

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE LAVRAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO COM A INCORPORAÇÃO
DE AGREGADOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

GUSTAVO MONTEIRO COSTA SBAMPATO RESENDE

LAVRAS – MG

2020

GUSTAVO MONTEIRO COSTA SBAMPATO RESENDE

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO COM A INCORPORAÇÃO
DE AGREGADOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Monografia apresentada ao
Centro Universitário de Lavras,
como parte das exigências do
curso de graduação em
Engenharia Civil.

ORIENTADOR

Prof. Dr. Adriano Rodrigues

PROFESSOR CONVIDADO

Prof. Dr. Alan Pereira Vilela

PRESIDENTE DA BANCA

Prof.^a Esp. Gabriela Bastos Pereira

LAVRAS – MG

2020

Ficha Catalográfica preparada pela Seção de Processamento Técnico da
Biblioteca Central do Unilavras

R433a Resende, Gustavo Monteiro Costa Sbampato.
Análise das características do concreto com a
incorporação de agregados de resíduos da construção
civil. -- Lavras: Unilavras, 2020.
33 f.: il.

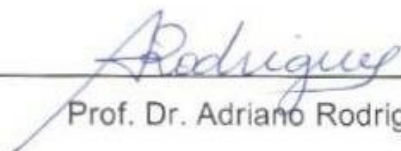
Monografia (Graduação em Engenharia Civil) –
Unilavras, Lavras, 2020.

Orientador: Profº Adriano Rodrigues.

1. Concreto. 2. Construção civil. 3. Resíduos.
4. Sustentabilidade. I. Rodrigues, Adriano (Orient.).
II. Título.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE LAVRAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Monografia apresentada ao
Centro Universitário de Lavras,
como parte das exigências da
disciplina Trabalho de conclusão
de curso em Engenharia Civil.



Prof. Dr. Adriano Rodrigues (Orientador)



Prof. Dr. Alan Pereira Vilela (Convidado)



Prof.ª Esp. Gabriela Bastos Pereira (Presidente da banca)

Aprovado em 22 de outubro de 2020

LAVRAS – MG
2020

Aos meus pais Cristiane e João Luiz
Aos meus irmãos Aline e Vitor
A todos que, direta ou indiretamente,
contribuíram com minha caminhada

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq pela bolsa de fomento concedida para a realização da pesquisa, ao Centro Universitário de Lavras (UNILAVRAS) por disponibilizar o laboratório e espaço para o desenvolvimento do trabalho, à Universidade Federal de Lavras (UFLA) por ceder o espaço e balança para a realização do ensaio de densidade, à Usina de reciclagem de Belo Horizonte por disponibilizar os agregados recicláveis e por último meus familiares, colegas, professores e amigos que me ajudaram com conselhos, incentivos e ideias.

RESUMO

Com finalidade de promover a sustentabilidade, pesquisas são realizadas com a intenção de reaproveitar os resíduos de construção civil. O concreto reciclado apresenta-se como fonte principal de reutilização destes materiais. Objetiva-se comparar as propriedades dos agregados reciclados com os agregados convencionais e entender como a granulometria e a resistência são afetadas pela mudança. Para isso, incorporou-se agregados de resíduos da construção civil no concreto em substituição de parte dos agregados graúdos. Confeccionou-se corpos de prova com as seguintes porcentagens de substituição: 0%, 5%, 10% e 15%, sendo 0% sem substituição dos agregados convencionais por reciclados (grupo controle), para comparações múltiplas. Foram realizados os seguintes ensaios: granulométricos, densidade, absorção de água, resistência à compressão e teste de abatimento. Foram obtidos que os agregados reciclados possuem menor densidade e maior absorção de água quando comparados aos agregados convencionais. A granulometria que apresentou maior resistência foi de 4,75 – 9,50 mm. Observa-se que as resistências à compressão dos tratamentos são estatisticamente iguais, quando comparados com o grupo controle, exceto para a granulometria de 4,75 – 9,50 mm, na qual é recomendada a utilização de 15% de incorporação de agregado reciclado, visto que não difere do grupo controle. Portanto, o agregado reciclado apresenta-se como opção viável.

Palavras-chave: Concreto. Construção Civil. Resíduos. Sustentabilidade.

ABSTRACT

In order to promote sustainability, many researches are carried out with the intention of reusing civil construction waste. Recycled concrete is the main source of reuse of these materials. To compare the properties between recycled aggregates with conventional aggregates and understand how the change affects both the granulometry and the strength. For this purpose, we incorporated aggregates of construction waste into the concrete to replace part of the coarse aggregates. We made samples with the following percentages of substitution: 0%, 5%, 10% and 15%, 0% without replacing conventional aggregates with recycled ones (control group), for multiple comparisons. We performed the following tests: particle size, density, water absorption, resistance to compression and slump test. We realized that recycled aggregates have lower density and greater water absorption when compared to conventional aggregates. The granulometry that presented greater resistance was 4,75 – 9,50 mm. It is observed that the compressive strengths of the treatments are statistically equal when compared with the control group, except for granulometry 4.75 - 9.50 mm, in which the use of 15% recycled aggregate is recommended, since it does not differ from the control group. Therefore, recycled aggregate is a viable option.

Keywords: Concrete. Construction. Construction waste. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Separação bruta, britagem, refino e separação granulométrica.....	16
Figura 2: Recolhendo material britado e separação manual	16
Figura 3: Ensaio de peneiramento e peneiramento do agregado.....	17
Figura 4: Submersão, secagem e pesagem dos agregados reciclados	18
Figura 5: Pesagem do material submerso, secagem em estufa e segunda pesagem.....	18
Figura 6: Estoque dos materiais e homogeneização do concreto na betoneira	20
Figura 7: Teste de abatimento (<i>Slump Test</i>)	20
Figura 8: Moldagem e etiquetagem dos corpos de prova.....	21
Figura 9: Desmoldagem dos corpos de prova.....	21
Figura 10: Corpos de prova em cura	22
Figura 11: Ensaio de resistência à compressão.....	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Identificação dos tratamentos	19
Tabela 2: Granulometria dos agregados graúdos	23
Tabela 3: Dimensão máxima característica e módulo de finura referente as granulometrias.....	23
Tabela 4: Ensaio de densidade dos agregados reciclados	25
Tabela 5: Densidades e absorção de água dos agregados reciclados	25
Tabela 6: Densidade relativa e absorção de água dos agregados.....	25
Tabela 7: Teste de abatimento (<i>Slump Test</i>)	26
Tabela 8: Resultado da ANOVA referente a resistência à compressão dos tratamentos	29
Tabela 9: Teste de Tukey para as resistências médias dos tratamentos	29

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Distribuição granulométrica dos agregados.....	24
Gráfico 2: Resistência média (em MPa) dos tratamentos com cura de 21 dias	27
Gráfico 3: Resistência média (em MPa) dos tratamentos com cura de 28 dias	28

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

cm – Centímetros

g – Gramas

m³ – Metros cúbicos

mm – Milímetros

m – Metros

MPa – Mega Pascal

NBR – Norma técnica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1 História do concreto.....	13
2.2 Agregados	13
2.3 Classificação dos resíduos da construção civil	14
2.4 Ensaio de peneiramento.....	15
2.5 Importância do controle de qualidade do concreto	15
2.6 Resistência à compressão	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1 Análise granulométrica.....	23
4.2 Ensaio de densidade	24
4.3 Teste de abatimento (<i>Slump Test</i>)	26
4.4 Ensaio de resistência à compressão	27
4.5 Análise estatística.....	28
5 CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos antigos o concreto tem sido utilizado pelo homem para construção de suas residências. Percebe-se a evolução deste material ao longo do tempo, buscando sempre adaptá-lo as necessidades da construção civil. Com esta finalidade, o concreto e o aço são combinados e utilizados com função estrutural, sendo conferidas a resistência à compressão e tração.

A resistência à compressão do concreto pode variar de acordo com as proporções e qualidade dos produtos. O engenheiro civil é responsável pela indicação dos materiais de construção mais apropriados para a execução da obra, buscando sempre o concreto de maior qualidade e menor preço.

É essencial apontar que a busca pela evolução do concreto continua através de pesquisas com vários tipos de aditivos no concreto. De fato, progrediu-se em relação a resistência, entretanto, a agressividade dos materiais ao meio ambiente não foi tratada com prioridade. Aparece como um dos principais tópicos no século XXI, a importância da reutilização de materiais.

Visando à sustentabilidade, pesquisas envolvendo a reciclagem dos resíduos de construção civil são cada vez mais frequentes. Atualmente, os resíduos de construção civil não possuem destinação eficiente, uma vez que são pouco reaproveitados e descartados em grandes escalas. Vem sendo estudada a produção de concreto reciclado na busca de reutilizar resíduos de diferentes formas, materiais e origens.

Com essa premissa, a incorporação de agregados graúdos provenientes dos resíduos da construção civil na produção do concreto, propõe um material com menores danos ao meio ambiente, menor custo e resistência equivalente.

A pesquisa teve como objetivo geral comparar as propriedades de densidade, absorção de água e granulometria dos agregados reciclados com os agregados convencionais. O objetivo específico foi entender como a granulometria e a incorporação dos agregados reciclados, em diferentes porcentagens e períodos de cura, influenciam na resistência à compressão do concreto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 História do concreto

O local e época em que ocorreu a descoberta do concreto são imprecisas. Existem vários indícios de que o homem conheceu a cal, provavelmente, no período paleolítico, de acordo com Guimarães (1997). Foram encontradas misturas de cal e pozolanas em sítios arqueológicos neolíticos (8000 a 10000 anos a.C.). A cal começa a aparecer como aglomerante na Sérvia, antiga Iugoslávia, nas ruínas de uma casa de 5600 a.C. com o piso feito de cal vermelha, areia e pedregulho, e com maior frequência começou a apresentar-se nas construções da civilização egípcia.

De acordo com Carvalho (2008), nas pirâmides, de Quéops e Tutancâmon por exemplo, o material de vedação aplicado demonstra que os egípcios já tinham experiência na utilização da argamassa de cal. Portanto, podemos considerar que o cimento teve origem em 2500 a.C., com a argamassa egípcia constituída por uma mistura de gesso calcinado.

Sobre a evolução do cimento, Carvalho (2008) ainda nos ensina que foram necessárias várias alterações e adequações para a evolução do material. Desde 1758, quando o engenheiro John Smeaton, obteve um calcário muito superior ao bruto, várias mudanças ocorreram. Em 1791, o engenheiro James Parker patenteou o Cimento Romano, formado de uma mistura de pedras calcárias, com cerca de um terço de argila e um pouco de óxido de ferro.

De acordo com Kaefer (1998) Vicat publicou, em 1817, o trabalho *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires* no qual apresenta os resultados de sua pesquisa sobre ensaios realizados com cimento, gerando grande avanço para a tecnologia deste. Joseph Aspdin, em 1824, aperfeiçoou o material ainda mais e patenteou como Cimento *Portland*, gerando um sucesso imediato, popularizando-o.

2.2 Agregados

Agregado é um material granular, com propriedades e dimensões adequadas para o uso em obras da engenharia civil, sendo classificado como gráudo e miúdo. No concreto, os agregados definem características como a retração e a resistência, sendo de baixo custo.

Os agregados miúdos, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), são todos os grãos que conseguem passar pela peneira de abertura de 4,75 mm e ficam retidos na peneira 0,075 mm.

Os agregados graúdos, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), são todos os grãos que conseguem passar pela peneira de abertura de 75 mm e ficam retidos na peneira com malha de 4,75 mm.

2.3 Classificação dos resíduos da construção civil

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos de construção civil são divididos em duas classes. A classe I são os materiais perigosos, como inflamáveis, corrosivos, com reatividade, toxicidade ou patogênico. Classe II são materiais não perigosos como restos de alimentos, sucatas de materiais ferrosos e não ferrosos, resíduos de papel e papelão, resíduos de plástico polimerizado, resíduos de borracha, resíduo de madeira, resíduo de materiais têxteis, resíduos de minerais não metálicos, areia de fundição, bagaço de cana entre outros resíduos não perigosos.

A classe II subdivide-se em não inertes (classe II A) e inertes (classe II B). Os não inertes são:

Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes, nos termos desta Norma. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ABNT – NBR 10004, 2004, p.11).

Já os inertes são:

Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT – NBR 10004, 2004, p.11).

Dessa forma, é possível classificar o tipo do material e entender se é recomendado sua utilização, ou não, para pesquisas e em campo.

2.4 Ensaio de peneiramento

O ensaio de peneiramento faz parte da análise granulométrica, que serve para separar os agregados de diferentes dimensões, através das malhas de peneiras que variam de 75 mm a 0,075 mm. É de suma importância a definição granulométrica do agregado, uma vez que no estado fresco ela influencia na trabalhabilidade e custo e, no estado endurecido, na durabilidade do concreto, estabilidade dimensional e resistência mecânica (SILVA, 2000).

2.5 Importância do controle de qualidade do concreto

O concreto deve apresentar boa trabalhabilidade, coesão, segregação e exsudação. Para isso, é importante também eliminar o ar presente no concreto, através de bolhas de ar ou vazios de ar aprisionado.

A qualidade final de uma estrutura de concreto armado depende tanto do controle de suas propriedades no estado fresco como no seu estado endurecido (GEYER; SÁ, 2006).

Para o controle de qualidade do concreto, podem ser realizados ensaios em seu estado fresco ou em seu estado endurecido. No estado fresco são realizados o abatimento de tronco (*Slump Test*) e de espalhamento (*Flow Test*). Em relação ao ensaio com o concreto endurecido, o teste mais comum é o ensaio de resistência à compressão de corpos de prova.

2.6 Resistência à compressão

De acordo com Bauer (1995), a resistência à compressão simples é utilizada para avaliar a qualidade do concreto, sendo de extrema importância o controle da cura. É importante ressaltar que conhecer os valores de esforços à compressão que o concreto resiste é essencial para o dimensionamento na construção civil.

A capacidade do concreto resistir a um esforço está diretamente interligada com os materiais e metodologia de preparo, sendo assim uma força ao ser aplicada provoca uma tensão neste, a qual gera uma deformação inicial até ruptura, caso a força seja maior que a resistência do corpo (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Segundo Neville (1997) para alcançar uma resistência à compressão do concreto elevada é necessário materiais de boa qualidade, traço adequado, forma adequada e no estado fresco uma boa trabalhabilidade.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os agregados reciclados utilizados neste estudo foram obtidos na estação de reciclagem de entulho, localizada na BR-040, bairro Pampulha, em Belo Horizonte – MG. Os materiais foram classificados como agregados graúdos cerâmicos, metálicos e poliméricos e denominados Classe II – Inerte. As Figuras 1a ilustram a separação bruta, 1b britagem e 1c separação granulométrica do material na estação de reciclagem de entulho.

Figura 1: Separação bruta, britagem, refino e separação granulométrica



Fonte: Autor (2020).

Após sua separação bruta, o material foi recolhido, como apresentado pela Figura 2a, e foi realizada uma seleção manual para retirada de materiais orgânicos e metálicos restantes, ilustrado pela Figuras 2b. A retirada das amostras de resíduos sólidos foi realizada de acordo com a NBR NM 10007 (ABNT, 2004).

Figura 2: Coleta do material britado e separação manual

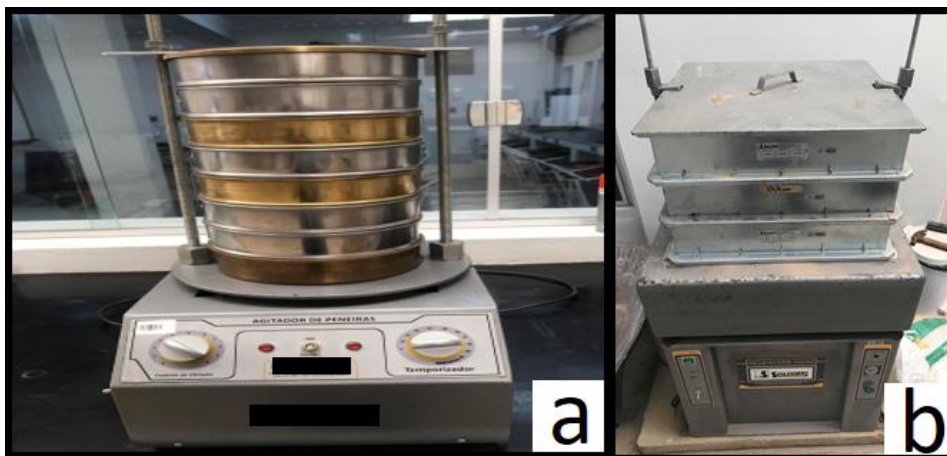


Fonte: Autor (2020).

Os materiais convencionais para a confecção do concreto são: brita 0 (granulometria de 4,75 – 9,50 mm), brita 1 (granulometria de 9,50 – 19,00 mm), areia e cimento CP II-E32 (cimento mais utilizado na região de Lavras). Estes materiais foram adquiridos, com os recursos próprios do autor, em uma casa de material de construção no município de Lavras – MG.

Para a determinação da granulometria dos materiais, foi executado o peneiramento dos agregados reciclados, como apresenta a Figura 3a, realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro Universitário de Lavras (UNILAVRAS), de acordo com os procedimentos da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Em seguida, foi realizado um segundo peneiramento do material, para separação das granulometrias desejadas utilizadas na pesquisa, através de peneirador elétrico de maior potência e dimensão, como mostra a Figura 3b.

Figura 3: Ensaio de peneiramento e peneiramento do agregado



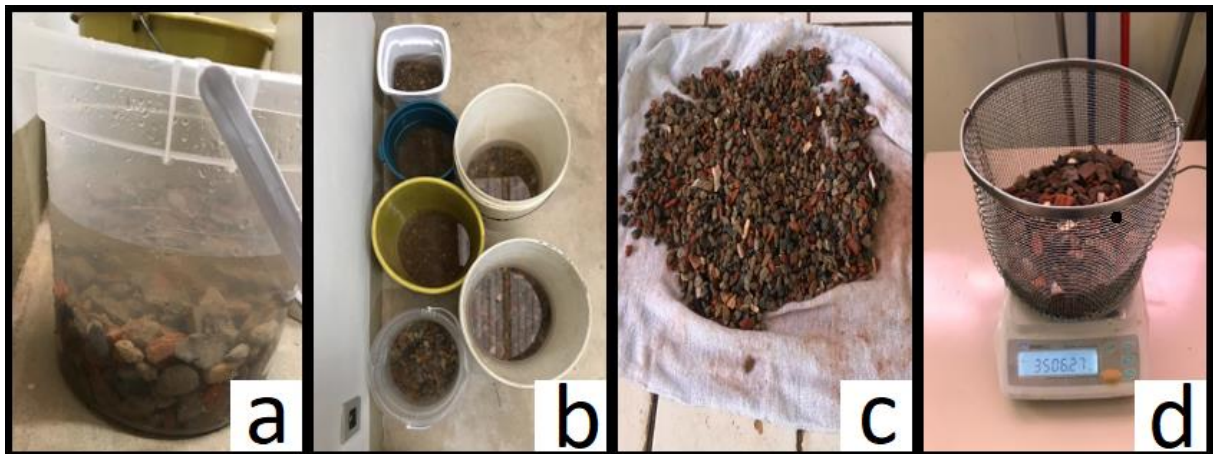
Fonte: Autor (2020).

O Ensaio 1 é referente ao material, que após ser peneirado, resultou na granulometria de 4,75 – 9,50 mm e o Ensaio 2 resultou na granulometria de 9,50 – 19,00mm.

Foi encontrada a dimensão máxima característica e o módulo de finura de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005). A fim de comparar os resultados deste trabalho com Fonseca, Ribeiro Junior e Barbosa (2018), calculou-se a média do módulo de finura dos agregados reciclados com os convencionais das granulometrias estudadas.

Uma pequena quantidade dos agregados reciclados foi separada e transportada para a realização do ensaio de densidade, na Unidade Experimental em Painéis de Madeira (UEPAM), no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA). As Figuras 4a e 4b ilustram os agregados reciclados submersos durante 24 horas em água. Os agregados foram superficialmente secos e pesados, como mostram as Figuras 4c e 4d.

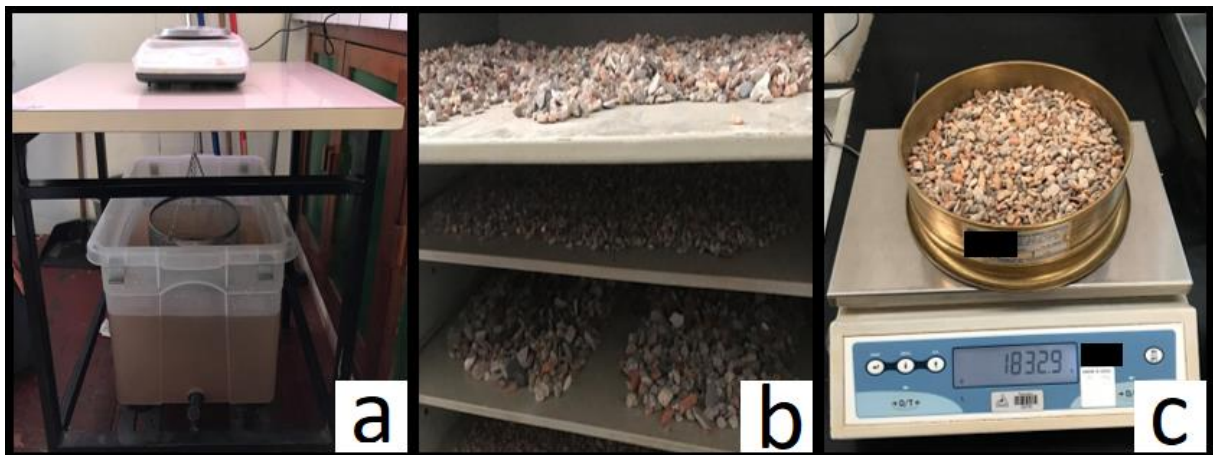
Figura 4: Submersão, secagem e pesagem dos agregados reciclados



Fonte: Autor (2020).

Em seguida, o agregado reciclado foi pesado enquanto submerso e posteriormente foi seco em estufa e pesado novamente, como apresentado pelas Figuras 5a, 5b e 5c. Todo o procedimento supracitado foi realizado de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Figura 5: Pesagem do material submerso, secagem em estufa e segunda pesagem



Fonte: Autor (2020).

O traço do concreto foi definido de acordo com Silva (1974): 1,04 agregado graúdo: 0,7 areia: 0,4 cimento: 0,21 água. Em seguida, iniciou-se a moldagem dos corpos de prova.

Foram utilizados quatro corpos de prova por tratamento, totalizando trinta e dois corpos de prova por granulometria. No caso do material de granulometria 4,75 - 19 mm, foi utilizado 50% de 4,75 - 9,50 mm e 50% de 9,50 - 19,00 mm. Foram utilizados dois períodos de cura: 21 e 28 dias, como apresenta a Tabela 1.

Tabela 1: Identificação dos tratamentos

Tratamento	Granulometria	Tempo de cura	Incorporação	
1		21	0%	
2		21	5%	
3		21	10%	
4	4,75 - 9,50	21	15%	
5		28	0%	
6		28	5%	
7		28	10%	
8		28	15%	
9		9,50 - 19,00	21	0%
10			21	5%
11			21	10%
12	21		15%	
13	28		0%	
14	28		5%	
15	28		10%	
16	28		15%	
17	4,75 - 19,00	21	0%	
18		21	5%	
19		21	10%	
20		21	15%	
21		28	0%	
22		28	5%	
23		28	10%	
24		28	15%	

Fonte: Autor (2020).

Separou-se as quantidades necessárias de cada material de acordo com o traço, colocando-os na betoneira durante um período médio de cinco minutos para a homogeneização do concreto, como apresentado pelas Figuras 6a e 6b.

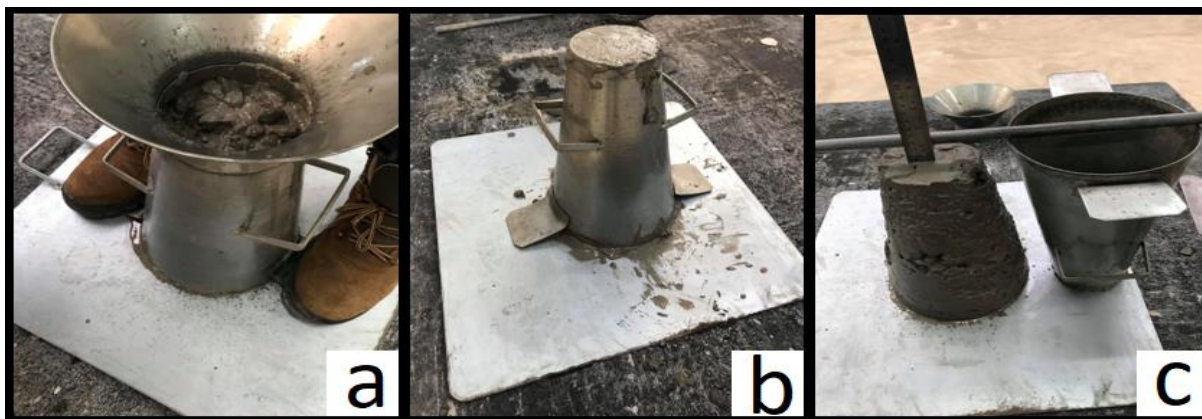
Figura 6: Estoque dos materiais e homogeneização do concreto na betoneira



Fonte: Autor (2020).

Em seguida, realizou-se o teste de abatimento (*Slump Test*), de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998), ilustrado pelas Figuras 7a, 7b e 7c.

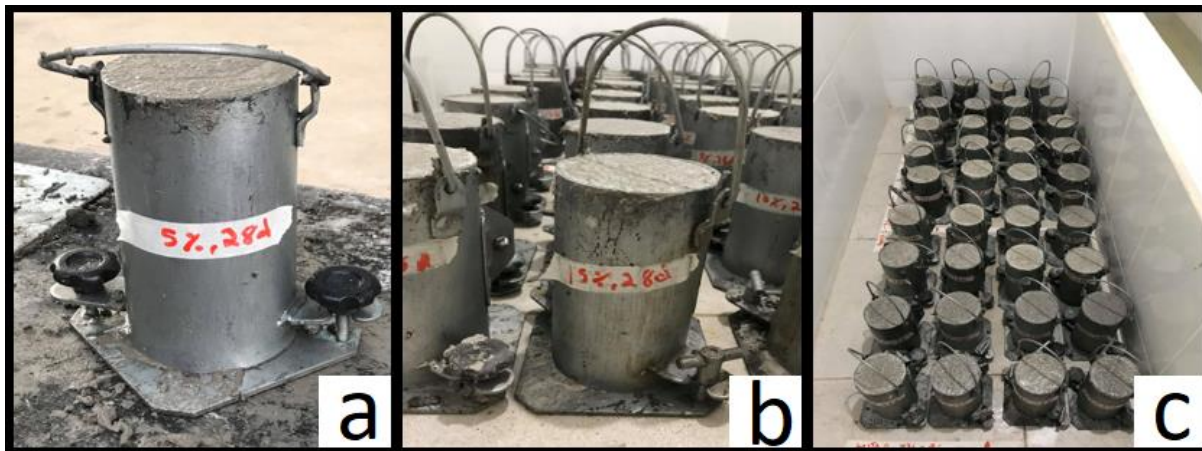
Figura 7: Teste de abatimento (*Slump Test*)



Fonte: Autor (2020).

Após sua produção, o concreto foi colocado em moldes cilíndricos com dimensão de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com a classificação do traço delimitada por etiquetas, como apresentado pelas Figuras 8a, 8b e 8c.

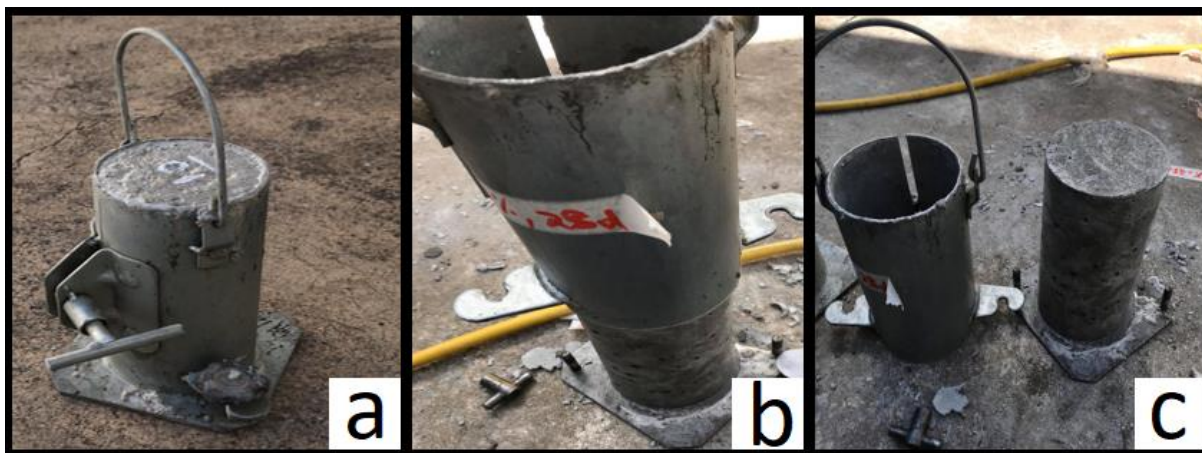
Figura 8: Moldagem e etiquetagem dos corpos de prova



Fonte: Autor (2020).

Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados, como apresentado, em sequência, pelas Figuras 9a, 9b e 9c.

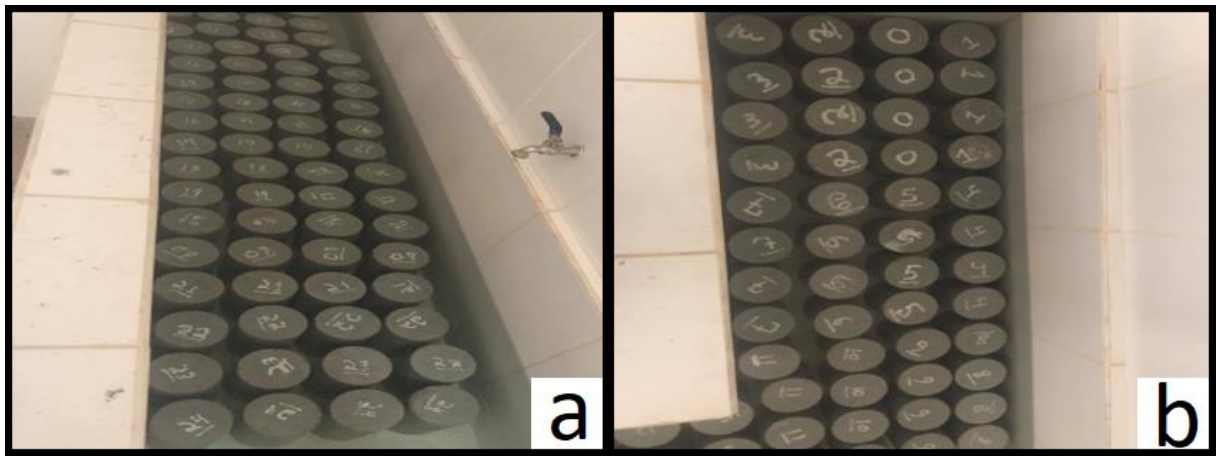
Figura 9: Desmoldagem dos corpos de prova



Fonte: Autor (2020).

Posteriormente, os corpos de provas foram imersos em um tanque de cura, com solução saturada de hidróxido de cálcio a $23 \pm 2^\circ\text{C}$, como mostram as Figuras 10a e 10b. Todo o processo de moldagem e cura dos corpos de prova foi realizado de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016).

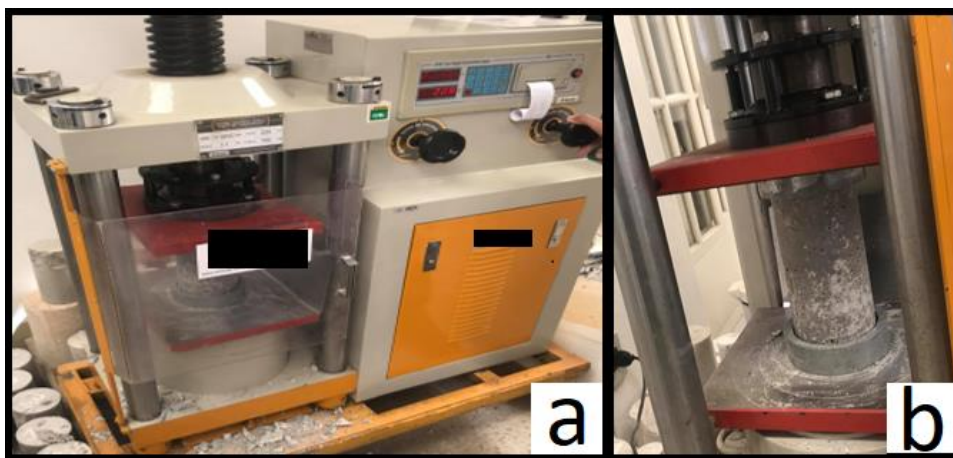
Figura 10: Corpos de prova em cura



Fonte: Autor (2020).

Após a retirada dos corpos de prova da solução saturada, executou-se o ensaio de compressão, mostrado pelas Figuras 11a e 11b. Todo o processo foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Figura 11: Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor (2020).

Com os resultados da resistência à compressão, foram realizadas as análises estatísticas no *software* R. O experimento foi balanceado, com quatro tratamentos e quatro repetições. Para realizar as comparações entre os tratamentos, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), bem como testes para verificar normalidade dos dados e homogeneidade de variâncias. Após a constatação de diferenças significativas entre os tratamentos, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Tukey para verificar quais grupos diferiram entre si. Todos os testes foram realizados ao nível de 5% de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise granulométrica

A Tabela 2 apresenta o resultado do ensaio granulométrico, dos agregados reciclados e convencionais.

Tabela 2: Granulometria dos agregados graúdos

Ensaio 1	25,00 mm	19,00 mm	12,50 mm	9,50 mm	6,30 mm	4,75 mm	Fundo
Agregado reciclado (g)	3,13	9,03	46,80	474,37	642,97	303,37	20,33
Agregado convencional (g)	3,76	16,80	213,07	523,57	364,00	218,30	160,50
Ensaio 2	25,00 mm	19,00 mm	12,50 mm	9,50 mm	6,30 mm	4,75 mm	Fundo
Agregado reciclado (g)	38,00	484,17	720,37	213,87	32,80	8,89	1,90
Agregado convencional (g)	202,27	727,83	456,14	50,93	22,20	9,30	31,33

Fonte: Autor (2020).

Para o Ensaio 1, temos como granulometria predominante de 6,30 mm no agregado reciclado e de 9,50 mm no agregado convencional. Em relação ao Ensaio 2 a granulometria predominante no agregado reciclado é de 12,5 mm e de 19 mm para o agregado convencional.

A Tabela 3 apresenta a dimensão máxima característica e o módulo de finura característicos dos agregados.

Tabela 3: Dimensão máxima característica e módulo de finura referente as granulometrias

Granulometria (mm)	Dimensão máxima característica (mm)	Módulo de finura
Ensaio 1 (Agregado reciclado)	12,50	2,15
Ensaio 2 (Agregado reciclado)	25,00	4,18
Ensaio 1 (Agregado convencional)	19,00	2,31
Ensaio 2 (Agregado convencional)	25,00	4,60

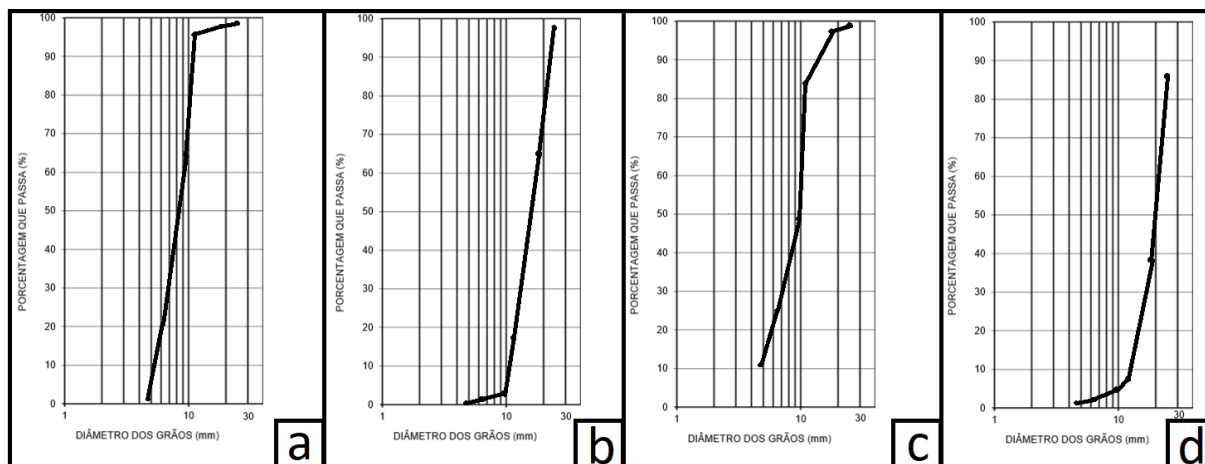
Fonte: Autor (2020).

A dimensão máxima característica para o Ensaio 1 do agregado reciclado é de 12,50 mm e para o convencional é 19,00 mm, já para o Ensaio 2 dos agregados reciclados e convencionais é de 25,00 mm. Portanto esta característica dos agregados reciclados coincide com os convencionais.

A média do módulo de finura dos agregados referentes ao Ensaio 1 (Agregado reciclado) e Ensaio 1 (Agregado convencional) apresentam um valor médio de 2,23, com variação de 0,08 e a média referente ao Ensaio 2 (Agregado reciclado) e Ensaio 2 (Agregado convencional) apresentam um valor médio de 4,39, com variação de 0,21. Esses resultados diferem ligeiramente dos resultados encontrados por Fonseca, Ribeiro Junior e Barbosa (2018), que ao estudarem a análise da viabilidade técnica da incorporação de agregados reciclados em concreto encontraram valores médios de módulo de finura iguais a 7,05, com variação de 0,22.

Os Gráficos 1a, 1b, 1c e 1d apresentam a distribuição granulométrica dos agregados referentes aos Ensaios 1, agregado reciclado e agregado convencional e Ensaios 2, agregado reciclado e agregado convencional, respectivamente.

Gráfico 1: Distribuição granulométrica dos agregados



Fonte: Autor (2020).

Baseados nos Gráficos de distribuição granulométrica é correto afirmar que todos os quatro tipos de granulometrias apresentam distribuição uniforme.

4.2 Ensaio de densidade

Obteve-se os resultados do ensaio de densidade dos agregados reciclados, apresentado pela Tabela 4.

Tabela 4: Ensaio de densidade dos agregados reciclados

Agregado reciclado	Agregado saturado (g)	Agregado submerso (g)	Agregado seco (g)
4,75 - 9,50 mm	3208,41	1800,06	2941,70
9,50 - 19,00 mm	3196,38	1806,26	2992,73

Fonte: Autor (2020).

Com os resultados anteriores, foi possível encontrar as densidades e a absorção de água do material, descritas na Tabela 5.

Tabela 5: Densidades e absorção de água dos agregados reciclados

Caracterização	Agregado reciclado	Agregado reciclado
	(4,75 - 9,50 mm)	(9,50 - 19,00 mm)
Densidade do agregado seco (kg/m ³)	2130	2160
Densidade do agregado saturado em superfície seca (kg/m ³)	2280	2300
Densidade aparente (kg/m ³)	2580	2520
Absorção de água (%)	6,95	6,55

Fonte: Autor (2020).

Nota-se que a densidade do agregado reciclado de granulometria 4,75 – 9,50 mm é de 2130 kg/m³ e absorção de água 6,95%. Para os agregados reciclados de granulometria 9,50 – 19,00 mm a densidade é de 2160 kg/m³ e absorção de água 6,55%.

A Tabela 6 apresenta os valores de densidade relativa e absorção de água dos agregados reciclados e naturais (convencionais) da pesquisa de Limbachiya, Leelawat e Dhir (2000).

Tabela 6: Densidade relativa e absorção de água dos agregados

Propriedade	Agregado reciclado		Agregado natural	
	10 - 20 mm	5 - 10 mm	10 - 20 mm	5 - 10 mm
Características físicas				
Densidade relativa (kg/m ³)	2410	2400	2600	2600
Absorção de água (%)	4,9	5,2	2,5	2,5

Fonte: Limbachiya, Leelawat e Dhir (2000).

Os resultados obtidos para a absorção de água e densidade vão de encontro ao Limbachiya, Leelawat e Dhir (2000), que ao estudar o uso de agregados reciclados em concreto de alta resistência, apresentou valores próximos aos encontrados nesta pesquisa. De acordo com o autor mencionado, o agregado reciclado tem aproximadamente de 7 a 9% de densidade a menos e duas vezes mais absorção de água quando comparado ao agregado convencional, devido ao material ser mais poroso.

4.3 Teste de abatimento (*Slump Test*)

O resultado do teste de abatimento encontra-se na Tabela 7.

Tabela 7: Teste de abatimento (*Slump Test*)

Granulometria (mm)	Tratamentos	0%	5%	10%	15%
4,75 - 9,50	21 dias	20 mm	35 mm	25 mm	28 mm
9,50 - 19,00	21 dias	32 mm	32 mm	34 mm	34 mm
4,75 - 19,00	21 dias	50 mm	45 mm	18 mm	32 mm
4,75 - 9,50	28 dias	40 mm	50 mm	35 mm	40 mm
9,50 - 19,00	28 dias	30 mm	35 mm	40 mm	40 mm
4,75 - 19,00	28 dias	78 mm	52 mm	54 mm	53 mm

Fonte: Autor (2020).

Inicialmente a pesquisa apresenta a proposta de um concreto reciclado para o estrutural, portanto, o teste de abatimento foi comparado com a tabela adaptada de Ripper (1995), fundações e muros armados, sendo a consistência de firme a plástico, com valores de 30 mm – 70 mm de abatimento.

Comparando os valores encontrados com Ripper (1995), todas as amostras encontram-se com a trabalhabilidade especificada, exceto 4,75 – 9,50 mm aos 21 dias com 0%, 10% e 15%, 4,75 – 19,00 mm aos 21 dias com 10% e 4,75 – 19,00 mm aos 28 dias com 0%. Entretanto, a diferença está dentro dos limites de tolerância de 2 cm, sendo interpretada como variação da quantidade de materiais porosos, absorvendo mais água e, conseqüentemente, aumentando o abatimento.

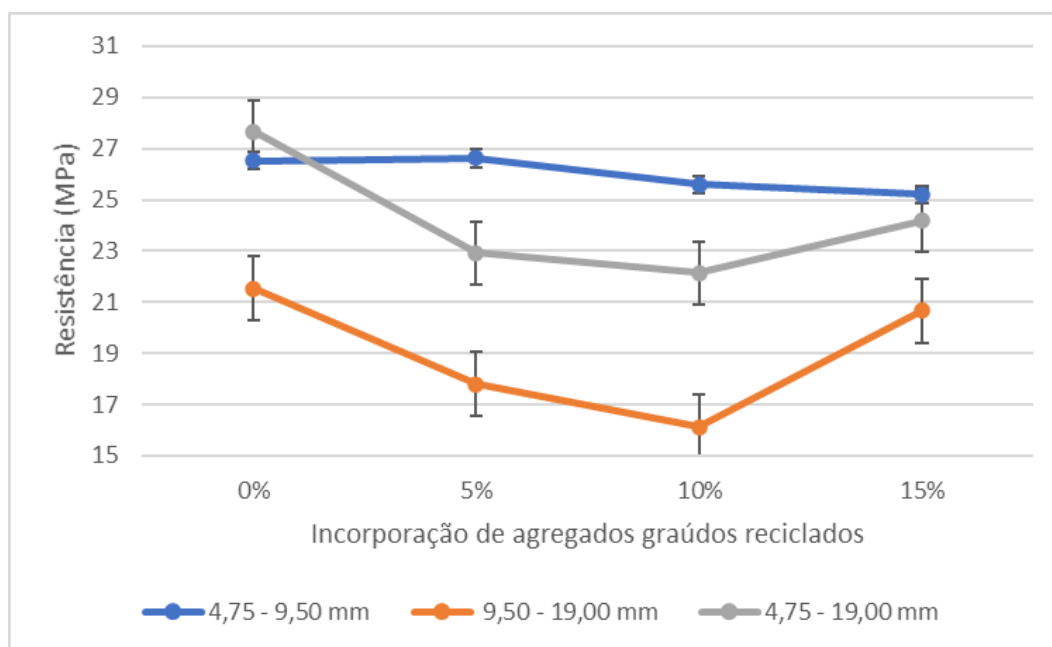
Fronté *et al.* (2017), estudando a inserção de agregados reciclados, perceberam que os valores do teste de abatimento diminuíram, uma vez que, os materiais reciclados foram utilizados secos, e por serem porosos absorveram a água

do concreto, reduzindo sua trabalhabilidade. No caso desta pesquisa, os valores do abatimento mantiveram-se com uma diferença média de cinco a dez milímetros, pois apresentavam materiais com maior e menor porosidade, promovendo um equilíbrio entre os agregados utilizados.

4.4 Ensaios de resistência à compressão

O Gráfico 2 apresenta as médias dos resultados das resistências dos tratamentos com um período de cura de 21 dias.

Gráfico 2: Resistência média (em MPa) dos tratamentos com cura de 21 dias



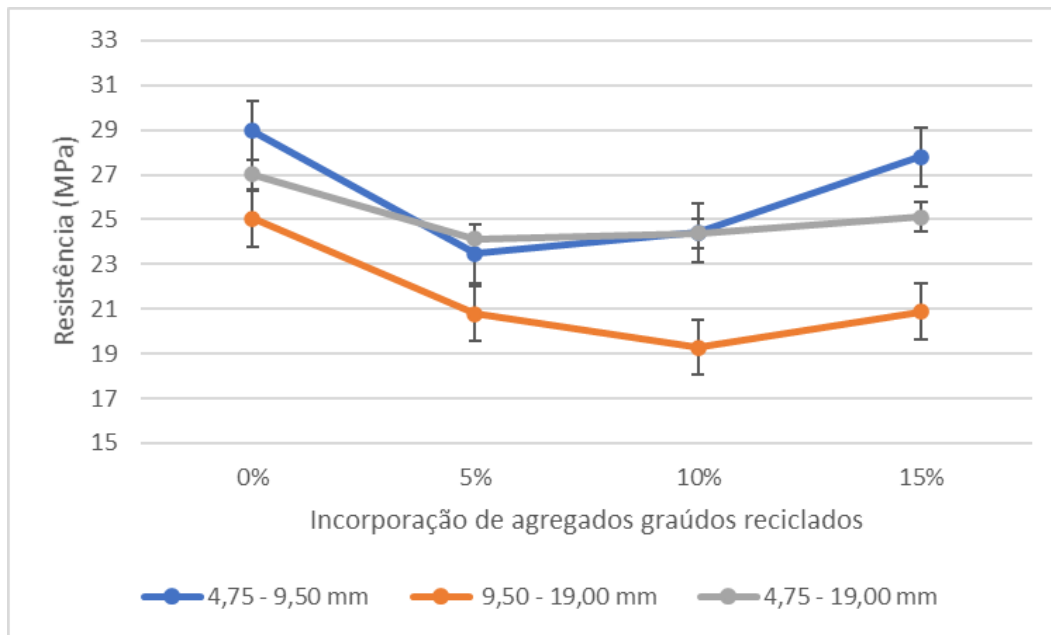
Fonte: Autor (2020).

Observa-se no Gráfico 2 uma perda de resistência progressiva, quando comparadas as porcentagens de 0%, 5% e 10%. Entretanto, quando se compara 10% com 15% de incorporação, há um ganho de resistência para as granulometrias 9,50 – 19,00 mm e 4,75 – 19,00 mm.

É essencial apontar que a granulometria 4,75 – 9,50 mm apresenta resistência maior que as outras duas granulometrias estudadas, sendo 4,75 – 19,00 mm apresentando resistência intermediária e 9,50 – 19,00 mm resistência inferior.

O Gráfico 3 apresenta as médias dos resultados das resistências dos tratamentos com um período de cura de 28 dias.

Gráfico 3: Resistência média (em MPa) dos tratamentos com cura de 28 dias



Fonte: Autor (2020).

Observa-se no Gráfico 3 que a resistência à compressão decresceu ao incorporar 5% e 10% de agregados graúdos reciclados no concreto. Não obstante, quando se compara 10% com 15% de incorporação, há um ganho de resistência para os três tipos de granulometria. A exemplo do que ocorreu aos 21 dias de cura, a maior resistência média também foi observada na granulometria de 4,75 – 9,50 mm.

Ao estudar a reciclagem de concreto como agregado graúdo, McNeil e Kang (2013), encontraram uma redução de 15% da resistência a compressão, ao substituir a mesma porcentagem em agregados reciclados. No caso desta pesquisa, ao realizar a mesma comparação, foram encontrados valores de redução da resistência médias à compressão de aproximadamente 4%, 7% e 17%, para as granulometrias 4,75 – 9,50 mm, 4,75 – 19,00 mm e 9,50 – 19,00 mm, respectivamente.

4.5 Análise estatística

A tabela 8 apresenta a análise de variância (anova) referente a resistência à compressão dos corpos de prova.

Tabela 8: Resultado da ANOVA referente a resistência à compressão dos tratamentos

Tratamento		Valor p
4,75 – 9,50 mm	21 dias	0,1270
	28 dias	0,0030*
9,50 – 19,00 mm	21 dias	0,0068*
	28 dias	0,5210
4,75 – 19,00 mm	21 dias	0,3340
	28 dias	0,5090

* Significativo ao nível de 5% de significância pelo teste F.

Fonte: Autor (2020).

Os tratamentos com 21 dias de cura referente as granulometrias de 4,75mm – 9,50 mm e 4,75 mm – 19,00 mm e com 28 dias de cura referente as granulometrias 9,50 mm – 19,00 mm e 4,75 – 19,00 mm apresentam o valor $p > 0,05$, portanto não há diferença significativa entre os tratamentos testados, ou seja, os valores de resistência são estatisticamente iguais.

Os tratamentos com 21 dias de cura referente a granulometria de 9,50 – 19,00 mm e com 28 dias referente a granulometria de 4,75 – 9,50 mm apresentam significância estatística ($p < 0,05$), portanto há diferença entre os tratamentos testados, ou seja, os valores de resistência são estatisticamente diferentes. Para estes tratamentos, realizou-se o teste de Tukey para identificar quais concentrações diferem na resistência média, apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Teste de Tukey para as resistências médias dos tratamentos

% de agregado reaproveitado	4,75 – 9,50 mm, 28 dias	9,50 – 19,00 mm, 21 dias
0	28,95 MPa A	21,52 MPa D
5	23,46 MPa B	17,80 MPa DE
10	24,42 MPa BC	16,12 MPa E
15	27,80 MPa AC	20,67 MPa D

*Tratamentos com letras iguais não diferem entre si ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey.

Fonte: Autor (2020).

Observa-se, pela Tabela 9, que não há diferença significativa entre o grupo controle e a concentração de 15%, entre as concentrações de 5% e 10% e entre as concentrações de 10% e 15%. As demais combinações diferem entre si.

Nota-se, pela Tabela 9, que as concentrações de 0%, 5% e 15% não apresentaram diferença significativa entre si. A resistência da concentração de 10% se mostrou estatisticamente igual à de 5% e diferente das demais.

Em relação a resistência à compressão, recomenda-se para a granulometria 4,75 – 9,50 mm, aos 28 dias de cura, a utilização de 15% de agregado reciclado, visto que sua resistência à compressão não difere estatisticamente do grupo controle. Em relação a granulometria de 9,50 – 19,00 mm, aos 21 dias de cura, observou-se que a resistência à compressão para a substituição de 5% e 15% não apresentou diferença estatística do grupo controle.

Na pesquisa realizada por Bedoya e Dzul (2015), foram comparadas as seguintes porcentagens de agregado reciclado no concreto; 0%, 25%, 50% e 100%. Em relação ao de 25%, foi explícita uma perda de resistência de aproximadamente 2,5% aos 28 dias e 2% aos 91 dias. Ao confrontar estes dados com os desta pesquisa, apesar de serem em proporções não idênticas, pode-se concluir que o concreto apresenta bom desempenho, sendo viável sua substituição.

5 CONCLUSÃO

Os testes realizados revelaram que os agregados reciclados possuem menor densidade e maior absorção de água quando comparado ao agregado convencional. Com relação à trabalhabilidade, os valores do teste de abatimento encontrados se mantiveram dentro da normalidade.

Comparando-se as três granulometrias estudadas, a opção que confere maior resistência à compressão é 4,75 – 9,50 mm. Com resistência intermediária encontrou-se a granulometria de 4,75 – 19,00 mm e 9,50 – 19,00 mm resistência inferior.

O agregado reciclado apresenta-se como opção viável para utilização no concreto nas porcentagens de incorporação de 5%, 10% e 15% nas granulometrias de 9,50 – 19,00 mm e 4,75 – 19,00 mm. Para a granulometria de 4,75 – 9,50 mm é recomendada a utilização de 15% de incorporação de agregado reciclado, visto que não difere do grupo controle quanto a resistência à compressão.

Como foco de futuras pesquisas, visa-se investigar a influência de aditivos químicos para melhorar o desempenho do concreto reciclado e estudar a viabilidade econômica da incorporação do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2009.

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

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

_____. **NBR 5738**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2016.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2018.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2019.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2004.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 2004.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 1995. 529

BEDOYA, C.; DZUL, L. **Concrete with recycled aggregates as urban sustainability project**. Revista Ingeniería de Construcción, Medellín, v. 30, n. 2, p. 99-108, 30 jul. 2015.

CARVALHO, João Dirceu Nogueira de. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. **Revista Tecnológica**, Maringá, v. 17, n. 1, p.19-28, jan. 2008.

FONSECA, T. D. S.; RIBEIRO JUNIOR, L. U.; BARBOSA, L. F. **Análise da viabilidade técnica da incorporação de agregados reciclados em concreto**. Holos Environment, Itajubá, v. 18, n. 1, p. 1-12, 30 jan. 2018.

FRONTTÉ, C. et al. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD**. Revista Materia, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 1-17, 21 set. 2017.

GEYER, André Luiz Bottolacci; SÁ, Rodrigo Resende de. **Importância do Controle de Qualidade do Concreto no Estado Fresco**. Aparecida de Goiânia: Realmix, 2006.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil**. São Paulo: Pini, 1997.

Kaefer, L.F. (1998). **A Evolução do Concreto Armado**. São Paulo - Brasil.
LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. **Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete**. Rilem, Scotland, v. 33, p. 574-580, 15 nov. 2000.

MCNEIL, K.; KANG, T. H. K. **Recycled Concrete Aggregates: A Review**. International Journal Of Concrete Structures And Materials. Texas, p. 61-69. 27 jan. 2013.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 2008. 573p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: PINI, 1997. 828p

R Core Team (2015). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RIPPER, E. **Como evitar erros na construção**. 3ª ed.rev. São Paulo: Pini, 1995. 168p.

SILVA, G. R. **Manual de traços de concreto**. Rio de Janeiro: Arte e Industria, 1974. 110p.

SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais – Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. 279 p.