇÕES	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	16
2.2	AGREGADOS RECICLADOS DE RCD	18
2.3	CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS.....	22
2.3.1	Propriedades do concreto no estado fresco.....	23
2.3.2	Propriedades do concreto no estado endurecido.....	24
2.4	SEPARAÇÃO DE RCD	27
2.5	SEPARAÇÃO GRAVIMÉTRICA POR JIGAGEM.....	29
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	35
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	40
3.1.1	Cimento	40
3.1.2	Agregado Miúdo.....	41
3.1.3	Agregado Graúdo Natural	43
3.1.4	Agregado Graúdo Reciclado	44
3.2	PRODUÇÃO DE CONCRETOS	61
3.2.4	Tratamento dos agregados	61
3.2.5	Dosagem experimental.....	62
3.2.6	Moldagem dos corpos de prova	64
3.3	ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO	66
3.4	ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO	67
3.4.4	Resistência à compressão axial	67
3.4.5	Módulo de Elasticidade	68
3.4.6	Absorção por Capilaridade	68
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	69

4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	69
4.1.4	Resultados Obtidos	69
4.1.5	Análise estatística	70
4.1.6	Impacto da utilização do RCD na resistência à compressão em função do consumo de cimento.....	76
4.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	83
4.2.4	Resultados obtidos.....	83
4.2.5	Análise estatística	85
4.3	ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	89
4.3.4	Resultados obtidos.....	89
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICE 1 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial.....	108
	APÊNDICE 2 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade	113
	APÊNDICE 3 – Resultados dos ensaios de absorção por capilaridade	118

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o contexto e a justificativa do tema proposto, os pressupostos da pesquisa, o problema de pesquisa, as questões de pesquisa, seus objetivos e suas delimitações.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

A necessidade da utilização de matérias-primas não renováveis, o alto consumo de energia associado à extração e ao transporte de insumos, a emissão de gases poluentes decorrentes da produção e do processamento de materiais, somados a uma grande quantidade de resíduos gerados, tanto durante a construção quanto em casos de demolição, tornam a indústria da construção civil uma das maiores responsáveis pelos impactos negativos causados pelo homem ao meio ambiente.

O crescimento econômico mundial é grande contribuinte para o aumento da geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). De acordo com dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2019), foi gerado um total de 79 milhões de toneladas de RSU no país em 2018, sendo que aproximadamente 56% desse número se referem a Resíduos de Construção e Demolição (RCD), com uma coleta de 122.012 toneladas por dia.

Em seu trabalho, Tam *et al.* (2018) afirmam que a geração de RCD aumentou em quase 100% entre 2007 e 2014, chegando em um valor aproximado de 40 bilhões de toneladas no mundo. Ainda, os autores constataram que o Brasil, juntamente com países como China, Índia, Indonésia, Malásia, México, Rússia, Tailândia e Turquia, destaca-se pelo rápido aumento de geração desse resíduo ao longo dos anos e que, em 2014, a geração de RCD foi de 101 milhões de toneladas no Brasil, dos quais apenas 6,14% foram reaproveitados.

No panorama mundial atual, com premissas de sustentabilidade e redução de danos ambientais, a reciclagem do RCD se torna uma alternativa eficiente para a redução tanto do acúmulo desses resíduos em aterros quanto da extração de matérias-primas de fontes não renováveis. Ao longo dos anos, alguns estudos vêm sendo feitos sobre a reutilização do RCD como agregado graúdo na produção de novos concretos (HANSEN, 1992; ZORDAN, 1997; JOHN, 2000; LEITE, 2001; SANTOS *et al.*, 2002; VIEIRA, 2003; CABRAL, 2007; RAO *et al.*, 2007; MOREIRA,

2010; ULSEN *et al.*, 2013; KAMRATH, 2013; CONTRERAS, 2016; KHOURY *et al.*, 2018; SAMPAIO *et al.*, 2020; entre outros).

A utilização de agregados reciclados em substituição aos agregados naturais, no concreto, apresenta diversas vantagens de sustentabilidade em relação ao meio ambiente. Dentre elas, podem ser citadas a redução da extração de matéria-prima natural, a redução de acúmulo de RCD em áreas urbanas e de emissão de gás carbônico na atmosfera causada pela extração, beneficiamento, armazenagem e transporte do agregado natural, entre outras (FÉLIX *et al.*, 2016).

De acordo com Bigolin (2013), o RCD já possui aplicação na produção de concretos magros, de blocos de concreto, no uso em base e sub-base de pavimentações e em obras de drenagem. Aguiar *et al.* (2019) afirmam que, levando em conta a variabilidade dos resíduos de construção e demolição, sua utilização em subleitos, sub-base e base de pavimentação é viável, apresentando boas propriedades de resistência mecânica, com capacidade de suportar solicitações externas sem sofrer deformações.

Para que o mercado da reutilização cresça, é interessante que seja viabilizada a sua aplicação em concretos mais nobres, para uso estrutural, com resistências superiores a 20 MPa. Segundo Corrêa (2014), concretos com essa resistência mínima podem ser alcançados com o uso de agregados de RCD, através do controle das suas variáveis. Porém, por ser um material heterogêneo constituído de diversos elementos, o RCD apresenta grande variabilidade, resultando em agregados muito diferentes em relação à resistência e à porosidade, o que influencia diretamente no produto final (LOVATO, 2007).

Para reduzir essa variabilidade, é importante que se consiga separar os constituintes do RCD a fim de recuperar um material com a maior resistência e a menor porosidade possível, para que a substituição não impacte significativamente nas características do concreto. Para isso, é interessante a separação em jig: equipamento muito utilizado na mineração que visa separar os materiais em função da sua densidade, através do movimento de um fluido (água ou ar) que provoca a pulsação de um leito de partículas, por meio de expansão e contração, para posterior acomodação (CARRIJO; FIGUEIREDO, 2005).

De acordo com Sampaio *et al.* (2016), os jigues são boas opções para o processo de separação do RCD devido ao seu baixo custo, sua facilidade de operação e manutenção e sua capacidade de beneficiar uma grande quantidade de partículas.

Segundo Ambrós (2017), é possível separar em algum dos modelos de jigue qualquer material constituído por partículas de diferentes densidades, tamanhos e formatos, desde que a granulometria do material esteja dentro da faixa adequada ao equipamento. Devido às vantagens ambientais que a eliminação da necessidade do uso de água para a separação traz, é crescente o interesse pelo uso de jigues pneumáticos, apesar da menor eficiência deste equipamento em comparação aos jigues hidráulicos (XING, 2002). Portanto, é necessário um entendimento mais aprofundado a respeito do processo de estratificação por meio do ar como fluido de separação.

Estudos utilizando o jigue pneumático na separação do RCD, como os de Zortea (2014a), Zortea (2014b), Sampaio *et al.* (2015), Schamne *et al.* (2016), Mondini (2018), Malysz (2018), mostram resultados positivos, com boa recuperação do concreto em relação à cerâmica e ao gesso. Porém, essa separação ainda não pode ser considerada excelente, uma vez que os resultados dos ensaios em concretos produzidos com agregado reciclado separado em jigue em relação aos concretos produzidos com agregados naturais ainda são muito inferiores, inviabilizando técnica e economicamente a utilização do agregado reciclado para fins estruturais. De acordo com Malysz (2018), um dos motivos pelos quais a jigagem não vem sendo completamente efetiva pode ser a presença de partículas com diferentes formatos e tamanhos, como, por exemplo, a presença de material lamelar cerâmico esmaltado ou polido e a utilização de partículas na ampla faixa granulométrica de 4,75mm a 25mm.

Desta forma, essa pesquisa se propõe a estudar o efeito do tamanho das partículas do RCD na separação por jigue pneumático, a fim de tentar alcançar uma recuperação ideal dos materiais mais nobres para utilizá-los como agregado graúdo em substituição ao agregado natural na produção de novos concretos.

1.2 PRESSUPOSTOS

Os pressupostos que justificam o tema da pesquisa são:

- tendo em vista que a densidade do material é uma relação entre a massa e o volume, o tamanho das partículas exerce influência na separação do RCD em jigue pneumático;
- se o tamanho das partículas influencia na eficácia da separação por densidade, as propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido apresentarão melhores resultados ao utilizar um agregado graúdo de RCD separado em faixas menores de granulometria.

1.3 QUESTÕES DE PESQUISA

Com base no problema de pesquisa, foi definida a questão de pesquisa:

Qual a influência das faixas granulométricas dos grãos de RCD na separação densitária em jigue a ar e nas propriedades dos concretos com agregados reciclados?

1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral da pesquisa consiste em analisar se a variação do tamanho das partículas de RCD exerce influência na eficácia da separação do material por densidade, em jigue pneumático, nas características dos agregados reciclados e nas propriedades dos concretos.

A fim de atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos para a pesquisa:

- verificar a influência da separação em faixas granulométricas do RCD em jigue pneumático nas características dos agregados;
- analisar as propriedades do concreto no estado fresco produzido com agregados graúdos de RCD com e sem separação densitária;
- determinar se as propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido (resistência à compressão e módulo de elasticidade) elaborado com agregado graúdo reciclado separado em jigue com diferentes faixas de granulometria, se equiparam às de concretos com agregados naturais;

- verificar a influência da separação dos agregados graúdos de RCD na durabilidade do concreto por meio do ensaio de absorção de água por capilaridade;
- realizar uma análise comparativa do desempenho de concretos produzidos com agregados graúdos de RCD com e sem a separação em diferentes faixas granulométricas.

1.5 DELIMITAÇÕES

A pesquisa possui as seguintes delimitações:

- utilização de RCD proveniente de uma fonte específica, localizada no estado do Rio Grande do Sul;
- o RCD foi adquirido nas condições que é comercializado, os equipamentos utilizados no beneficiamento e britagem não foram avaliados;
- o jigue utilizado na pesquisa foi de um modelo específico;
- este trabalho se limitou a analisar apenas a influência do tamanho e da densidade do RCD, desconsiderando a influência do formato ou da textura, por serem características que dependem do tipo de britador e do material a ser britado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo tem por objetivo auxiliar na compreensão do tema proposto, sendo pautada pelos principais conceitos e definições importantes para o embasamento teórico da pesquisa.

Diversos trabalhos exploraram o estudo do RCD, tanto em nível nacional, desde Pinto (1986), Zordan (1997), Vieira (2003), Moreira (2010), Cordeiro (2013), Brasileiro e Matos (2015), Silva *et al.* (2017), Malysz (2018), entre outros; quanto em nível internacional, como Hansen (1992), Ulsen *et al.* (2004), Rao *et al.* (2007), Martín-Morales *et al.* (2013), Silva *et al.* (2014), Contreras *et al.* (2016), Khoury *et al.* (2018), entre outros. Por este motivo, será feita uma revisão sucinta sobre o assunto.

2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

É considerado resíduo de construção e demolição todo o material proveniente dos desperdícios da construção civil ou de demolições. Esses resíduos, também chamados de resíduos de construção civil (RCC), são definidos pela resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2002, p. 1), alterada pelas resoluções 348/2004, 431/2011, 448/2012 e 469/2015, como:

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

De acordo com Cabral (2007), a classificação do RCD é muito importante para definir sua destinação, principalmente em função da periculosidade. A resolução nº 307 do CONAMA (2002, p.2) classifica os resíduos da construção civil em quatro classes de acordo com a sua composição e origem, sendo:

- a) Classe A: resíduos provenientes de demolições e de perdas de construções e reformas, de obras de pavimentação, infraestrutura e terraplenagem, ou do processo de fabricação de materiais nos canteiros de obra, constituídos por diversos componentes como

argamassa, concreto e cerâmica, com potencial de reciclagem ou de reutilização como agregado;

- b) Classe B: resíduos com possibilidade de reciclagem, mas sem as características necessárias para serem utilizados como agregado, como papel, vidro e materiais não minerais;
- c) Classe C: resíduos cuja reciclagem ainda não é possível devido à falta de tecnologias economicamente viáveis, como o gesso;
- d) Classe D: resíduos considerados perigosos por sua composição, como tintas e solventes, ou por estarem contaminados.

A composição do RCD varia de acordo com a região onde foi gerado e com o tipo de obra da qual é proveniente. No Brasil, a maior parcela dos resíduos de construção e demolição é constituída por rochas, argamassas, concretos e material cerâmico, sendo a quantidade de cada componente também muito variável de acordo com sua procedência (ANGULO, 2005).

De acordo com Hoornweg (2000), a condição socioeconômica da população, o grau de industrialização, as fontes de energia e o clima da região de geração do resíduo são fatores determinantes na sua composição. O autor ainda estabelece uma relação diretamente proporcional entre o poder econômico da região e a quantidade de resíduos sólidos gerados, destacando também que quanto menor a renda da população, maior o percentual de matéria orgânica na composição dos resíduos.

Sendo assim, existem diversas fontes geradoras de RCD, originando amostras de resíduos muito diferentes e variáveis. A falta de controle de qualidade e de gerenciamento dos processos das obras acaba ocasionando grande quantidade de perdas e desperdícios, contribuindo para a geração de muito resíduo de construção, além de aumentar a necessidade de manutenções com uso de matéria-prima não renovável. Somado a esses fatores, também são gerados resíduos por ocasião de demolições e por desastres ou fenômenos naturais (LOVATO, 2007).

De acordo com Contreras *et al.* (2016), o RCD representa a maior parte dos resíduos sólidos urbanos em massa. A geração anual estimada de RCD no Brasil é de 500 kg por habitante. Quando esse número é multiplicado pelo número de habitantes em 2018, fornecido pelo IBGE (2018), o total de RCD gerado é de aproximadamente 104 milhões de toneladas no país

(MALYSZ, 2018). Quando esse valor é comparado ao apresentado anteriormente pela ABRELPE (2017), de aproximadamente 44,6 milhões de toneladas, percebe-se que existe uma grande variação nos números levantados. Essa variação mostra a dificuldade de quantificar a geração de resíduos em um país com tantos aterros não licenciados e com grande parte do material possuindo destinação imprópria.

Tendo em vista a grande geração de resíduos de construção e demolição somada à necessidade de extração de agregados naturais para uso na indústria da construção civil, o reaproveitamento desses resíduos se faz importante se considerado seu uso como agregados na produção de concretos, de modo a reduzir o impacto ambiental causado tanto pela geração de entulho quanto pela extração de matéria-prima (ANGULO; JOHN, 2002). Além disso, Coelho e Brito (2013a e 2013b) realizaram uma análise econômica a respeito da reciclagem e obtiveram resultados positivos, concluindo que este é um processo sustentável e economicamente viável.

2.2 AGREGADOS RECICLADOS DE RCD

A resolução nº 307 do CONAMA (2002, p.2) define agregado reciclado como “material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para aplicação em obras [...] de engenharia”.

Na engenharia civil, o reaproveitamento dos resíduos já vem sendo difundido em bases e sub-bases de pavimentos, na produção de blocos de concreto e de concretos magros sem fins estruturais (ARULRAJAH *et al.*, 2014; VIEIRA; DAL MOLIN, 2004; RAO *et al.*, 2007; YANG *et al.*, 2011; COELHO; DE BRITO, 2013; entre outros). Porém, para sua utilização em concretos mais nobres e até estruturais, as características e propriedades dos agregados de RCD ainda precisam ser mais estudadas, uma vez que os resultados encontrados até hoje ainda não são satisfatórios para aplicação prática.

Os grãos do agregado reciclado apresentam algumas características que reduzem o desempenho do concreto, como a grande variabilidade em relação à porosidade e à absorção de água, à abrasão, à massa específica, ao tamanho e ao formato do material, além de possuírem menor resistência quando comparados ao agregado natural (ANGULO, 2005; ULSEN *et al.*, 2004; RAO *et al.*, 2007).

Leite (2001) realizou uma comparação entre agregados graúdos reciclados e naturais, considerando aspectos como massa específica e unitária, absorção e formato dos grãos. A autora encontrou valores de massa específica para o agregado graúdo reciclado 19% menores em relação ao agregado natural, e de massa unitária 30% menores, atribuindo essas reduções à maior porosidade dos grãos e, conseqüentemente, menor densidade. Butler (2003) afirma que a camada de argamassa presente na superfície dos grãos de RCD torna o agregado mais poroso, reduzindo, assim, seus valores de massa específica em relação aos agregados naturais, encontrando valores cerca de 15% menores.

Em relação à absorção de água dos grãos de AGR, Leite (2001) encontrou uma taxa de 4,95%, valor bastante elevado se comparado a agregados naturais, que variam entre 0,48% e 1,26% de acordo com a pesquisa de Rohden (2015).

O formato dos grãos de RCD também contribui para o seu desempenho como agregado para a produção de concretos. Sendo a forma cúbica considerada ideal para agregados graúdos, com índice de forma próximo de 1, grãos com índices mais altos são considerados lamelares e, quanto maior o índice, mais lamelar é o grão. Leite (2001) encontrou um valor aproximadamente 11% maior para o índice de forma do agregado graúdo reciclado em relação ao agregado natural. Por sua vez, Malysz (2018) encontrou resultados até 37% maiores para o agregado reciclado em comparação ao agregado natural estudado. Estudos mais antigos também apontam um alto índice de forma como característica dos grãos de RCD, principalmente quando são compostos por maior parcela de material cerâmico, como o de Mehta e Monteiro (1994). Os autores ainda atribuem aos agregados reciclados uma textura áspera e rugosa.

Todas essas características intrínsecas aos agregados reciclados, como baixa massa específica, alta porosidade, alta taxa de absorção de água, alto índice de forma e textura áspera contribuem para uma redução da densidade dos grãos, reduzindo também sua resistência. Sendo assim, conhecer as características físicas do agregado e sua interação com o concreto é fundamental para viabilizar sua utilização.

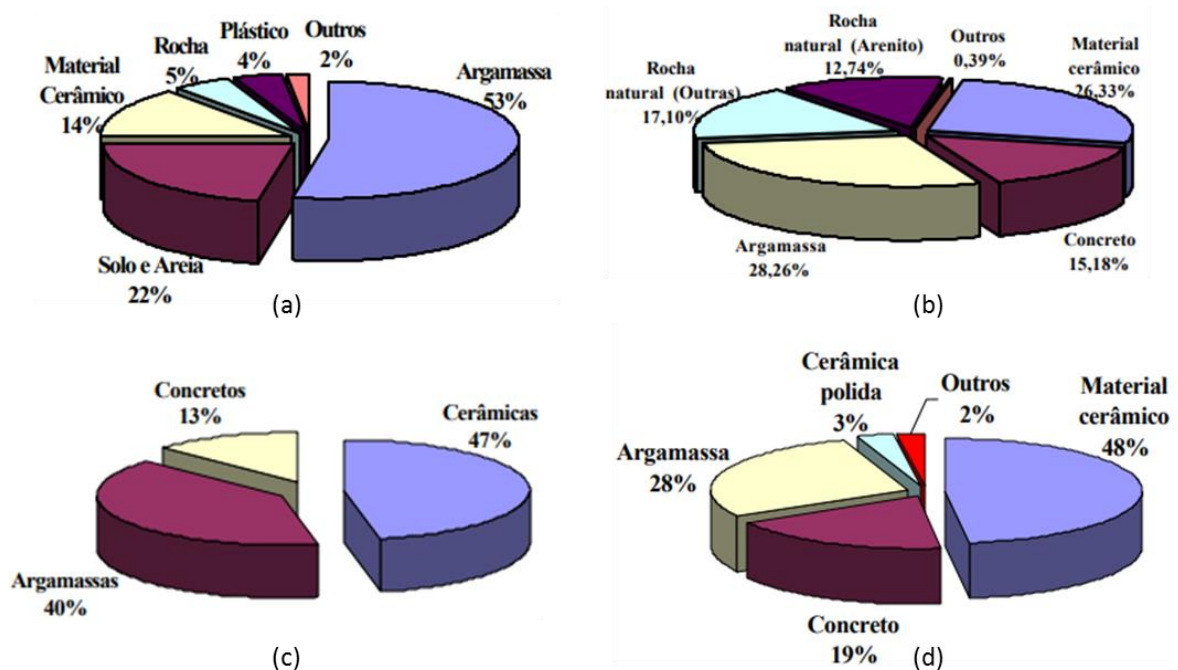
Segundo Lovato (2007), essa grande variabilidade nas propriedades dos agregados reciclados se dá pelos diferentes materiais que constituem o RCD. Uma vez que este é um resíduo proveniente de perdas da construção ou da demolição de edificações, pode conter materiais

orgânicos, materiais inorgânicos e minerais, abrangendo: concreto, cerâmica vermelha (tijolos e telhas) e de revestimento, argamassas (de assentamento e revestimento), aço, gesso, vidro, madeira, plástico, materiais betuminosos, papel, tinta, entre outros. De acordo com Zordan (2000), este pode ser considerado o mais heterogêneo entre os resíduos industriais.

Ulsen (2010) coloca que os resíduos de construção e demolição são predominantemente compostos por concreto, restos de argamassa e material cerâmico, que podem ser transformados em matéria-prima para reaproveitamento dentro da própria indústria da construção civil, se forem tratados de maneira correta.

Vieira (2003) realizou um estudo a respeito da variabilidade de resíduos de construção e demolição provenientes de aterros naturais de diferentes estados do Brasil. A autora recolheu dados de outros trabalhos (CARNEIRO *et al.*, 2001; LEITE, 2001; JOHN; AGOPYAN, 2000) e apresentou na forma de gráficos de distribuição da composição do RCD (figura 1).

Figura 1- Composição do RCD em (a) Salvador, BA; (b) Porto Alegre, RS; (c) Itatinga, SP; (d) Maceió, AL.



Fonte: Adaptado de Vieira (2003)

Ao longo dos anos, a composição do RCD continuou sendo estudada em diversos estados do Brasil. Alguns resultados desses estudos foram reunidos na tabela 1.

Tabela 1 - Composição do RCD em diferentes estados do Brasil

	Concreto (%)	Argamassa (%)	Cerâmica Vermelha (%)	Cerâmica Polida (%)	Rochas (%)	Outros (%)
Lima e Cabral (2013) Fortaleza/CE	15,6	22,0	14,4	6,3	24,6	17,1
Marques <i>et al.</i> (2013) Palmas/TO		43,0	39,0	8,0	-	10,0
Kohchem <i>et al.</i> (2017) Cascavel/PR	16,5	36,6	33,3	-	-	13,6
Malysz (2018) Porto Alegre/RS	11,8	28,3	21,9	3,7	32,8	1,5

Fonte: a autora (2020)

Observando a composição dos resíduos dos quatro estados apresentados por Vieira (2003) e os dados dos estudos da tabela 1, percebe-se que, ainda que as quantidades de concreto, argamassa e cerâmica se destaquem em relação aos outros componentes, todas as amostras são bastante diferentes entre si. Ainda, realizando a caracterização do RCD em diferentes épocas do ano e em diferentes aterros, essa diferença poderia ser visível dentro do mesmo estado ou até de um mesmo aterro, uma vez que a composição do resíduo varia não só de acordo com a localização, mas também ao longo do tempo, por ser dependente da sua fonte geradora. Cada um desses resíduos daria origem a um agregado com diferentes propriedades, reduzindo a capacidade para sua utilização devido à dificuldade de prever o desempenho do concreto.

De acordo com Angulo (2000), a variabilidade dos resíduos é um dos grandes empecilhos para que o uso desse material se torne difundido devido à falta de conhecimento sobre valores de resistência e durabilidade dos concretos produzidos com esse material. Vieira (2003) ainda coloca que a heterogeneidade do RCD dificulta que os concretos fabricados com esse agregado atinjam valores aceitáveis de desempenho.

Porém, Cabral (2007) afirma que a redução da heterogeneidade dos agregados reciclados e sua segregação em faixas de densidade podem contribuir para o sucesso da sua aplicação em concretos com maior durabilidade e resistência.

Segundo Nagataki *et al.* (2004), uma forma de reduzir a variabilidade dos agregados de RCD é através de processos de separação e peneiramento, recuperando a parte mais resistente do material e viabilizando seu uso como substituto ao agregado natural no concreto.

2.3 CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS

Na produção dos concretos, os agregados reciclados podem comprometer a fluidez das misturas em função do seu maior teor de materiais pulverulentos, formatos mais angulosos e textura rugosa. Ainda, mesmo executando a pré-molhagem, os agregados reciclados possuem a característica de grande absorção de água, tornando a pasta menos fluida em comparação aos agregados naturais (CAMPOS, 2017).

Quando se substitui o agregado natural por agregado reciclado de RCD, as propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido apresentam características diferentes. No estado fresco, é importante analisar a massa específica e a trabalhabilidade do concreto, enquanto no estado endurecido as propriedades mais determinantes para o desempenho do concreto são a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

No trabalho de Ogar (2017) foi observado que, para uso em concretos, a utilização total de agregados reciclados apresenta um aumento de quase 12% na resistência nas primeiras idades, mas uma redução de 3% aos 28 dias em relação a concretos com agregado natural. Salles (2018), comparando os valores de resistência aos 7 e 28 dias, observou que a substituição dos agregados por RCD não apresentou diferença no desempenho do concreto aos 7 dias, considerando o desvio padrão. Por outro lado, aos 28 dias, a resistência do concreto utilizando agregados reciclados apresentou desempenho aproximadamente 10% inferior. O autor concluiu, em sua pesquisa, que a substituição do agregado natural por RCD apenas do tipo cinza (concreto) apresenta resultados semelhantes ao concreto referência, ou seja, o acréscimo destes tipos de agregados não prejudica a resistência dos concretos.

Neville (2016) correlaciona as propriedades do concreto e as propriedades dos agregados, separando-as em dois grupos: propriedades influenciadoras do estado fresco (porosidade, massa específica, forma, textura e composição granulométrica); e propriedades influenciadoras do estado endurecido: porosidade, composição mineralógica, resistência e módulo de elasticidade.

2.3.1 Propriedades do concreto no estado fresco

Os diferentes tipos de agregados utilizados no concreto possuem variações em relação à porosidade, característica que está diretamente relacionada à sua massa específica. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a massa específica é definida pela massa das partículas do agregado por unidade de volume, incluindo os poros internos das partículas. Sendo assim, a massa específica do concreto no estado fresco é diretamente influenciada pela massa específica do agregado.

Carrijo e Figueiredo (2005) relacionam a massa específica do concreto no estado fresco com as quantidades de água e cimento da dosagem, além da massa específica do agregado utilizado, constatando que quanto menor a massa específica do agregado e maior a relação a/c, menor a massa específica do concreto no estado fresco.

De acordo com Cabral (2007), a massa específica dos agregados reciclados é menor que a dos agregados naturais em função das características das partículas do resíduo, que são menos densas que as partículas dos agregados naturais. Sendo assim, a massa específica de um concreto no estado fresco fabricado com agregados graúdos reciclados tende a ser menor em comparação a um concreto fabricado com agregados naturais.

Lovato (2007) analisou a massa específica de agregados graúdos de RCD e encontrou valores até 16% menores quando comparados à massa específica de agregados naturais. Cabral (2007) comparou o agregado natural com três diferentes agregados reciclados: concreto, argamassa e cerâmica, obtendo resultados até 35% menores. No caso de Cordeiro (2013), a diferença dos resultados foi de 23%. Malysz (2018) encontrou resultados de massa específica até 15% menores para os agregados graúdos reciclados em comparação aos agregados naturais.

Em relação à trabalhabilidade, para atingir os mesmos valores de abatimento de concretos produzidos com agregados naturais, os concretos com agregados reciclados necessitam de mais pasta de cimento. Essa situação se deve, possivelmente, ao fato da maior absorção de água dos agregados graúdos reciclados, tornando a mistura mais seca. Além disso, devido ao formato lamelar dos agregados reciclados, estes possuem uma maior fricção interna, fazendo com que seja necessário aumentar o teor de pasta para manter a mesma trabalhabilidade de concretos com agregados naturais, que são mais arredondados e com a superfície mais lisa (RAKSHVIR; BARAI, 2006).

2.3.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

Diversos estudos já foram realizados sobre a resistência à compressão axial de concretos fabricados com agregado graúdo reciclado de RCD, concluindo que, para um mesmo consumo de cimento, a resistência é menor em concretos com agregados reciclados (SANTOS *et al.*, 2002; ALAEJOS; SÁNCHEZ, 2004; XIAO *et al.*, 2005; RAO *et al.*, 2007; MOREIRA, 2010; SILVA *et al.*, 2014; ZANGESKI *et al.*, 2017; SILVA, 2019; entre outros). Os autores atribuem esses resultados à maior porosidade, menor resistência e formato normalmente mais lamelar destes agregados. Zordan (1997) comparou a resistência à compressão entre concretos com agregados naturais e reciclados, variando o consumo de cimento das misturas, chegando a uma redução da resistência à compressão nos concretos reciclados de até 50%.

A resistência do concreto é influenciada pela presença de vazios, falhas e poros presentes na sua matriz, e essas características podem possuir diferentes origens e motivos (NEVILLE; BROOKS, 2013). Os autores afirmam que há uma relação inversa entre a resistência e a porosidade do material, sendo menor a resistência quanto maior a porosidade.

De acordo com Cabral (2007), a composição do resíduo, o formato, a textura superficial, o tamanho das partículas, o tipo de cimento e o teor de substituição, dentre outros fatores, afetam a resistência do concreto no estado endurecido, e não apenas a substituição do agregado.

Mehta e Monteiro (1994) apontam que a influência dos agregados graúdos naturais não é determinante para a resistência do concreto, por serem mais resistentes que a zona de transição e a matriz. Porém, isso pode mudar no caso do uso de agregados reciclados, uma vez que, pela porosidade e variabilidade, tendem a apresentar resistências menores. No caso de a matriz do concreto ser menos resistente que o agregado, este não influenciará de forma significativa na resistência mecânica do concreto, uma vez que, nesse caso, a ruptura ocorreria na matriz e não no agregado.

Ainda que a variabilidade e a composição do agregado de RCD sejam características que podem fazer com que a resistência do concreto seja reduzida, é possível adquirir valores de resistência adequados utilizando agregado reciclado. Porém, para obter valores satisfatórios, é importante conhecer a composição do RCD e adequar a metodologia de dosagem e a relação a/c (CABRAL, 2007).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), outra característica importante a ser analisada no concreto endurecido é o módulo de elasticidade. Esse parâmetro avalia o comportamento do agregado na matriz cimentícia, medindo sua rigidez, relacionando a pasta de cimento hidratada, o agregado e a zona de transição entre eles. A porosidade, a textura, a composição e o formato do agregado são características determinantes para sua deformação, influenciando diretamente o módulo de elasticidade do concreto.

De acordo com Neville e Brooks (2013), o módulo de elasticidade do agregado e seu volume exercem influência direta no módulo do concreto. Como o agregado natural costuma possuir um módulo de elasticidade maior que o da matriz, quanto maiores forem os valores do módulo e o volume do agregado, maiores serão os valores do módulo de elasticidade do concreto como um todo.

Salles (2018) coloca que o uso de agregado de RCD no concreto influencia nos valores de módulo de elasticidade, justamente por causa da variação do módulo de elasticidade dos agregados, sendo que quanto maior o teor de agregados reciclados, menor é o módulo de elasticidade do concreto.

O tamanho das partículas do agregado, o formato, a textura e a sua composição mineralógica são fatores que podem influenciar na zona de transição e, assim, na deformação do concreto. Porém, a característica mais importante para a definição do valor do módulo de elasticidade é a porosidade do agregado (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Algumas pesquisas concluíram que concretos produzidos com agregados graúdos reciclados apresentam valores de módulo de elasticidade mais baixos do que aqueles produzidos com agregado natural: Hansen (1992) obteve resultados até 40% menores substituindo o agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado; Alaejo e Sanchez (2004) obtiveram uma redução de até 20%; Silva (2018) encontrou módulos de elasticidade de 30% a 49% menores ao substituir o agregado natural pelo agregado de RCD. Os autores atribuem este fato à grande porosidade do material, visto que a baixa densidade do agregado pode diminuir o módulo do concreto. Mesmo utilizando-se de relações a/c mais baixas, o que provoca a redução da porosidade da matriz, quanto maior o teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado, menores os valores de módulo de elasticidade do concreto (ROHDEN, 2015).

Com relação à durabilidade do concreto, Neville e Brooks (2013) afirmam que essa característica está diretamente relacionada à permeabilidade dos materiais. Quanto maior a capacidade de penetração de fluidos no concreto, menor a durabilidade do mesmo, uma vez que possibilita a entrada de agentes agressivos e, conseqüentemente, reduz a vida útil da estrutura.

A penetração de gás carbônico na estrutura de concreto armado provoca a carbonatação, fenômeno que reduz a alcalinidade do concreto, alterando sua estabilidade química e podendo despassivar a armadura, provocando danos e fissuras que comprometem a durabilidade das estruturas. Sendo assim, existe uma relação direta entre a permeabilidade do concreto e a durabilidade da estrutura devido à possibilidade de penetração de substâncias que podem causar ações deletérias (MEHTA; MONTEIRO, 1994; CASCUDO; CASAREK, 2011).

É importante reduzir a porosidade do material a fim de impedir a penetração de agentes deletérios. Para isso, deve-se estabelecer uma relação a/c adequada e baixa o suficiente para reduzir a permeabilidade e, ainda, deve-se atentar à densidade do concreto, que também é uma forma de reduzir o efeito da penetração de agentes agressivos. (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Estudos já avaliaram o impacto da substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de RCD na profundidade de carbonatação do concreto. Werle *et al.* (2011) concluíram que quanto maior a porosidade e menor a densidade do agregado reciclado utilizado, maiores as profundidades de carbonatação atingidas nos concretos, chegando a uma profundidade até 20% maior para uma mesma relação a/c. Katz (2003) chegou à conclusão que a substituição do agregado natural por agregado reciclado aumenta a profundidade de carbonatação em até 37% aos 28 dias. Cabral (2007) constatou que, independente da relação a/c utilizada, a durabilidade de concretos fabricados com agregado reciclado é menor quando comparada à de concretos fabricados com agregados naturais. Porém, o autor coloca que a utilização de uma baixa relação a/c pode colaborar com a menor permeabilidade da estrutura e, conseqüentemente, menor penetração de agentes agressivos.

Uma vez que a permeabilidade determina a facilidade de saturação do concreto em água, ela depende da porosidade capilar, que vem a ser o mecanismo de transporte da água pelo concreto. O volume de poros do concreto pode ser medido por meio do ensaio de absorção capilar, sendo esta a forma mais adequada para medir a permeabilidade do concreto. Além disso, de acordo

com Aguiar (2006), este ensaio apresenta resultados mais precisos e dentro de faixas mais bem definidas quando comparados a outros ensaios passíveis de prever a durabilidade.

No caso dos concretos com agregados reciclados, ao substituir o agregado graúdo natural pelo reciclado, é esperado um pior desempenho dos concretos devido à maior porosidade e, conseqüentemente, menor densidade dos agregados, permitindo a penetração dos agentes agressivos. Porém, fabricando um concreto com uma matriz resistente, a permeabilidade será reduzida e a carbonatação será controlada (CABRAL, 2007).

Campos (2017) afirma que concretos fabricados com RCD apresentam um aumento nos valores de absorção de água por capilaridade de quase 21% e no índice de vazios de quase 18%. O autor relaciona estes aumentos à maior capacidade de absorção de água dos agregados reciclados em comparação aos agregados naturais, tornando o concreto mais poroso e, assim, mais suscetível à penetração de agentes externos.

O autor também coloca que a substituição dos agregados naturais por agregados reciclados em concretos implica na diminuição de suas massas específicas e propriedades mecânicas. Isso se dá devido às propriedades intrínsecas do RCD, como maior absorção de água, menor resistência mecânica e menor massa específica em comparação aos agregados naturais (CAMPOS *et al.*, 2017).

2.4 SEPARAÇÃO DE RCD

A variabilidade dos agregados reciclados de RCD é a maior dificuldade para sua utilização em concretos. Essa variabilidade se deve à heterogeneidade da composição do resíduo, considerando os diferentes materiais que o formam e suas diferentes proporções (VIEIRA e DAL MOLIN, 2004).

Cabral (2007) afirma que é importante se atentar para algumas características do resíduo, como a presença de contaminantes e o tamanho dos grãos para adequar seu uso como agregado em concretos, além de sua maior porosidade e menor densidade quando comparados aos agregados naturais.

Esses contaminantes são os materiais que prejudicam o desempenho do concreto quando utilizados como agregados, como as substâncias orgânicas, o gesso e o vidro. As substâncias

orgânicas reagem no concreto, produzindo ácidos que reduzem o pH da pasta de cimento na presença de hidróxido de cálcio, o que acaba retardando sua hidratação. O gesso, quando presente no concreto, reage com os produtos anidros e de hidratação do cimento, gerando reações expansivas que podem fissurar o concreto. E o vidro pode causar reações álcali-agregado nos concretos, também gerando expansão. Por isso, é importante que esses materiais sejam separados do resíduo antes da sua utilização como agregado para produção de concretos (VIEIRA; DAL MOLIN, 2004; LEITE, 2001).

Para reduzir a variabilidade do RCD a fim de transformá-lo em um agregado passível de manter as características do concreto, é importante que o resíduo passe por um processo de separação, a fim de recuperar a parte mais densa e menos porosa para ser utilizada na fabricação de concretos estruturais, e a parte mais porosa para uso em concretos menos nobres. Equipamentos e técnicas que trabalham a separação de acordo com a diferença de densidade, tamanho e forma das partículas são os mais utilizados nos processos de beneficiamento mineral (WILLS; FINCH, 2015).

De acordo com Poon *et al.* (2001), apud Vogt *et al.* (2016), existe um desenvolvimento de diversas tecnologias e equipamentos para a reciclagem de resíduos de construção e demolição, principalmente no quesito de separação de grãos, com o objetivo de otimizar as etapas de reciclagem e conseguir produzir um agregado de maior qualidade e propriedades mecânicas.

Dentre essas diversas tecnologias, Angulo (2004), Lovato (2007), entre outros, estudam o método dos líquidos densos, e mostram que esse procedimento é eficiente no beneficiamento dos materiais com porosidades e densidades distintas, e ainda é capaz de separar contaminantes da mistura com resultados precisos. Porém, é um método restrito a uso laboratorial devido aos altos custos envolvidos no processo e a sua limitação a respeito de partículas de alta porosidade. O método de separação automática por sensores (ANGULO, 2013; PANDURANGAN *et al.*, 2016) se mostrou eficiente na separação da cerâmica vermelha dos agregados reciclados, mas a qualidade da seleção depende da quantidade de cerâmica presente na mistura, o que é um problema devido à grande variabilidade dos resíduos, além de não ter um desempenho aceitável ao se tratar de grãos com cores semelhantes e possuir um alto custo de processamento.

Além dessas técnicas, Sampaio *et al.* (2015) afirmam que é possível utilizar jiques para realizar uma separação densitária de partículas de 4 a 20 mm de gesso, concreto e alvenaria.

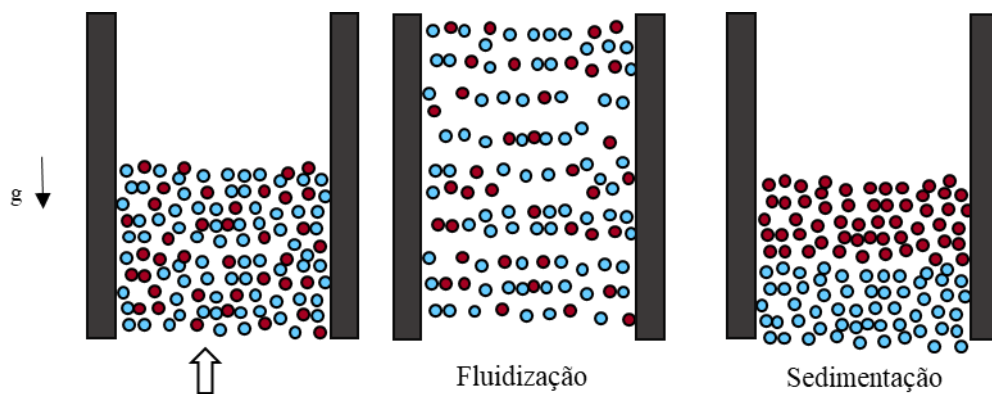
Assim, a jigagem vem sendo apontada como a tecnologia de separação gravimétrica mais apropriada para uso em escala na separação por densidade (COELHO e DE BRITO, 2013; CAZACLIU *et al.*, 2014; SAMPAIO *et al.*, 2016).

2.5 SEPARAÇÃO GRAVIMÉTRICA POR JIGAGEM

O método de separação gravimétrica consiste na movimentação das partículas com diferentes densidades sob a ação de uma força externa, fazendo com que se reconfigurem e, devido ao efeito da gravidade, sejam dispostas de acordo com a densidade. Quando essa força externa é um fluido pulsante, geralmente ar ou água, que provoca movimentos de expansão (dilatação) e contração (compressão) vertical das partículas, esse método é denominado de jigagem (SAMPAIO e TAVARES, 2005).

O processo ganha esse nome devido ao equipamento no qual acontece, chamado de jigue. No jigue, devido à ação do fluido pulsante, o material é estratificado em camadas de densidades diferentes desde a base do equipamento, onde ficam as partículas de maior densidade, até o topo, onde ficam as partículas menos densas. O fenômeno pode ser mais bem explicado na figura 2, que apresenta os três estágios da jigagem: a passagem de um fluido ascendente através de um leito particulado, a fluidificação, em que as partículas são suspensas e caem novamente sucessivas vezes até o estágio da sedimentação, em que os grãos já se reconfiguraram de forma que as partículas mais densas do material caem primeiro e, sobre elas, são dispostas as partículas menos densas (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

Figura 2- Etapas do processo de jigagem



Fonte: Adaptado de Sampaio *et al.* (2016)

A jigagem é um processo utilizado há muitos anos na mineração e, ao longo do tempo, a modernização traz cada vez mais melhorias no seu desempenho. Esse desenvolvimento faz com que a jigagem tenha uma utilização mais ampla, não mais se restringindo apenas ao beneficiamento de carvão e minérios, mas apresentando grande potencial em processos de reciclagem de RCD (PARANHOS *et al.*, 2016).

Sampaio *et al.* (2016) citam como vantagens da utilização da jigagem o baixo custo do equipamento, tanto na aquisição quanto na manutenção; a robustez e resistência do equipamento, possibilitando uma alta capacidade de processamento; a fácil operação e o bom desempenho na separação de partículas maiores e com grandes variações granulométricas; e a não utilização de reagentes, não gerando resíduos no processo.

Costumeiramente, o processo de jigagem a seco, utilizando ar como o fluido pulsante, é utilizado nos casos em que os materiais não podem ser molhados ou que a molhagem interfere no seu beneficiamento. Além disso, a utilização de ar apresenta algumas vantagens em relação à utilização de água: oferece importantes benefícios econômicos e ambientais, além de permitir a eliminação de etapas como a de filtragem e a de secagem, suprimindo também a geração de resíduo líquido; o beneficiamento a seco apresenta maior capacidade de separação, uma vez que as partículas sedimentam até 100 vezes mais rápido no ar do que na água; a estratificação a ar elimina o risco da desagregação dos materiais por imersão e da absorção de água, que pode alterar a densidade dos materiais (SAMPAIO e TAVARES, 2005).

Por outro lado, de acordo com Sampaio e Tavares (2005), o processo a seco também apresenta algumas desvantagens. Dentre elas está a menor eficiência quando comparado ao processo úmido, a influência do tamanho das partículas na eficácia da separação, sendo menor com partículas menores, e a menor precisão de separação, uma vez que o método exige uma diferença clara de densidade entre os materiais. Ainda, os autores citam que a eficiência do método é baixa quando considerado o processamento de materiais com partículas menores que dois milímetros.

Valente *et al.* (2018) realizaram uma avaliação dos equipamentos de separação de RCD no Brasil e concluíram que a jigagem a seco é eficiente para a estratificação de contaminantes mais leves e duros, proporcionando boas perspectivas para sua aplicação industrial. Por outro lado,

possui baixa efetividade na separação de partículas com a densidade muito próxima ou partículas muito porosas.

Sampaio e Tavares (2005) afirmam que a densidade do ar não influencia no processo, mas sim a velocidade da corrente de ar que mantém as partículas suspensas. O controle da velocidade é importante uma vez que velocidades muito altas geram turbulências muito fortes, impossibilitando uma boa estratificação, e velocidades muito baixas não são suficientes para a movimentação necessária das partículas, prejudicando a expansão do leito. Da mesma forma, a frequência e a amplitude das pulsações também precisam ser controladas a fim de garantir a boa separação das partículas e seu retorno ao estado de repouso completo.

Cazacliu *et al.* (2014) desenvolveram um estudo a respeito da separação de gesso, tijolo e concreto em jigagem pulsionada a ar. Os materiais foram britados e tiveram beneficiamento controlado em laboratório. Como resultado, encontraram na camada inferior um material quase livre de gesso, com mais de 90% em massa de concreto, enquanto na camada superior sobrou um material com mais de 80% de gesso em massa. Sendo assim, os autores obtiveram uma alta eficácia do equipamento na separação desses materiais.

Considerando as diversas pesquisas realizadas envolvendo a separação densitária de resíduos de construção e demolição, grande parte obteve resultados positivos. Schamne *et al.* (2016) concluíram que a jigagem a seco é eficiente na remoção da fração pulverulenta do RCD, reduzindo a quantidade de finos. Sampaio *et al.* (2015) colocam que a separação torna o material mais homogêneo, facilitando uma posterior produção padronizada e mais confiável, e ainda afirma que é um processo efetivo para a estratificação de contaminantes do material. Silva *et al.* (2015) concluíram que a jigagem a seco é capaz de recuperar a fração mais densa do resíduo, produzindo agregados até 43% menos porosos. Martín-Morales *et al.* (2013) afirmam que a remoção do gesso e do material cerâmico pode ser efetivamente realizada em um único estágio de jigagem a seco, gerando um produto denso com mais de 90% de concreto.

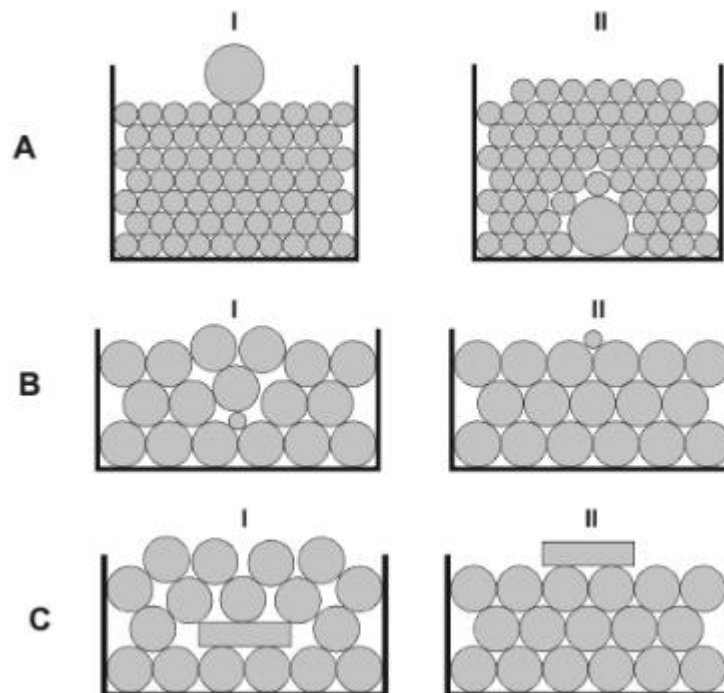
Por outro lado, a jigagem pneumática apresenta alguns empecilhos em relação a sua eficácia. De acordo com Ambrós *et al.* (2017), o efeito parede é recorrente neste tipo de beneficiamento. Os autores constataram uma segregação diferente junto às paredes laterais do equipamento, gerando um padrão de separação horizontal: as partículas mais pesadas ficaram concentradas no centro do leito, enquanto as partículas mais leves se depositaram ao longo das paredes

laterais. Porém, os autores ainda falam que esse efeito pode ser reduzido ou até eliminado na utilização de jiges industriais, devido ao tamanho maior do equipamento.

Ainda, Schamne *et al.* (2016) explicam que a separação em jige pode não ser perfeita devido à proximidade da densidade e à natureza porosa das partículas, fato que leva algumas partículas leves a afundarem junto com as porosas. Esse fato também pode ser explicado pelas diferenças de tamanho das partículas: partículas grandes de densidade menor podem afundar junto com partículas pequenas mais densas, devido à sua massa, o que acaba prejudicando o beneficiamento e a recuperação de um material denso o suficiente para ser usado com segurança como agregado graúdo na fabricação de concretos estruturais.

É possível que a causa das falhas na separação por jige a ar esteja relacionada ao tamanho e ao formato das partículas. Sampaio e Tavares (2005) citaram em sua pesquisa o trabalho de Mayer (1964), no qual foi expressa a relação das características físicas do material com a eficácia da separação. O autor concluiu que, mesmo considerando partículas de igual densidade, o tamanho e o formato exerciam influência no beneficiamento do material, de acordo com a figura 3.

Figura 3- Influência dos diferentes tipos de partículas no beneficiamento gravimétrico



Fonte: Sampaio e Tavares (2005)

Na figura 3, todas as partículas são consideradas com a mesma densidade. Na configuração A, uma partícula maior que as outras estava na parte superior (A-I) e, com a jigagem, muda para a parte inferior (A-II). De acordo com Mayer (1964) *apud* Sampaio e Tavares (2005), a estratificação do leito é entendida como um processo de rebaixamento da sua energia potencial. Assim, ocorre que a energia potencial do leito no estado A-II é menor que no estado A-I, sendo a densidade aparente maior na base do leito.

Na configuração B, a partícula menor que as outras, após a jigagem, subiu para o topo do leito. Esse fato é devido a um distúrbio provocado pela partícula pequena sobre a configuração inicial do material maior. Sendo assim, a energia potencial do sistema é menor no estado B-II do que no estado B-I.

A configuração C diz respeito ao formato das partículas. Mostra que uma partícula retangular em meio às partículas circulares, com o efeito da jigagem, subiu para o topo do leito, enquanto as partículas circulares se reconfiguraram sob ela, inclusive reduzindo o volume de vazios da mistura, gerando uma energia potencial menor no estado C-II do que no estado C-I.

Existem diversas características dos agregados que influenciam no desempenho do concreto, como formato, textura, porosidade, absorção de água, composição, granulometria, mas, principalmente, sua resistência, que depende de sua densidade. Assim, para conseguir um reaproveitamento do RCD como agregado para concretos estruturais, é importante que sua porção mais resistente seja recuperada, o que pode ser feito por meio de uma separação densitária dos grãos.

Como discutido anteriormente, uma forma de se obter um agregado mais denso, descartando sua parte mais porosa é utilizando-se do jigge pneumático. Porém, este processo ainda precisa ser melhorado, uma vez que os trabalhos que testaram este equipamento ainda não obtiveram uma separação efetiva do material, recuperando junto aos grãos mais densos, materiais de menor densidade prejudiciais ao desempenho do concreto, sendo necessário aperfeiçoar este processo.

Uma vez que o equipamento separa o material por diferença de massa, fazendo com que os grãos mais leves sejam elevados pela corrente de ar e os mais pesados fiquem na bandeja inferior, a uniformização do tamanho dos grãos pode colaborar para uma separação mais

efetiva, descartando essa variável do processo. Por isso, este trabalho se propõe a testar a efetividade da separação densitária de grãos de RCD divididos em faixas granulométricas.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A fim de alcançar os objetivos estabelecidos no item 1.4 deste trabalho, o programa experimental foi planejado de forma a tornar possível uma análise precisa e embasada das características do concreto elaborado com agregado reciclado jigado em diferentes faixas granulométricas. Para isso, foram utilizados agregados provenientes do processo de britagem de resíduos de construção e demolição. Desse material, uma parte foi utilizada como agregado graúdo na fabricação de concretos sem passar por nenhuma separação; outra parte foi separada em jigue e sua parcela mais densa foi utilizada como agregado graúdo; e ainda uma terceira parte foi separada em cinco faixas de granulometria distintas que foram jigadas uma a uma, com o objetivo de recuperar a parte mais nobre de cada faixa.

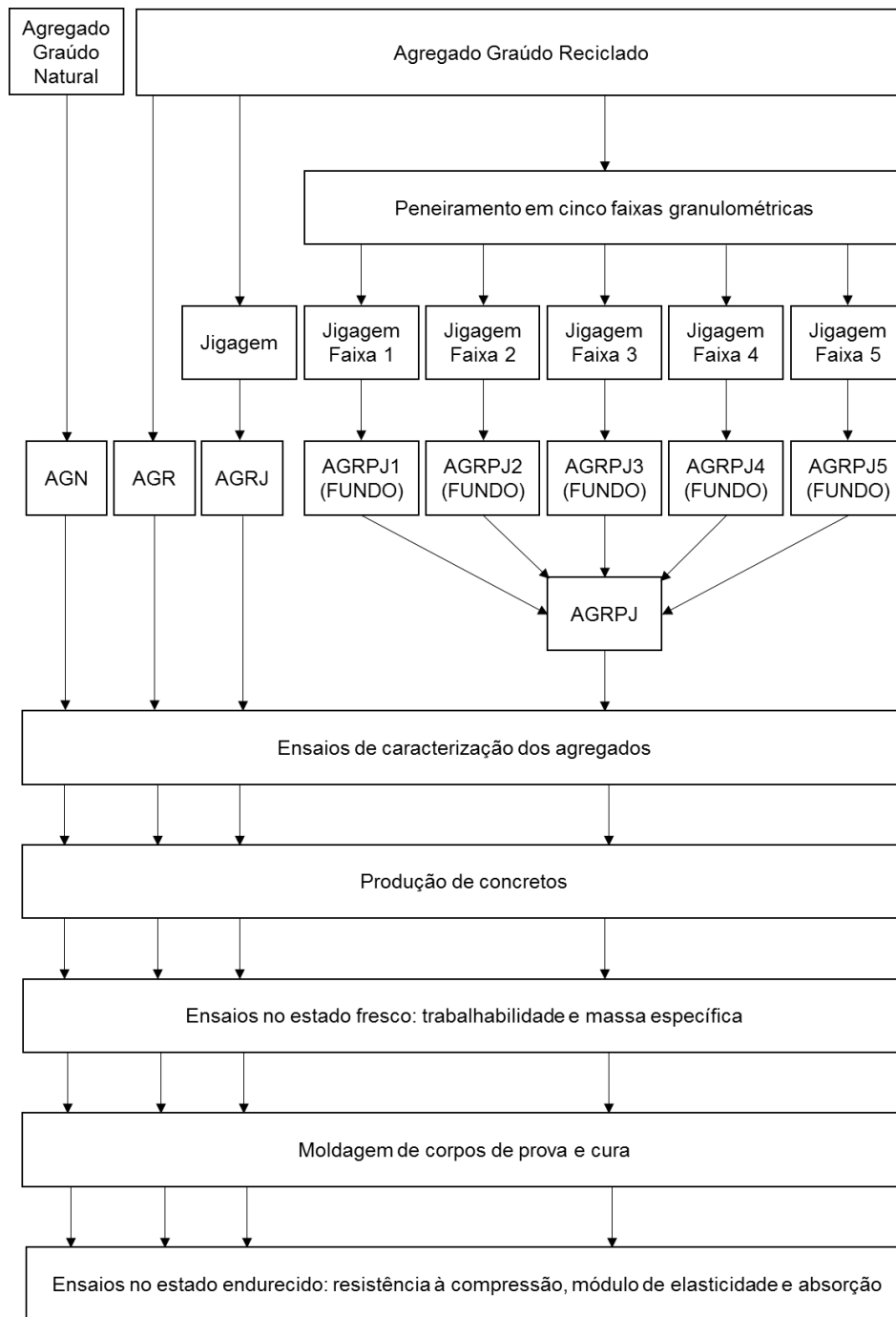
A fim de estabelecer uma comparação entre grãos antes e depois da jigagem, foi realizado o ensaio de composição do material. Após o beneficiamento, para obter um conhecimento aprofundado do agregado, foram realizados ensaios de caracterização. Os ensaios mais comumente utilizados para caracterização de agregados reciclados são os de análise granulométrica, índice de forma, massas unitária e específica e constituição, uma vez que essas propriedades têm influência nas características do concreto, como trabalhabilidade e consumo de água e de cimento, sendo importante seu conhecimento para estabelecer os parâmetros de dosagem.

Foram, então, moldadas quatro famílias de concreto, cada uma com três traços diferentes, variando a relação a/c , sendo a primeira dosada com agregado natural a fim de obter um parâmetro de referência, e as demais com os agregados reciclados.

Os concretos foram submetidos a ensaios nos estados fresco e endurecido, sendo analisadas no estado fresco a trabalhabilidade e a massa específica, e no estado endurecido as propriedades mecânicas de resistência à compressão, por ser a propriedade mais relevante dos concretos, e o módulo de elasticidade, por ser fortemente afetado pelos agregados graúdos da mistura. Ainda no estado endurecido, foi realizado o ensaio de absorção por capilaridade, como parâmetro relevante para a determinação da durabilidade do concreto.

A figura 4 apresenta uma representação esquemática do programa experimental desta pesquisa, utilizando a nomenclatura adotada para cada amostra de agregado.

Figura 4- Programa experimental



Fonte: a autora (2020)

Sendo:

AGN: Agregado Graúdo Natural;

AGR: Agregado Graúdo Reciclado;

AGRJ: Agregado Graúdo Reciclado Jigado;

AGRPJ1: Agregado Graúdo Reciclado Peneirado, passante na peneira #25mm e retido na peneira #19mm, Jigado;

AGRPJ2: Agregado Graúdo Reciclado Peneirado, passante na peneira #19mm e retido na peneira #12,5mm, Jigado;

AGRPJ3: Agregado Graúdo Reciclado Peneirado, passante na peneira #12,5mm e retido na peneira #9,5mm, Jigado;

AGRPJ4: Agregado Graúdo Reciclado Peneirado, passante na peneira #9,5mm e retido na peneira #6,3mm, Jigado;

AGRPJ5: Agregado Graúdo Reciclado Peneirado, passante na peneira #6,3mm e retido na peneira #4,75mm, Jigado;

AGRPJ: Mistura das frações de material depositadas na bandeja do fundo do jigado dos AGRPJ1, 2, 3, 4 e 5, mantendo a proporção granulométrica do AGR.

Com o resultado dos ensaios, foi elaborada uma análise estatística a fim de validar as conclusões desta pesquisa com maior consistência e melhor embasamento científico. Para isso, se faz necessária a identificação das variáveis dependentes e independentes do trabalho.

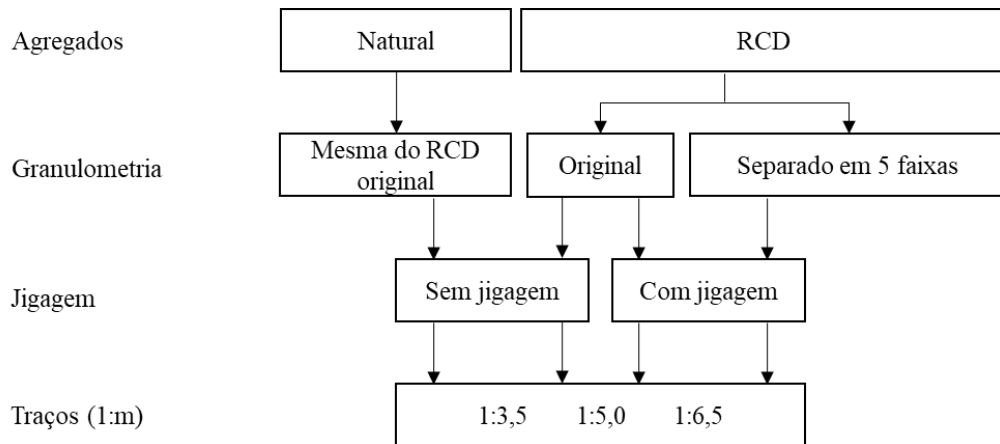
Entende-se por variáveis dependentes os parâmetros que permitem realizar uma análise qualitativa do material estudado, podendo ser medidos e quantificados. As variáveis dependentes deste trabalho são:

- a) resistência à compressão;
- b) módulo de elasticidade;
- c) absorção por capilaridade.

Por outro lado, as variáveis independentes são aquelas que podem ser controladas no processo e que podem exercer influência sobre as variáveis dependentes. Neste trabalho, foram identificadas como variáveis independentes a separação do material em faixas granulométricas, o beneficiamento dos grãos com jigagem e a relação entre agregado e aglomerante para

estabelecer o traço unitário dos concretos produzidos. Sendo assim, foram produzidas três famílias de concreto, cada uma com três traços diferentes, totalizando a produção de nove traços de concreto além do concreto referência (com agregados naturais). O fluxograma da figura 5 exemplifica esquematicamente a relação das variáveis independentes deste trabalho.

Figura 5 - Variáveis independentes



Fonte: a autora (2020)

Para efetivar o programa experimental inicialmente definido, foram realizadas as etapas a seguir:

- pesquisa e obtenção de resíduo de construção e demolição, já britado, de aterro;
- peneiramento do material obtido entre as peneiras de 25mm e 4,75mm – **Amostra 01**;
- jigagem 1: beneficiamento do material passante na peneira de 25mm e retido na de 4,75mm – **Amostra 02**;
- peneiramento do material passante na peneira de 25mm e retido na de 4,75mm em cinco faixas menores de granulometria: 19mm; 12,5mm, 9,5mm; 6,3mm e 4,75mm;
- jigagem 2: beneficiamento do material passante na peneira de 25mm e retido na peneira de 19mm;
- jigagem 3: beneficiamento do material passante na peneira de 19mm e retido na peneira de 12,5mm;

- jigagem 4: beneficiamento do material passante na peneira de 12,5mm e retido na peneira de 9,5mm;
- jigagem 5: beneficiamento do material passante na peneira de 9,5mm e retido na peneira de 6,3mm;
- jigagem 6: beneficiamento do material passante na peneira de 6,3mm e retido na peneira de 4,75mm;
- mistura do material configurado na bandeja de fundo das jigagens 2 a 6, para formar uma amostra única – **Amostra 03**;
- seleção do agregado natural a ser utilizado no concreto de referência de acordo com a granulometria encontrada na amostra 01 – **Amostra 04**;
- caracterização das quatro amostras (agregados naturais e reciclados);
- determinação das três relações a/c para a dosagem de cada família de concretos;
- execução dos concretos com agregados natural e reciclados;
- execução dos ensaios do concreto no estado fresco de trabalhabilidade e massa específica;
- moldagem dos corpos de prova e posterior cura do concreto, de acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2015);
- execução dos ensaios do concreto no estado endurecido de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e absorção por capilaridade;
- análise estatística dos resultados.

Os ensaios realizados nesta pesquisa foram organizados na tabela 2.

Tabela 2- Ensaios realizados

ENSAIO		REFERÊNCIA
	Composição Granulométrica	ABNT NBR NM 248 (2003)
CARACTERIZAÇÃO	Índice de Forma	ABNT NBR 7809 (2006)
DOS AGREGADOS	Massa Específica	LEITE (2001)
	Massa Unitária	ABNT NBR NM 45 (2006)
CONCRETO NO	Massa Específica	ABNT NBR 9833 (2008)
ESTADO FRESCO	Trabalhabilidade	ABNT NBR NM 67 (1998)
	Resistência à Compressão	ABNT NBR 5739 (2007)
CONCRETO NO	Módulo de Elasticidade	ABNT NBR 8522 (2008)
ESTADO ENDURECIDO	Absorção por Capilaridade	ABNT NBR 9779 (1995)

Fonte: a autora (2020)

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

A seguir são descritos os materiais utilizados nessa pesquisa.

3.1.1 Cimento

Foi utilizado cimento Portland CP IV 32 RS, com adições pozolânicas, por sua vasta utilização e disponibilidade na região da execução dos ensaios desse trabalho.

O cimento utilizado possui características físicas e químicas conforme o estabelecido nas normas de cimento Portland pozolânico NBR 5736 (ABNT, 1991) e NBR 5737 (ABNT, 1992).

Possui valores de massa específica de 2,65 g/cm³ e massa unitária de 0876 g/cm³. Para estabelecer os valores de módulo de finura, início e fim de pega, resistência à compressão, perda

ao fogo e percentual de óxido sulfúrico (SO₃) e óxido de magnésio (MgO), foram realizados ensaios pelo fabricante e os resultados estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3- Caracterização do cimento CP IV 32 RS

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

Fonte: disponibilizado pelo fabricante (2020)

3.1.2 Agregado Miúdo

Como agregado miúdo, este trabalho utilizou areia de quartzo, de origem natural, adquirida na região de Porto Alegre, RS, com granulometria passante na peneira com malha de abertura de #4,75mm.

Para realização dos ensaios para caracterização das propriedades físicas do agregado miúdo, o material passou pelo processo de quarteamento, de acordo com a NBR NM 27 (ABNT, 2001),

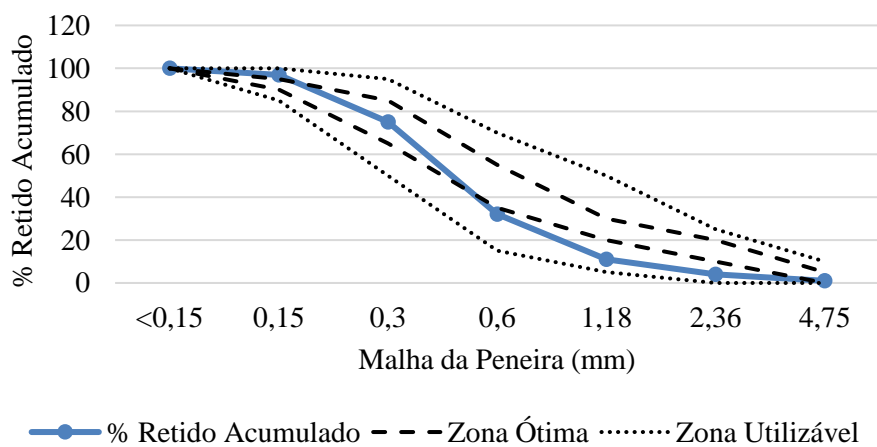
com o objetivo de aumentar a representatividade das amostras, tornando-as mais próximas da totalidade do material. Foram, então, realizados ensaios de composição granulométrica e módulo de finura conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), massa unitária conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006) e massa específica conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009). Os resultados dos ensaios de composição granulométrica estão expostos na tabela 4 e a curva granulométrica do agregado miúdo natural de quartzo está exposta na figura 6.

Tabela 4 - Composição granulométrica do agregado miúdo

Abertura da Peneira (mm)	Agregado Miúdo	
	% retido	% acumulado
4,75	1	1
2,36	3	4
1,18	7	11
0,60	21	32
0,30	43	75
0,15	22	97
<0,15	3	100

Fonte: a autora (2020)

Figura 6 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: a autora (2020)

Os resultados dos ensaios de módulo de finura, dimensão máxima do agregado, massa unitária e massa específica estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Características físicas do agregado miúdo

Ensaio	Unidade	Resultados
Módulo de Finura	-	2,23
Dimensão Máxima	mm	2,40
Massa Unitária	g/cm ³	2,51
Massa Específica	g/cm ³	1,54

Fonte: a autora (2020)

3.1.3 Agregado Graúdo Natural

O agregado graúdo natural usado na produção dos concretos foi de origem basáltica, com granulometria entre as peneiras de 25mm e 4,75mm, proveniente da cidade de Montenegro, RS, e comercializado na região de Porto Alegre, RS.

Para aumentar a representatividade das amostras e torna-las mais próximas do material completo, foi realizado o quarteamento de acordo com a NBR NM 27 (ABNT, 2011). Com o material quarteado, foram realizados ensaios de índice de forma prescrito na NBR 7809 (ABNT, 2006), massa unitária segundo NBR NM 45 (ABNT, 2006), massa específica e absorção descritas na NBR NM 53 (ABNT, 2009). Os resultados dos ensaios de caracterização estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Características físicas do agregado graúdo natural

Ensaio	Unidade	Resultados
Módulo de Finura	-	7,06
Índice de Forma	-	2,20
Massa Unitária	g/cm ³	1,69
Massa Específica	g/cm ³	2,69
Absorção de Água	%	0,02

Fonte: a autora (2020)

Para eliminar a variável do tamanho dos grãos do agregado graúdo natural e reciclado, a granulometria do agregado graúdo natural foi ajustada de acordo com a encontrada para o agregado graúdo reciclado antes da jigagem.

3.1.4 Agregado Graúdo Reciclado

3.1.4.1 Coleta do Material

O RCD utilizado nesta pesquisa foi cedido por um aterro inerte da cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, o qual recebe entulho de obras, reformas e demolições que acontecem na região. Devido à grande variedade de origens do resíduo, é perceptível a presença de diversos componentes, como concreto, argamassa, cerâmica, cerâmica polida, rochas, gesso, vidro, entre outros.

A escolha do aterro se deu pela preferência por fornecedores locais, que realizam a britagem do material que recebem para comercialização, mantendo-se aproximada da realidade dos resíduos provenientes de construção e demolição que são aproveitados como agregados de alguma forma na indústria da construção civil.

Assim, ao chegar no aterro, todo o entulho é britado em britador industrial, conforme a figura 7, gerando um agregado graúdo com dimensão máxima de 25mm.

Figura 7 - Britagem do RCD no aterro



Fonte: a autora (2020)

Por questão de disponibilidade de material no aterro, o resíduo foi coletado em dois lotes distintos, sendo o primeiro em março e o segundo em junho de 2019. No aterro, os agregados foram acomodados em sacos de entulho, pesados, com aproximadamente 20 kg cada. No primeiro lote foram recolhidos 20 sacos, totalizando em torno de 500 kg, e no segundo lote 35 sacos, somando aproximadamente 700 kg. Ao chegar no laboratório, os dois lotes foram misturados e homogeneizados, sendo beneficiados pouco mais de 1.200 kg de RCD.

3.1.4.2 Caracterização

Uma vez coletado, o material foi levado até o Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC), do NORIE/UFRGS, para dar início ao plano experimental desta pesquisa.

Por ser o RCD um material muito variável e inconstante, que depende muito da sua origem, é importante um reconhecimento da amostra com que se vai trabalhar. Para isso, a primeira etapa deste trabalho consistiu em caracterizar o material em relação à sua composição e suas

características após os processos de peneiramento e jigagem, tais como constituição, composição granulométrica, índice de forma, massa específica e massa unitária.

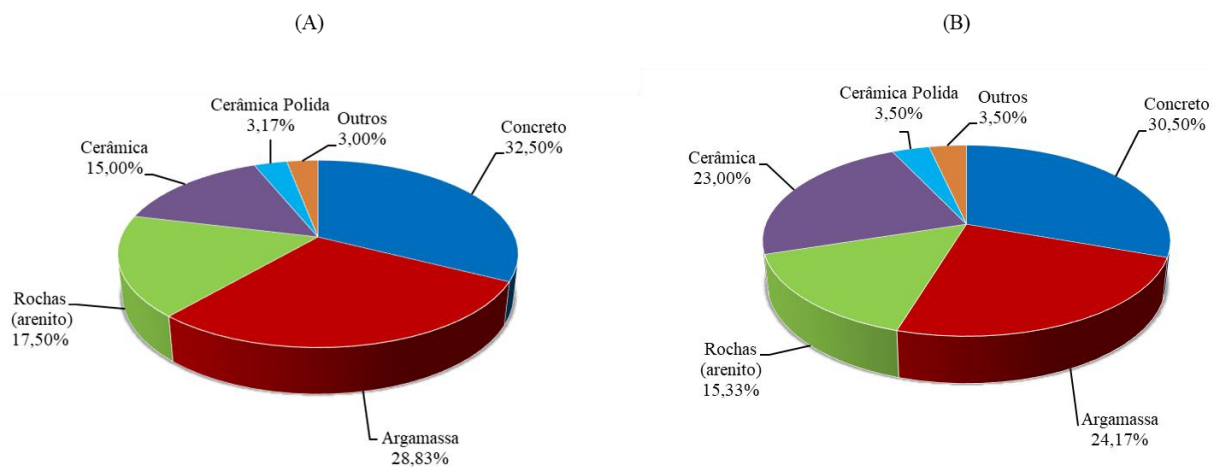
3.1.4.3.1 Composição das amostras de RCD

A análise da composição da amostra tem por objetivo classificar os grãos presentes do agregado de acordo com o material do qual são provenientes, tais como: concretos, argamassas, cerâmicas, rochas, impurezas. É interessante a realização desta caracterização nesta etapa inicial para possibilitar uma comparação da composição do material antes e depois do seu beneficiamento em jigue.

O ensaio de composição não é normatizado e, por isso, foi feito através de uma análise visual e separação manual. Foram coletadas três amostras de 1kg cada, com as quais foi possível realizar o ensaio. Ao final, foi realizada uma média dos três resultados a fim de obter uma composição mais coerente com a realidade do material.

Uma vez que o material foi coletado em dois lotes distintos, foi julgado importante realizar uma composição de cada um deles, a fim de exemplificar a variabilidade do resíduo de acordo com sua origem, com o momento das obras e com a época do ano. A figura 8 mostra a composição dos dois lotes, sendo (A) referente ao lote 01, coletado em março/2019 e (B) referente ao lote 02, coletado em junho/2019.

Figura 8- Composição do RCD coletado em aterro de Porto Alegre, sendo (A) lote 01, coletado em março/2019 e (B) lote 02, coletado em junho/2019



Fonte: a autora (2020)

Para a classificação dos materiais, foram usados os seguintes critérios:

- a) concreto: material composto de cimento, areia e agregado graúdo;
- b) argamassa: material composto de cimento e/ou cal e areia. As partículas de argamassa foram diferenciadas das de concreto pela identificação ou não de agregados graúdos;
- c) cerâmica: material cerâmico não polido;
- d) rochas: material composto por fragmentos de rocha natural;
- e) cerâmica polida: material cerâmico com ao menos uma superfície polida;
- f) impurezas: materiais contaminantes como gesso, vidro, madeira, plástico, entre outros.

Comparando os gráficos da figura 8, pode-se perceber a predominância de grãos provenientes de concreto e argamassa britados em ambos os lotes. Porém, como terceiro componente em maior quantidade, no lote 01 tem-se as rochas e no lote 02 a cerâmica. Dentre as rochas encontradas nos dois lotes, além de basalto e granito, destaca-se a predominância de arenito que, por se tratar de um material de maior porosidade e, conseqüentemente, menor resistência que as outras duas rochas (Isaia, 2007), é um exemplo de material que deve ser eliminado da composição do RCD antes da sua utilização como agregado na confecção de concretos com fins estruturais.

Além disso, nos dois lotes foi encontrada uma pequena quantidade de cerâmica polida e de impurezas, caracterizadas principalmente como vidro, gesso e asfalto, sendo o primeiro mais abundante no lote 01.

Em geral, da mesma forma encontrada nos dois lotes deste trabalho, os resíduos de construção e demolição são predominantemente compostos por concreto, argamassa e material cerâmico, com quantidades menos significativas de rochas e impurezas, como foi constatado por Zordan (1997); Lovato (2007); Lima e Cabral (2013); Kohchem *et al.* (2017); entre outros. Porém, em todas as pesquisas as quantidades de cada material foram bastante distintas, mostrando a grande variabilidade do RCD.

3.1.4.3.2 Peneiramento

A fim de garantir que o tamanho dos grãos estivesse entre as granulometrias de 25mm e 4,75mm e de dividir o material nas diferentes faixas granulométricas utilizadas para a jigagem, foi utilizado um peneirador de vibração mecânica (figura 9).

Figura 9 - Peneiramento do material



Fonte: a autora (2020)

Com o peneiramento, o material foi separado nas cinco faixas granulométricas estabelecidas para este trabalho: 19mm, 12,5mm, 9,5mm, 6,3mm e 4,75mm. Todo o material retido na peneira de 25mm e passante na peneira de 4,75mm foi descartado.

Ainda, uma parte do material foi peneirada apenas com o intuito de descartar os grãos maiores que 25mm e menores que 4,75mm, a fim de realizar uma jigagem com amostra na granulometria completa e um concreto com agregado reciclado não jigado.

Após o peneiramento, as amostras foram homogêneas de acordo com a norma NBR NM 27 (ABNT, 2001), a fim de garantir uma representatividade confiável do todo, obtendo a quantidade necessária de material para a realização dos ensaios e dosagem de todos os traços de concreto. Assim, foram obtidas sete amostras de aproximadamente 60kg cada, sendo elas: AGR, AGRJ, AGRPJ1, AGRPJ2, AGRPJ3, AGRPJ4 e AGRPJ5. Essas amostras foram, então,

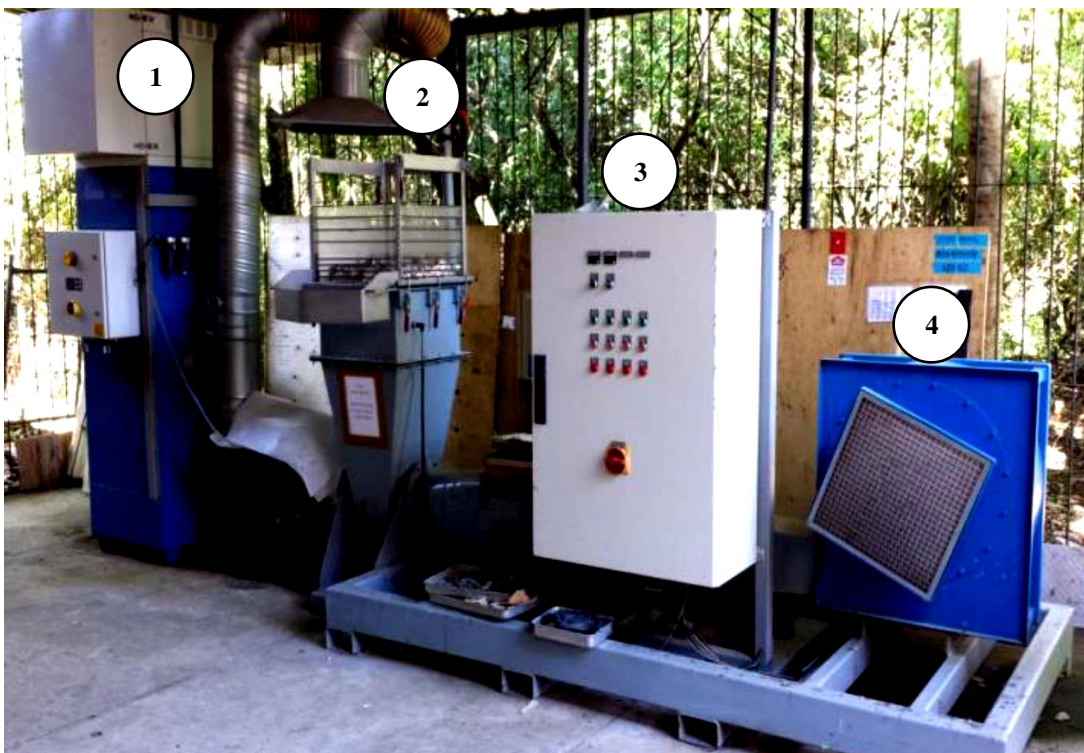
levadas ao Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM), no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, para posterior jigagem.

3.1.4.3.3 Jigagem

Por se tratar de um equipamento com capacidade de separação em grande escala, não utilizar água, não gerar resíduos do processamento e existirem diversos estudos evidenciando seu bom desempenho na separação de agregados graúdos, a separação por densidade do RCD desta pesquisa foi realizada através da jigagem a seco, com a utilização de um jigue pneumático, cujo meio de separação é o ar.

O jigue utilizado neste trabalho foi o modelo AllAir® S-500, laboratorial, apresentado na figura 10.

Figura 10 - Jigue AllAir® S-500



Fonte: Adaptado de Sampaio *et al.* (2016)

Na figura 10, o número 1 consiste na unidade de filtragem dos finos, o número 2 na unidade de separação, onde acontece a passagem da corrente de ar e a divisão das camadas através das

bandejas, o número 3 no painel de controle, onde são configurados os parâmetros do ensaio (frequência e taxa de expansão) e o início e fim do ensaio através de botões de liga e desliga, e o número 4 na unidade de captação de ar.

Foi colocada na unidade de separação quantidade suficiente de material para preencher três bandejas, com altura de 5 cm cada, a fim de obter uma amostra de fundo, uma intermediária e uma de topo. Dessa forma, obtém-se uma camada de fundo representativa, importante para a realização dessa pesquisa. Por isso, utilizou-se aproximadamente 60kg de material por jigagem, recuperando na camada de fundo os aproximados 20kg necessários.

Para operar o equipamento, primeiramente é necessário estabelecer os parâmetros de frequência e taxa de expansão para a estratificação. Para selecionar as configurações a serem utilizadas, foi realizada uma busca por referências de outros trabalhos que já utilizaram o jigue pneumático como meio de separação densitária de partículas de RCD. Foram analisados os parâmetros utilizados por Cazacliu *et al.* (2014), Ambrós (2017), Sampaio *et al.* (2016), Malysz (2018), entre outros, e testados no jigue com a amostra AGRJ (granulometria completa). As configurações utilizadas pelos autores não foram suficientes para que a amostra estratificasse visualmente, e por isso foram realizados testes, partindo dos valores de referência encontrados, até que se obtivessem valores suficientes para um bom movimento das partículas dentro da unidade de separação. Assim, foi utilizada a seguinte configuração:

- a) frequência: 190 rpm;
- b) taxa de expansão do leito: 95%;
- c) tempo de ensaio: 120 segundos.

Com os parâmetros de funcionamento do jigue definidos, o ar é aspirado através de um ventilador centrífugo e pressurizado, por uma válvula rotativa, que cria um fluxo pistonado de escoamento, direcionando-o, através de tubulações, para a unidade de separação. Esta é a etapa de estratificação, em que, através da força do ar pulsionado, as amostras se expandem e voltam à situação inicial diversas vezes, pelo tempo estipulado (120 segundos). Após passar pelas partículas provocando sua movimentação e acomodação, o ar é sugado pelo bocal de exaustão, onde o material pulverulento é captado, realizando um processo de filtragem do ar, que é devolvido limpo para a atmosfera (Sampaio e Tavares, 2005).

Durante a estratificação do leito na unidade de separação, Ambrós *et al.* (2017) comprovaram que pode acontecer o efeito parede, explicado na revisão bibliográfica. Corrêa (2014) também verificou que o efeito parede exerce influência na separação de resíduos de concreto, argamassa e cerâmica, fazendo com que o material de menor densidade se depositasse junto às bordas das bandejas do jig, prejudicando a separação. Porém, o autor coloca que em escala industrial, devido às grandes dimensões do equipamento, é possível que este efeito não seja relevante. Isso foi desconsiderado nessa pesquisa por não ter sido encontrado na bibliografia referências de como evitar o fenômeno ou de como desprezar as amostras próximas às paredes das bandejas, suscetíveis a esse efeito.

Ao final de cada jigagem, foi coletado o material retido na bandeja inferior, buscando a parcela mais densa da amostra. As partículas das bandejas inferiores das amostras AGRPJ 1 a 5 foram misturadas, na taxa de proporção da composição granulométrica do RCD original, que não foi jigado, a fim de gerar uma amostra única com os agregados jigados nas diferentes faixas granulométricas.

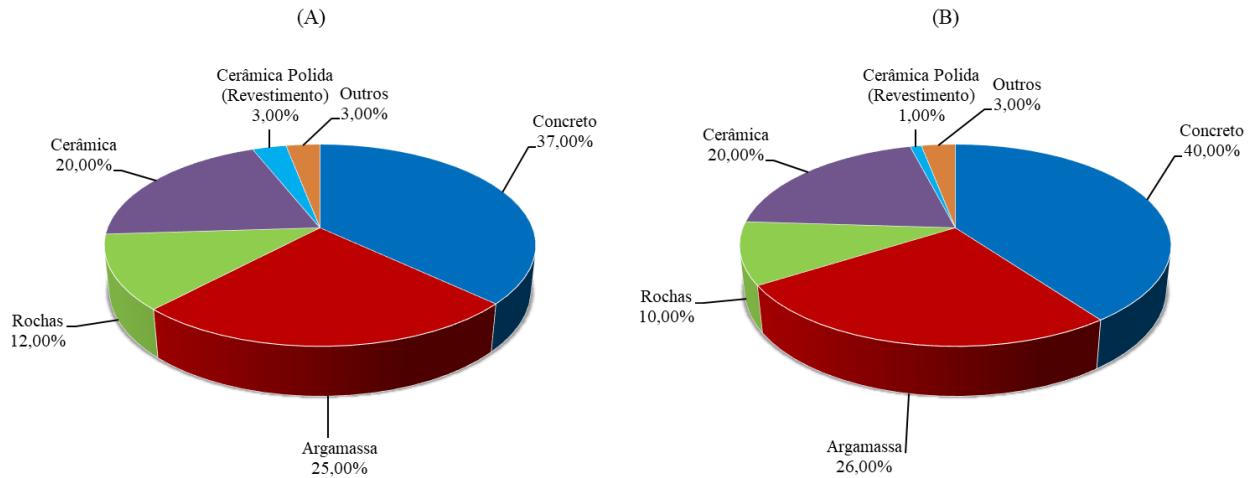
Com todas as jigagens concluídas, os materiais foram transportados de volta para o Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC).

3.1.4.3.4 Constituição

Concluída a etapa de separação densitária, foi realizado novamente o ensaio de constituição das amostras, a fim de verificar se o processo exerceu influência na composição do material. Da mesma forma realizada no item 3.2.1 desse trabalho, a composição dos materiais foi determinada através de análise visual e separação manual.

As partículas foram secas em estufa até constância de massa, quando foram separadas três amostras de um quilograma de cada tipo de agregado, com as quais foi realizada a separação dos materiais e posterior pesagem, determinando a porcentagem em massa de cada material constituinte em relação à massa total de um quilograma. Após as pesagens, foi realizada uma média dos três resultados, que estão ilustrados nos gráficos da figura 11, onde (A) se refere à composição do AGRJ e (B) à composição do AGRPJ.

Figura 11- Composição das amostras após a jigagem, sendo (A) AGRJ e (B) AGRPJ



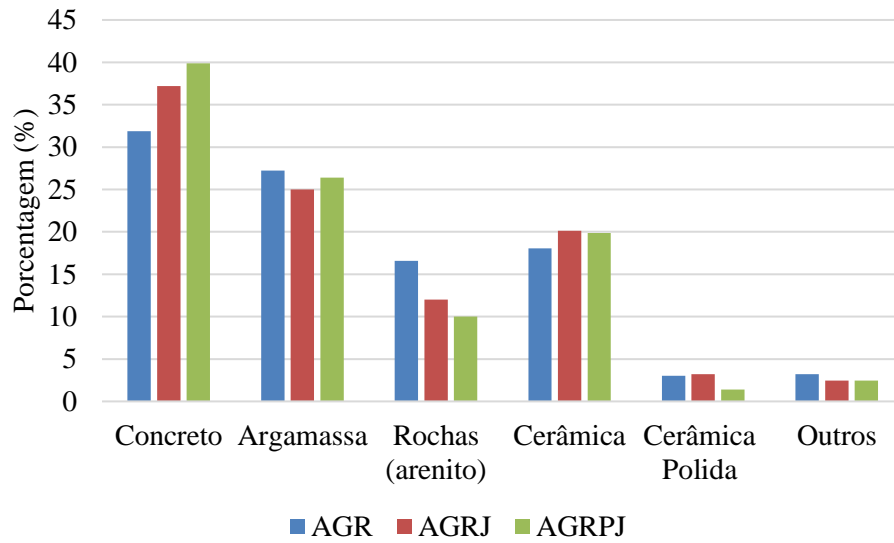
Fonte: a autora (2020)

Pode-se perceber que ambas as amostras apresentaram a mesma ordem de quantidade dos materiais, sendo o concreto e a argamassa os mais significativos, seguidos de cerâmica vermelha, rochas e, em pequenas quantidades, cerâmica polida e impurezas (madeira, gesso, metal, plástico, vidro, entre outros).

A jigagem do material, tanto na granulometria completa quanto em faixas granulométricas, aumentou o percentual de concreto da amostra em aproximadamente 6% no primeiro caso e 9% no segundo. Com isso, pode-se concluir que o processamento do material tem resultados efetivos para a recuperação dos grãos mais densos, porém, o peneiramento das amostras não apresentou grande diferença para a separação.

Para obter uma comparação entre as composições das amostras antes e após as jigagens, calculou-se uma média das composições dos lotes 01 e 02 de RCD antes do processamento. Assim, pode-se constatar que a separação densitária colaborou com o aumento do percentual de concreto. A quantidade de argamassa presente nas amostras se manteve parecida, apresentando uma pequena redução na amostra de AGRJ. O percentual de rochas (arenito) apresentou significativa redução após a jigagem, enquanto as quantidades de cerâmica apresentaram-se maiores. A cerâmica polida apresentou um pequeno aumento na amostra de AGRJ, ao contrário da amostra de AGRPJ, cuja quantidade foi menor. A quantidade de materiais contaminantes, como era esperado, apresentou redução em ambas as amostras jigadas. Essas relações podem ser observadas no gráfico da figura 12.

Figura 12 - Comparação entre composições das amostras de RCD



Fonte: a autora (2020)

O aumento da quantidade de concreto e redução da quantidade de argamassa da amostra de agregado de RCD através da jigagem também foi constatado por Malysz (2018) em uma das três amostras ensaiadas em sua pesquisa. Ambrós (2017) também conseguiu separar uma grande quantidade de concreto do agregado, chegando a resultados de até 90% recuperados, reduzindo a quantidade de cerâmica e impurezas. Ainda, com o mesmo comportamento das amostras deste trabalho, Mondini (2018) obteve um aumento da quantidade de concreto e uma redução da quantidade de argamassa e de impurezas, porém as quantidades de cerâmica reduziram e de rochas aumentaram, diferente do que aconteceu tanto nas amostras de AGRJ quanto de AGRPJ.

3.1.4.3.5 Composição granulométrica e módulo de finura

A fim de padronizar a composição granulométrica de todas as amostras de agregado, foram realizados ensaios de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) nos agregados reciclados que não foram jigados, tomando-os como referência para compor as demais amostras.

Por terem sido descartadas todas as partículas maiores que 25mm e menores que 4,75mm, a dimensão máxima de todos os grãos das amostras é de 25mm e nenhuma delas contém material fino.

A tabela 7 mostra os resultados obtidos da análise granulométrica realizada, as dimensões máximas dos agregados e o módulo de finura para as amostras estudadas.

Tabela 7 - Composição granulométrica do AGR

Abertura da Peneira (mm)	AGR	
	% retido	% acumulado
25	0	0
19	5	5
12,5	33	38
9,5	24	62
6,3	25	87
4,75	13	100
<4,75	0	
MF	6,67	
D _{máx} (mm)	19	

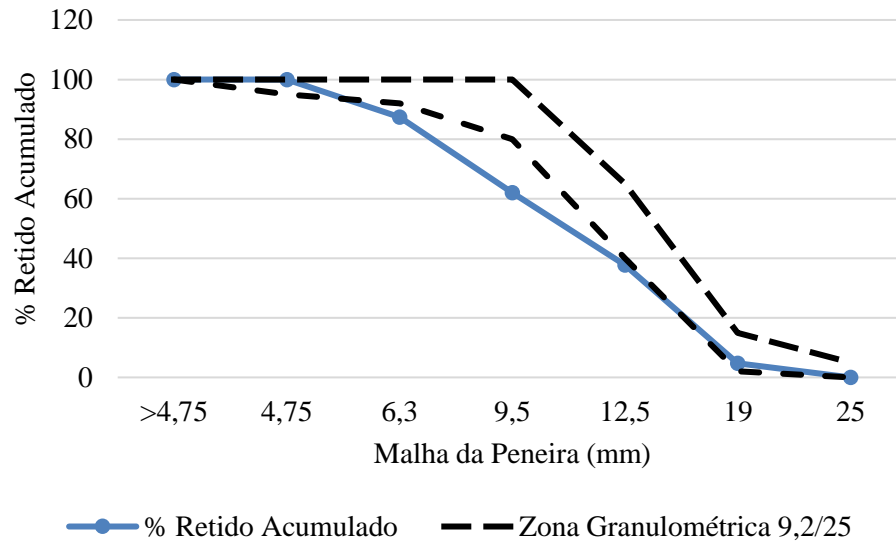
Fonte: a autora (2020)

O módulo de finura da amostra permite estimar o tamanho médio das partículas que formam o agregado, possibilitando estabelecer uma relação entre o tamanho dos grãos e sua superfície específica: quanto maior o valor do módulo de finura, maiores os grãos e, conseqüentemente, menores as suas superfícies específicas.

A partir da composição granulométrica da amostra AGR, foram compostas as amostras de agregado graúdo natural (AGN), agregado graúdo reciclado jigado (AGRJ) e agregado graúdo reciclado jigado peneirado (AGRPJ), ficando, assim, todas as amostras com exatamente a mesma curva granulométrica.

A curva granulométrica das amostras está representada no gráfico da figura 13.

Figura 13- Curva granulométrica ajustada a todas as amostras



Fonte: a autora (2020)

Através da curva granulométrica da figura 14 pode-se perceber que os resultados obtidos para a amostra AGR e replicado para todas as outras ficam próximos dos limites da zona granulométrica 9,5/25 indicada pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), ainda que em algumas peneiras não alcancem a zona mínima, assim como em alguns trabalhos como o de Cabral (2007) e Malysz (2018).

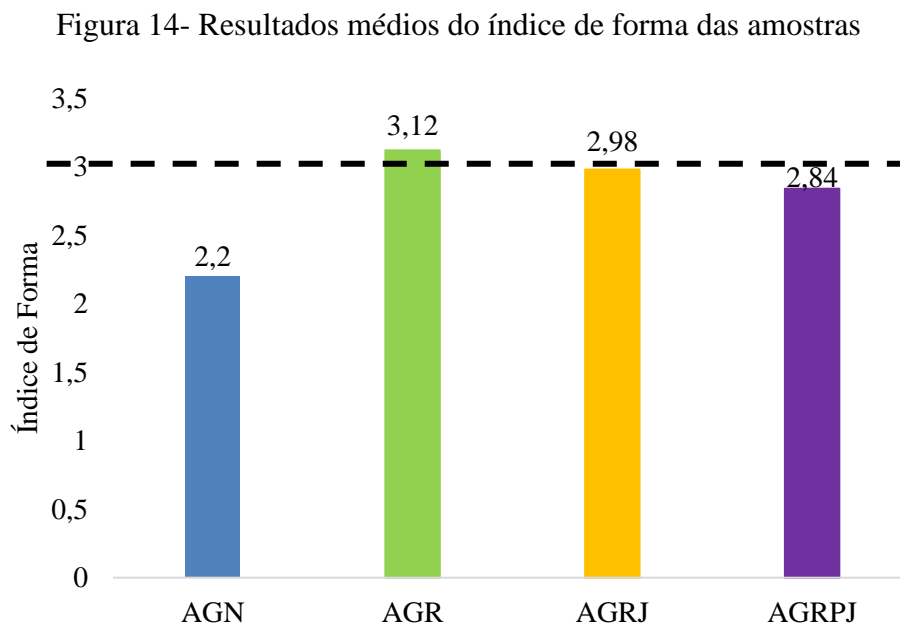
Rohden (2011) estudou a curva granulométrica de britas naturais provenientes de dez centrais de britagem diferente e percebeu que, mesmo que haja um padrão a ser seguido, existe uma grande diferença entre as composições granulométricas dos agregados, sendo que das dez amostras, apenas duas se mantiveram dentro dos padrões estabelecidos pela norma.

Assim, tendo em vista que, em maioria, os agregados naturais também não se enquadram dentro dos limites da norma e com o intuito de se manter o mais próximo da realidade possível, utilizando os agregados reciclados em sua composição original, como são disponibilizados nos aterros, evitando o acréscimo de mais etapas de processamento para sua utilização, não foram feitas alterações na distribuição granulométrica da amostra.

3.1.4.3.6 Índice de forma

A norma NBR 7809 (ABNT, 2006) define índice de forma do agregado como a média ponderada da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos, considerando o número de grãos avaliados, sendo o comprimento sua maior dimensão e a espessura a menor dimensão entre planos paralelos. Os agregados podem ser classificados pelo seu formato: forma ótima (índice de forma próximo de 1) e grãos lamelares (índice de forma maior que 1 com limite de 3).

Para a realização do ensaio de índice de forma foram avaliados 200 grãos de cada amostra, com a utilização de um paquímetro, conforme descrito na norma. Os resultados do ensaio estão apresentados no gráfico da figura 14, comparados ao limite de 3, apresentado pela norma NBR 7809 (ABNT, 2006), representado pela linha preta tracejada.



Fonte: a autora (2020)

Como pode ser visto no gráfico da figura 14, a única amostra que obteve resultados superiores ao limite de 3 foi a de agregado reciclado que não passou pela jigagem. Pode-se concluir, assim, que o processo de jigagem contribuiu para a melhoria do índice de forma dos agregados, reduzindo 4,5% do valor no caso da amostra que foi jigada na granulometria completa, e quase 9% no caso da amostra que foi jigada em faixas granulométricas menores.

Apesar da redução da quantidade de grãos lamelares com o processo da jigagem, todas as amostras ainda apresentaram valores superiores ao índice do agregado graúdo natural, confirmando que o agregado reciclado, em geral, se apresenta mais lamelar, como também constatado por Mondini (2018).

3.1.4.3.7 Massa específica

A massa específica do agregado representa a relação entre sua massa e seu volume seco, desconsiderando poros permeáveis. Por ser adaptada a agregados reciclados, acredita-se que a metodologia de ensaio proposta por Leite (2001) seja a mais adequada para medir a massa específica deste tipo de material.

O método de ensaio desenvolvido por Leite (2001) sugere a pesagem da amostra submersa em água após passar pelo processo de vácuo para a eliminação do ar dos poros dos grãos. Para isso, a amostra é seca em estufa até massa constante e, após, resfriada em temperatura ambiente. Separa-se para o ensaio, então, uma porção da amostra seca de 800 a 1000g, registrando a massa inicial “C” (figura 16a). Coloca-se, então, a amostra em kitasato com água até pouco mais da metade da sua capacidade, cuidando para que a quantidade de água seja suficiente para submergir totalmente o agregado (figura 16b). O conjunto deve permanecer coberto e em repouso por 24h, quando aplica-se vácuo por 15 minutos (figura 16c), agitando o recipiente a fim de eliminar o ar aprisionado entre os grãos. Após o período na bomba de vácuo, completa-se o recipiente com água, cobrindo-o com uma placa de vidro, afim de evitar nova entrada de ar no conjunto. É determinada a massa do conjunto com a placa de vidro “A” (figura 16d). Retira-se, então, a amostra de agregado do kitasato, que é lavado, completado novamente com água e coberto com a placa de vidro para registro da massa final do conjunto “B” (figura 16e). Com as três massas registradas, utiliza-se da Equação 01 para determinação da massa específica do agregado.

$$\gamma = \frac{C}{B-A+C} \quad \text{Equação 01}$$

Onde:

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

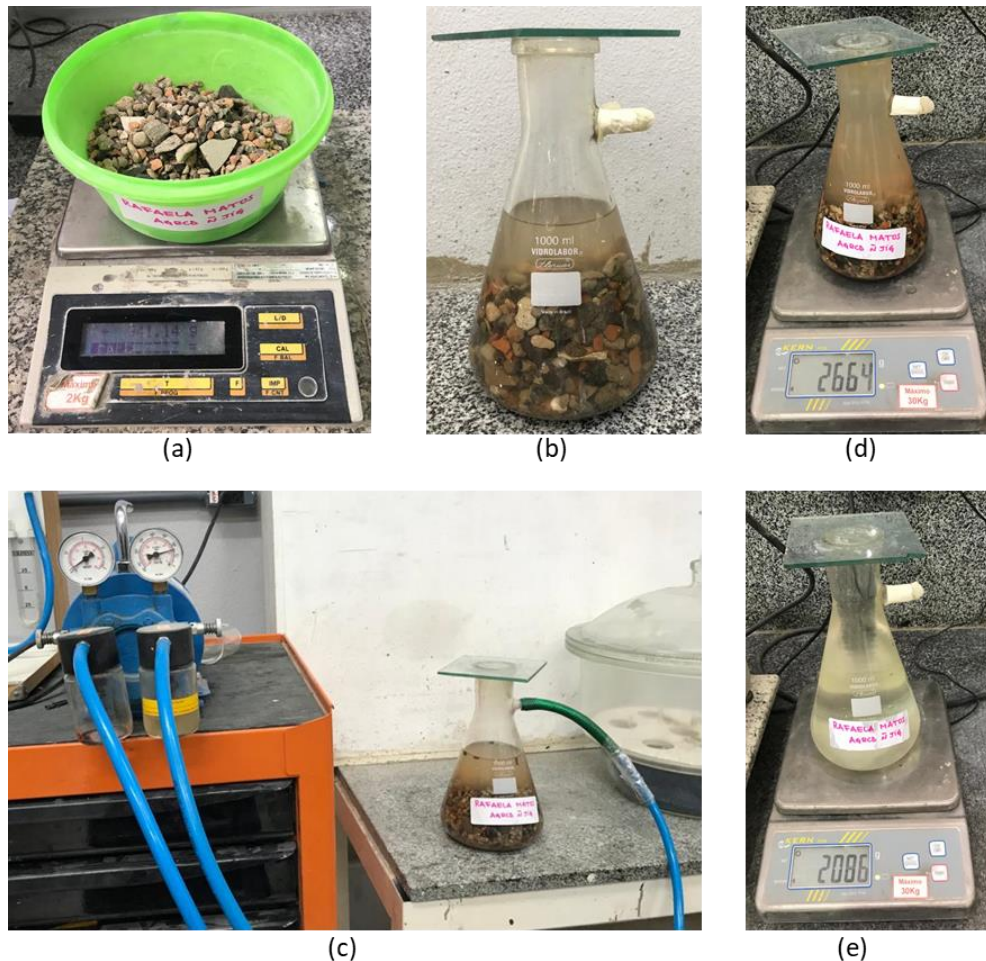
A (g) = massa do conjunto amostra + kitasato + água + placa de vidro

$B (g)$ = massa do conjunto kitasato + água + placa de vidro

$C (g)$ = massa inicial da amostra seca em estufa

As etapas do ensaio estão ilustradas e podem ser melhor entendidas na figura 15.

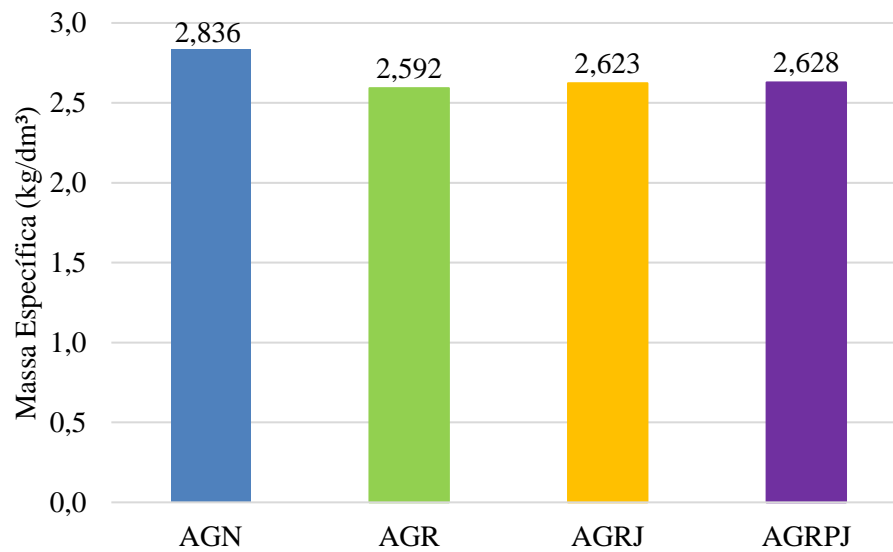
Figura 15 - Etapas do ensaio de massa específica - (a) registro da massa inicial "C"; (b) amostra submersa no kitasato; (c) aplicação de vácuo; (d) registro da massa do conjunto kitasato+amostra+água "A"; (e) registro da massa do conjunto kitasato+água "B"



Fonte: a autora (2020)

No gráfico da figura 16 estão apresentados os resultados de massa específica das amostras de agregado, obtidos através do método sugerido por Leite (2001), em comparação à massa específica do agregado natural (AGN).

Figura 16 – Resultados médios de massa específica dos agregados



Fonte: a autora (2020)

Em comparação à amostra de AGN (Agregado Graúdo Natural), as três amostras de agregado reciclado apresentaram valores menores de massa específica, chegando a uma diferença de quase 9%. Este resultado também foi encontrado em outras pesquisas, como a de Xiao *et al.* (2005), Lovato (2007), Cordeiro (2013), Malysz (2018).

Xiao *et al.* (2005) compararam as massas específicas de um agregado natural e um agregado reciclado, chegando a valores na faixa de 11% menores para o reciclado.

Lovato (2007) realizou os dois métodos de ensaio (proposto por Leite (2001) e o normatizado) em lotes de RCD coletados de aterros. Com o ensaio proposto por Leite (2001), encontrou valores de massa específica até 10% menores para agregados reciclados em comparação aos agregados naturais e, com o ensaio normatizado, quase 15% menores.

Cordeiro (2013) trabalhou com duas amostras de RCD, sendo uma delas de concreto de 15 MPa e outra de concreto de 30 MPa. Com o ensaio normatizado, encontrou um valor 23% menor para a amostra de concreto 30 MPa em relação à amostra de agregado natural. Já com o ensaio proposto por Leite (2001), o resultado foi apenas 8% menor.

Malysz (2018) ensaiou seis amostras de agregados reciclados, jigados e não jigados, com o ensaio proposto por Leite (2001), encontrando valores quase 15% menores em comparação ao agregado natural.

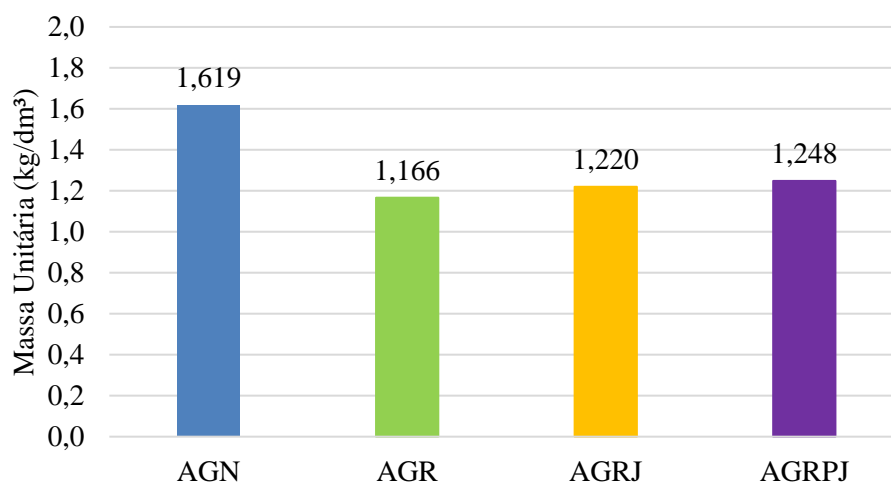
Nesse trabalho, os valores de massa específica encontrados foram proporcionais ao processamento dos agregados, tendo a menor massa específica o agregado reciclado que não foi jigado, e a maior massa específica o agregado reciclado que foi jigado em diferentes faixas granulométricas. Assim, pode-se inferir que o processo de jigagem pode apresentar melhorias, ainda que os valores estejam próximos entre si.

3.1.4.3.8 Massa unitária

A massa unitária representa o volume aparente do agregado, sendo a razão entre a massa de um agregado lançado em um recipiente e o volume deste recipiente. Assim, inclui na medida do volume os vazios entre os grãos. É importante conhecer a massa unitária dos agregados para entender a relação que terão com a pasta na dosagem de concretos, tornando possível transformar um traço em massa para volume e vice-versa. Quanto maior a massa unitária dos agregados, considerando a mesma massa específica, melhor tende a ser o empacotamento dos grãos no concreto (Coutinho, 2000)

O ensaio de massa unitária foi realizado conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006), e os resultados podem ser visualizados no gráfico da figura 17.

Figura 17 – Resultados médios de massa unitária dos agregados



Fonte: a autora (2020)

Da mesma forma que aconteceu com os resultados do ensaio de massa específica, esperava-se que os valores de massa unitária dos agregados reciclados fossem menores em relação ao agregado natural. Através do gráfico da figura 18, pode-se perceber que o processo de jigagem aumentou em quase 5% o valor de massa unitária dos agregados reciclados, enquanto aqueles que passaram pela jigagem em faixas reduzidas de granulometria obtiveram um aumento de quase 7% em comparação ao agregado não jigado (AGR). Assim, pode-se constatar que o processo de jigagem em faixas granulométricas apresenta melhoria do material, tanto em relação ao material não jigado quanto ao material jigado na granulometria completa.

3.2 PRODUÇÃO DE CONCRETOS

Com todas as características dos agregados conhecidas, foi iniciada a terceira etapa deste trabalho, que consiste em: saturação prévia dos agregados, definição dos traços e produção dos concretos, moldagem de corpos de prova, ensaios do concreto no estado fresco e seu procedimento de cura.

Todos os concretos foram produzidos no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC), do NORIE/PPGCI no campus Centro da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3.2.4 Tratamento dos agregados

Os agregados reciclados, devido à alta porosidade que apresentam, absorvem grande quantidade de água quando utilizados em traços de concreto. De acordo com Angulo (2000), Carrijo e Figueiredo (2005), entre outros, essa absorção elevada pode alterar a relação a/c dos concretos através da redução de água disponível para amassamento, prejudicando a trabalhabilidade e, conseqüentemente, influenciando nas propriedades e características dos concretos produzidos. Ainda, a *Cement and Concrete Association of New Zeland* (CCANZ, 2011) afirma que, após a pega do cimento e ao longo da hidratação, a água absorvida pelos poros dos agregados pode migrar para a matriz cimentícia, trazendo benefícios quanto ao efeito da retração dos concretos.

Para evitar a absorção elevada de água na produção dos concretos, é importante que seja realizada uma pré-saturação dos agregados. Na bibliografia existem diferentes opções para esse

processo, como imersão por 24h, aspersão de água durante alguns minutos e predefinição do tempo de saturação. A NBR 15116 (ABNT, 2004) recomenda que os agregados sejam utilizados no concreto com teores de saturação de aproximadamente 80%.

Para manter o teor de saturação proposto pela norma em todos os agregados, todas as amostras foram secas em estufa a temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$, a fim de eliminar qualquer água presente em seus poros, até a condição de massa constante. Depois de totalmente secas, as amostras foram pesadas para registro da massa seca. Os agregados foram, então, submergidos em água por 24h, para registro da massa do material 100% saturado. Após esse tempo, as amostras foram dispostas em peneiras com abertura inferior a 0,15mm, para escoamento da água e secagem, com eventuais pesagens, até que se obtivesse um peso calculado com base nas massas do material seco e 100% saturado, que representasse uma saturação de aproximadamente 80%. Os tempos de secagem dos agregados ficou entre três e quatro horas, sendo estabelecidos pela condição de saturação dos grãos com a superfície seca. As porcentagens de saturação dos agregados após a secagem estão expostas na tabela 8.

Tabela 8 - Percentual de saturação dos agregados

	μ de absorção (%)
AGR	84,4
AGRJ	81,0
AGRPJ	81,6

Fonte: a autora (2020)

Os diferentes tipos de agregados obtiveram diferentes taxas de saturação devido às variações de suas constituições, uma vez que a composição granulométrica de todas as amostras foi uniformizada.

3.2.5 Dosagem experimental

Para a produção dos concretos desta pesquisa foi utilizado o método de dosagem IPT/EPUSP, proposto por Helene e Terzian (1992). O método sugere que o valor do abatimento do tronco de cone, determinado a partir da NBR NM 67 (ABNT, 1998), seja predefinido e fixado como parâmetro para o ajuste da água. Para este trabalho, foi estabelecido o abatimento de $120 \pm$

20mm. Foram realizados três traços em massa de concreto para cada tipo de agregado: um traço rico, com maior consumo de cimento, um traço intermediário e um traço pobre, com menor consumo de cimento. O objetivo da escolha dos três traços para o mesmo agregado é possibilitar a produção de curvas de dosagem, buscando, também, encontrar a quantidade de cimento necessária para a obtenção das resistências desejadas para os concretos com os diferentes tipos de agregados. Assim, torna-se possível comparar os concretos produzidos com os três diferentes traços e com os quatro diferentes agregados e estabelecer o consumo de cimento necessário para cada um dos agregados alcançar as resistências buscadas.

Para cada tipo de agregado foram calculados traços unitários em relação à massa de cimento, nos valores de 1:3,5 (traço rico); 1:5,0 (traço intermediário) e 1:6,5 (traço pobre). Experimentalmente, foi definido o teor de argamassa ideal de 54%, que se adequa para todos os três tipos de agregados graúdos reciclados produzidos e para o agregado natural. Com esses parâmetros definidos, as concretagens foram iniciadas pelo traço médio, seguidas pelos traços rico e pobre. A tabela 9 apresenta os valores do traço unitário em relação à massa de cimento utilizado para este trabalho.

Tabela 9- Traços unitários para o teor de argamassa ideal de 54%

Traço	Cimento (c)	Areia (a)	Brita (p)
1:3,5	1,00	1,43	2,07
1:5,0	1,00	2,24	2,76
1:6,5	1,00	3,05	3,45

Fonte: a autora (2020)

Com os traços estabelecidos, foi calculada a compensação de volume dos agregados reciclados e o ajuste da trabalhabilidade foi realizado pela correção da quantidade de água necessária para atingir o abatimento fixado em 120 ± 20 mm.

Foram produzidos, ao todo, 12 concretos, sendo três traços para cada um dos agregados utilizados: AGN, para obter um valor de referência; AGR; AGRJ e AGRPJ.

As dosagens foram realizadas em betoneira de eixo vertical, após passar por imprimação utilizando uma mistura de cimento, areia e água. A imprimação tem por objetivo eliminar a

aderência da argamassa das misturas à betoneira, criando uma camada de preparo em todo o tambor e nas pás.

Com a betoneira imprimada e a mistura de cimento, areia e água já descartada, foram iniciadas as misturas para as dosagens de concreto na seguinte ordem: inicialmente foram colocados o cimento, a areia e um pouco de água, a fim de iniciar a mistura da argamassa antes da colocação dos agregados graúdos, minimizando a quebra dos grãos pelo contato com a betoneira em movimento. Com a argamassa pronta, foram acrescentados os agregados graúdos e a água, aos poucos, a fim de alcançar o abatimento estabelecido de 120 +/- 20mm. Os valores para as relações a/c ajustados e os abatimentos alcançados em cada mistura estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10- Relações a/c e abatimentos dos concretos

	Relação a/c			Abatimento (mm)		
	1:3,5	1:5,0	1:6,5	1:3,5	1:5,0	1:6,5
AGN	0,42	0,50	0,63	115	110	120
AGR	0,40	0,48	0,60	115	110	110
AGRJ	0,40	0,49	0,61	110	110	110
AGRPJ	0,41	0,49	0,61	110	110	110

Fonte: a autora (2020)

3.2.6 Moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem, todas as fôrmas foram previamente limpas e receberam uma camada de óleo mineral, que funciona como desmoldante para facilitar a desforma. Em cada dosagem foram moldados nove corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10x20cm, para os ensaios dos concretos no estado endurecido, sendo três para o ensaio de resistência à compressão axial, três para o ensaio de módulo de elasticidade e três para o ensaio de absorção por capilaridade. Os procedimentos para moldagem e cura dos corpos de prova foram os recomendados na NBR 5738 (ABNT, 2015), sendo feitos em duas camadas e levados à mesa vibratória por um período

de 15 segundos por camada, a fim de obter um melhor adensamento do concreto dentro das fôrmas.

Assim, foram moldados ao todo 108 corpos de prova, apresentados na tabela 11.

Tabela 11 - Quantidade de corpos de prova

		AGN	AGR	AGRJ	AGRPJ	TOTAL
Resistência à Compressão	1:3,5	3	3	3	3	12
	1:5,0	3	3	3	3	12
	1:6,5	3	3	3	3	12
Módulo de Elasticidade	1:3,5	3	3	3	3	12
	1:5,0	3	3	3	3	12
	1:6,5	3	3	3	3	12
Absorção por Capilaridade	1:3,5	3	3	3	3	12
	1:5,0	3	3	3	3	12
	1:6,5	3	3	3	3	12
Total		27	27	27	27	108

Fonte: a autora (2020)

Depois de moldados, os corpos de prova foram cobertos por sacos plásticos com o objetivo de evitar a perda de água nas primeiras 24 horas, até atingirem o endurecimento. Depois de endurecidos, foram desmoldados e colocados em câmara úmida com temperatura e umidade relativa controladas, fixadas em 23+/-2°C e 90 a 100%, respectivamente, onde ficaram até o momento da realização dos ensaios no estado endurecido.

3.3 ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

A massa específica do concreto no estado fresco é uma característica definida pela relação entre sua massa e seu volume, antes do início da pega, medido após o adensamento do concreto, e leva em consideração o volume de ar aprisionado na mistura.

Durante a moldagem dos corpos de prova de cada concreto produzido foi realizado o ensaio de massa específica no estado fresco, conforme a NBR 9833 (ABNT, 2008). Os resultados deste ensaio estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de massa específica no estado fresco (g/cm^3)

Traço	AGN	AGR	AGRJ	AGRPJ
1:3,5	2,41	2,19	2,19	2,24
1:5,0	2,42	2,22	2,23	2,28
1:6,5	2,42	2,22	2,28	2,22

Fonte: a autora (2020)

De acordo com Moreira (2010), os agregados reciclados possuem menor densidade que o agregado natural e, por isso, é esperado que os concretos produzidos com agregados reciclados obtenham resultados de massa específica no estado fresco menores em relação ao concreto produzido com agregados naturais, independente do traço, como aconteceu neste trabalho e pode ser observado na tabela 8. Como apresentado nos ensaios de caracterização dos agregados estudados, os agregados reciclados possuem massa específica menor que o agregado natural utilizado como referência, consequentemente produzindo concretos mais leves e menos densos, com menor massa específica no estado fresco, como também constatado por Katz (2003), Cabral (2007), Rao *et al.* (2007), Malysz (2018), entre outros.

Ao comparar os resultados dos concretos produzidos com os três tipos de agregado reciclado, percebe-se que a jigagem do material na granulometria completa apresentou maior aumento para o traço de 1:6,5, enquanto os outros traços se mantiveram praticamente iguais. Por outro lado, a jigagem do material em faixas granulométricas menores apresentou aumento da massa específica para os traços de 1:3,5 e 1:5,0, enquanto no traço de 1:6,5 não obteve alteração.

Malysz (2018), ao comparar a massa específica no estado fresco de concretos produzidos com agregados reciclados jigados e não jigados, não obteve aumento expressivo, tendo em alguns casos a massa específica se mantido igual e, em outros, até reduzido. Moreira (2010) obteve valores apenas 3% maiores de massa específica dos concretos no estado fresco ao submeter os agregados reciclados à jigagem. Assim, pode-se notar que, da mesma forma que aconteceu neste trabalho, a jigagem dos agregados não tende a melhorar de forma significativa a massa específica do concreto no estado fresco.

3.4 ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

Após o período de pega e cura, a fim de realizar uma análise das propriedades do concreto no estado endurecido, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e absorção por capilaridade. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC), do NORIE, no campus Centro da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e serão descritos na sequência.

3.4.4 Resistência à compressão axial

O ensaio de compressão axial foi realizado conforme os procedimentos prescritos na NBR 5739 (ABNT, 2007), com os corpos de prova em idade de 28 dias, por ser a idade padrão mais adotada para análise das propriedades mecânicas do concreto.

Para a realização do ensaio, os corpos de prova foram previamente preparados, passando pelo processo de retificação de acordo com a NBR NM 77 (ABNT, 1996), com o objetivo de evitar que possíveis irregularidades provenientes da moldagem exercessem influência no resultado do rompimento na prensa. Para cada tipo de agregado utilizado, foram ensaiados três corpos de prova à compressão, e a prensa utilizada neste trabalho foi do modelo EMIC MCT30 PC 200i.

Com todos os corpos de prova rompidos, foram registradas as cargas de ruptura, utilizadas para calcular a resistência à compressão dos concretos.

3.4.5 Módulo de Elasticidade

Com as informações das cargas de ruptura obtidas no ensaio de resistência à compressão axial, três corpos de prova de cada concreto produzido foram submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade, conforme a NBR 8522 (ABNT, 2008). A norma propõe que o módulo de elasticidade do corpo de prova deve se dar pela média de três resultados, desde que não difiram entre si em mais do que 5%. Nesse caso, o resultado deve ser descartado.

Os resultados de deformação foram medidos na condição de aplicação da carga determinada para cada tipo de concreto, pelo tempo determinado pela norma, através de um extensômetro elétrico.

3.4.6 Absorção por Capilaridade

Para estimativa comparativa da durabilidade dos concretos, foi utilizado o ensaio de absorção por capilaridade, de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 1995), para a amostra de três corpos de prova de cada concreto. Conforme prescrito, foram realizadas pesagens para determinação da massa dos corpos de prova nos tempos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h desde sua colocação em contato com água. Após todas as pesagens, os corpos de prova foram rompidos à compressão diametral, conforme NBR 7222 (ABNT, 2011), para registro da distribuição da água no interior do corpo de prova.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios dos concretos no estado endurecido, citados e explicados na metodologia deste trabalho (item 3.5). Ainda, serão realizadas análises estatísticas para validação da comparação dos valores dos ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e absorção por capilaridade.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Na determinação de resistência à compressão axial foram ensaiados três corpos de prova para cada traço de concreto produzido, totalizando nove corpos de prova por família de concreto.

4.1.4 Resultados Obtidos

Os resultados dos ensaio de cada traço representa a média dos três valores obtidos e estão expostos na tabela 13. Os resultados brutos estão no Apêndice 1.

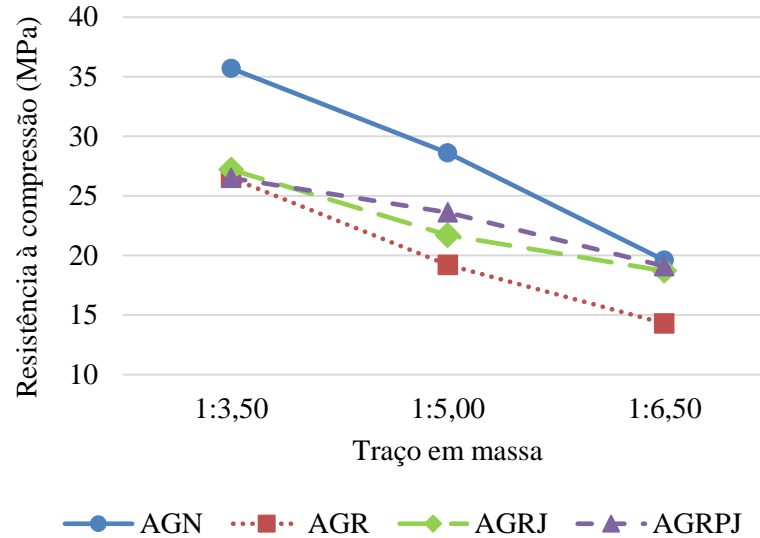
Tabela 13- Resultados do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias

Agregado	Traço unitário	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
AGN	3,5	35,7	0,47	1,31
	5,0	28,6	0,29	1,01
	6,5	19,6	0,23	1,19
AGR	3,5	26,5	0,40	1,49
	5,0	19,2	0,39	2,03
	6,5	14,3	0,07	0,46
AGRJ	3,5	27,2	1,19	4,36
	5,0	21,7	0,10	0,45
	6,5	18,7	0,62	3,30
AGRPJ	3,5	26,5	0,91	3,43
	5,0	23,6	0,35	1,47
	6,5	19,1	0,52	2,72

Fonte: a autora (2020)

Para melhor entendimento, os resultados estão colocados no gráfico da figura 18.

Figura 18 - Média dos resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias



Fonte: a autora (2020)

Com base nos resultados médios dos ensaios, pode-se perceber que não existe um padrão entre os três tipos de agregado reciclado. Dependendo do traço utilizado, os resultados foram variáveis e não apresentaram constância, tendo em vista suas diferenças de processamento. Era esperado que os concretos produzidos com os agregados jigados em faixas granulométricas (AGRPJ) obtivessem maiores resistências para os três traços produzidos, em relação aos agregados AGRJ e AGR, mas este comportamento só foi observado no traço de 1:5,0.

4.1.5 Análise estatística

Com o objetivo de dar maior confiabilidade à análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial, foi utilizado o software SPSS 21.0 para realizar uma avaliação estatística através da análise de variância (ANOVA) de duas vias e de quatro vias, complementadas pelo teste LSD (*Least Significant Difference*), utilizando um nível de significância de 5%, ou seja, os resultados só são considerados significativos e relevantes para a variável de resposta quando apresenta probabilidade inferior a 5%. Os resultados estão apresentados na tabela 14.

Tabela 14 – ANOVA: Efeito da interação agregado x traço unitário na resistência à compressão axial

Variáveis	AGN (1)	AGR (2)	AGRJ (3)	AGRPJ (4)	Efeitos		
	Média ± EP	Média ± EP	Média ± EP	Média ± EP	Grupo	Traço	Grupo x Traço
					<0,001	<0,001	<0,001
3,5	35,7 ± 0,47 ^{b,3}	26,5 ± 0,40 ^{a,3}	27,2 ± 1,19 ^{a,3}	26,5 ± 0,91 ^{a,3}			
5,0	28,6 ± 0,29 ^{d,2}	19,2 ± 0,39 ^{a,2}	21,7 ± 0,10 ^{b,2}	23,6 ± 0,35 ^{c,2}			
6,5	19,6 ± 0,23 ^{c,1}	14,3 ± 0,07 ^{a,1}	18,7 ± 0,62 ^{b,1}	19,1 ± 0,52 ^{b,1}			

Fonte: a autora

^{a,b,c,d} Letras iguais não diferem pelo teste LSD ao nível de 5% de significância (comparação entre os agregados); ^{1,2,3} Números iguais não diferem pelo teste (LSD) ao nível de 5% de significância (comparação entre os traços); EP = Erro Padrão

A partir da análise de variância da tabela 10, considerando que as letras iguais não diferem pelo teste LSD ao nível de 5% de significância para a comparação entre os agregados, pode-se perceber que todos os concretos produzidos com agregados reciclados obtiveram resistências mais baixas em relação ao produzido com agregados naturais.

Para o traço de 1:3,5 o único concreto que apresentou diferença no resultado de resistência à compressão foi o produzido com agregado natural, tendo os três concretos produzidos com agregado reciclado (AGR, AGRJ e AGRPJ) apresentado valores de resistência parecidos o suficiente para não serem considerados diferentes. Assim, para esse traço, a jigagem e o peneiramento dos agregados não resultou em melhoras significativas nos concretos.

Para o traço de 1:5,0, os quatro concretos apresentaram resultados significativamente diferentes, sendo que, entre os três produzidos com agregados reciclados, o concreto com maior resistência foi o com agregado reciclado jigado em faixas granulométricas (AGRPJ), seguido pelo concreto com agregado reciclado jigado na granulometria completa e, com menor resistência, o concreto com agregado reciclado não jigado. Assim, para esse traço, pode-se dizer que o peneiramento dos agregados fez diferença no processo de jigagem e, ainda, que o processo de jigagem no geral, tanto em faixas granulométricas como na granulometria completa, promoveu uma melhora dos agregados, contribuindo para o aumento da resistência do concreto, como pode ser visto nos ensaios de caracterização, em que a jigagem colaborou para uma redução da diferença da massa específica do RCD em relação à do agregado natural na faixa de 15%, além de reduzir em torno de 9% o índice de forma da amostra, tornando o resíduo menos lamelar.

Para o traço de 6,5, o concreto produzido com agregado reciclado não jigado (AGR) apresentou redução significativa da resistência em relação aos concretos com agregados jigados (AGRJ e AGRPJ). Neste caso, o rompimento do corpo de prova se deu no agregado, que possuía resistência inferior à da matriz. Já os dois concretos produzidos com agregados jigados romperam na matriz, mostrando que a jigagem foi efetiva na melhoria da qualidade do agregado reciclado. Porém, a separação do material em faixas granulométricas antes do processamento não apresentou diferença significativa, uma vez que, ainda que o concreto produzido com AGRPJ tenha obtido maior resistência à compressão axial, a diferença em comparação ao concreto produzido com AGRJ não se mostrou significante.

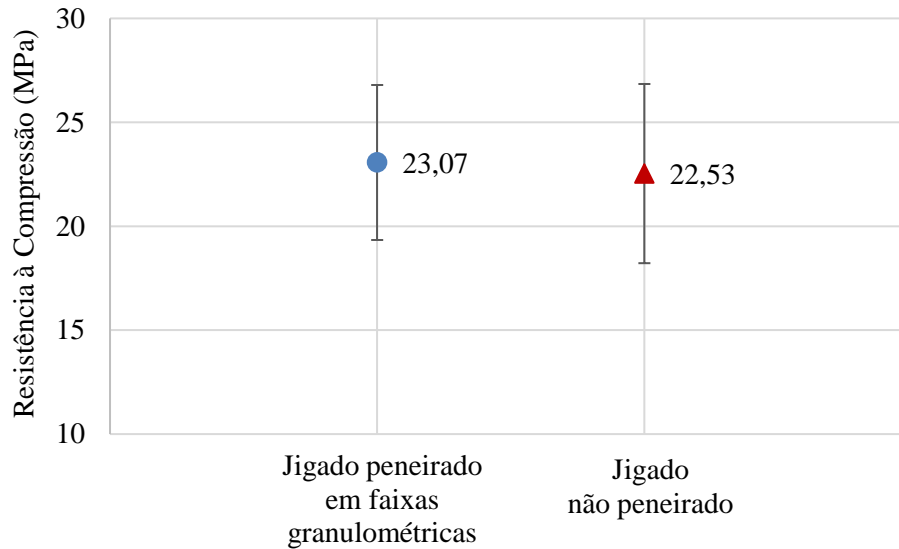
Esses resultados podem ser comparados com outros já encontrados na bibliografia. Zortea (2014b) obteve um valor quase 50% menor para o concreto produzido com RCD em comparação ao produzido com agregado natural para uma relação a/c de 0,4, valor que baixou para 44% utilizando agregados reciclados jigados. Lovato (2007) obteve um descréscimo de aproximadamente 24% na resistência dos concretos ao substituir o agregado natural por agregado reciclado para um nível de resistência de 19 MPa. Mondini (2018) comparando concretos produzidos com agregados reciclados jigados e não jigados obteve diferença significativa nas resistências, obtendo um ligeiro aumento em torno de 4% para todas as relações a/c testadas. Moreira (2010) obteve uma resistência cerca de 29% menor ao substituir agregados naturais por reciclados que não passaram por jigagem, e em torno de 12% menor utilizando agregados reciclados jigados para o nível de resistência de 25 MPa.

Esse comportamento pode se dar pela grande variabilidade do RCD, que não foi vencida nos processos de jigagem. Apesar de reduzir a quantidade de rochas (arenito) e de cerâmica polida, a quantidade de cerâmica vermelha se manteve quase inalterada quando os agregados foram jigados em faixas granulométricas, o que pode ter influenciado na resistência do concreto. Normalmente, a presença de material cerâmico no concreto pode criar um ponto de fragilidade, devido à sua baixa densidade, reduzindo a resistência do concreto e colaborando para um aumento da variabilidade dos resultados.

Por outro lado, para todos os concretos produzidos, o traço unitário apresentou influência nas resistências conforme o esperado, sendo sempre a maior resistência do concreto com o traço mais rico, de 1:3,5, devido a menor relação a/c da mistura.

Foram analisados também os efeitos isolados de cada fator controlável. O gráfico da figura 19 mostra o efeito isolado do peneiramento dos agregados jigados.

Figura 19 - Efeito isolado do peneiramento na resistência à compressão axial

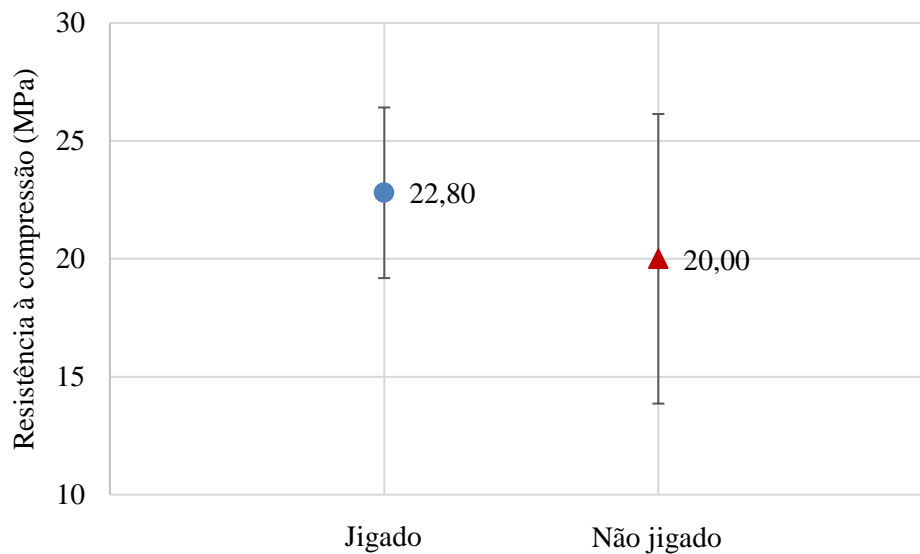


Fonte: a autora (2020)

Como pode ser visto no gráfico da figura 19, as médias dos valores de resistência à compressão axial de concretos produzidos com AGRPJ (peneirado em faixas granulométricas) se apresentam levemente superiores em relação às dos concretos produzidos com AGRJ (não peneirado). Porém, a análise de variância não apresenta melhora significativa e, assim, conclui-se que o peneiramento não exerceu impacto nos valores para o parâmetro analisado.

O gráfico da figura 20 apresenta os resultados da análise isolada do fator jigagem, através das médias dos valores de resistência à compressão axial obtidas para os concretos produzidos com agregados reciclados jigados e não jigados.

Figura 20 - Efeito isolado da jigagem na resistência à compressão axial

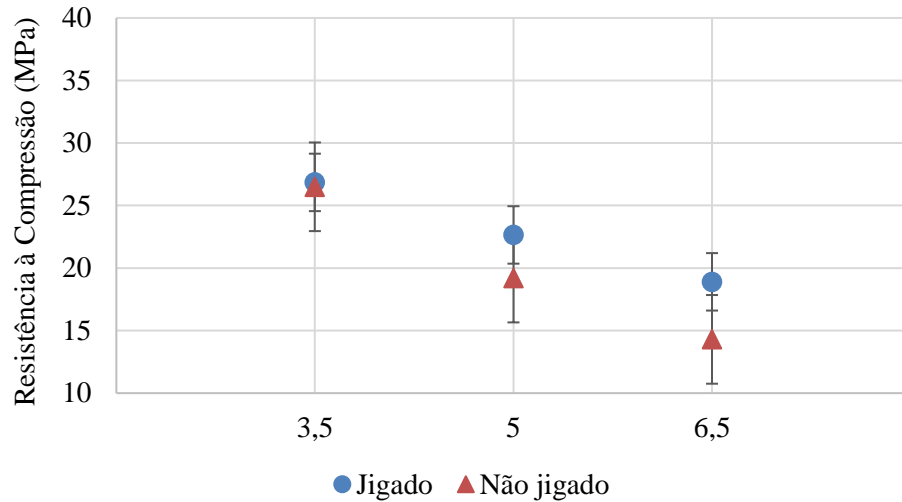


Fonte: a autora (2020)

O gráfico da figura 20 apresenta um resultado significativamente maior de resistência à compressão para o concreto produzido com agregados jigados em comparação ao concreto produzido com agregados não jigados. Assim, pode-se afirmar que o processo provoca uma melhora efetiva para o parâmetro analisado. Como foi comentado na revisão bibliográfica, a resistência do concreto está diretamente relacionada à resistência dos agregados, sendo os concretos de maiores resistências aqueles produzidos com agregados menos lamelares e de maior massa unitária, fato alcançado através da seleção por jigagem.

Para entender se existe relação entre a jigagem dos agregados e o traço unitário do concreto, foi realizada uma análise estatística do efeito combinado da jigagem com o traço. Esses resultados estão apresentados no gráfico da figura 21.

Figura 21 - Efeito combinado jigagem x traço unitário

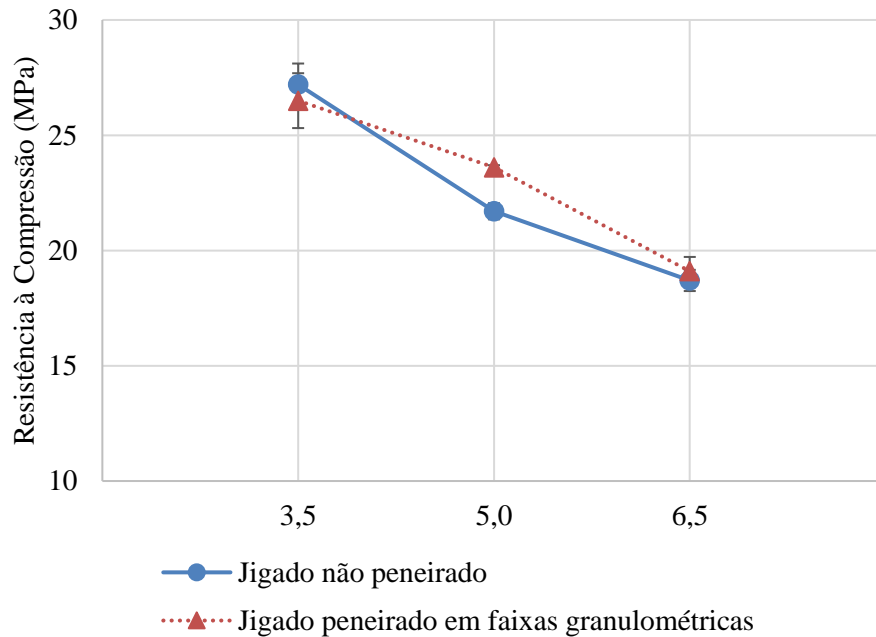


Fonte: a autora (2020)

Pode-se perceber que, na medida que o traço se torna mais pobre (com menor quantidade de cimento e maior relação a/c), a jigagem dos agregados apresentou maior influência nos resultados de resistência à compressão dos concretos. Ainda, para os traços de 1:5,0 e 1:6,5, os concretos mostraram diferença significativa entre as resistências à compressão com agregados jigados e não jigados, fato que não se repetiu para o traço de 3,5, em que a diferença não se mostrou significativa. Esse resultado pode ter sido influenciado pela variabilidade dos materiais que compõe o RCD, já evidenciada nos ensaios de caracterização, e pela falta de uma separação efetiva através da jigagem, mantendo a resistência do agregado mais baixa e, assim, não colaborando para ganhos na resistência do concreto. Dessa forma, constata-se que a jigagem colaborou para um aumento da resistência de concretos produzidos com agregados reciclados nos traços de 1:5,0 e 1:6,5, fato já constatado em outros trabalhos, como o de Corrêa (2014) e Silva (2015), e também nos resultados de massa específica, absorção de água e percentual de concreto nos agregados reciclados jigados (37% a 40%) e não jigados (31,5%) apresentados no item 3.2.7.

Por fim, para entender a interação entre o peneiramento, a jigagem e o traço unitário na resistência à compressão dos concretos, foi realizada uma análise estatística dos três fatores combinados, apresentada no gráfico da figura 22.

Figura 22 - Efeito combinado peneiramento x jigagem x traço unitário



Fonte: a autora (2020)

De acordo com o gráfico da figura 22, pode-se perceber que os concretos produzidos com agregados jigados em faixas granulométricas apresentaram maior resistência à compressão em relação aos concretos produzidos com agregados jigados na granulometria completa apenas para o traço intermediário de $m=5,0$. Para os traços de 3,5 e de 6,5 a diferença não se apresentou significativa.

4.1.6 Impacto da utilização do RCD na resistência à compressão em função do consumo de cimento

A partir das dosagens de concreto realizadas neste trabalho, foram montados gráficos a fim de relacionar as propriedades de cada traço e colaborar para a análise comportamental das famílias de concreto que foram moldadas, comparando os consumos de cimento em função dos traços unitários e das massas específicas dos concretos, para cada tipo de agregado utilizado. As características dos concretos produzidos estão apresentadas na tabela 15.

Tabela 15- Características de dosagem dos concretos

Agregado	Proporção agregados (m)	Resistência à compressão (MPa)	Relação a/c	Massa específica (kg/dm ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)
AGN	3,5	35,7	0,42	2,41	490,0
	5,0	28,6	0,50	2,42	372,6
	6,5	19,6	0,63	2,42	298,3
AGR	3,5	26,5	0,40	2,19	447,4
	5,0	19,2	0,48	2,22	343,0
	6,5	14,3	0,60	2,22	274,1
AGRJ	3,5	27,2	0,40	2,19	447,5
	5,0	21,7	0,49	2,23	343,0
	6,5	18,7	0,61	2,28	281,6
AGRPJ	3,5	26,5	0,41	2,24	456,1
	5,0	23,6	0,49	2,28	351,9
	6,5	19,1	0,61	2,22	273,1

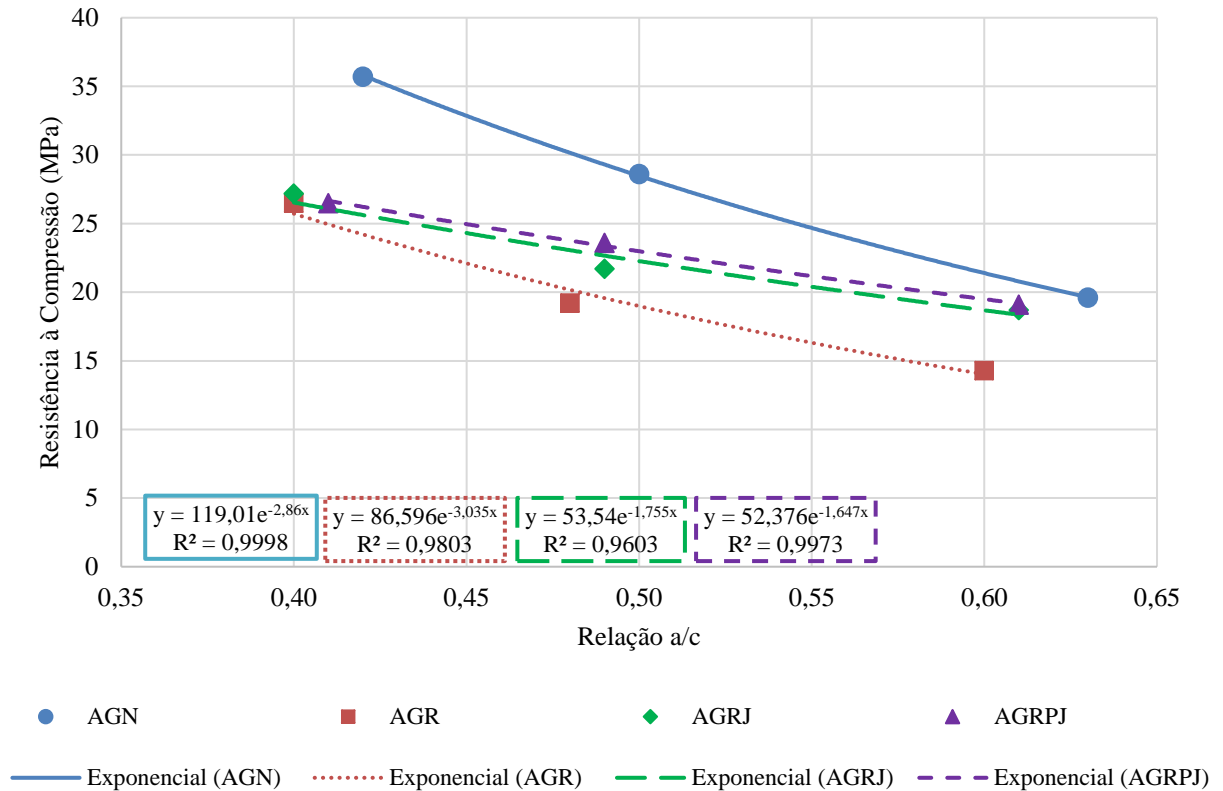
Fonte: a autora (2020)

A partir das informações expostas na tabela 15, as características foram relacionadas e plotadas em gráficos, de acordo com as interações propostas por Abrams, Lyse e Molinari. Por fim, as informações foram compiladas em um diagrama de dosagem.

Duff Abrams demonstrou, em 1919, que a resistência do concreto depende das propriedades da pasta de cimento endurecida, a qual é uma função direta da relação água/cimento (a/c). Assim, colocou que relação água/cimento exerce uma influência inversamente proporcional à resistência à compressão axial do concreto, ou seja, quanto menor a relação a/c , maior será a resistência (NEVILLE, 1997). Assim, baseando-se em pesquisas laboratoriais e teóricas existentes, criou a Lei de Abrams, correlacionando a relação a/c da dosagem com a resistência do concreto em uma determinada idade, a partir da determinação de uma equação exponencial para cada família de concreto produzida, levando em consideração um coeficiente de determinação, que chama de R-quadrado (R^2), indicando o quanto o modelo proposto representa os valores estudados, de forma que quanto mais próximo de um for esse coeficiente, melhor será o ajuste da equação aos resultados da pesquisa.

O diagrama da lei de Abrams está plotado no gráfico da figura 23.

Figura 23 - Resistência à compressão axial em função da relação a/c

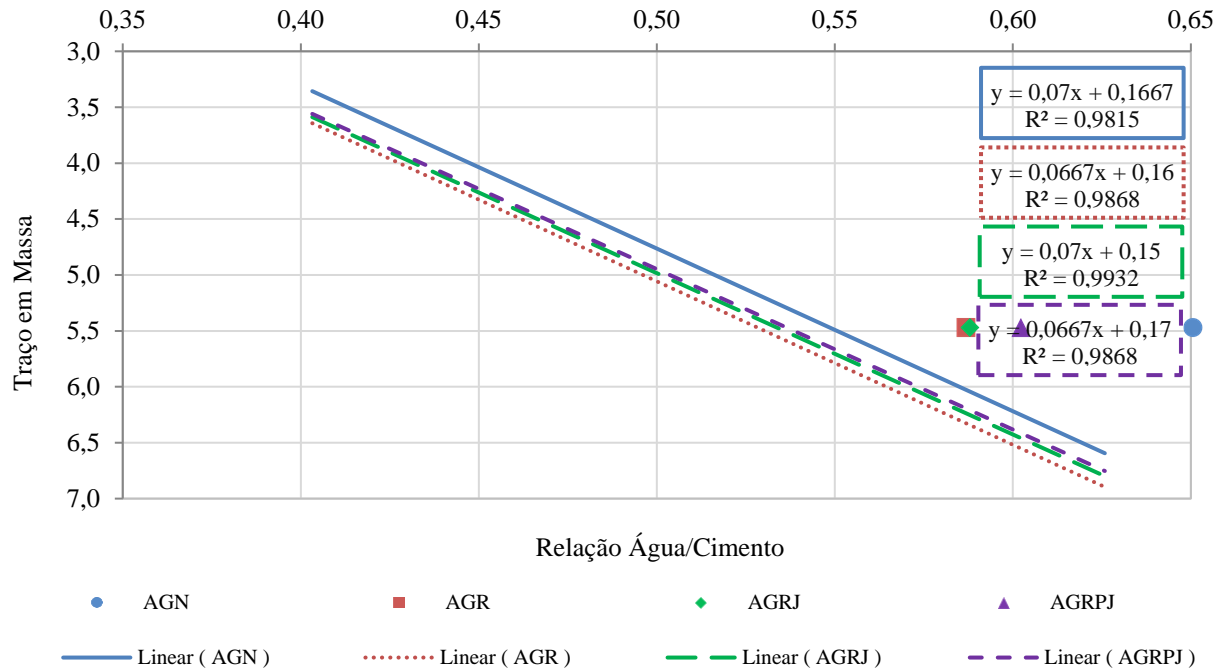


Fonte: a autora (2020)

Observando o gráfico da figura 23, pode-se perceber que o concreto que melhor pode ser delineado pela Lei de Abrams, com valor de R^2 mais próximo de um, é o concreto referência, produzido com agregado natural. Os três concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram valores próximos de R^2 , sendo o mais próximo de 1 aquele produzido com AGRPJ, seguido pelo produzido com AGR e, por fim, AGRJ. Esses resultados demonstram uma maior proximidade do concreto produzido com AGRPJ do concreto referência, mostrando uma melhora dos resultados com o processo de jigsaw em faixas granulométricas.

A lei proposta por Lyse (1932), por outro lado, propõe que a consistência do concreto é função entre o traço 1:m, relacionando cimento/agregados secos, e a relação água/cimento. Os parâmetros da lei de Lyse estão relacionados no gráfico da figura 24.

Figura 24 - Relação água/cimento em função do traço unitário

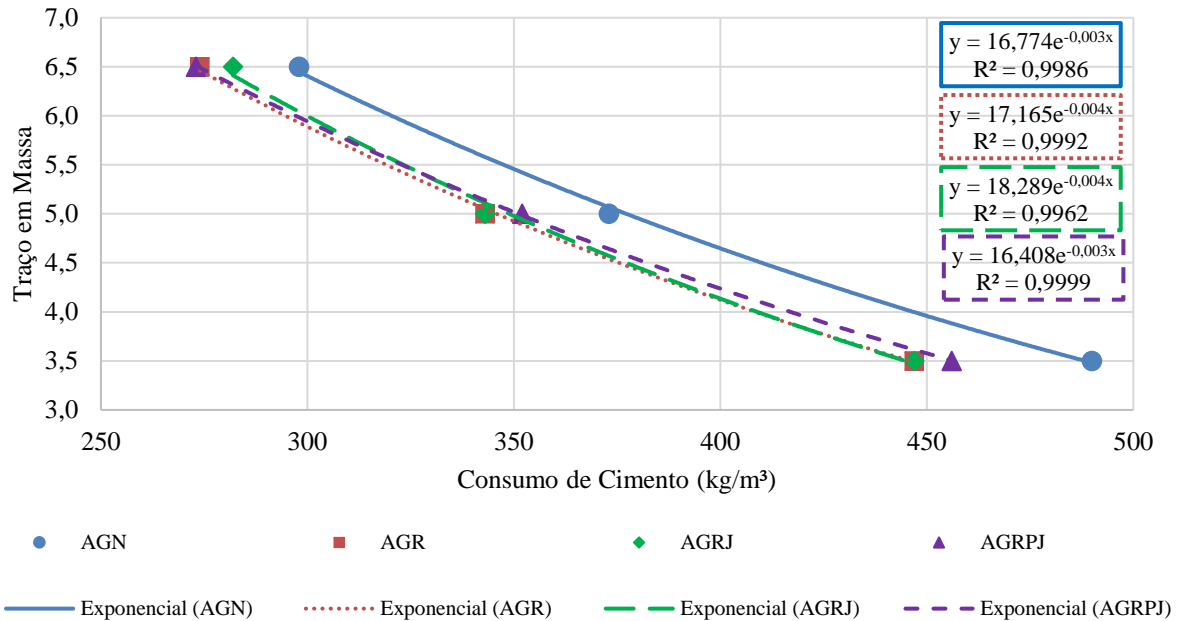


Fonte: a autora (2020)

Pode-se perceber que, para a consistência adotada para os concretos produzidos, as três retas dos concretos com agregados reciclados se apresentam muito próximas, estando um pouco afastadas apenas em relação à reta do concreto com agregado natural.

Por fim, para compor o diagrama de dosagem dos concretos fabricados, foi elaborado o gráfico correspondente à lei de Molinari, que propõe uma curva polinomial para relacionar o consumo de cimento de um concreto com o valor do traço seco, expresso pela relação entre cimento/agregados secos. As equações originárias desse diagrama, considerando seu valor de R-quadrado, estão apresentadas no gráfico da figura 25.

Figura 25 - Traço unitário em função do consumo de cimento

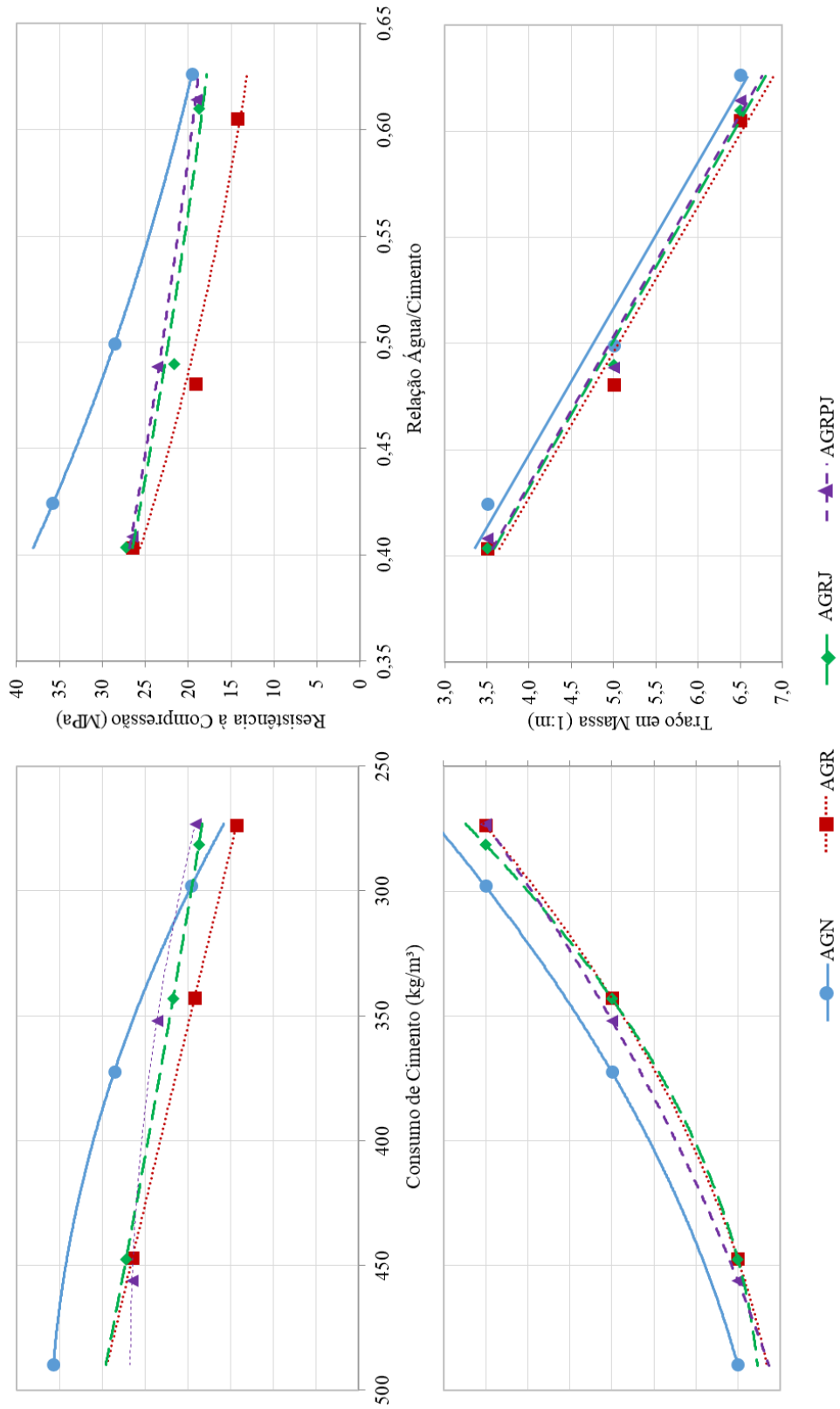


Fonte: a autora (2020)

Analisando o diagrama da figura 25, pode-se perceber que quanto mais rico o traço, maior o consumo de cimento, conforme esperado, sendo o maior consumo para o traço de 1:3,5 e o menor para o traço de 1:6,5, em todos os concretos. Além disso, também se vê que as curvas dos três concretos com agregados reciclados ficaram bastante próximas, destoando apenas da curva do concreto com agregado natural.

Para relacionar os três gráficos supracitados nas figuras 24, 25 e 26, juntamente com uma relação entre o consumo de cimento e a resistência à compressão axial dos concretos, foi elaborado o diagrama de dosagem, que serve para descrever o comportamento dos concretos produzidos, considerando os materiais, o teor de argamassa e a faixa de consistência utilizados. O diagrama de dosagem deste trabalho está apresentado na figura 26.

Figura 26 - Diagrama de dosagem dos concretos aos 28 dias



Fonte: a autora (2020)

Analisando as quatro partes do diagrama de dosagem conjuntamente, pode-se perceber que, de uma forma geral, principalmente para as resistências mais altas, o consumo de cimento nos concretos com agregados reciclados precisa ser bastante elevado para atingir a mesma resistência do concreto referência, produzido com agregados naturais (AGN).

Também é possível perceber que, para atingir a mesma resistência dos concretos produzidos com agregados reciclados, aquele que utilizou AGRPJ necessita de menor consumo de cimento, seguido pelo concreto com AGRJ e, com necessidade de maior consumo, o com AGR. Isso demonstra uma melhora do processo de jigagem em faixas granulométricas para o processamento dos agregados a serem utilizados na mistura dos concretos, uma vez que sua utilização demanda menos cimento para obter os mesmos valores de resistência, o que pode ser explicado por sua maior densidade e forma mais arredondada.

Para entender o impacto do processamento do agregado no consumo de cimento dos concretos, foram calculados os consumos necessários para resistências de 20 MPa e 25 MPa, valores pelos quais passam as quatro curvas no diagrama de Abrams. Os resultados estão apresentados na tabela 16.

Tabela 16 - Consumo de cimento para as resistências à compressão de 20MPa e 25 MPa

fc (MPa)		AGN	AGR	AGRJ	AGRPJ
20	a/c	0,62	0,48	0,56	0,58
	C (kg/m ³)	295,2	354,7	306,4	286,7
25	a/c	0,55	0,41	0,43	0,45
	C (kg/m ³)	352,7	426,4	403,7	404,0

Fonte: a autora (2020)

Para a resistência de 20 MPa, pode-se perceber que, melhorando a qualidade do RCD através da jigagem em faixas granulométricas, é possível produzir concretos com um consumo de cimento ainda menor que o demandado para a produção dos concretos com agregados naturais. Na medida em que a resistência aumenta, no caso dos 25 MPa, em que o agregado é mais solicitado, o impacto, em termos de consumo de cimento, se torna mais evidente, e o

peneiramento dos agregados já não proporcionou uma redução do consumo de cimento em relação aos agregados que foram jigados na granulometria completa.

Como constatado nos ensaios de caracterização dos agregados, a jigagem em diferentes faixas granulométricas colaborou para uma melhora do índice de forma do material, tornando-o menos lamelar, colaborando para um melhor empacotamento dos grãos, aumentando sua massa unitária. Essas características do agregado provocaram uma redução do consumo de cimento necessário para atingir as mesmas resistências de um concreto produzido com agregado natural, tornando possível constatar que, para resistências mais baixas (20 MPa), incluir a etapa de peneiramento antes da jigagem permite ocupar um resíduo, evitando a extração de recursos naturais para o agregado graúdo, sem aumentar o consumo de cimento, mantendo uma menor emissão de CO₂ para a produção dos concretos e, ainda, um menor custo de operação, considerando apenas a substituição do agregado. Para atestar esses benefícios, seriam necessários alguns estudos a respeito dos impactos ambiental e financeiro que a adição da etapa de peneiração traz ao processo.

4.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Para cada concreto produzido foram ensaiados três corpos de prova, porém, os ensaios apresentaram variabilidade nos resultados para alguns concretos. Nesses casos, conforme sugere a norma, descartou-se o resultado dos corpos de provas que apresentaram módulo de elasticidade diferindo mais do que 5% dos outros dois resultados. Por isso, em alguns casos, foram validados apenas dois resultados para o cálculo da média e do desvio padrão.

4.2.4 Resultados obtidos

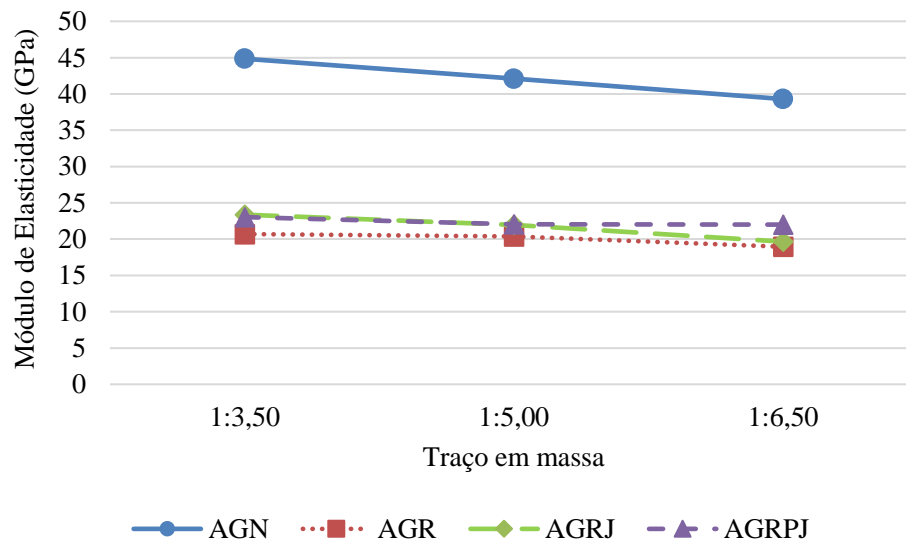
Os valores referentes à média dos resultados de módulo de elasticidade dos concretos produzidos estão apresentados na tabela 17 e plotados, para melhor visualização, no gráfico da figura 27.

Tabela 17 - Médias dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias

Agregado	Traço (1:m)	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)
AGN	3,5	44,85	0,35
	5,0	42,10	0,42
	6,5	39,30	1,56
AGR	3,5	20,70	0,10
	5,0	20,35	0,63
	6,5	18,95	0,49
AGRJ	3,5	23,37	0,64
	5,0	21,95	0,07
	6,5	19,65	0,07
AGRPJ	3,5	23,03	0,04
	5,0	22,07	0,16
	6,5	22,00	0,61

Fonte: a autora (2020)

Figura 27 - Média dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias



Fonte: a autora (2020)

Observando o gráfico das médias de resultados para o módulo de elasticidade, na figura 27, pode-se perceber que o comportamento dos concretos em relação à deformação seguiu o padrão esperado, sendo o módulo de elasticidade proporcional à qualidade da matriz, ou seja, quanto

mais rico o traço, menor a relação a/c da pasta, maior o módulo de elasticidade do concreto, conforme explicado no item 2.3.2 da revisão bibliográfica deste trabalho.

Ainda, pode ser observado que os resultados foram maiores para o concreto referência, produzido com AGN, em relação a todos os concretos produzidos com AGR, conforme o esperado.

4.2.5 Análise estatística

Para obter uma análise com maior confiabilidade a respeito dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), que demonstra a significância das variáveis estudadas. Esses resultados estão apresentados na tabela 18.

Tabela 18 - ANOVA: Efeito combinado agregado x traço unitário no módulo de elasticidade

Variáveis	AGN (1)	AGR (2)	AGRJ (3)	AGRPJ (4)	Efeitos		
					Grupo	Traço	Grupo x Traço
	Média ± EP	Média ± EP	Média ± EP	Média ± EP			
					<0,001	<0,001	<0,001
3,5	44,9 ± 0,35 ^{c.2}	20,7 ± 0,10 ^{a.2}	23,4 ± 0,64 ^{b.3}	23,0 ± 0,04 ^{b.2}			
5,0	42,1 ± 0,42 ^{c.3}	20,4 ± 0,63 ^{a.2}	22,0 ± 0,07 ^{b.2}	22,1 ± 0,16 ^{b.1}			
6,5	39,3 ± 1,56 ^{d.1}	19,0 ± 0,49 ^{a.1}	19,7 ± 0,07 ^{b.1}	22,0 ± 0,61 ^{c.1}			

Fonte: a autora (2020)

^{a,b,c,d} Letras iguais não diferem pelo teste LSD ao nível de 5% de significância (comparação entre os agregados);
^{1,2,3} Números iguais não diferem pelo teste (LSD) ao nível de 5% de significância (comparação entre os traços).
 EP = Erro Padrão

A partir da análise de variância da tabela 18, percebe-se que, para todos os traços, os resultados seguiram o comportamento esperado, tendo maior módulo de elasticidade os concretos produzidos com menor relação a/c. Ainda, os resultados dos concretos produzidos com agregado natural se apresentaram até 54% maiores em relação ao concreto produzido com agregado reciclado sem processamento. Esse comportamento também foi constatado por Leite (2001), que obteve uma redução do módulo de elasticidade de aproximadamente 30% ao substituir os agregados naturais por reciclados no concreto. Andrade *et al.* (2016) obtiveram uma redução menor, de 12% aos 28 dias, utilizando um teor de 100% de substituição dos agregados. Frotté *et al.* (2018) utilizaram uma taxa de substituição de agregados naturais por agregados reciclados de 50% para a produção de concretos e, ainda sem uma substituição total,

encontrou valores de módulo de elasticidade quase 35% menores em comparação ao concreto com agregados naturais.

Para o traço de 6,5, todos os concretos apresentaram diferenças significativas para o parâmetro analisado. Neste traço, a jigagem dos agregados reciclados na granulometria completa apresentou uma melhora sutil de um pouco menos de 4% no valor do módulo de elasticidade do concreto, enquanto com a jigagem em faixas granulométricas o resultado aumentou quase 14%.

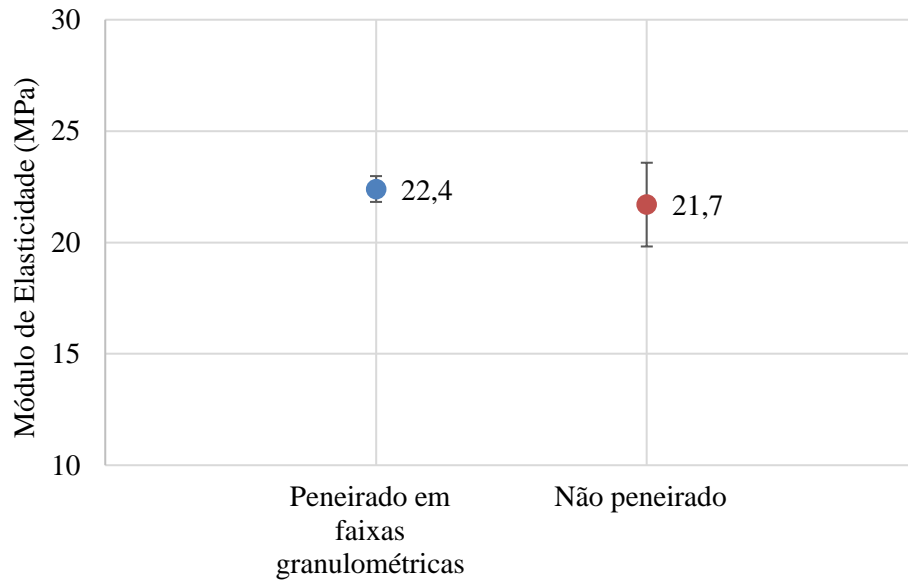
Para os traços de 3,5 e 5,0, os concretos produzidos com agregado natural, com agregado reciclado (AGR) e com agregado reciclado jigado (AGRJ) apresentaram resultados significativamente diferentes, sendo que a jigagem do material contribuiu para uma melhora dos valores de módulo de elasticidade dos concretos em quase 12% no traço mais rico. Alguns autores também constataram que a jigagem dos agregados reciclados promove uma melhora do módulo de elasticidade do concreto, como Corrêa (2014), que encontrou resultados aproximadamente 23% maiores ao processar os agregados reciclados em jig; Moreira (2010) obteve uma melhora de quase 19% promovendo a jigagem dos agregados.

Entre os agregados jigados, peneirados ou não, a diferença entre os resultados de módulo de elasticidade não se mostrou significativa para os traços de 3,5 e 5,0, não sendo possível afirmar que o peneiramento dos agregados fez diferença no processo de jigagem.

Por outro lado, quando se compara os resultados de módulo de elasticidade para os diferentes traços unitários, percebe-se uma diferença de resultados para os três traços dos concretos produzidos com AGN e com AGRJ. Para o concreto produzidos com AGR, os resultados dos traços 3,5 e 5,0 não apresentaram diferença significativa, sendo relevante apenas a diferença apresentada pelo traço de 6,5, enquanto para o concreto produzido com AGRPJ, os resultados dos traços 5,0 e 6,5 não apresentaram diferença significativa.

Para melhor entendimento da influência de cada fator controlável no módulo de elasticidade dos concretos, foram analisados os seus efeitos isolados nos resultados. O gráfico da figura 28 mostra o efeito isolado do peneiramento dos agregados jigados no módulo de elasticidade.

Figura 28 - Efeito isolado do peneiramento no módulo de elasticidade

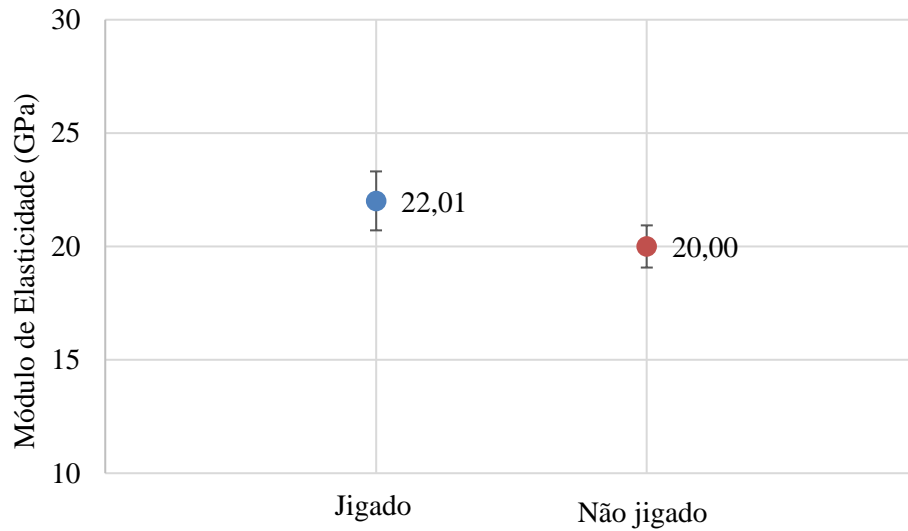


Fonte: a autora (2020)

Como pode ser visto no gráfico da figura 28, a média dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregado peneirado em faixas granulométricas não apresentou melhoria significativa em comparação com os resultados dos concretos produzidos com agregados que não foram peneirados, de acordo com a análise de variância do fator isolado. Assim, conclui-se que o peneiramento não influencia nos valores para o parâmetro analisado.

O gráfico da figura 29 apresenta os resultados da análise isolada do fator jigagem, através das médias dos valores de módulo de elasticidade obtidas para os concretos produzidos com agregados reciclados jigados e não jigados.

Figura 29 - Efeito isolado da jigagem no módulo de elasticidade

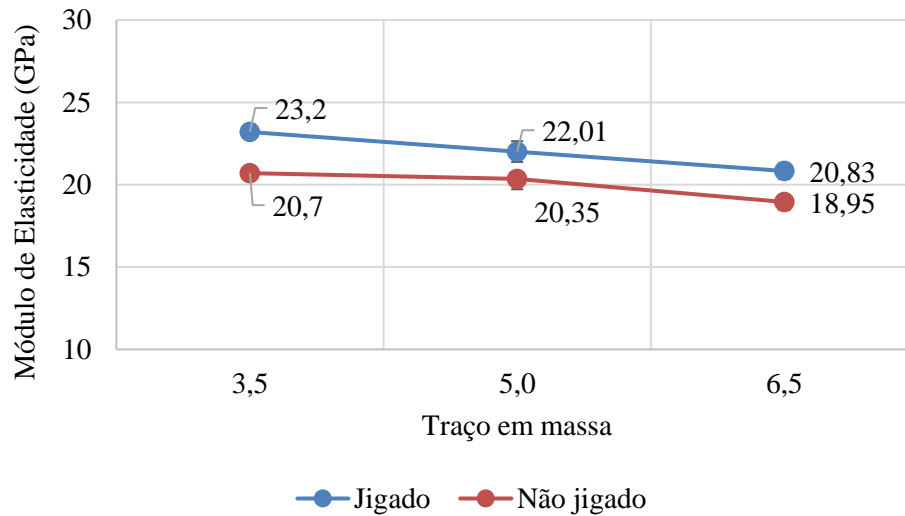


Fonte: a autora (2020)

Pode-se perceber, pelo gráfico da figura 29, que o módulo de elasticidade do concreto que utilizou agregados reciclados jigados é maior em relação ao concreto que utilizou agregados reciclados não jigados. A análise de variância apontou diferença significativa entre os dois valores, sendo possível afirmar que o processo de jigagem influencia positivamente os resultados de deformação dos concretos.

A fim de entender a influência da jigagem dos agregados nos diferentes traços de concreto, foi realizada uma análise estatística do efeito combinado da jigagem com o traço unitário. Esses resultados estão apresentados no gráfico da figura 30.

Figura 30- Efeito combinado jigagem x traço unitário no módulo de elasticidade



Fonte: a autora (2020)

Como esperado, para todos os traços estudados, o valor de módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregados reciclados jigados se apresentou maior em relação àqueles produzidos com agregados não jigados, confirmando que o processo de jigagem do material colabora para um aumento do módulo de elasticidade dos concretos.

Pode-se perceber também que, na medida em que o traço se torna mais pobre (com maior relação a/c), menor é o módulo de elasticidade tanto para os concretos produzidos com AGR quanto para os produzidos com AGRJ, conforme o esperado.

4.3 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

A fim de obter uma estimativa da durabilidade dos concretos, foram realizados ensaios de absorção por capilaridade para três corpos de prova de cada traço de concreto produzido, totalizando nove corpos de prova por família de concreto.

4.3.4 Resultados obtidos

O resultado do ensaio de cada traço representa a média dos três valores obtidos e os dados brutos estão apresentados no Apêndice 03. Os resultados médios de absorção dos concretos estão expostos na tabela 19.

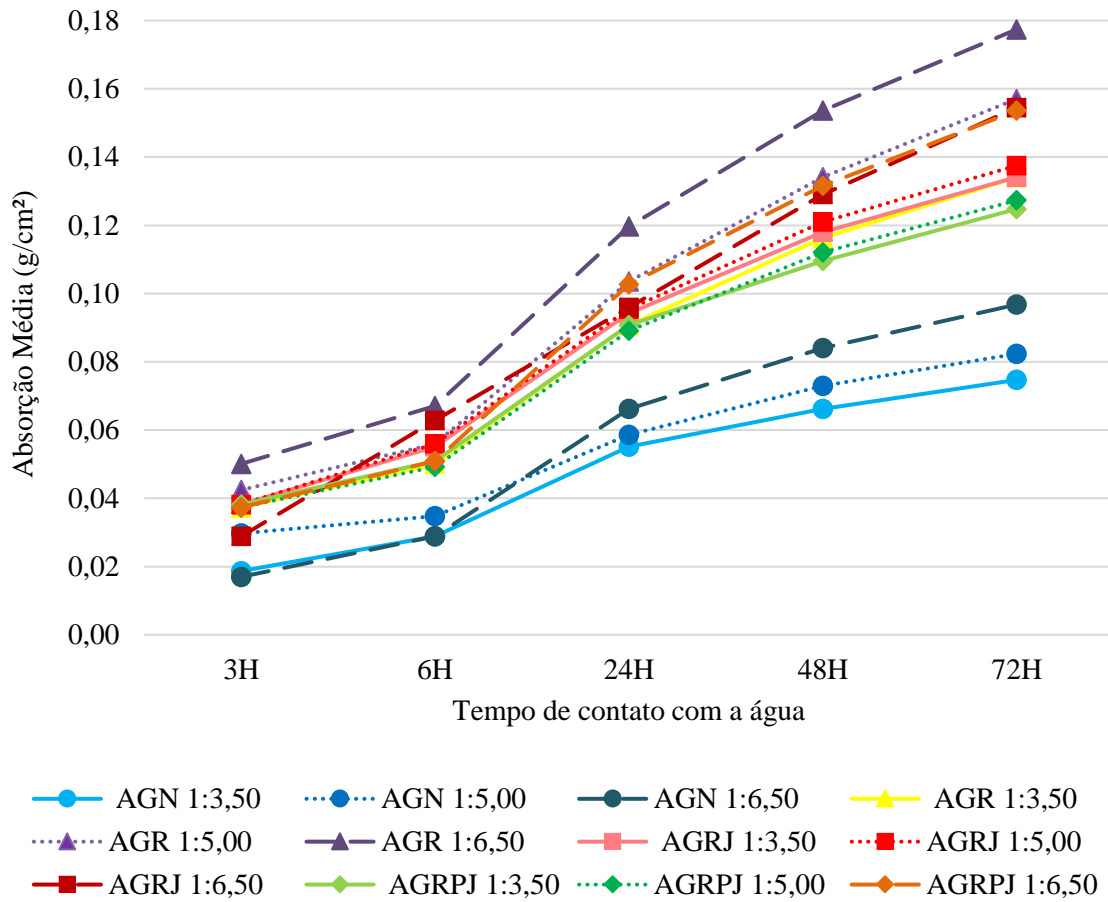
Tabela 19 - Média dos resultados do ensaio de absorção por capilaridade por tempo de contato com a água aos 28 dias

Agregado	Traço em massa	Tempo				
		3h	6h	24h	48h	72h
AGN	3,50	0,019	0,029	0,055	0,066	0,074
	5,00	0,030	0,035	0,059	0,073	0,082
	6,50	0,017	0,029	0,066	0,084	0,097
AGR	3,50	0,037	0,050	0,091	0,116	0,134
	5,00	0,043	0,056	0,104	0,134	0,157
	6,50	0,050	0,067	0,119	0,153	0,176
AGRJ	3,50	0,038	0,055	0,094	0,118	0,134
	5,00	0,034	0,052	0,093	0,114	0,134
	6,50	0,029	0,063	0,096	0,129	0,154
AGRPJ	3,50	0,038	0,051	0,091	0,109	0,124
	5,00	0,037	0,049	0,089	0,112	0,127
	6,50	0,037	0,051	0,102	0,131	0,153

Fonte: a autora (2020)

Para melhor entendimento, os resultados estão plotados no gráfico na figura 31.

Figura 31 – Média dos resultados do ensaio de absorção por capilaridade por tempo de contato com a água aos 28 dias



Fonte: a autora (2020)

Observando o gráfico da figura 31, pode-se perceber que a absorção de todos os concretos produzidos com agregado reciclado foi maior em relação aos concretos produzidos com agregado natural, chegando a um valor até 9% maior no caso do traço mais pobre do concreto com o agregado que não foi jigado. Este resultado vem de acordo com o já apresentado por Bravo *et al.* (2015), Cartuxo *et al.* (2016), Alexandridou *et al.* (2018), entre outros.

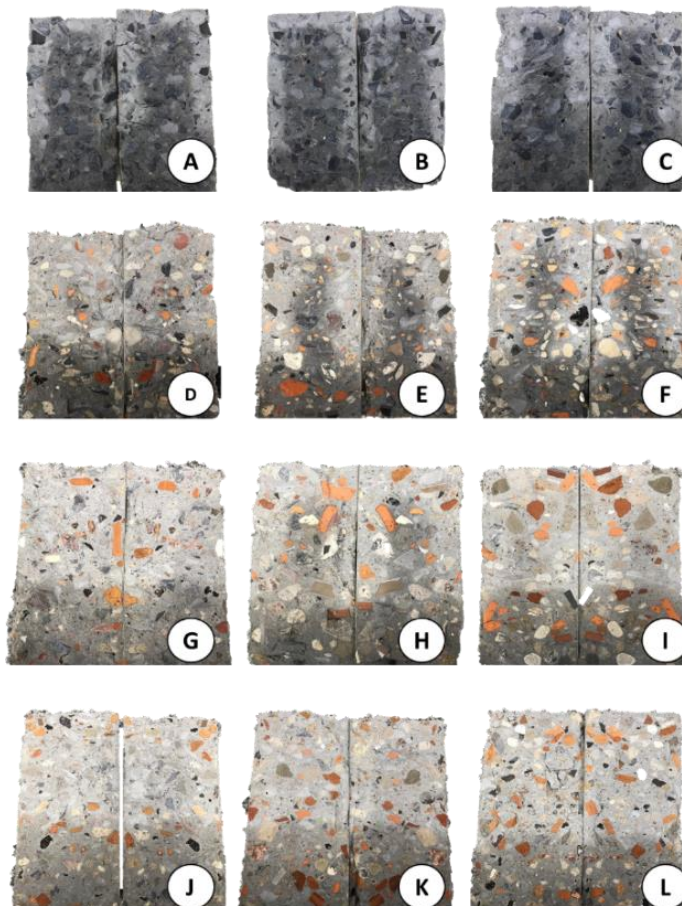
Observa-se, também, que a absorção dos concretos foi inversamente proporcional ao grau de processamento dos agregados. Ou seja, o concreto produzido com o agregado mais processado, jigado em faixas granulométricas (AGRPJ), obteve a menor absorção dentre os concretos produzidos com agregado reciclado, conforme o esperado.

Ainda, os concretos produzidos com agregado reciclado não jigado obteve os maiores valores de absorção. Esses resultados mostram que o processamento em jigue melhora a qualidade dos

agregados, reduzindo sua permeabilidade, fato ainda mais acentuado na jigagem em faixas granulométricas.

Após o ensaio de absorção e a constatação das taxas de absorção de cada tipo de concreto, os corpos de prova foram rompidos à compressão diametral, com o objetivo de medir as alturas de ascensão capilar, conforme apresentado na figura 32, sendo A, B e C referentes aos traços de 1:3,5, 1:5,0 e 1:6,5, respectivamente, do concreto com AGN; D, E e F referentes aos traços de 1:3,5, 1:5,0 e 1:6,5 do concreto com AGRPJ; G, H e I referentes aos traços de 1:3,5, 1:5,0 e 1:6,5 do concreto com AGRJ; e J, K e L referentes aos traços de 1:3,5, 1:5,0 e 1:6,5 do concreto com AGR. No Apêndice 04 constam todos os resultados obtidos.

Figura 32 - Distribuição de água nos corpos de prova, sendo (A) AGN 1:3,5; (B) AGN 1:5,0; (C) AGN 1:6,5; (D) AGRPJ 1:3,5; (E) AGRPJ 1:5,0; (F) AGRPJ 1:6,5; (G) AGRJ 1:3,5; (H) AGRJ 1:5,0; (I) AGRJ 1:6,5; (J) AGR 1:3,5; (K) AGR 1:5,0; (L) AGR 1:6,5



Fonte: a autora (2020)

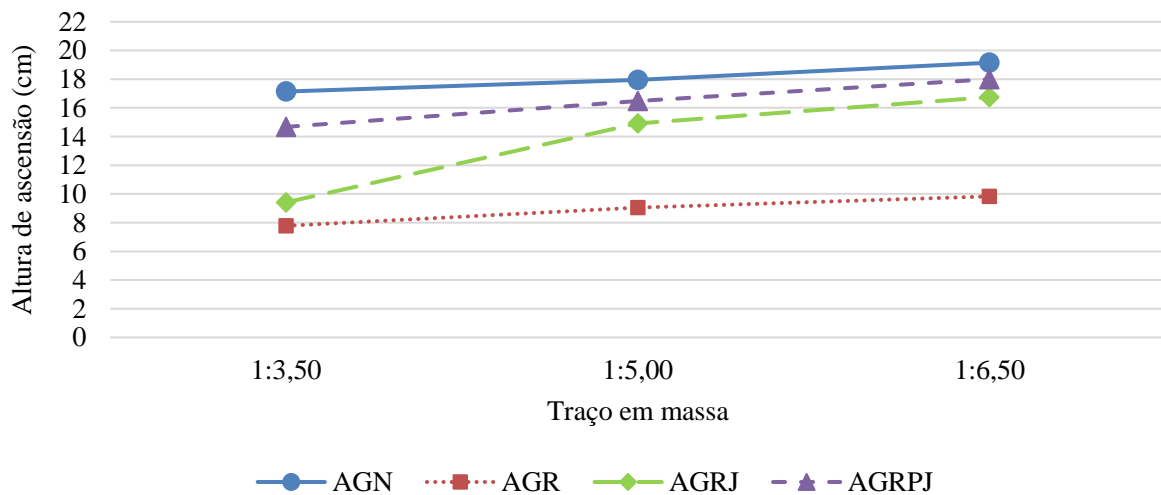
As alturas médias estão expostas na tabela 20 e apresentadas graficamente na figura 33.

Tabela 20 - Média das alturas de ascensão capilar após 72h de ensaio

Agregado	Traço 1:m	Ascensão Capilar Média (cm)
AGN	3,5	17,14
	5,0	17,95
	6,5	19,15
AGR	3,5	7,78
	5,0	9,05
	6,5	9,83
AGRJ	3,5	9,42
	5,0	14,93
	6,5	16,75
AGRPJ	3,5	14,67
	5,0	16,49
	6,5	18,00

Fonte: a autora (2020)

Figura 33 - Alturas médias de ascensão da água no corpo de prova após 72h de ensaio



Fonte: a autora (2020)

Percebe-se que, dos concretos produzidos com agregados reciclados, o que continha o AGRPJ apresentou a maior altura, enquanto o que continha AGR, apresentou a menor. Isso pode ser

explicado devido à maior porosidade dos agregados. No concreto referência (AGN) a altura de ascensão foi maior uma vez que os agregados naturais apresentam baixa porosidade, de forma que a água se espalha pela pasta, ao contrário dos agregados reciclados, que possuem maior porosidade, absorvendo a água e impedindo que ela suba pela pasta, como também constatado por Leite (2001), Butler (2003), Pedro *et al.* (2014), entre outros. Assim, a maior altura de ascensão do concreto produzido com AGRPJ em relação aos outros dois concretos produzidos com agregado reciclado (AGR e AGRJ) representa uma redução da porosidade dos agregados através do processo de jigagem em faixas granulométricas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho se propôs a avaliar o efeito da jigagem de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados em cinco faixas granulométricas (material retido nas peneiras 19mm, 12,5mm, 9,5mm, 6,3mm e 4,75mm), em comparação à jigagem na granulometria completa (todo o material retido nas peneiras de 19mm até 4,75mm), através das propriedades mecânicas de concretos produzidos com esses agregados.

Os ensaios de caracterização dos agregados graúdos reciclados serviram para auxiliar no entendimento dos resultados dos ensaios do concreto no estado endurecido e, assim, suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

A análise da composição dos agregados de RCD apresentou diferença na proporção de cada material para cada tipo de agregado, sendo eles não jigados; jigados na granulometria completa e jigados em faixas granulométricas. A jigagem apresentou melhoras na composição dos agregados, considerando um aumento de 17% na quantidade de concreto, tornando a amostra menos porosa. Ainda, através da jigagem, foram reduzidos os teores de rochas (arenito) em 28% e de contaminantes em 23%. Quando processado em faixas granulométricas, as melhoras foram ainda maiores, aumentando a quantidade de concreto da amostra em 25% e reduzindo os percentuais de cerâmica polida em 54% e de rochas (arenito) em 40%, enquanto a redução de contaminantes se manteve em 23%.

As composições granulométricas de todos agregados estudados foram uniformizadas de acordo com a granulometria do agregado graúdo reciclado (AGR), a fim de obter parâmetros de comparação mais uniformes. Dessa forma, a faixa granulométrica estipulada fica próxima dos limites da zona granulométrica 9,5/25 indicada pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), ainda que em algumas peneiras a zona mínima não seja alcançada.

Os resultados dos ensaios de índice de forma dos agregados reciclados, conforme esperado, foram maiores em comparação ao agregado natural. O agregado reciclado não processado (AGR) foi o único que obteve resultado superior ao limite de 3 da norma. Os agregados jigados na granulometria completa (AGRJ) apresentaram redução das partículas lamelares em até 4,5% em comparação ao AGR, enquanto os agregados jigados em faixas granulométricas (AGRPJ), até 9%. Assim, pode-se concluir que a jigagem em faixas granulométricas foi efetiva para a melhora do índice de forma dos agregados.

Para os ensaios de massa específica dos concretos, as três famílias com agregados reciclados apresentaram resultados inferiores quando comparados ao concreto com agregado natural, chegando a uma diferença de aproximadamente 9% no caso do concreto produzido com AGR. Ainda, para os traços de 1:3,5 e 1:5,0, os resultados de massa específica tiveram um pequeno aumento conforme o grau de processamento do material no jigue, sendo a do concreto produzido com AGRPJ em torno de 3% maior em relação a do concreto com agregados não jigados. Por outro lado, esse fato não se repetiu para o traço de 1:6,5, no qual o concreto produzido com AGRJ apresentou a maior massa específica no estado fresco, sendo aproximadamente 3% maior em relação ao com AGR.

Com os concretos no estado endurecido, após o período de cura de 28 dias, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e absorção por capilaridade, a fim de verificar as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos produzidos com os diferentes agregados reciclados.

O ensaio de resistência à compressão axial apresentou resultados conforme os esperados ao comparar o concreto produzido com agregado natural aos concretos produzidos com agregado reciclado para todos os traços estudados, tendo o primeiro uma resistência até 27% superior aos demais.

Observando os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados, esperava-se que aquele com AGRPJ obtivesse a maior resistência, seguido pelo com AGRJ e, com menor resistência, o com AGR, mas esse comportamento foi apresentado apenas para o traço intermediário, de 1:5,0. Neste traço, o concreto produzido com agregado reciclado jigado em faixas granulométricas apresentou resistência à compressão em torno de 9% maior do que o que utilizou agregado reciclado na jigado granulometria completa, que obteve resistência 13% maior em relação a do concreto com agregados reciclados não jigados. Para o traço de 6,5, os concretos produzidos com AGRPJ e com AGRJ não apresentaram diferenças significativas de resistência de acordo com a análise estatística, diferindo apenas do concreto produzido com AGR, que obteve resistências até 34% menores. Ainda, para o traço de 1:3,5 os três concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram resistências estatisticamente iguais.

Por outro lado, analisando o consumo de cimento demandado pelos concretos produzidos com os quatro tipos de agregado para atingir uma mesma resistência à compressão, concluiu-se que, para resistências mais baixas (20 MPa), é possível substituir o agregado natural por agregado reciclado jigado em faixas granulométricas sem aumentar o consumo de cimento ou ainda, no caso deste

trabalho, reduzindo o consumo. Porém, ao aumentar a resistência (25 MPa), o comportamento já não foi o mesmo, tendo o concreto produzido com AGRJ e AGRPJ apresentado consumos muito semelhantes e em torno de 13% superiores ao produzido com AGN.

Conforme o esperado, os resultados encontrados nos ensaios de módulo de elasticidade apresentaram uma grande redução para os concretos produzidos com AGR, AGRJ e AGRPJ, em torno de 50% em comparação ao produzido com AGN. Além disso, os resultados de quase todos os concretos obtiveram valores coerentes de módulo de elasticidade em relação ao traço unitário, ou seja, quanto mais rico o traço (e conseqüentemente menor relação água/cimento), maior o módulo de elasticidade. Essa diferença não foi grande o bastante para ser considerada significativa estatisticamente para os traços de 1:3,5 e 1:5,0 no caso do concreto produzido com AGR, e de 1:5,0 e 1:6,5 no caso do concreto produzido com AGRPJ.

Analisando os concretos produzidos com agregado de RCD, para o traço de 1:6,5 os resultados de módulo de elasticidade seguiram o comportamento esperado, sendo o maior módulo de elasticidade apresentado pelo concreto com AGRPJ, com uma diferença de aproximadamente 12%, seguido pelo produzido com AGRJ, com um valor de módulo apenas 4% maior o que produzido com AGR. Para os traços de 1:3,5 e de 1:5,0, o valor do módulo cresceu 13% e 8%, respectivamente, com a substituição do AGR pelo AGRJ, mas não apresentou diferença significativa entre o concreto produzido com AGRJ e o produzido com AGRPJ.

Por fim, o ensaio de absorção por capilaridade apresentou valores coerentes e conforme o esperado. A absorção dos concretos com agregado natural se apresentou menor em relação a todos os concretos produzidos com agregado reciclado, chegando a uma absorção quase três vezes menor quando comparado com o concreto produzido com AGRJ para o tempo de 72h de ensaio.

Comparando os três concretos com agregados de RCD, os resultados se mostraram bastante variáveis de acordo com o traço do concreto. Para o traço de 1:3,5, o processamento em faixas granulométricas apresentou uma melhoria de apenas 3% em relação à jigagem na granulometria completa, enquanto no traço de 1:6,5 essa melhoria subiu para 13%, tendo os resultados reduzidos em 40% no traço de 1:5,0. Esse comportamento variável também foi observado para o concreto com AGRJ em relação ao concreto com agregado reciclado não jigado.

Esse comportamento variável não foi reproduzido nas alturas de ascensão capilar. Neste caso, o concreto com AGN apresentou os maiores valores, uma vez que a baixa permeabilidade dos agregados faz com que a água penetre na pasta, tornando-se visível uma maior altura de água com

o rompimento dos corpos de prova à compressão diametral. Seguido deste, está o concreto produzido com AGRPJ, com uma diferença nas alturas de ascensão na faixa de 6%. O concreto produzido com AGRJ apresentou valores até 56% menores em relação ao concreto com AGRPJ, sendo o com menores alturas de ascensão o concreto produzido com AGR, com uma redução de até 70% em comparação ao último citado.

Assim, conclui-se que, para resistências de até 20 MPa, a jigagem dos agregados reciclados em faixas granulométricas torna possível a produção de concretos sem aumentar o consumo de cimento em relação aos concretos com agregado natural. Isso torna possível a reciclagem de um resíduo, reduzindo a extração de matéria-prima não renovável, sem aumentar a emissão de CO₂ do processo, e, assim, contribuindo para a produção de um concreto mais sustentável. Porém, para resistências maiores, acima de 20 MPa, a jigagem dos agregados graúdos em sua granulometria completa é suficiente para melhorar as propriedades mecânicas do concreto, aumentando sua capacidade de resistência e reduzindo a deformação, não sendo necessário o peneiramento do material antes do processamento a fim de reduzir a variável do tamanho dos grãos na jigagem, uma vez que esta etapa não influenciou de forma significativa na maior parte dos resultados.

REFERÊNCIAS

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 ensaios de compressão. Rio de Janeiro, 1996.

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

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

_____. **NBR 5737**. Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

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

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

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

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

_____. **NBR 8522**. Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. 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 15116**. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro. 2004.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo. 68 p. 2019. Disponível em <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>>. Acesso em: 03 jul. 2020.

AGUIAR, J. E. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis**. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2006.

AGUIAR, M. B.; ALVES, F. M.; GOMES, M. G.; PORTO, L. F.; GOMES, L. F. R.; JACOB, R. S. J. **Avaliação de viabilidade técnica para incorporação dos resíduos da construção civil em obras de pavimentação**. *Percurso Acadêmico*, v. 9, n. 17, p. 227-247. Minas do Barreto. Belo Horizonte, 2019.

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.

ALEXANDRIDOU, C.; ANGELOPOULOS, G. N.; COUTELIERIS, F. A. **Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants**. *Journal of Cleaner Production*, p. 1-13. 2017.

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

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.

ANDRADE, V. D.; TEIXEIRA, R. L. P.; OLIVEIRA, C. A. S. **Resíduos da construção civil para produção de concretos estruturais**. *Revista Construindo*, v. 08, nº 02. São Paulo, 2016.

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. **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. 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.; 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*, Vol. 13, nº 2. Porto Alegre. 2013.

ARULRAJAH A., PIRATHEEPAN J., DISFANI, M. **Reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate blends in pavement subbases: laboratory and field evaluation.** J. Mater. Civ. Eng. 26 (2), p. 349–357, 2014.

BIGOLIN, M. **Indicadores de desempenho para blocos de concreto: uma análise de requisitos mais sustentáveis para a produção a partir de RCD.** 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil.** Cerâmica, v. 61, p. 178-189, 2015.

BRAVO, M.; DE BRITO, J.; PONTES, J.; EVANGELISTA, L. **Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants.** Journal of Construction and Building Materials, v. 77, p. 357-369. 2015.

BUTLER, A. M. **Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.** Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2003.

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.** 254f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

CAMPOS, R. S. **Concreto autoadensável produzido com resíduos de construção e demolição: propriedades mecânicas e reológicas.** Dissertação (Mestrado em sistemas de infraestrutura urbana). Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas, 2017.

CARNEIRO, A. P.; CASSA, J. C. S.; BRUM, I. A. S. **Características do entulho e do agregado reciclado. In: Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção.** Projeto Entulho Bom. Edufba. Salvador, 2001.

CARRIJO, P. M.; FIGUEIREDO, A. D. de. **Análise do desempenho mecânico de concretos com agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição reciclados separados por densidade.** São Paulo: EPUSP, 2005. Boletim Técnico PCC n. 410, 2005.

CARTUXO, F.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; JIMÉNEZ, J. R.; LEDESMA, E. F. **Increased durability of concrete made with fine recycled concrete aggregates using superplasticizers.** Journal of Materials, v. 9. 2016.

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.

CAZACLIU, B.; SAMPAIO, C. H.; MILTZAREK, G.; PETTER, C.; LE GUEN, L.; PARANHOS, R.; HUCHET, F.; KIRCHHEIM, A. P. **The potential of using air jigging to sort recycled aggregates.** Journal of Cleaner Production v. 66 p. 46-53, 2014.

CCANZ - CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION OF NEW ZEALAND. **Best practice guide for the use of recycled aggregates in new concrete**. Nova Zelândia, 2011.

COELHO, A.; BRITO, A. C. J. **Economic viability analysis of a construction and demolition waste plant in Portugal – Part I: location, materials, technology and economic analysis**. Journal of Cleaner Production, Volume 39, Pages 338-352. 2013a.

COELHO, A.; BRITO, A. C. J. **Economic viability analysis of a construction and demolition waste plant in Portugal – Part II: economic sensitivity analysis**. , Journal of Cleaner Production, Volume 39, 2013, Pages 329-337. 2013b.

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

CONTRERAS M.; TEIXEIRA, S. R.; LUCAS, M. C.; LIMA, L. C. N.; CARDOSO, D. S. L.; SILVA, G. A. C.; GREGÓRIO, G. C.; SOUZA, A. E.; SANTOS, A. **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.

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 de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto**. 2013. 127f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CORRÊA, A. A. B. **Propriedades mecânicas de concretos com agregados reciclados: estudo de redução da variabilidade em concretos utilizando agregados submetidos à separação por jigagem a seco**. 2014.97f. Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

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

FÉLIX, E.; FELICIANO, T.; DEZEN, B. G. S.; OLIVEIRA, I. **Viabilidade técnica e econômica da produção de concreto com RCD**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 14, Belo Horizonte, 2016. Anais... Belo Horizonte: IBRACON, 2016.

FROTTÉ, C.; DI NUBILA, C. S. A.; NAGALLI, A.; MAZER, W.; MACIOSKI, G.; OLIVEIRA, L. O. S. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD**. Revista Matéria, v. 22, n. 2, 2017.

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. SENAI, Brasília, 1992. 349p. HOORNWEG, D. **“What a waste”: solid waste management in Asia**. UNEP Industry and Environment, Vol. 23, N. 1-2, 65-70, 2000.

HOORNWEG, D. **“What a waste”**: solid waste management in Asia. UNEP Industry and Environment, Vol. 23, N. 1-2, 65-70, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS (IBGE). **Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2018**. Rio de Janeiro. Disponível para download em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?edicao=22367=resultados>>. Acesso em 27 de novembro de 2018.

ISAIA, G. C. Materiais de construção civil. IBRACON (2 Vol.). São Paulo, 2007.

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.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

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.

KATZ, A. **Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete**. Cement and Concrete Research, Vol. 33, p. 703-711, 2003.

KHOURY, E; AMBRÓS, W; CAZACLIU, B.; SAMPAIO, C. H; REMOND, S. **Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability**. In: Construction and Building Materials n° 175, p. 705–713, 2018.

KOCHEM, K.; DUTRA, M. L.; POSSAN, E. **Caracterização do resíduo da construção civil da cidade de Cascavel, PR**. In: 8º FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2017, Curitiba. Anais... Curitiba. 2017.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIMA, A. S.; CABRAL, E. B.; **Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE)**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, v18, n° 2, p. 169-176. 2013.

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

LYSE, I. **Test on consistency and strength of concrete having constant water content**. In: Annual Meeting 35. Philadelphia: ASTM, 1932. v.32, part II, p. 629-636. 1932.

MALYSZ, G. N. **Estudo da influência da jigagem nas propriedades do concreto com agregado graúdo reciclado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

MARQUES, O. B.; OLIVEIRA, R. M. S.; PICANÇO, A. P. Resíduos de construção civil: geração e alternativas para reciclagem em um canteiro de obras de pequeno porte. *Engenharia Ambiental*, v. 10, nº 2, p. 143-156. Espírito Santo do Pinhal, São Paulo. 2013.

MARTÍN-MORALES, M.; ZAMORANO, M.; VALVERDE-PALACIOS, I.; CUENCA-MOYANO, G. M.; SÁNCHEZ-ROLDÁN, Z. **Quality control of recycled aggregates (RAs) from construction and demolition waste (CDW)**. In Handbook of recycled concrete and demolition waste (pp. 270-303). 2013.

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

MONDINI, B. G. **Avaliação da variabilidade de concretos utilizando resíduos de construção e demolição submetidos ao processo de separação por jigagem a seco**. 2018. 130p. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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**. 2010. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2010.

NAGATAKI, S.; SAEKI, T.; HISADA, M. **Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates**. *Cem Concr Res* 2004; 34:965–71.

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

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OGAR, I. F. **The effects of recycled aggregates on compressive strength of concrete**. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*. Vol. 4, p. 250-258, 2017.

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.

PARANHOS R. S.; CAZACLIU, B. G.; SAMPAIO, C. H.; PETTER, C. O.; NETO, R. O.; HUCHET, F. **A sorting method to value recycled concrete**. *Journal of Cleaner Production* v.112 p. 2249 – 2258, 2016.

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. **Influence of the use of recycled aggregates from different sources on structural concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 71, p. 141-151. 2014.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas.** São Carlos. 140 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Carlos. Universidade de São Paulo. 1986.

RAKSHVIR, M.; BARAI, S. V. **Studies on recycled aggregates-based concrete.** *Waste Management and Research*, Vol. 24, p. 225-233, 2006.

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.

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.

ROHDEN, A. B. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SALLES, P. V. **Avaliação mecânica e de durabilidade de concretos fabricados com resíduos de construção e demolição.** Dissertação de (Mestrado em Engenharia) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018.

SAMPAIO, C. H.; AMBRÓS, W.; MIRANDA, L. F. **Improve the quality of recycled aggregate concrete by sorting in air jig.** *III Progress of Recycling in the Built Environment.* São Paulo, 2015.

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, 2016.

SAMPAIO, C. H.; CAZACLIU, B. G.; AMBRÓS, W.; KRONBAUER, M.; TUBINO, R.; DAL MOLIN, D. C. C.; OLIVA, J.; MILTZAREK, G.; WASKOW, R.; SANTOS, V. **Demolished concretes recycling by the use of pneumatic jigs.** *Waste Management and Research*, Vol. 38, p. 392-399, 2020.

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.

SCHAMNE, A. N.; MIRANDA, L. F. R.; VOGT, V.. **Equipamentos De Reciclagem De Resíduos Da Construção Civil: Mecanismos De Separação.** In: XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Entac, São Paulo. 2016.

SILVA, A. H. **Avaliação de concreto com uso de RCD para aplicação em passeio público no município de Estrela-RS.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Vale do Taquari. Lajeado, Rio Grande do Sul. 2019.

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. **Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production.** Construction and Building Materials. Vol .65, p.201-217, 2014.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. **A review of recycled aggregate in concrete applications (2000-2017).** Construction and Building Materials. Vol. 172, p.272-292, 2018

ULSEN, C. **Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ULSEN, C.; KAHN, H.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. **Applied mineralogy characterization of construction and demolition waste from Brazilian recycling plants.** 8th International Congress of Applied Mineralogy (8th ICAM). Águas de Lindóia, Brazil, 2004.

ULSEN, C.; KAHN, H.; HAWLITSCHKE, G.; MAISINI, E; ANGULO, S. **Separability studies of construction and demolition waste recycled sand.** Waste Management 33, 656-662. 2013.

VALENTE, A. F.; SERRA, J. C. V.; NAZARENO, J. C.; MAGALHÃES, A. K. F. **Avaliação dos equipamentos de separação dos resíduos da construção civil RCD no Brasil.** Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal , v. 15, n. 1, p. 010-020, 2018.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), UFRGS, Porto Alegre. 2003.

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.

VOGT, V.; SCHAMNE, A. N.; MIRANDA, L. F. R. **Equipamentos de reciclagem de resíduos da construção civil: mecanismos de separação.** In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 2016, São Paulo.

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.

WILLS, B. A.; FINCH, J. **Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery.** Butterworth-Heinemann. 2015.

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, W.; PIETERSEN, H.; HENDRIKS, C.; REM, P. **Improve the quality of construction and demolition waste by separation techniques.** In: Advances in Building Technology, Vol 2. Pg. 1439-1446, 2002.

YANG, J.; DU, Q; BAO, Y. **Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks,** Constr. Build. Mater. 25 (4) (2011) 1935–1945.

ZANGESKI, D. D. S. O., NOVAIS, J. W. Z., DA SILVA, J. P., FERREIRA, R. L., MELO, F. C. L. **Estudo Comparativo Entre a Resistência à Compressão do Concreto com Agregado Convencional Calcário e com Agregados Recicláveis.** Ensaios e Ciência: C. Biológicas, Agrárias e da Saúde, v. 21, n. 2, p. 64-69, 2017.

ZORDAN, S. E. **Utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** 1997. 140 f. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 1997.

ZORDAN, S. E. **Fichas Técnicas. Entulho da Indústria da Construção Civil.** São Paulo. 2000.

ZORTEA, F. **Características mecânicas de concretos produzidos com materiais cerâmicos reciclados: estudo da redução da variabilidade usando separação dos agregados por densidade.** 2014a. 97p. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ZORTEA, J. **Agregados reciclados de resíduos de construção e demolição: remoção de contaminantes por separação por densidade para utilização em concreto.** 2014b. 107p. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

APÊNDICE 1 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial

Resistência à compressão axial - AGN												
	h1 (cm)	h2 (cm)	hméd	D1 (cm)	D2 (cm)	Dméd	MPa	kN	h/D	Fator de Correção	Resistência à Compressão (MPa)	
m=3,5	1	19,61	19,66	19,64	10,01	9,98	10,00	35,47	245,30	1,96	1,00	35,47
	2	19,71	19,67	19,69	9,96	10,00	9,98	35,49	278,70	1,97	1,00	35,49
	3	19,65	19,71	19,68	10,08	10,05	10,07	36,29	260,90	1,96	1,00	36,29
						Média	35,75	261,63			Média	35,75
						Desvio Padrão	0,47	16,71			Desvio Padrão	0,47
m=5,0	1	19,81	19,78	19,80	9,99	10,02	10,01	28,25	221,90	1,98	1,00	28,25
	2	19,75	19,77	19,76	10,00	9,99	10,00	28,78	221,10	1,98	1,00	28,78
	3	19,92	19,83	19,88	10,01	10,02	10,02	28,72	226,00	1,98	1,00	28,72
						Média	28,58	223,00			Média	28,58
						Desvio Padrão	0,29	2,63			Desvio Padrão	0,29
m=6,5	1	19,59	19,61	19,60	10,01	10,01	10,01	19,37	162,70	1,96	1,00	19,37
	2	19,64	19,61	19,63	9,88	9,86	9,87	19,82	152,10	1,99	1,00	19,82
	3	19,85	19,83	19,84	10,08	9,99	10,04	19,49	155,70	1,98	1,00	19,49
						Média	19,56	156,83			Média	19,56
						Desvio Padrão	0,24	5,39			Desvio Padrão	0,24

Resistência à compressão axial - AGR												
	h1 (cm)	h2 (cm)	hméd	D1 (cm)	D2 (cm)	Dméd	MPa	kN	h/D	Fator de Correção	Resistência à Compressão (MPa)	
m=3,5	1	19,81	19,76	19,79	10,07	10,03	10,05	26,20	191,40	1,97	1,0000	26,2
	2	19,68	19,72	19,70	10,02	10,04	10,03	26,94	206,80	1,96	1,0000	26,94
	3	19,86	19,98	19,92	10,00	10,01	10,01	26,33	211,60	1,99	1,0000	26,33
							Média	26,49	203,27		Média	26,49
						Desvio Padrão	0,40	10,55		Desvio Padrão	0,40	
m=5,0	1	19,88	19,85	19,87	9,96	9,98	9,97	18,73	147,10	1,99	1,0000	18,73
	2	19,77	19,83	19,80	10,01	9,97	9,99	19,40	154,00	1,98	1,0000	19,40
	3	19,63	19,73	19,68	10,04	10,05	10,05	19,41	141,00	1,96	1,0000	19,41
							Média	19,18	147,37		Média	19,18
						Desvio Padrão	0,39	6,50		Desvio Padrão	0,39	
m=6,5	1	19,82	19,83	19,83	9,98	9,95	9,97	14,23	111,80	1,99	1,0000	14,23
	2	19,61	19,72	19,67	9,99	10,02	10,01	14,36	113,50	1,97	1,0000	14,36
	3	19,90	19,91	19,91	10,04	10,01	10,03	14,27	119,50	1,99	1,0000	14,27
							Média	14,29	114,93		Média	14,29
						Desvio Padrão	0,06	4,05		Desvio Padrão	0,06	

Resistência à compressão axial - AGRJ												
	h1 (cm)	h2 (cm)	hméd	D1 (cm)	D2 (cm)	Dméd	MPa	kN	h/D	Fator de Correção	Resistência à Compressão (MPa)	
m=3,5	1	19,26	19,73	19,50	10,01	9,93	9,97	25,98	224,20	1,96	1,0000	25,98
	2	19,71	19,66	19,69	9,99	10,04	10,02	27,16	188,20	1,97	1,0000	27,16
	3	19,92	19,87	19,90	10,03	10,01	10,02	28,35	174,40	1,99	1,0000	28,35
							Média	27,16	195,60		Média	27,16
						Desvio Padrão	1,19	25,71		Desvio Padrão	1,19	
m=5,0	1	19,82	19,91	19,87	10,03	10,04	10,04	21,62	170,80	1,98	1,0000	21,62
	2	19,69	19,74	19,72	9,97	9,93	9,95	21,56	167,20	1,98	1,0000	21,56
	3	19,68	19,67	19,68	9,98	10,02	10,00	21,75	171,30	1,97	1,0000	21,75
							Média	21,64	169,77		Média	21,64
						Desvio Padrão	0,10	2,24		Desvio Padrão	0,10	
m=6,5	1	19,76	18,81	19,29	10,02	10,01	10,02	18,23	151,90	1,93	0,9944	18,13
	2	19,91	19,88	19,90	10,00	10,05	10,03	18,54	166,50	1,98	1,0000	18,54
	3	19,83	19,92	19,88	9,98	10,03	10,01	19,34	146,40	1,99	1,0000	19,34
							Média	18,70	154,93		Média	18,67
						Desvio Padrão	0,57	10,39		Desvio Padrão	0,62	

Resistência à compressão axial - AGRPJ												
	h1 (cm)	h2 (cm)	hméd	D1 (cm)	D2 (cm)	Dméd	MPa	kN	h/D	Fator de Correção	Resistência à Compressão (MPa)	
m=3,5	1	19,87	19,91	19,89	10,02	9,97	10,00	25,52	200,40	1,99	1,0000	25,52
	2	19,88	19,89	19,89	10,09	9,89	9,99	26,66	197,70	1,99	1,0000	26,66
	3	19,78	19,83	19,81	10,08	9,97	10,03	27,32	209,40	1,98	1,0000	27,32
							Média	26,50	202,50		Média	26,50
						Desvio Padrão	0,91	6,13		Desvio Padrão	0,91	
m=5,0	1	19,74	19,69	19,72	10,01	10,03	10,02	23,19	160,10	1,97	1,0000	23,19
	2	19,68	19,62	19,65	9,99	9,99	9,99	23,83	182,10	1,97	1,0000	23,83
	3	19,82	19,78	19,80	10,01	10,00	10,01	23,74	164,10	1,98	1,0000	23,74
							Média	23,59	168,77		Média	23,59
						Desvio Padrão	0,35	11,72		Desvio Padrão	0,35	
m=6,5	1	19,66	19,61	19,64	10,10	9,99	10,05	18,56	162,70	1,95	0,9944	18,46
	2	19,83	19,87	19,85	10,05	10,02	10,04	19,16	136,70	1,98	1,0000	19,16
	3	19,79	19,84	19,82	9,98	9,94	9,96	19,47	152,90	1,99	1,0000	19,47
							Média	19,06	150,77		Média	19,03
						Desvio Padrão	0,46	13,13		Desvio Padrão	0,52	

APÊNDICE 2 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade

Módulo de Elasticidade - AGN										
	h1 (cm)	h2 (cm)	hméd	D1 (cm)	D2 (cm)	Dméd	GPa	Gpa (norma)	h/D	
m=3,5	1	19,42	19,44	19,43	10,03	10,01	10,02	44,60	44,60	1,94
	2	19,39	19,41	19,40	9,99	9,97	9,98	45,10	45,10	1,94
	3	19,63	19,65	19,64	9,98	9,99	9,99	42,10		1,97
							Média	43,93	44,85	
							Desvio Padrão	1,61	0,35	
m=5,0	1	19,61	19,59	19,60	10,02	10,03	10,03	41,80	41,80	1,96
	2	19,55	19,56	19,56	10,05	10,03	10,04	36,10		1,95
	3	19,78	19,72	19,75	10,01	9,99	10,00	42,40	42,40	1,98
							Média	40,10	42,10	
							Desvio Padrão	3,48	0,42	
m=6,5	1	19,61	19,63	19,62	10,01	10,02	10,02	46,30		1,96
	2	19,74	19,77	19,76	10,03	10,02	10,03	38,20	38,20	1,97
	3	19,83	19,79	19,81	9,98	10,01	10,00	40,40	40,40	1,98
							Média	41,63	39,30	
							Desvio Padrão	4,19	1,56	

Módulo de Elasticidade - AGR										
	h1 (cm)	h2 (cm)	hméd	D1 (cm)	D2 (cm)	Dméd	GPa	GPa (norma)	h/D	
m=3,5	1	19,76	19,73	19,75	10,03	10,05	10,04	20,70	20,70	1,97
	2	19,65	19,66	19,66	10,00	10,01	10,01	20,60	20,60	1,96
	3	19,49	19,53	19,51	10,02	9,99	10,01	20,80	20,80	1,95
						Média	20,70	20,70		
						Desvio Padrão	0,10	0,10		
m=5,0	1	19,83	19,81	19,82	10,03	10,00	10,02	23,00		1,98
	2	19,59	19,57	19,58	10,02	10,02	10,02	19,90	19,90	1,95
	3	19,69	19,69	19,69	9,98	9,99	9,99	20,79	20,79	1,97
						Média	21,23	20,35		
						Desvio Padrão	1,60	0,63		
m=6,5	1	19,81	19,78	19,80	9,99	9,97	9,98	22,30		1,98
	2	19,88	19,92	19,90	10,02	10,01	10,02	19,30	19,30	1,99
	3	19,69	19,73	19,71	10,01	10,03	10,02	18,60	18,60	1,97
						Média	20,07	18,95		
						Desvio Padrão	1,97	0,49		

Módulo de Elasticidade - AGRJ										
	h1 (cm)	h2 (cm)	hméd	D1 (cm)	D2 (cm)	Dméd	GPa	GPa (norma)	h/D	
m=3,5	1	19,37	19,39	19,38	10,02	10,01	10,02	22,90	22,90	1,94
	2	19,44	19,47	19,46	10,01	10,01	10,01	23,10	23,10	1,94
	3	19,55	19,56	19,56	10,00	9,98	9,99	24,10	24,10	1,96
							Média	23,37	23,37	
						Desvio Padrão	0,64	0,64		
m=5,0	1	19,71	19,68	19,70	10,03	10,04	10,04	23,90		1,96
	2	19,77	19,78	19,78	10,01	10,02	10,02	22,00	22,00	1,97
	3	19,66	19,65	19,66	9,98	9,99	9,99	21,90	21,90	1,97
							Média	22,60	21,95	
						Desvio Padrão	1,13	0,07		
m=6,5	1	19,91	19,89	19,90	9,97	10,01	9,99	19,70	19,70	1,99
	2	19,88	19,88	19,88	10,03	10,00	10,02	21,20		1,99
	3	19,73	19,76	19,75	9,99	10,04	10,02	19,60	19,60	1,97
							Média	20,17	19,65	
						Desvio Padrão	0,90	0,07		

Módulo de Elasticidade - AGRPJ										
	h1 (cm)	h2 (cm)	hméd	D1 (cm)	D2 (cm)	Dméd	GPa	GPa (norma)	h/D	
m=3,5	1	19,67	19,69	19,68	10,01	10,00	10,01	23,00	23,00	1,97
	2	19,78	19,74	19,76	10,03	10,04	10,04	21,90		1,97
	3	19,81	19,78	19,80	10,03	10,06	10,05	23,06	23,06	1,97
						Média	22,65	23,03		
						Desvio Padrão	0,65	0,04		
m=5,0	1	19,77	19,74	19,76	10,03	9,99	10,01	21,96	21,96	1,97
	2	19,69	19,72	19,71	9,98	10,01	10,00	22,18	22,18	1,97
	3	19,88	19,90	19,89	10,02	10,02	10,02	20,50		1,99
						Média	21,55	22,07		
						Desvio Padrão	0,91	0,16		
m=6,5	1	19,66	19,64	19,65	10,03	10,01	10,02	22,30	22,30	1,96
	2	19,73	19,75	19,74	9,97	9,98	9,98	22,40	22,40	1,98
	3	19,78	19,80	19,79	10,04	10,05	10,05	21,30	21,30	1,97
						Média	22,00	22,00		
						Desvio Padrão	0,61	0,61		

APÊNDICE 3 – Resultados dos ensaios de absorção por capilaridade

Absorção por Capilaridade - AGN

	D (cm)	Seco	Massa CP (g)					Absorção CP (g/cm ²)					Altura Absorvida (cm)	
			3h	6h	24h	48h	72h	3h	6h	24h	48h	72h		
m=3,5	1	10,05	3618	3630	3636	3656	3664	3668	0,015	0,023	0,048	0,058	0,063	18,17
	2	10,00	3594	3610	3618	3640	3648	3656	0,020	0,031	0,059	0,069	0,079	17,84
	3	10,03	3564	3580	3590	3610	3620	3628	0,020	0,033	0,058	0,071	0,081	18,41
												Média	0,074	18,14
												Desvio Padrão	0,010	0,29
m=5,0	1	9,99	3614	3666	3676	3696	3706	3714	0,066	0,079	0,105	0,117	0,128	18,16
	2	10,01	3652	3666	3666	3680	3694	3702	0,018	0,018	0,036	0,053	0,064	18,24
	3	10,01	3632	3636	3638	3660	3670	3676	0,005	0,008	0,036	0,048	0,056	18,20
												Média	0,082	18,20
												Desvio Padrão	0,039	0,04
m=6,5	1	10,01	3618	3634	3644	3674	3690	3700	0,020	0,033	0,071	0,092	0,104	18,08
	2	10,00	3588	3600	3608	3638	3652	3660	0,015	0,025	0,064	0,082	0,092	18,41
	3	10,03	3536	3548	3558	3586	3598	3610	0,015	0,028	0,063	0,079	0,094	18,57
												Média	0,097	18,35
												Desvio Padrão	0,007	0,25

Absorção por Capilaridade - AGR

	D (cm)	Massa CP (g)						Absorção CP (g/cm ²)					Altura Absorvida (cm)	
		Seco	3h	6h	24h	48h	72h	3h	6h	24h	48h	72h		
m=3,5	1	10,03	3122	3148	3158	3190	3208	3220	0,033	0,046	0,086	0,109	0,124	7,42
	2	10,01	3110	3140	3150	3182	3204	3218	0,038	0,051	0,091	0,119	0,137	8,05
	3	9,99	3096	3128	3138	3170	3190	3206	0,041	0,054	0,094	0,120	0,140	7,87
												Média	0,134	7,78
												Desvio Padrão	0,009	0,32
m=5,0	1	9,98	3096	3132	3144	3182	3206	3224	0,046	0,061	0,110	0,141	0,164	9,79
	2	9,99	3098	3134	3144	3182	3206	3224	0,046	0,059	0,107	0,138	0,161	9,76
	3	10,01	3098	3126	3136	3172	3196	3214	0,036	0,048	0,094	0,125	0,147	9,94
												Média	0,157	9,83
												Desvio Padrão	0,009	0,10
m=6,5	1	10,02	3080	3116	3128	3168	3194	3212	0,046	0,061	0,112	0,145	0,167	9,79
	2	10,05	3104	3148	3162	3204	3230	3250	0,055	0,073	0,126	0,159	0,184	9,76
	3	10,01	3090	3128	3142	3184	3212	3230	0,048	0,066	0,119	0,155	0,178	9,94
												Média	0,176	9,83
												Desvio Padrão	0,008	0,10

Absorção por Capilaridade - AGRJ

	D	Massa CP (g)						Absorção CP (g/cm ²)					Altura Absorvida (cm)	
		Seco	3h	6h	24h	48h	72h	3h	6h	24h	48h	72h		
m=3,5	1	10,03	3068	3098	3110	3140	3156	3168	0,038	0,053	0,091	0,111	0,127	8,43
	2	10,02	3042	3074	3090	3124	3144	3160	0,041	0,061	0,104	0,129	0,150	8,99
	3	10,01	3086	3114	3126	3154	3174	3184	0,036	0,051	0,086	0,112	0,125	10,83
												Média	0,134	9,42
												Desvio Padrão	0,014	1,26
m=5,0	1	10,02	3156	3186	3200	3232	3248	3264	0,038	0,056	0,096	0,117	0,137	15,56
	2	10,04	3104	3128	3140	3170	3190	3202	0,030	0,045	0,083	0,109	0,124	13,21
	3	9,98	3020	3046	3062	3098	3112	3130	0,033	0,054	0,100	0,118	0,141	16,01
												Média	0,134	14,93
												Desvio Padrão	0,009	1,50
m=6,5	1	10,01	3144	3158	3170	3206	3230	3248	0,018	0,033	0,079	0,109	0,132	16,63
	2	10,01	3122	3146	3190	3196	3222	3240	0,030	0,086	0,094	0,127	0,150	16,82
	3	9,99	3132	3162	3186	3222	3250	3274	0,038	0,069	0,115	0,151	0,181	16,80
												Média	0,154	16,75
												Desvio Padrão	0,025	0,10

Absorção por Capilaridade - AGRPJ

	D	Seco	Massa CP (g)					Absorção CP (g/cm ²)					Altura Absorvida (cm)	
			3h	6h	24h	48h	72h	3h	6h	24h	48h	72h		
m=3,5	1	9,98	3084	3112	3122	3148	3162	3174	0,036	0,049	0,082	0,100	0,115	15,38
	2	10,02	3130	3160	3170	3202	3216	3228	0,038	0,051	0,091	0,109	0,124	13,88
	3	10,04	3122	3154	3164	3200	3216	3228	0,040	0,053	0,099	0,119	0,134	14,76
												Média	0,124	14,67
												Desvio Padrão	0,009	0,75
m=5,0	1	10,01	3120	3150	3160	3192	3212	3226	0,038	0,051	0,091	0,117	0,135	15,98
	2	10,00	3130	3156	3166	3200	3216	3226	0,033	0,046	0,089	0,109	0,122	16,78
	3	10,01	3090	3122	3130	3158	3176	3188	0,041	0,051	0,086	0,109	0,125	16,71
												Média	0,127	16,49
												Desvio Padrão	0,007	0,44
m=6,5	1	9,99	3084	3116	3128	3168	3192	3210	0,041	0,056	0,107	0,138	0,161	18,03
	2	10,02	3100	3130	3140	3184	3206	3224	0,038	0,051	0,107	0,134	0,157	18,41
	3	10,03	3094	3120	3130	3168	3190	3206	0,033	0,046	0,094	0,122	0,142	17,56
												Média	0,153	18,00
												Desvio Padrão	0,010	0,43
