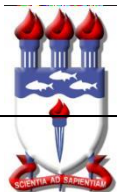


UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

– UFAL CAMPUS DO SERTÃO –

ENGENHARIA CIVIL



**CAMPUS
DO SERTÃO**

VITOR EMMANOEL TAVARES TENÓRIO RAMOS

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADO
MIÚDO RECICLADO PROVENIENTE DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO**

DELMIRO GOUVEIA

2021

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADO
MIÚDO RECICLADO PROVENIENTE DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao programa de graduação da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção de grau acadêmico (Bacharelado) no curso de Engenharia Civil da UFAL – Campus Sertão.

Orientador: Prof. Msc. Alexandre Nascimento de Lima.

Coorientador: Prof. Msc. Rogério de Jesus Santos.

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza CRB-4 2209

R175a Ramos, Vítor Emmanoel Tavares Tenório

Análise das propriedades de concreto produzido com agregado miúdo reciclado proveniente de corpos de prova de concreto / Vítor Emmanoel Tavares Tenório Ramos. - 2021.

48 f. : il.

Orientação: Alexandre Nascimento de Lima.

Coorientação: Rogério de Jesus Santos.

Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas.
Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2021.

1. Construção civil. 2. Resíduos. 3. Agregado miúdo reciclado. 4. Concreto reciclado. I. Lima, Alexandre Nascimento de. II. Santos, Rogério de Jesus. I. Título.

CDU: 691.322

FOLHA DE APROVAÇÃO

AUTOR: VITOR EMMANOEL TAVARES TENÓRIO RAMOS

(Análise das propriedades de concreto produzido com agregado miúdo reciclado proveniente de corpos de prova de concreto/Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, da Universidade federal de Alagoas - Campus Sertão)

Trabalho de conclusão de curso submetido ao corpo docente da Universidade Federal de Alagoas e aprovado em (dia) de (mês) de 2021.

Alexandre Nascimento de Lima

Mestre, Alexandre Nascimento de Lima, Universidade Federal de Alagoas - Orientador

Rogério de Jesus Santos

Mestre, Rogério de Jesus Santos, Universidade Federal de Alagoas - Coorientador

Banca Examinadora:

Karlisson André Nunes da Silva

Mestre, Karlisson André Nunes da Silva, Universidade Federal de Alagoas

José Lima dos Santos Neto

Eng. Civil Especialista, José Lima dos Santos Neto

Aos meus pais, e àqueles que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, que cuida de mim o tempo todo e me conduz nos vales sombrios protegendo-me do mal existente na terra. À vida pelas dificuldades e oportunidades, pelas pessoas que são meus maiores mestres. Às situações que fogem ao controle e possibilitam essa jornada chamada de vida.

Agradeço a minha família, por toda paciência nesses anos ausente, pelo refúgio nas horas difíceis, nos momentos de angústia, onde, várias vezes esgotado, retirava força e motivação para seguir em frente. A Valéria Torres Vieira, minha namorada, companheira e amiga, por estar sempre ao meu lado durante esses anos.

A todos que amo, àqueles que fazem parte da minha vida e aos que, por algum motivo, já não fazem mais. Ao meu tio, Edvanildo Romero Tenório Ramos, engenheiro eletricitista pela POLI UPE, graduando em medicina pela UFAL, por ser exemplo de dedicação à educação.

Ao meu orientador professor Msc. (quase Dr.) Alexandre Nascimento de Lima, pela dedicação e paciência com este trabalho e excelência profissional. Ao meu coorientador professor Msc. Rogério de Jesus Santos, pela amizade construída durante a graduação e pelo auxílio nos momentos difíceis, além do apoio indispensável à realização deste trabalho.

A todos os funcionários do campus, por tudo que foi vivenciado nesses anos, em especial ao pessoal da limpeza, que não mediam esforços no “BOM DIA” e “BOA NOITE”, ao longo desses anos de convivência, pela paciência, e atenção.

Aos meus amigos de graduação, pela convivência nos momentos extremamente difíceis e desgastantes. Em especial: Lucas Miguel Alencar de Moraes Correia, Renan Filipe Pires Novaes, Janaina Carvalho Menezes e Ana Karolayne de Brito Andrade, pela amizade construída na graduação.

Aos meus colegas de trabalho que de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse ao fim dessa jornada, seja com palavras de incentivo, seja com atitudes de camaradagem, seja, compartilhando as longas noites de rondas, ou, entre armas e livros, na caserna.

RESUMO

A Indústria da Construção Civil é um importante setor da economia brasileira, vem apresentando nos últimos anos, aumento na participação do Produto Interno Bruto (PIB). Porém, mesmo com o desenvolvimento apresentado, o desperdício de materiais e a crescente geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) provenientes de construção e demolição (RCD) causam grandes impactos ao meio ambiente. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo analisar a substituição dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos reciclados provenientes de resíduos “cinzas” de construção e demolição para produção de concreto reciclado. Para isto, o presente, faz uma comparação entre as propriedades do concreto convencional e as propriedades do concreto reciclado, ambos produzidos em laboratório, por meio da análise no estado fresco (trabalhabilidade) e no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração e absorção de água) de traços com 100% de substituição da fração miúda convencional pela miúda reciclada, proveniente de resíduos de corpos de prova de concreto. Os resultados mostram que é possível fazer a substituição de 100% dos agregados miúdos naturais pelos agregados miúdos reciclados em concretos estruturais com redução de apenas 6% na resistência à compressão. No entanto, deve-se fazer um estudo detalhado de dosagem e viabilidade desses materiais para uso em obras. Assim, surge um campo enorme de possibilidades para o aproveitamento desses materiais que precisa ser explorado.

Palavras chave: Resíduos de Construção e Demolição; Agregado; Agregado Miúdo Reciclado; Concreto; Concreto com Agregado Reciclado.

ABSTRACT

The Civil Construction Industry is an important sector of the Brazilian economy, in recent years it has been showing an increase in participation in the Gross Domestic Product (GDP). However, even with the development presented, the waste of materials and the increasing generation of solid waste from construction and demolition (CDW) cause great impacts to the environment. In this sense, this work aims to analyze the replacement of natural small aggregates by recycled small aggregates from construction and demolition waste for the production of recycled concrete. This work makes a comparison between the properties of conventional concrete with the properties of recycled concrete, both produced in the laboratory, through analysis in the fresh (workability) and in the hardened state (compressive strength, tensile strength and water absorption) of traces with 100% replacement of the conventional fine fraction by the recycled fine from residues of concrete specimens. The results show that it is possible to make the replacement of 100% of the natural kids aggregates by the recycled kids aggregates in structural concrete with a reduction of only 6% in compressive strength. However, a detailed study of the dosage and feasibility of these materials should be carried out for use in construction. Thus, there is a huge field of possibilities for the use of these materials that needs to be explored.

Keywords: Construction and Demolition Waste; Aggregate; Fine and recycle aggregate; Concrete; Concrete with recycled aggregate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geração de RSU ano 2017/2018.....	16
Figura 2 – Quantidade de RCD coletados nos municípios brasileiros.....	17
Figura 3 – Equipamentos usados no processamento de RCD.....	19
Figura 4 – Propriedades do concreto.....	22
Figura 5 – Resistência à compressão – Concreto de RCD.....	24
Figura 6 – Absorção do concreto de agregado miúdo reciclado.....	26
Figura 7 – Porosidade do concreto de agregado miúdo reciclado.....	26
Figura 8 – Corpos de prova ensaiados à compressão.....	28
Figura 9 – Processo de beneficiamento.....	29
Figura 10 – Abatimento, moldagem e desforma dos corpos de prova.....	31
Figura 11 – Granulometria – agregados graúdos naturais.....	33
Figura 12 – Granulometria - agregados miúdos: natural e reciclado.....	34
Figura 13 – Ensaaios – estado fresco.....	36
Figura 14 – Resultados no estado fresco.....	37
Figura 15 – Ensaaios – estado endurecido.....	38
Figura 16 – Resistência à compressão aos 7 e 28 dias.....	38
Figura 17 – Resistência à tração aos 7 e 28 dias.....	39
Figura 18 – Absorção de água aos 7 e 28 dias.....	40
Figura 19 – Massa específica aos 7 e 28 dias.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais empregados no concreto de referência.....	30
Tabela 2 – Traço de referência.....	31
Tabela 3 – Ensaaios experimentais realizados.....	32
Tabela 4 – Caracterização dos agregados utilizados.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais;
A/C	Relação Águas por Cimento para Concreto;
AMR	Agregado Miúdo Reciclado;
C100AMR	Concreto com 100% de Agregado Miúdo Reciclado;
C50AMR	Concreto com 50% de Agregado Miúdo Reciclado;
C-AMR-CP	Concreto produzido com Agregado Miúdo Reciclado e Com Pré-Imersão da fração miúda em água;
C-AMR-SP	Concreto produzido com Agregado Miúdo Reciclado e Sem Pré-Imersão da fração miúda em água;
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente;
C-REF	Concreto de Referência;
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
MPa	Mega pascal (Unidade de medida usual para resistência mecânica, equivale a pressão exercida em uma superfície de 1000.000 x N/m^2);
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos;
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos;
RAC	Recycled Aggregate of Concret (Agregado Reciclado de Concreto);
RCD	Resíduos de Construção e Demolição;
TON	Toneladas (Unidade de medida de massa usual na engenharia, equivale a massa de 1000 quilogramas).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo geral	14
1. 2 Objetivos específicos	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 Agregados	15
2.2 Resíduos de Construção e Demolição	16
2.3 Agregado Proveniente de Resíduos de Construção e Demolição.	18
2.4 Concreto Produzido com Agregado Reciclado	22
2.5 Propriedades do Estado Fresco	24
2.5.1 Trabalhabilidade	24
2.5.2 Consistência	24
2.6 Propriedades do Estado Endurecido	25
2.6.1 Resistência à compressão	25
2.6.2 Resistência à tração	26
2.6.3 Porosidade e absorção de água	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 Preparo e Caracterização dos Materiais	29
3.2 Dosagem e Ensaio Realizados	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 Agregados	34
4.1.1 Composição granulométrica	34
4.1.2 Absorção de água e Massa específica	36
4.2 Concreto no Estado Fresco – Trabalhabilidade	36
4.3 Concreto no Estado Endurecido	38
	11

4.3.1 Resistência à compressão	39
4.3.2 Resistência à tração	40
4.3.3 Absorção de água	41
4.3.4 Massa específica	42
5 CONCLUSÃO	44
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 INTRODUÇÃO

É evidente a participação que a indústria da construção civil vem apresentando na economia brasileira nos últimos anos (RODRIGUES & FUCALÉ, 2014). Em 2019, os registros mostram um aumento de 4,4% na parcela correspondente à construção civil, no Produto Interno Bruto (IBGE, 2020).

A pesquisa anual da indústria da construção, referente ao exercício 2018, relata que a atividade gerou R\$ 278 bilhões no período. Desse total, 95,1% foi correspondente a novas obras e serviços de construção, ocupando mais de 124 mil empresas e empregando, aproximadamente, 2 milhões de pessoas (IBGE, 2020).

Porém, mesmo com o desenvolvimento apresentado no setor, o desperdício de materiais e a crescente geração de resíduos de construção e demolição (RCD) causam grandes impactos ao meio ambiente (Brasileiro & Matos, 2015). Segundo os serviços de limpeza pública, em 2018 foram coletadas 122.012 toneladas desses resíduos por dia (ABRELPE, 2020).

Conforme o panorama de resíduos sólidos do Brasil, os dados referem-se à quantidade coletada pelos municípios, em sua maioria, refletem apenas o que foi abandonado em vias e logradouros públicos (ABRELPE, 2020). Do ponto de vista da pesquisa e inovação, conforme Ulsen (2011), o desafio é desenvolver tecnologias de reciclagem para ampliar o mercado de utilização de agregados reciclados.

Nesta perspectiva, em 02 de agosto de 2010, o Congresso Nacional, decretou a Lei nº 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Um importante instrumento normativo que abriga uma série de medidas para auxiliar o país no combate aos problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos urbanos (RSU) (BRASIL, 2010).

Inspirado nos impactos ambientais desses resíduos, o legislador, adota como diretriz a responsabilidade compartilhada, fazendo uso da gestão integrada, onde, o poder público, juntamente com o setor industrial e a sociedade civil assumem o compromisso com os princípios de redução, reutilização e reciclagem que fundamentam o desenvolvimento sustentável.

Tendo como base as premissas anteriores, o presente trabalho tem como meta estudar o agregado miúdo reciclado (AMR), proveniente de corpos de prova de concreto, para caracterizar o uso do material como matéria-prima alternativa à indústria da construção civil para produção de concreto reciclado. Assim, tem-se:

1.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento físico-mecânico do concreto produzido com agregado miúdo reciclado, em relação ao comportamento do concreto convencional, ambos no estado fresco e no estado endurecido.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o AMR quanto ao uso para produção de concreto;
- Determinar a consistência do concreto produzido com AMR e comparar com o concreto de referência (C-REF);
- Comparar a resistência mecânica do C-REF com a resistência do concreto produzido com AMR;
- Avaliar a absorção e o índice de vazios do concreto proveniente de AMR e comparar com os índices do C-REF.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os agregados usados em concretos na indústria da construção civil, expõe dados da geração de resíduos provenientes da construção e demolição. Como também, evidencia o aproveitamento dos RCD para a produção de agregados reciclados. Além de relacionar algumas propriedades dos agregados reciclados com as propriedades dos agregados naturais para uso desses materiais em concretos estruturais.

2.1 Agregados

Os agregados têm origem diversa, Brasileiro & Matos (2015), argumentam que a extração de agregados miúdos por meio de sedimentos aluviais causa a degradação ambiental, a modificação do leito dos rios e a alteração do equilíbrio ecológico. Além disso, a extração de material inerte de formações rochosas altera a paisagem e provoca instabilidades ambientais.

Bauer (2012), classifica os agregados segundo a origem como naturais, encontrados de forma particulada na natureza, ou, industrializados que precisam passar por processos industriais de britagem e segregação.

A NBR 7211 (ABNT, 2005), define agregado como um material composto por grãos duros, compactos, duráveis, limpos e que não devem conter substâncias que afetem a hidratação e o endurecimento do cimento.

Bauer (2012), descreve o agregado como um material incoesivo, ou seja, não é composto por argilas e de atividade química praticamente nula. A NBR 7211 (ABNT, 2005), classifica os agregados em duas frações, miúdos e graúdos. Logo, de forma geral, os agregados miúdos são as areias e os graúdos representam os cascalhos e as britas. Conforme a NBR 7211:

“Areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm. Pedregulho ou a brita proveniente de rochas estáveis, ou mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm”. (ABNT, 2005).

Segundo Neville & Brooks (2013), aproximadamente $\frac{3}{4}$ do volume do concreto é ocupado pelos agregados, logo a qualidade desse material é muito importante para o desempenho do composto.

Os agregados industriais podem ser classificados em vários tipos, a exemplo: brita, pedra britada, pó de pedra, areia britada, fíller, entre outros. Porém, destaca-se para uso em concretos estruturais, a fração que representa cerca de 80% do peso e 20% do custo do concreto, sem aditivos, com resistência mecânica da ordem de 15 Mpa (BAUER, 2012).

Neville & Brooks (2013), não limitam os agregados miúdos quanto a origem ou tipo, apenas faz ressalvas excluindo os agregados provenientes de rochas macias, friáveis ou de baixa resistência à compressão, ou ainda, aqueles que contenham gesso, pirita, matéria orgânica, argila, ou qualquer material que prejudique a qualidade do concreto ou a aderência à argamassa.

Logo, não há limitações para a composição do concreto. Porém, deve-se tomar cuidado com as especificações deste material para garantir a manutenção de características mínimas de usabilidade.

2.2 Resíduos de Construção e Demolição

Segundo Brasileiro & Matos (2015), a geração de RCD é anterior a qualquer obra ou serviço. Ulsen (2011), descreve que a indústria da construção consome uma enorme quantidade de matéria-prima e gera uma grande quantidade de resíduos de construção e demolição.

Para os autores, os resíduos, têm origem diversa, logo considera-se RCD, todo e qualquer resíduo proveniente de atividades relacionadas à construção civil. Dessa forma, evidenciando o crescimento do setor e a necessidade de gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, a resolução nº 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), estabelece diretrizes para a efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos da construção civil (CONAMA, 2002).

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), com base nos dados do Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil, exercício 2018/2019, relata que foram gerados 79 milhões de toneladas de RSU no

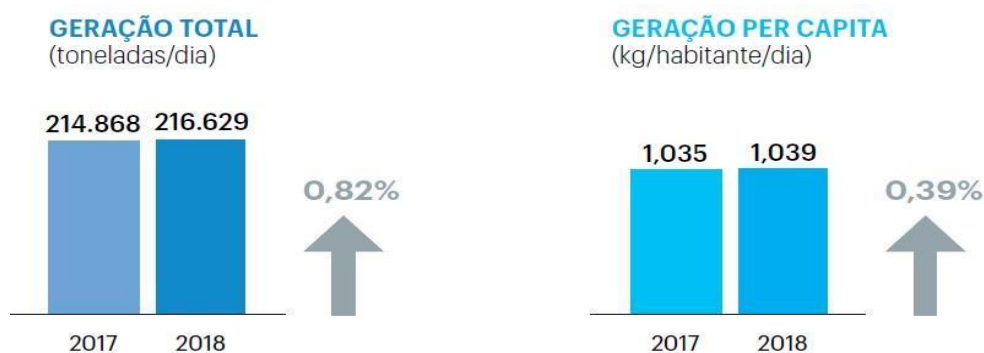
período e que desse montante, aproximadamente 57%, 44,5 milhões de toneladas é proveniente da indústria da construção civil. Porém, pouco menos da metade desses resíduos recebeu a destinação adequada em aterros sanitários. Assim, nota-se um campo imenso de pesquisa e exploração econômica desses materiais, tendo em mente que a maior parte desses resíduos podem ser reciclado ou reaproveitado.

Destacando a importância do tema, observa-se que no Reino Unido são produzidos anualmente, cerca de 109 milhões de toneladas, na China continental, estima-se uma geração de aproximadamente 200 milhões de toneladas (Brasileiro & Matos, 2015). Brasileiro & Matos (2015), ainda relatam que só a província de Hong Kong, passou a produzir cerca de 15 milhões de toneladas (Ton) de RCD por ano.

A figura 1, mostra que a geração RSU no Brasil, nos anos 2017 e 2018, foi superior a 200 mil toneladas diárias, ou seja, em média cada brasileiro produziu, no período, um quilograma de resíduo sólido urbano por dia. Com isso, nota-se um crescimento anual de 0,82% no total de resíduos gerados no exercício 2017/2018 (ABRELPE, 2020).

Figura 1: Geração de RSU ano 2017/2018.

• GERAÇÃO DE RSU NO BRASIL



Fonte: Adaptado ABRELPE/IBGE, 2020.

Para Brasileiro & Matos (2015), a parcela de resíduos de construção e demolição presente nos RSU varia entre 41 e 70%. Os mesmos destacam que na cidade de Salvador, em um período de 10 anos, o percentual de RCD passou de 4,4% para 49,8%.

Conforme a figura 2, a quantidade de resíduos de construção e demolição coletados pelos municípios brasileiros diminuiu 1,15% entre os exercícios 2017 e 2018. Porém, tanto no Brasil e quanto no exterior, a parcela de geração de RCD supera de 2 a 3 vezes a massa de lixo comum (Brasileiro & Matos, 2015).

Figura 2: Quantidade de RCD coletados nos municípios brasileiros.

2017		2018	
Total (toneladas/dia)	Per capita (kg/habitante/dia)	Total (toneladas/dia)	Per capita (kg/habitante/dia)
123.421	0,594	122.012	0,585

Fonte: Adaptado ABRELPE/IBGE, 2020.

Torna-se então, um problema de muitas faces. Por exemplo, na cidade de Guarulhos, região metropolitana da grande São Paulo, o gerenciamento de resíduos de construção e demolição, gerou uma economia de R\$ 87,4 milhões em 11 anos para as empresas de limpeza pública, e uma receita de R\$ 7,7 milhões pela substituição dos agregados naturais pelos reciclados (CETESB, 2020). Assim:

“A falta de gerenciamento desses resíduos afeta as cidades nos aspectos sociais, econômicos e ambientais. Desta forma, ações no sentido de enfrentar este problema tiveram início no final da década de 1980 em alguns países da Europa, enquanto que no Brasil somente no início do século XXI.” (Brasileiro & Matos, 2015).

Conforme dados do Panorama Nacional de Resíduos de Construção e Demolição, expostos na figura 2, os serviços de limpeza pública dos municípios brasileiros coletaram em 2018, 122.012 toneladas de RCD por dia (ABRELPE, 2020).

2.3 Agregado Proveniente de Resíduos de Construção e Demolição.

Ângulo (2005), estudando os processos de beneficiamento de agregados provenientes de RCD, constatou uma grande variação na produção entre miúdos e graúdos. Tenório (2007), nota que além de elevada quantidade de finos, passantes na peneira de malha 0,075 mm, estes agregados, não atendem as especificações normativas relativas aos agregados naturais.

Porém, Brasileiro & Matos (2015), afirmam que os RCD podem ser utilizados como matéria prima para agregados de ótima qualidade, tornando-se uma alternativa à indústria da construção civil.

Ulsen (2011), afirma que a britagem de RCD gera uma parcela expressiva de agregados miúdos reciclados, cerca de 40% para a fração < 4,8 mm. Mas a utilização dessa fração tem sido evitada, geralmente, por causa da baixa qualidade apresentada pelo material. Pois, tende a apresentar variabilidade em suas propriedades. Não obstante, pode apresentar-se menos trabalhável, menos resistente, mais deformável, mais poroso e mais permeável (TENÓRIO, 2007).

Araújo et al. (2016), relataram que os agregados obtidos através dos RCD, apresentam uma massa específica próxima à massa específica dos agregados naturais, além de apresentarem uma composição granulométrica semelhante à areia natural, porém, com um teor de finos um pouco maior.

Khüger et al. (2017), afirmaram que o agregado reciclado de RCD pode apresentar constituição diversa. É comum encontrar resíduos de concreto, argamassas, além de outros materiais provenientes de outros processos construtivos.

Porém, nota-se que o processo de produção desses agregados é determinante para as características deste material, principalmente para a fração miúda, a granulometria, a quantidade de impurezas e a qualidade da argamassa aderida dependem do processo de cominuição adotado (KRÜGER et al, 2017).

O processo de transformação do RCD, em agregado, não é muito diferente do processamento dos agregados naturais. Em grande parte, o resíduo gerado pela indústria da construção civil é formado por concreto e argamassa, denominados resíduos “cinzas” (ARAÚJO et al, 2016).

Ulse (2011), observou que os processos de reciclagem desses resíduos envolvem basicamente a britagem e o peneiramento a seco. Para Pedroso et al. (2017), os equipamentos utilizados na obtenção dos agregados naturais podem ser adaptados ou diretamente usados para a produção dos agregados reciclados.

Araújo et al. (2016), citam a utilização de um moinho de tambor rotativo, no qual os resíduos de construção e demolição são processados em intervalos de tempo que variam entre 10 e 15 minutos. Onde, ao final do processo, são obtidos agregados reciclados de morfologia e absorção próximos aos apresentados pelos agregados naturais, obtendo-se um agregado de melhor qualidade.

Mostofinejad et al. (2020), buscaram minimizar a influência negativa do agregado reciclado nas propriedades do concreto usando um britador de mandíbulas e um equipamento de abrasão Los Angeles para produzir agregados miúdos reciclados.

Na figura 3, os agregados reciclados foram obtidos por trituração usando o britador de mandíbulas (figura 3-A), em seguida, houve a introdução do AMR no equipamento de abrasão Los Angeles (figura 3-B), obtendo-se um composto reciclado que foi utilizado como ligante (figura 3-C), que substituiu em até 20% a quantidade de cimento portland comum, obtendo excelentes resultados contra a ação de íons cloreto em ambientes agressivos.

Figura 3: Equipamentos usados no processamento de RCD.



Fonte: Adaptado, Mostofinejad et al., 2020.

Para garantir o bom comportamento das propriedades do concreto produzido com agregados reciclados torna-se fundamental a adequada seleção dos resíduos que darão origem ao composto (ARAÚJO et al, 2016). Os autores recomendam o uso de agregados com baixo teor de material cerâmico e massa específica maior que 2,5 Kg/dm³.

Além desses fatores, Silva (2020), relata que o uso dos agregados reciclados só poderá ser atrativo financeiramente, se os custos de produção forem, no mínimo, iguais aos custos dos agregados naturais, com qualidades equivalentes.

Porém, as propriedades dos agregados reciclados são diferentes das propriedades dos agregados naturais. Evidentemente, as características físicas são mais importantes que as composições mineralógica e química (ARAÚJO et al, 2016).

Logo, os agregados reciclados geralmente são caracterizados por baixas densidades, altas absorções de água, além de baixa resistência mecânica (BERREDJEM et al, 2020). Assim, os autores relatam que o conjunto de todos esses fatores influencia diretamente as propriedades básicas do concreto produzido com esses materiais: resistência mecânica e durabilidade.

Domenico et al. (2018), descrevem altos valores de porosidade encontrados em agregados provenientes de RCD. Ângulo (2005), relata que agregados reciclados com densidade menor que $2,2 \text{ Kg/dm}^3$, possuem alto teor de material cerâmico. Ambos os autores atribuem ao concreto produzido com este material, perda de resistência à compressão e aumento da permeabilidade, impondo ressalvas para uso do material com fim estrutural.

Além disso, relatam a ausência de normas específicas que regulamentem o uso dos agregados reciclados para produção de concreto estrutural, mesmo existindo normas específicas que tratem do uso do material para outras aplicações como uso em bases e sub-bases de pavimentos. Logo, a solução para minimizar os efeitos da porosidade é o controle de qualidade do agregado de RCD que será utilizado (DOMENICO et al, 2018).

Krüger et al. (2017), confirmam as afirmações anteriores, acrescentando que o grau de hidratação dos resíduos de concreto com idade de reciclagem entre o 1º e o 28º dia de cura tem influência nas propriedades mecânicas do concreto reciclado.

Outro fator observado foi o efeito lento no processo de cura interna, permitindo que boa parte da água da mistura presente no agregado reciclado, esteja disponível para que as reações de hidratação continuem ocorrendo (KRÜGER et al, 2017).

A alta absorção do agregado reciclado, acarreta significativa diminuição da trabalhabilidade do composto (BERREDJEM et al, 2020). Porém essa propriedade pode ser compensada com a pré-imersão do agregado proveniente de RCD. Com tudo, ocorre uma tendência à absorção de aproximadamente 85%, nos primeiros 10 minutos de imersão em água (KRÜGER et al, 2017).

Cabral et al. (2009), observaram que os agregados miúdos oriundos de RCD de cerâmica vermelha são mais porosos que os agregados naturais. logo, necessitam de mais água para alcançar níveis adequados de trabalhabilidade, uma vez que apresentam maiores absorções.

Krüger et al. (2017), afirmam que todos esses fatores podem ser controlados, possibilitando uma série de benefícios à resistência do concreto. Araújo et al. (2016), relatam que o emprego de agregados reciclados de boa qualidade e oriundos de resíduos “cinzas”, resíduos provenientes de concreto e argamassa, apresentam desempenho semelhante ao dos agregados naturais.

Araújo et al. (2016), mostram que é possível realizar a substituição de até 100% do agregado natural pelo agregado reciclado para produção de concreto estrutural com características semelhantes ao concreto de referência.

Paradoxalmente, estudos recentes mostram que a substituição do agregado natural por reciclado exige um incremento na relação água/cimento (BERREDJEM et al, 2020). Fato que prejudica as características do concreto relacionadas a porosidade, comprometendo as propriedades dos compostos produzidos com esse tipo de material.

2.4 Concreto Produzido com Agregado Reciclado

A NBR 8953/2015, classifica o concreto para uso estrutural como aquele que possui massa específica compreendida entre 2000 Kg/m³ e 2800 Kg/m³. Além disso, a resistência à compressão do composto, deve ser igual ou superior à 20 Mpa.

Domenico et al. (2018), argumenta que o uso de agregados reciclados para produção de concreto estrutural pode ser vantajoso, em obras inseridas no meio urbano, onde a escassez de agregados naturais acarreta maiores custos. Portanto,

torna-se uma alternativa, viabilizando a produção de novos concretos e argamassas (Ângulo, 2005).

Brasileiro & Matos (2015), citam vantagens na utilização dos resíduos de construção e demolição na produção de novos concretos, entre elas, o cumprimento a legislação ambiental. Na figura 4, é possível observar o comportamento das propriedades dos concretos produzidos com agregados naturais em relação ao comportamento daqueles produzidos com agregados reciclados em função da porosidade.

Figura 4: Propriedades do concreto.



Fonte: Adaptado de ARAÚJO et al, 2016; KRÜGER et al, 2017; DOMENICO et al, 2018.

Além disso, Pepe et al. (2014), produziram concretos de agregados reciclados com valores de resistência, à compressão próximos à 30 Mpa, e com perdas menores que 10% quando comparadas aos valores de resistência do concreto com agregados naturais (ARAÚJO et al, 2016).

Trabalhos recentes, mostram que a substituição de 50% a 100% dos agregados naturais pelos agregados reciclados não traz prejuízos às propriedades mecânicas do concreto (RODRIGUES & FUCALÉ, 2014), (ARAÚJO et al, 2016) e (Silva, 2020).

Porém, o concreto produzido com agregado graúdo reciclado, oferece maior influência sobre a resistência à compressão, quando comparado ao miúdo, mas, ambos, quando ensaiados à compressão, apresentam resistências inferiores aos concretos de referência (KRÜGER et al, 2017).

2.5 Propriedades do Estado Fresco

Neville & Brooks (2013), descrevem que as propriedades do estado fresco são de vital importância para determinação da resistência, estabilidade e durabilidade do concreto. Pois o grau de adensamento depende da trabalhabilidade e consistência do composto, uma vez que, este deve ser adequadamente transportado, lançado e adensado, de forma que não sofra segregação.

2.5.1 Trabalhabilidade

Para Bauer (2012), a trabalhabilidade é uma característica mais subjetiva do que física, pois envolve considerações relativas à natureza da obra e aos métodos de execução adotados. Portanto, um concreto pode ser trabalhável num caso e não ser em outro.

Contudo, a trabalhabilidade é fundamental para se conseguir compactação adequada, de forma que assegure a máxima eficiência e desempenho no canteiro de obras. Rodrigues & Fucale (2014), perceberam a perda de trabalhabilidade e de coesão dos concretos reciclados produzidos com a mesma relação água/cimento, em relação aos concretos de referência.

Logo, conforme as autoras, é necessário adicionar água na mistura para suprir a absorção do agregado reciclado, fato também observado por Cabral et al. (2009), Krüger et al. (2017) e Berredjem et al. (2020).

2.5.2 Consistência

Geralmente os concretos produzidos com agregados reciclados apresentam menor consistência. Bauer (2012), confirma este aspecto, argumentando que mudanças na granulometria e forma dos grãos, resultam em mudanças na consistência do concreto.

Tenório (2007), relata que concretos confeccionados somente com agregados graúdos reciclados têm consistência menos prejudicada. Para o autor, a maior presença de finos, materiais pulverulentos, a forma mais lamelar ou angular dos grãos, a textura mais rugosa e a porosidade, prejudicam a consistência. Araújo et al. (2016), constataram menor consistência em concretos produzidos com agregados reciclados.

2.6 Propriedades do Estado Endurecido

As propriedades do estado endurecido, relacionam-se à capacidade de resistir aos esforços solicitantes, provenientes de carregamentos externos. Logo, ocorre redução nas propriedades do estado endurecido quando há substituição total dos agregados naturais pelos agregados miúdos reciclados oriundos de resíduos “cinzas”.

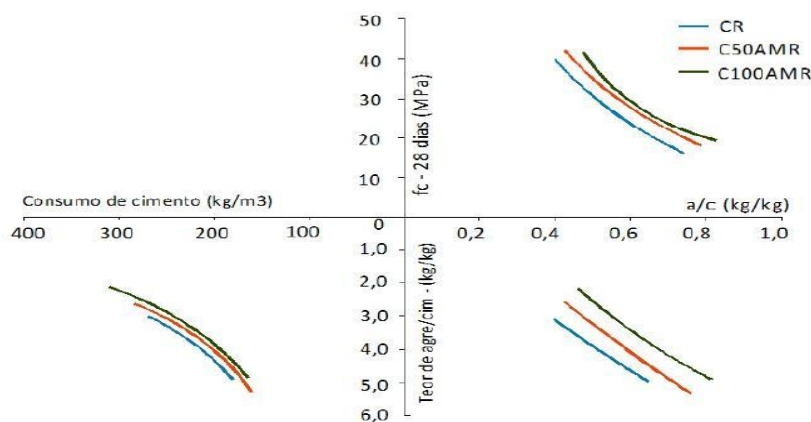
2.6.1 Resistência à compressão

Neville & Brooks (2013), afirmam que a porosidade da pasta de cimento é um fator determinante para a resistência à compressão dos concretos, de modo que resistências elevadas são alcançadas com baixa porosidade, obtida com uma boa compactação e com relações água/cimento extremamente baixas.

Porém, Ângulo (2005), nota que a resistência dos concretos reciclados produzidos está limitada, pois, os agregados de RCD são os principais responsáveis pela introdução de porosidade no sistema. Tenório (2007), confirma essa tendência, argumentando que para um mesmo consumo de cimento ou relação água/cimento, o único fator que afeta a resistência do concreto é a porosidade do agregado.

Entretanto, Rodrigues & Fucale (2014), relatam que não há alterações significativas nos valores de resistência à compressão (figura 5), e que o concreto reciclado apresentou desempenho até mesmo superior quando comparado ao concreto de referência, possivelmente pela diminuição da relação água/cimento efetiva da mistura e pela boa qualidade do agregado reciclado usado na pesquisa.

Figura 5: Resistência à Compressão Concreto de RCD.



Fonte: Adaptado, Rodrigues & Fucale, 2014.

Na figura 5, nota-se que o traço C100AMR (100% de substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado), apresentou resistência à compressão um pouco maior que o CR (concreto de referência). O traço C50AMR (50% de substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado), apresentou o melhor desempenho quando ensaiado à compressão, porém mostrou um leve crescimento no consumo de cimento, evidenciado pelo incremento da relação água/cimento efetiva.

Para os concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de concreto, há ganho relativo de resistência aos 28 dias (RODRIGUES & FUCALE, 2014). Atribuído à ação cimentante das partículas de cimento não hidratadas, contidas no agregado miúdo reciclado. Resultados semelhantes foram apresentados por Pepe et al. (2014), para concretos com 100% de agregados graúdos reciclados tratados.

2.6.2 Resistência à tração

Após análises do comportamento à tração, os concretos de RCD, apresentaram comportamento semelhante à compressão, quando usadas as mesmas relações água/cimento dos concretos de referência.

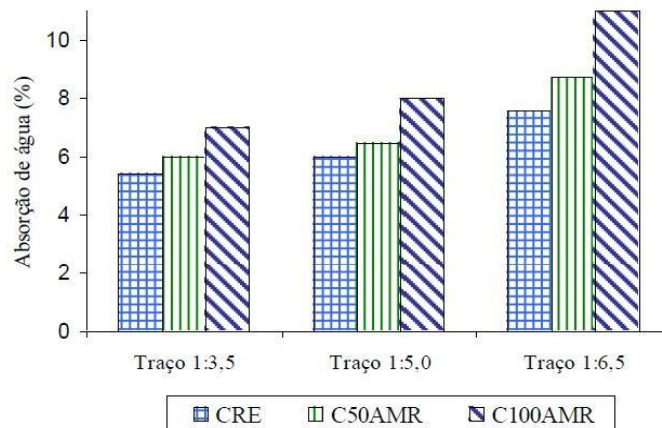
Porém, o agregado graúdo reciclado comportou-se de forma negativa em relação a resistência à tração, quando comparado ao agregado miúdo, houve redução nas resistências de 18,3% para o miúdo e 25,5% para o graúdo (KRÜGER et al, 2017).

2.6.3 Porosidade e absorção de água

Cabral et al. (2009), observaram o aumento proporcional da porosidade do concreto reciclado, em traços pobres, onde a relação água/cimento é maior. Nota-se que a porosidade do agregado, é relevantemente mais influente à durabilidade do concreto do que a própria natureza mineralógica do material. Pois, alta porosidade, implica grande quantidade de vazios, conseqüentemente, menor resistência mecânica do material (KRÜGER et al, 2017).

Rodrigues & Fucale (2014), encontraram resultados que confirmam estas afirmações. Em seu trabalho, verificou-se o aumento da quantidade de vazios, queda da massa específica e conseqüente aumento de absorção (figura 6).

Figura 6: Absorção do concreto de agregado miúdo reciclado.

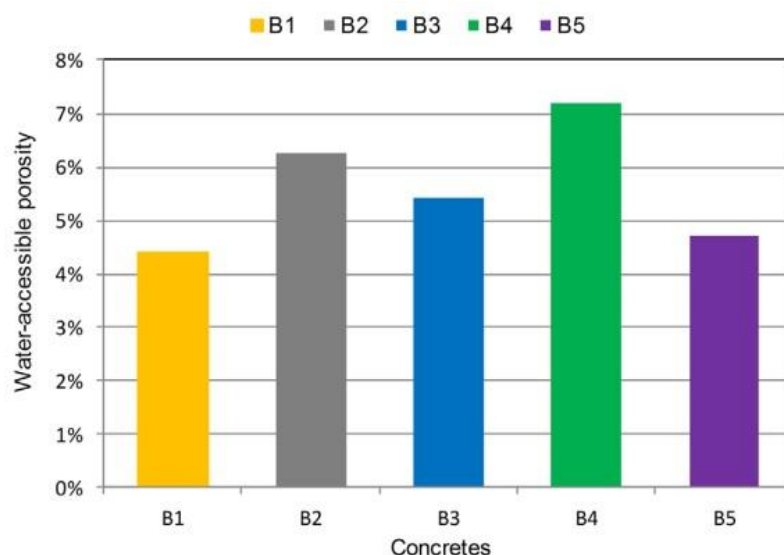


Fonte: Adaptado, Rodrigues & Fucale, 2014.

As mesmas, relatam uma absorção de água, no concreto reciclado, até 60% maior (traço 1:6,5), em relação ao concreto de referência para 100% de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado proveniente de RCD.

Berredjem et al. (2020), confirmam os efeitos da fração fina reciclada na alta porosidade dos concretos reciclados. Na figura 7, encontraram valores semelhantes de absorção nos traços B2 (concreto com agregado miúdo reciclado e agregado graúdo natural) e B4 (concreto com ambos agregados, miúdo e graúdo, reciclados).

Figura 7: Porosidade dos concretos produzidos com agregados reciclados.



Fonte: Adaptado, Berredjem et al, 2020.

Alcançando respectivamente, valores superiores à 42% e 64% de porosidade em relação ao traço B1 de referência. Ocorre que os agregados reciclados de concreto (RAC), pré-saturados, influenciam a zona de transição do concreto produzido com estes minerais. Pois, a água absorvida pelos agregados reciclados tende a migrar para a pasta de cimento, induzindo porosidade adicional no sistema (KRÜGER et al, 2017), (BERREDJEM et al, 2020).

Logo, os autores desse estudo, concluíram que o uso dos agregados reciclados, causa a perda de propriedades mecânicas por introdução de porosidade no sistema. Fato relatado por diversos trabalhos presentes na literatura estudada.

Por outro lado, a durabilidade do concreto reciclado pode ser melhorada em relação ao concreto convencional, por meio de um estudo de dosagem ou projeto de dosagem apropriado (MOSTOFINEJAD et al, 2020). Tendo em mente que as propriedades dos agregados reciclados são diferentes das propriedades dos agregados naturais.

Assim, Mostofinejad et al. (2020) mostram que a reciclagem de concreto representa uma solução racional, pois, seus estudos apontam que a expansão e a absorção de água do concreto reciclado exposto à ambientes agressivos diminuiram com o uso dos agregados miúdos reciclados com substituição parcial de até 30% do agregado convencional.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item são apresentados os materiais usados na pesquisa, além dos métodos utilizados para a caracterização do concreto. Os procedimentos aqui descritos foram realizados a luz de Rodrigues & Fucile (2014) e Gualberto et al. (2019). Para análise das propriedades físicas do concreto reciclado, foram realizados 3 traços de concreto: um com agregado miúdo convencional, que serviu de referência a outros dois traços, que foram realizados com a fração miúda reciclada objeto de estudo desta pesquisa. Sendo que, foi realizada pré-imersão em água (85% da água de absorção do AMR), em um dos compostos e outro não foi adicionada a água de absorção.

3.1 Preparo e Caracterização dos Materiais

O resíduo empregado para o desenvolvimento deste trabalho (figura 8), foi coletado no Laboratório de Materiais (Anexo Mandacarú – UFAL – SERTÃO) e consistiu em corpos de prova de concreto, ensaiados à compressão, provenientes da construção de um hospital no Sertão Alagoano. Nota-se que os resíduos utilizados, se enquadram na Classe A, resíduos de construção e demolição que podem ser reutilizados ou reciclados como agregados, conforme a classificação da resolução nº 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2002).

Figura 8: Corpos de prova ensaiados à compressão.



Fonte: Autor, 2020.

O processo de beneficiamento do resíduo para obtenção do agregado reciclado foi realizado em duas etapas. A primeira, manualmente, com o auxílio de uma marreta de 0,5 Kg, ver figura 9-A, onde os corpos de prova ensaiados à compressão (figura 7) foram cominuídos em tamanhos variáveis, de forma que a classificação do mesmo pudesse atender os requisitos da tabela 2 da NBR NM 51/2000.

Logo em seguida, o material foi processado no equipamento de abrasão “Los Angeles”, figura 9-B, usado normalmente para ensaios de abrasão em agregados graúdos, mas que neste trabalho, foi adaptado para o tratamento secundário da matéria prima usada, após processamento primário. Fato que atribuiu uma nova função ao equipamento, diferente daquela, a qual o equipamento é normalmente utilizado.

Assim, o processamento secundário foi realizado com um total de 12 esferas, número de esferas recomendado pela NBR NM 51/2000, para a graduação A, agregados graúdos de dimensões compreendidas entre 22 mm e 9,5 mm, onde uma massa de 8 kg foi introduzida no equipamento e processada em ciclo de 10 minutos, tempo mínimo recomendado por Araújo et al. (2016) para obter boas características de resistência mecânica.

Figura 9: Processo de beneficiamento.



Figura 9-A



Figura 9-B



Figura 9-C



Figura 9-D

Fonte: Autor, 2020.

Após o processamento secundário, figura 9-C, o material foi peneirado e selecionado, onde, a fração passante na peneira de 4,8 mm, foi armazenada e a fração graúda seguiu para ser descartada. Na figura 9-D, é possível visualizar o agregado miúdo reciclado, obtido após as etapas descritas acima.

Como agregado graúdo natural, utilizou-se britas com dimensões máximas características de 19 mm e 25 mm, respectivamente. Seguindo a recomendação de Rodrigues & Fucale (2014), o agregado graúdo foi lavado para eliminação do material pulverulento e seco a temperatura ambiente por 48 horas, evitando-se erros relativos à influência desse material na composição do concreto.

3.2 Dosagem e Ensaios Realizados

Nesta pesquisa, optou-se por utilizar a mesma dosagem do concreto que deu origem ao resíduo de construção e demolição, uma vez que, a ideia é utilizar o RCD para produzir concreto no próprio canteiro de obra, reaproveitando o composto no mesmo processo produtivo.

Nas tabelas 1 e 2, respectivamente, estão expressas algumas das características físicas dos materiais utilizados e a dosagem em massa do concreto que será usado como referência.

Tabela 1: Materiais empregados no concreto de referência.

Material	Descrição	Característica
Cimento	CP – V ARI	Rc = 50 Mpa
Areia	Módulo de finura:	2,02
	Densidade:	2,10 (Kg/dm ³)
Brita 1	Dimensão máxima característica:	19 mm
	Densidade:	2,61 (Kg/dm ³)
Brita 2	Dimensão máxima característica:	25,0 mm
	Densidade:	2,79 (kg/dm ³)
Aditivo	Densidade:	1,2 (kg/dm ³)
Plastificante	Dosagem:	0,84% sobre a massa de cimento

Fonte: Autor, 2020.

Para cada traço, foram produzidos 20 corpos de prova (cps), ensaiados aos 7 e aos 28 dias. Sendo 4 cps destinados ao ensaio de resistência à compressão, 4 cps ao ensaio de resistência à tração e 2 cps destinados aos ensaios de absorção e massa específica, para cada idade de ensaio.

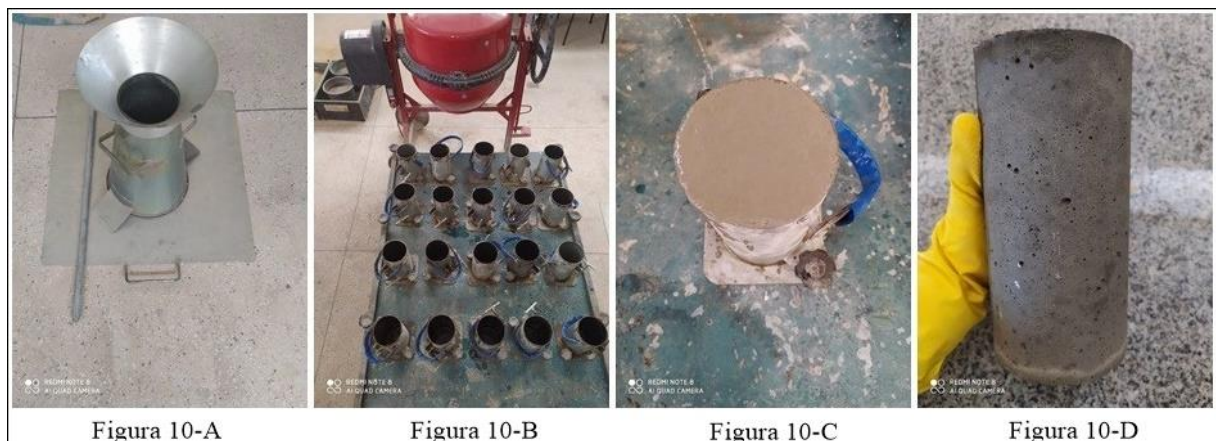
Tabela 2: Traço de referência.

	Dosagem (kg)				Resistência à Compressão (MPa)		Slump test (mm)	Massa Específica (kg/m³)
	Cimento	Areia	Brita 1	Brita 2	A/C	7 dias	28 dias	
1		2,57	1,57	1,73	0,628	32,8	40,4	2340

Fonte: Adaptado, TECNOSENTE, 2020.

Após a mistura na betoneira, o concreto foi ensaiado no estado fresco, figura 10-A, conforme a NBR NM 67/1998 e os corpos de prova foram moldados em fôrmas metálicas cilíndricas de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, figura 10-B. Além disso, no presente estudo, foi realizado adensamento mecânico, utilizando uma mesa vibratória (figuras 10-B e 10-C) e secagem ao ar nas primeiras 24 horas de cura, onde os corpos de prova ficaram acomodados a temperatura ambiente, conforme a NBR 5738/2003.

Figura 10: Abatimento, moldagem e desforma dos corpos de prova.



Fonte: Autor, 2020.

Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados, figura 10-D e curados em reservatórios de água no Laboratório de Materiais (Anexo Mandacarú – UFAL – SERTÃO). Após o período de cura, aos 7 e 28 dias, os corpos de prova foram ensaiados no estado endurecido conforme as normas técnicas descritas na tabela 3, abaixo. O mesmo processo de dosagem, moldagem, cura e ensaios descritos acima foi realizado para os traços com agregado miúdo reciclado, com e sem pré-imersão em água.

Tabela 3: Ensaios experimentais realizados.

Ensaio Estado Endurecido	Método utilizado
Absorção de água	NBR 9778/2005
Massa específica	NBR 9778/2005
Resistência à compressão	NBR 5738/2003 e NBR 5739/2018
Resistência à tração	NBR 7222/2011

Fonte: Autor, 2020.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente, foram analisadas as propriedades dos agregados miúdos (natural e reciclado) e grãos naturais, usados nesta pesquisa. Como também, as propriedades do concreto reciclado no estado fresco (massa específica e consistência) e no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração, absorção de água e massa específica), ambas comparadas com as propriedades apresentadas pelo traço de referência.

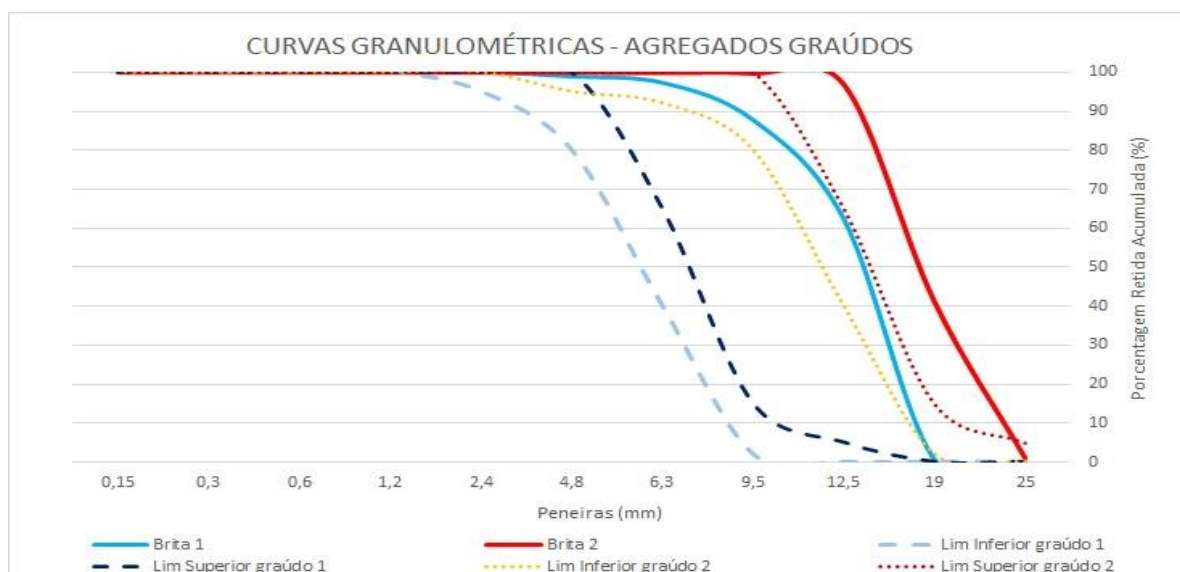
4.1 Agregados

Este item, apresenta os resultados da caracterização granulométrica dos agregados usados. É possível observar que os agregados miúdo e grão, apresentam-se dentro das especificações estabelecidas pela NBR 7211/2005.

4.1.1 Composição granulométrica

Nota-se que a brita 2 utilizada, apresentou-se fora dos limites granulométricos estabelecidos pela NBR 7211/2005, porém de acordo com a dimensão máxima característica de 25 mm. Em relação a brita 1, observa-se uma dimensão máxima característica de 19 mm, com curva granulométrica compreendida entre os limites granulométricos estabelecidos pela NBR 7211/2005 para a brita 2.

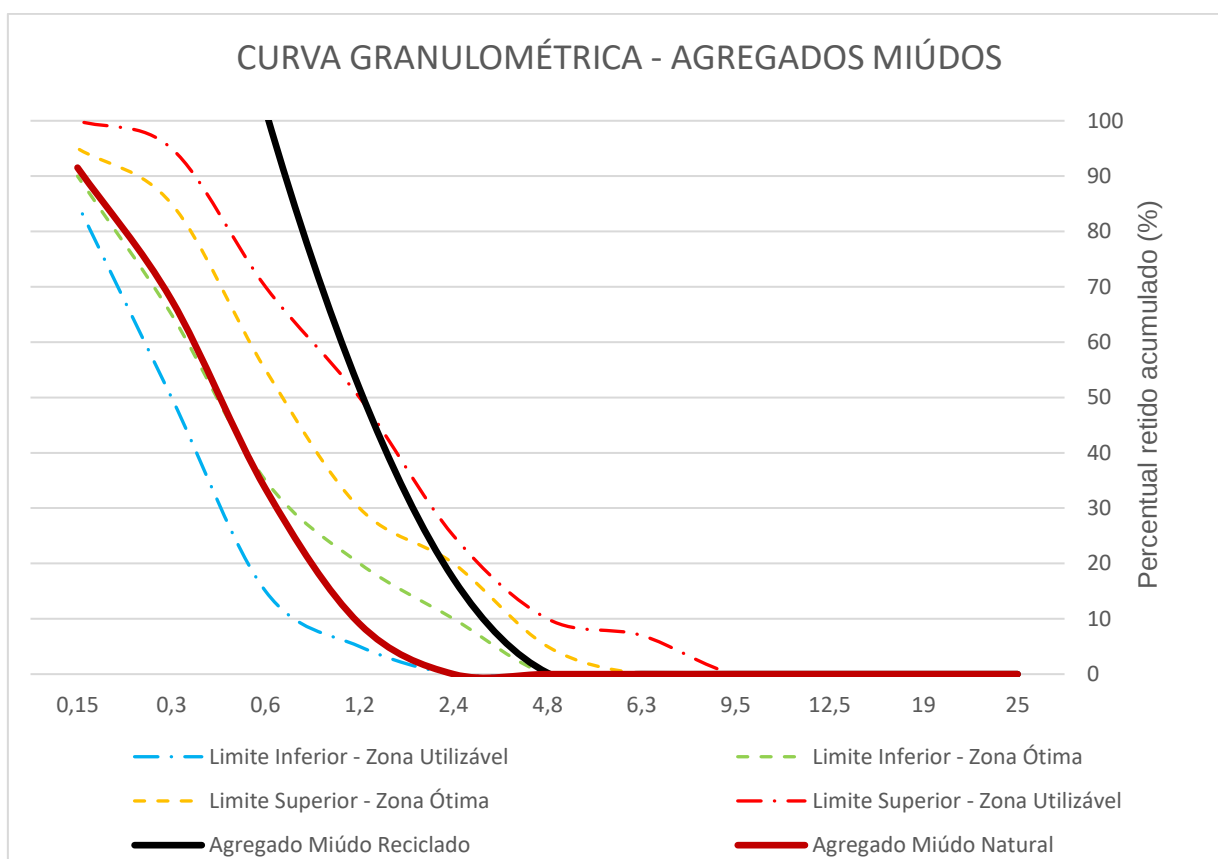
Figura 11: Granulometria agregados grãos naturais.



Fonte: Autor, 2021.

Em relação ao agregado miúdo natural, o mesmo, apresentou-se dentro da zona ótima - limite inferior (ver curva vermelha – figura 12), comportando-se de forma contínua, com uma boa distribuição granulométrica. Porém, o agregado miúdo reciclado apresentou 50% de percentual retido acumulado na peneira de 1,2 mm, (ver curva preta – figura 12), entre a zona utilizável e a zona ótima, fato que evidencia o elevado teor de finos presente no material.

Figura 12: Granulometria agregados miúdos: natural e reciclado.



Fonte: Autor, 2021.

Em relação aos agregados apresentados, nota-se que ambas as frações miúdas, apresentaram dimensão máxima característica de 4,8 mm, limite superior – zona ótima, para a distribuição granulométrica determinada segundo a ABNT NM 248.

No entanto, não existe normas técnicas que regulamentem a caracterização dos materiais reciclados. Fato que evidencia a necessidade de normatização para este tipo de material, uma vez que, o uso de agregados reciclados, torna-se uma realidade evidente, mesmo que em concretos não estruturais.

4.1.2 Absorção de água e Massa específica

De acordo com a tabela 4, o agregado miúdo reciclado, apresentou absorção de 9,35%, cerca de 6 vezes maior, quando comparado a fração miúda natural com absorção de 1,6%. Nota-se uma densidade de 2,32 Kg/dm³, valor superior ao mínimo recomendado de 2,2 Kg/dm³ para uso em concreto estrutural, conforme Krüger et al (2017).

Tabela 4: Caracterização dos agregados utilizados.

Ensaio	Miúdo natural	Miúdo reciclado	Brita 1	Brita 2
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	4,8	19	25
Módulo de Finura	2,01	2,47	3,47	3,39
Densidade (Kg/dm³)	2,15	2,32	2,61	2,79
Absorção (%)	1,6	9,35	0,45	0,2

Fonte: Autor, 2020.

Assim, mesmo a absorção de água sendo inversamente proporcional à densidade, não se pode concluir que o agregado reciclado terá valores menores de absorção, mesmo apresentando densidade maior que o agregado miúdo natural. Uma vez que outros fatores devem ser levados em consideração, como por exemplo, a composição mineralógica e química que não foram analisadas nesta pesquisa.

Além disso, os agregados reciclados com densidade inferior a 2,2 kg/dm³, apresentam alto teor de material cerâmico (Ângulo, 2005). Porém, neste estudo, devido ao resíduo que deu origem a fração miúda reciclada, não foi observada a presença de material cerâmico.

Em relação as frações graúdas (britas 1 e 2), as mesmas apresentaram-se dentro dos valores considerados normais referentes a densidade e a absorção de água. Conforme Rodrigues & Fucale (2014), a absorção de 9,35% do agregado miúdo reciclado, será o único fator que afetará as características do concreto de RCD.

4.2 Concreto no Estado Fresco – Trabalhabilidade

Os resultados dos ensaios no estado fresco podem ser visualizados na figura 13, como também no gráfico de barras descrito na figura 14, onde estão expressos os abatimentos dos compostos estudados e os respectivos consumos de cimento.

Durante a dosagem, notou-se a perda da trabalhabilidade dos compostos com o uso de agregado miúdo reciclado na faixa de densidade entre 2,2 e 2,5 kg/dm³. Além disso, foi possível observar que o uso de 85% da água de absorção do agregado miúdo reciclado causou aumento na relação água/cimento (a/c) efetiva da mistura.

Para o concreto de referência (C-REF), conforme a dosagem prevista na tabela 2, houve um consumo de cimento de 350,40 kg/m³ para a relação a/c efetiva de 0,628.

Tabela 2: Traço de referência.

Cimento	Dosagem (kg)				Resistência à Compressão (MPa)		Slump test (mm)	Massa Específica (kg/m ³)
	Areia	Brita 1	Brita 2	A/C	7 dias	28 dias		
1	2,57	1,57	1,73	0,628	32,8	40,4	200±2	2340

Fonte: Adaptado, TECNOSENTE, 2020.

Notou-se, que o composto apresentou trabalhabilidade ideal para as operações de bombeamento do concreto. Apresentando abatimento de tronco de cone de 210 mm, conforme figura 13-C, abaixo.

Figura 13: Ensaios: estado fresco.



Figura 13-A

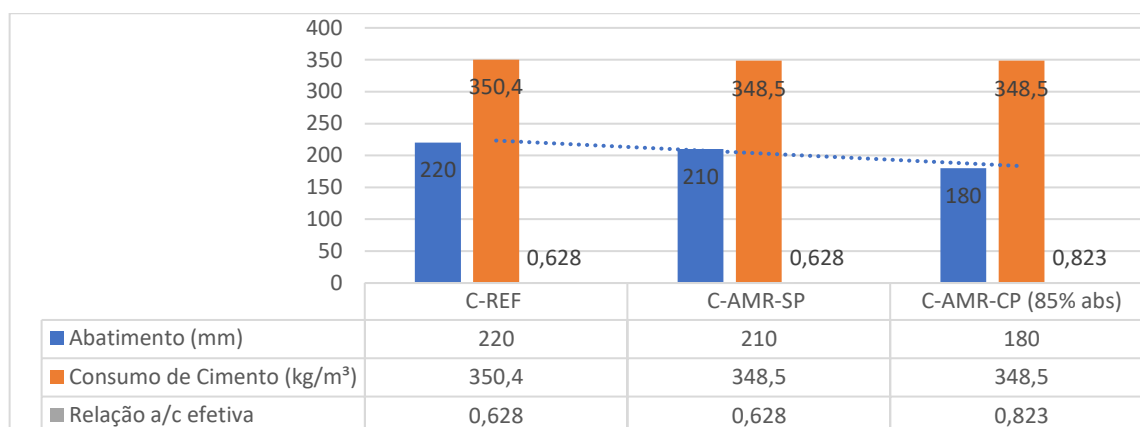
Figura 13-B

Figura 13-C

Fonte: Autor, 2020.

Os resultados disponíveis na figura 14, mostram que o abatimento dos traços com agregado reciclado proveniente de RCD esteve dentro dos limites encontrados para o traço de referência. Tal fato, deve-se ao aumento no volume de aditivo superplastificante adicionado à mistura e ao incremento na relação a/c efetiva no traço com pré-imersão da fração miúda reciclada C-AMR-CP.

Figura 14: Resultados no estado fresco.



Fonte: Autor, 2021.

Assim, para o concreto de agregado miúdo reciclado sem pré-imersão (C-AMR-SP), houve consumo de cimento de 348,50 kg/m³ e relação a/c efetiva de 0,628, igual à do C-REF. Percebeu-se perda severa de trabalhabilidade durante a operação de mistura, sendo necessário dobrar a quantidade de aditivo superplastificante para atingir trabalhabilidade ideal (200 ± 20 mm).

Este fato, justifica-se pela alta absorção do agregado reciclado usado no estudo. Uma vez que, ocorre uma tendência à absorção, nos primeiros minutos de imersão em água, fato que diminui a quantidade de água de amassamento, disponível para a fluidez do concreto.

Para o composto de agregado miúdo reciclado com pré-imersão (C-AMR-CP), nota-se que houve o mesmo consumo de cimento do traço C-AMR-SP. Porém, ocorreu incremento na relação a/c efetiva (0,823), devido a adição de 85% da água de absorção do agregado miúdo reciclado. Fato que ocasionou a redução da quantidade de aditivo superplastificante utilizado em 80%.

Em relação ao C-AMR-CP nota-se um abatimento de 180 mm, dentro da especificação (200 ± 20 mm) às operações de bombeamento para obras de múltiplos pavimentos, inseridas no ambiente urbano conforme dosagem pré-estabelecida.

4.3 Concreto no Estado Endurecido

Os ensaios no estado endurecido podem ser visualizados nas figuras: 15-A e 15-B. Em termos de propriedades mecânicas, de forma geral, os concretos de agregados

reciclados apresentaram resistências inferiores às apresentadas pelo concreto de referência. Logo, as propriedades mecânicas dos concretos, são afetadas pela substituição de 100% da fração miúda natural pela proveniente de RCD.

Figura 15: Ensaios: estado endurecido.

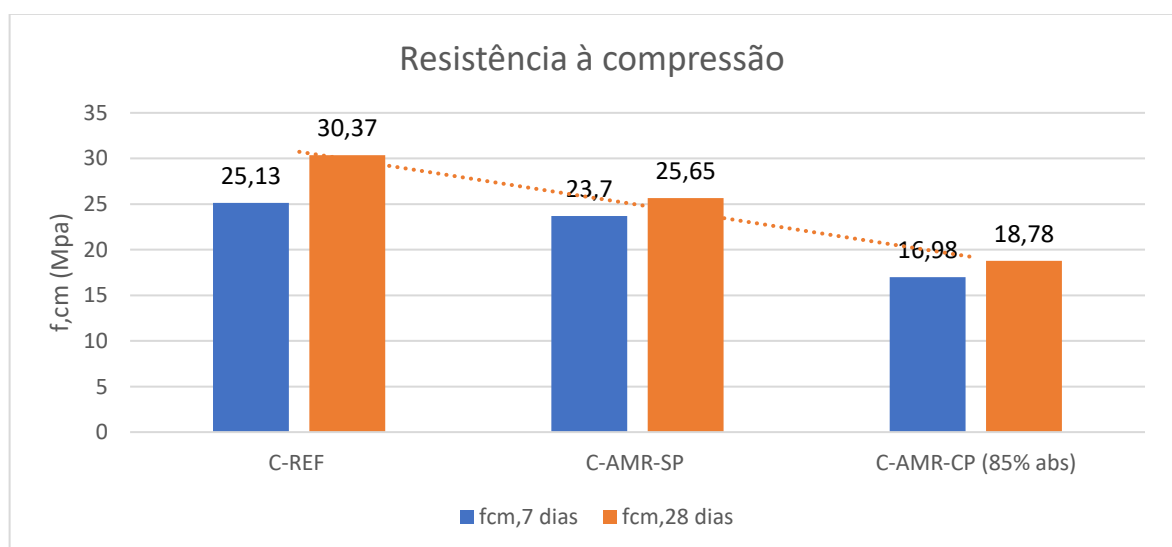


Fonte: Autor, 2020.

4.3.1 Resistência à compressão

A figura 16, mostra os resultados da resistência à compressão dos concretos estudados.

Figura 16: Resistência à compressão aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autor, 2021.

Em relação a resistência à compressão, o composto mais prejudicado foi o C-AMR-CP, com resistência média a compressão aos 7 e 28 dias, respectivamente, 16,98 Mpa e 18,78 Mpa, uma redução de 38,16% aos 7 dias em relação ao concreto de referência. Fato que não permite caracterizar o concreto de agregado miúdo reciclado com pré-imersão para uso estrutural, segundo a NBR 8953/2015.

A redução acentuada na resistência do composto C-AMR-CP, é justificada pelo incremento na relação a/c efetiva. Uma vez que, relações água/cimento elevadas, implicam queda na resistência do concreto (DOMENICO et al, 2018).

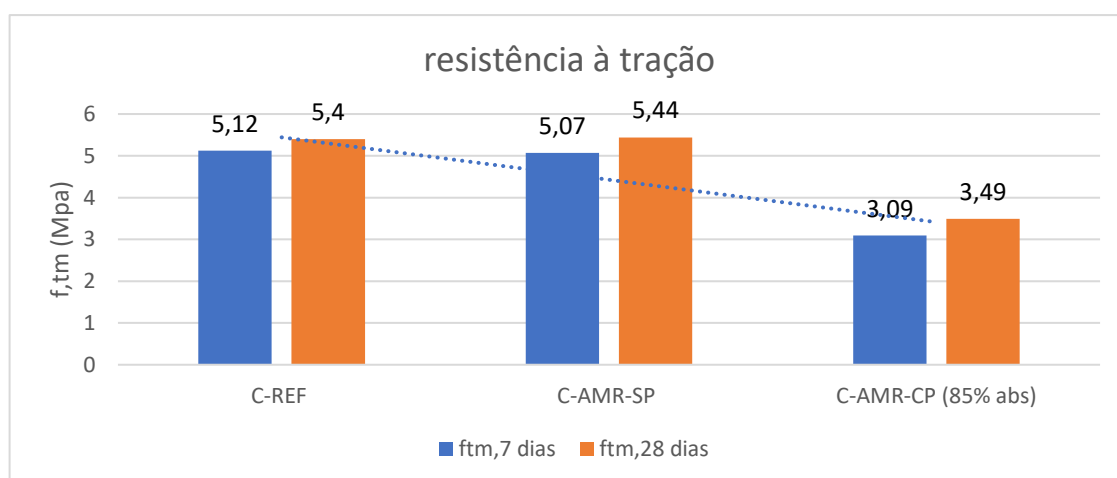
O composto sem pré-imersão C-AMR-SP, apresentou valores próximos aos valores do concreto de referência C-REF. Com redução percentual, respectivamente, inferior a 6% aos 7 dias e inferior a 16% aos 28 dias.

Resultados semelhantes foram encontrados na literatura, Domenico et al. (2018), e Araújo et al. (2016), produziram concretos com agregados miúdos reciclados com valores de resistência à compressão próximos à 30 Mpa e com perdas próximas a 10%. Além disso, os autores mostram que é possível a substituição de até 100% da fração miúda natural pela reciclada proveniente de RCD.

4.3.2 Resistência à tração

A resistência à tração diminuiu com a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, conforme descrito na figura 17.

Figura 17: Resistência à tração aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autor, 2021.

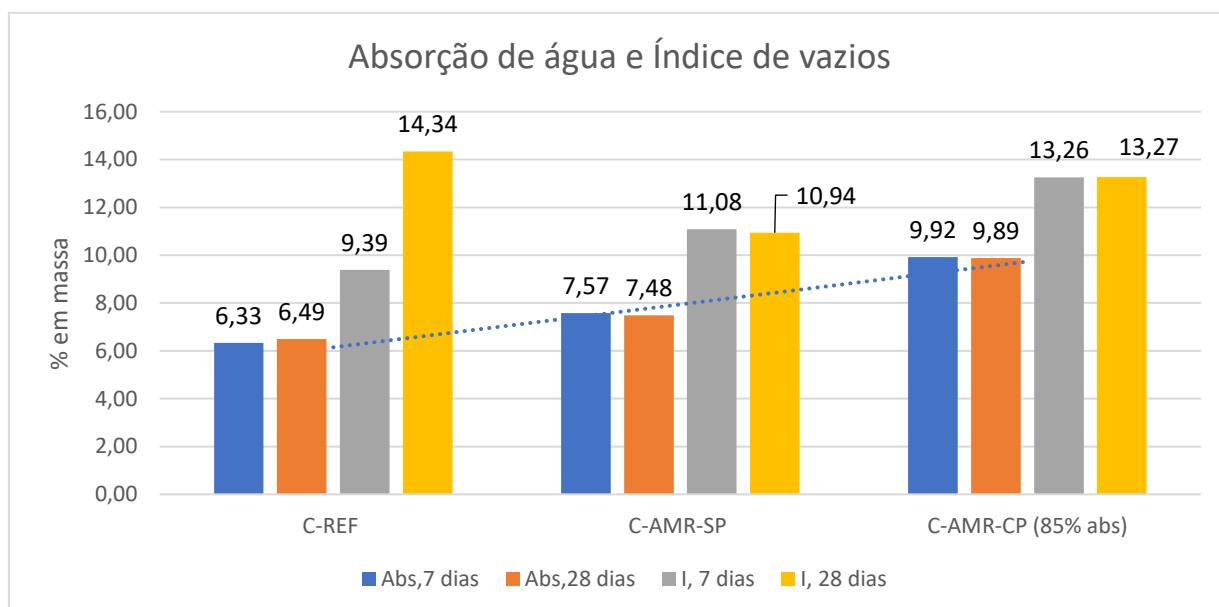
Nota-se, alterações significativas na resistência à tração dos compostos com pré-imersão da fração miúda reciclada C-AMR-CP, onde ocorre redução de até 40% nos valores, provavelmente devido ao excesso de água do composto. Em relação ao concreto sem pré-imersão C-AMR-SP, quase não há redução da resistência à tração, sendo observado, até mesmo ganho relativo de resistência aos 28 dias de cura.

4.3.3 Absorção de água

Rodrigues & Fucale (2014), encontraram absorções de até 60% em traços pobres, com relações água/cimento extremamente altas. Conforme as autoras, a porosidade do agregado, é mais influente à absorção de água do que a própria natureza mineralógica do agregado utilizado. Logo, alta porosidade, implica maior número de vazios, consequentemente maior absorção e menor resistência mecânica (KRÜGER et al, 2017).

Mas o emprego de agregados reciclados de boa qualidade, apresenta desempenho semelhante aos concretos produzidos com agregados naturais. Assim, a figura 18 mostra os resultados de absorção de água para as idades de 7 e 28 dias dos compostos analisados.

Figura 18: Absorção de água e Índice de vazios aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autor, 2021.

Nota-se que ocorreu um aumento nos valores de absorção, principalmente no C-AMR-CP, onde foi observado um crescimento de 36,2% nos valores aos 7 dias. Para o C-AMR-SP, houve 16% de aumento no valor da absorção, justificado pela alta porosidade do agregado miúdo reciclado utilizado no estudo.

Comparando os valores da absorção, aos 7 e 28 dias de cura dos compostos produzidos com o índice de vazios dos mesmos, ocorreu uma tendência de aumento da absorção para os concretos mais porosos.

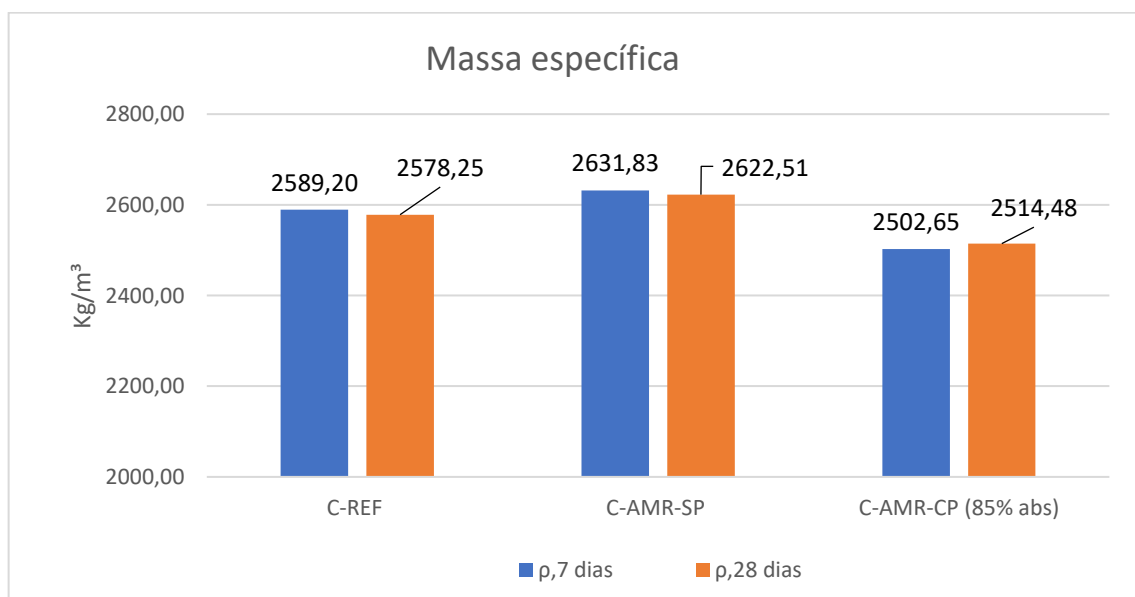
Assim, nos compostos produzidos com 100% de AMR, observa-se uma relação diretamente proporcional entre os valores da absorção e o índice de vazios. Porém, não ocorre o mesmo em relação ao C-REF.

Krüger (2017), também observou esse efeito lento no processo de cura dos compostos produzidos com agregado miúdo reciclado. Fato que evidencia a pequena redução dos índices de absorção e índice de vazios analisados aos 28 dias de cura.

4.3.4 Massa específica

Em relação a massa específica, neste trabalho não houve alterações significativas, nota-se até mesmo crescimento nos valores relativos aos compostos com 100% de AMR, conforme figura 19 abaixo.

Figura 19: Massa específica aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autor, 2021.

Os valores maiores da massa específica para o composto C-AMR-SP, são justificados pela maior densidade do agregado miúdo reciclado, quando comparada ao agregado natural, conforme tabela 4.

Tabela 4: Caracterização dos agregados utilizados.

Ensaio	Miúdo natural	Miúdo reciclado	Brita 1	Brita 2
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	4,8	19	25
Módulo de Finura	2,01	2,47	3,47	3,39
Densidade (Kg/dm³)	2,15	2,32	2,61	2,79
Absorção (%)	1,6	9,35	0,45	0,2

Fonte: Autor, 2020.

Outro fator que deve ser levado em consideração, é o incremento na relação a/c efetiva, onde o uso de 85% da água de absorção do agregado miúdo reciclado no composto C-AMR-CP, ocasionou o aumento na quantidade de água total da mistura. Fato que justifica a queda no índice de massa específica para o C-AMR-CP.

Assim, nota-se que os concretos produzidos com agregado miúdo reciclado, respeitam a Lei de Abrams. Evidenciando que a quantidade de água presente na mistura altera a estrutura interna da pasta de cimento. Logo, quanto maior a relação a/c efetiva, maior é o índice de vazios da mistura. Ocorrendo então, queda na massa específica do concreto, e consequente perda de resistência mecânica do composto.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, observou-se que é possível fazer a substituição de 100% dos agregados miúdos naturais por AMR provenientes de corpos de prova de concreto para produzir concreto com fim estrutural. No entanto, deve-se fazer um estudo detalhado de dosagem do concreto, uma vez que as propriedades do AMR são diferentes das propriedades dos agregados convencionais.

O AMR utilizado nesta pesquisa, é mais poroso que o agregado miúdo convencional. Logo, ocorre perda severa de consistência e trabalhabilidade nos concretos reciclados produzidos com este material. Havendo necessidade de aumentar a quantidade de água na mistura, ou, a quantidade de aditivo superplastificante. No entanto, o uso de 85% da água de absorção do agregado miúdo reciclado, não se mostra eficiente, pois compromete a resistência mecânica do concreto devido ao incremento na relação a/c efetiva.

De forma geral, houve redução das propriedades no estado endurecido dos compostos analisados, quando ocorreu a substituição total da fração miúda convencional pela reciclada proveniente de resíduos “cinzas”. Pela análise gráfica dos indicadores de resistência mecânica, é possível identificar que a porosidade da pasta de cimento é um fator determinante para a resistência mecânica do concreto reciclado. De forma que, resistências elevadas, são alcançadas com baixa porosidade e relações a/c extremamente baixas.

Em relação a metodologia empregada, nota-se que o uso do equipamento de abrasão “Los Angeles”, em tempo de processamento de 10 minutos, produziu AMR de boa qualidade, fato evidenciado pelos índices físicos apresentados pelo composto estudado e pela boa qualidade do concreto produzido.

Por fim, considerando a crescente geração de resíduos de construção e demolição, e os problemas ambientais que o manejo inadequado desses resíduos causa ao meio ambiente, o uso de AMR, torna-se uma alternativa à indústria da construção civil. Entretanto, deve-se analisar a viabilidade para emprego do material em obra.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 67: **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

_____. NBR NM 51: **Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro, 2000.

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

_____. NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova: especificação**. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. NBR 7211: **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 8953: **Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama 2018/2019**. São Paulo, 2020. Disponível em : <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>>. Acesso em: 15 de Março de 2020.

ÂNGULO. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica -USP, São Paulo, 2005.

ARAÚJO, D. L.; FELIX, L. P.; SILVA, L. C.; SANTOS, T. M. **Influência de agregados reciclados de resíduos de construção nas propriedades mecânicas do concreto**. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.5216/reec.V11i1.35467>>. Acesso em: 15 de Março de 2020.

BAUER, L. A. **Materiais de Construção**. 5ª ed., Vol. unico.: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, Rio de Janeiro, 2012.

BERREDJEM, L.; ARABI, N.; MOLEZ, L. **Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concret**. *Elsevier Jornal*, 118421-118433, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118421>>. Acesso em: 20 de Setembro de 2020.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2010.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. **Revisão Bibliográfica: Reutilização de resíduos da Construção e Demolição na Industria da Construção Civil**. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>>. Acesso em: 16 de Março de 2020.

CABRAL, A. E. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2007.

CABRAL, A. E. **Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha**. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000400016>>. Acesso em: 16 de Março de 2020.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **Plano de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo 2020**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2020/12/plano-resi%CC%81duos-solidos-2020_final.pdf>. Acesso em: 26 de Fevereiro de 2021.

CONAMA. **Resolução nº 307**. Brasília, 2002. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/36_09102008030504.pdf>. Acesso em: 16 de Março de 2020.

DOMENICO, D. P.; LIMA, T. T.; CASTRO, R. M.; CASTRO, M. N. **Influência do agregado miúdo reciclado na resistência à compressão e porosidade do concreto.** Revista Internacional de Ciências, 08, 129-147, 2018. Disponível em: <doi:10.12957/ric.2018.33254>. Acesso em: 26 de Março de 2020.

GUALBERTO, A. B.; AZEVEDO, I. C.; PEREIRA, R. M. R. **Evaluation of the use of recycled civil construction waste as concrete's aggregates in a composting yard.** REEC - Revista Eletrônica De Engenharia Civil, 2020. Disponível em: <doi:https://doi.org/10.5216/reec.v15i1.49076> Acesso em: 20 de Setembro de 2020.

IBGE. **Pesquisa Anual da Indústria da Construção - PAIC 2018.** Diretoria de Pesquisa, IBGE, 2020.

KRÜGER, P.; PEREIRA, E.; CHINELATTO, Adriana. S. A. **Influência do agregado reciclado na durabilidade do concreto. Uma revisão da bibliografia.** Revista Técnico-Científica do CREA-PR. Curitiba, 2017. Disponível em: <http://creaprw16.creaprw.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/view/292>. Acesso em: 20 de Março de 2020.

MOSTOFINEJAD, D.; HOSSEINI, S. M.; NOSOUHIAN, F.; OZBAKKALOGLU, T.; TEHRANI, B. N. **Durability of concrete containing recycled concrete coarse and fine aggregates and milled waste glass in magnesium sulfate environment.** Journal of building Engineering, 101182-101193, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271021931085X>. Acesso em: 20 de Setembro de 2020.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto** - 2ª ed., Vol. 1.: Bookman, Porto Alegre, 2013.

PEDROSO, C. L. **Comparação da Resistência à Compressão do Concreto Produzido com Agregado reciclado de duas empresas do setor da construção e demolição.** Ponta Grossa, 2017. Disponível em: <file:///D:/DOWNLOADS/01506823201.pdf>. Acesso em: 29 de Maio de 2020.

PEPE, M; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A. B.; MARTINELLI, E. **Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete.** Construction and Building Material, v. 69, p. 124-132, 2014.

RODRIGUES, C. R.,; FUCALE, S. **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduos da construção civil.** Ambiente Construído, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <doi:http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212014000100009> Acesso em: 12 de Março de 2020.

SILVA, O. f. **Estudo experimental e numérico de agregado graúdo tratado para Aplicação em concreto.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

SNIC, S. N. **Relatório Anual de Consumo e Produção.** Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2012.pdf>. Acesso em 15 de Março de 2020,

TECNOSENGE. **Relatório de Dosagem Experimental de Concreto.** Maceió, 2019.

TENÓRIO, J. j. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção demolição visando aplicações estruturais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição.** São Paulo, 2011.