

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

Thainá Yasmin Dessuy

**Concretos produzidos com substituição total do agregado miúdo
natural por diferentes tipos de agregados miúdos reciclados de
resíduos da construção civil (RCC)**

Porto Alegre
2021

THAINÁ YASMIN DESSUY

**CONCRETOS PRODUZIDOS COM SUBSTITUIÇÃO TOTAL
DO AGREGADO MIÚDO NATURAL POR DIFERENTES
TIPOS DE AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE RESÍDUOS
DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)**

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

Profa. Dra. Angela Borges Masuero
Dra. pela UFRS, Brasil
Orientadora

Profa. Dra. Denise C. C. Dal Molin
Dra. pela USP, Brasil
Orientadora

Porto Alegre
2021

THAINÁ YASMIN DESSUY

**CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO TOTAL DO
AGREGADO MIÚDO NATURAL POR DIFERENTES TIPOS
DE AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE RESÍDUOS
DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)**

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

Porto Alegre, 2021.

Profa. Dra. Angela Borges Masuero
Dra. pela UFRGS, Brasil
Orientadora

Profa. Dra. Denise C. C. Dal Molin
Dra. pela USP, Brasil
Orientadora

Profa. Angela Danilevicz
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Carina Ulsen (USP)
Doutora pela USP, Brasil

Profa. Dra. Luciana Cordeiro (UFPA)
Doutora pela UFGRS, Brasil

Profa. Dra. Rejane Tubino (UFRGS)
Doutora pela UFRGS, Brasil

Dedico este trabalho aos meus pais,
Jocemar e Elaine, por todo o incentivo e apoio.

AGRADECIMENTOS

Produzir uma dissertação é um longo caminho que requer dedicação, abdicção e disciplina. Produzir uma dissertação, em meio a uma pandemia, requer muito além de disciplina, requer enfrentar o medo, as incertezas e a solidão do isolamento. Apesar de todos os momentos ocorridos ao longo do processo, chegamos na conclusão deste trabalho, etapa essa vencida graças ao apoio, força e energia das pessoas a quem eu agradeço e dedico esse trabalho. Primeiramente, agradeço ao bom Deus, pela minha vida, por me possibilitar a realização de mais um objetivo, sendo refúgio nos momentos de insegurança e o caminho para os momentos decisivos.

Aos meus amados pais, Jocemar Dessuy e Elaine T. W. Dessuy, pelo apoio e incentivo em todo o processo da realização desse trabalho, além das palavras confortáveis de um “tudo vai dar certo”, “você é capaz de ir mais além”, “Você é forte” e “Não desista”. Ao amor incondicional e toda a dedicação para eu chegar, com êxito, na finalização do meu trabalho. Por serem sempre meus alicerces e presentes em minha vida, principalmente nos momentos difíceis, apoiando minhas escolhas e vibrando com minhas vitórias. Amo muito vocês e tenho muito orgulho de ser filha de vocês!

Ao meu namorado, amigo e companheiro Lorenzo Ghisleni Arenhardt, pela força, principalmente na “finaleira” desse processo, por nosso amor, por você existir na minha vida, pelo nosso incondicional companheirismo e por cada momento nosso. Sempre prestativo ao longo de toda a caminhada do trabalho, buscando me deixar mais confortável nos momentos que não foram tão bons neste processo. Por sempre apoiar minhas decisões e escolhas de vida, me proporcionando segurança. Amo muito você!

À minha família pelo apoio, carinho, conforto e pela torcida de sempre. Aqui, faço um agradecimento especial à minha querida estrelinha Izolina Portolan Welzbacher, a melhor vó que alguém poderia ter. Sempre prestativa em todo o processo, até onde pode estar presente em corpo físico. Sempre alegre em ouvir meus “contos” de Porto Alegre, pela preocupação que tinha com meu bem-estar, por todo o apoio e orações feitas, cada noite, antes de dormir, pedindo proteção para comigo. Meu exemplo de mulher batalhadora, de superação e de força. Sempre levarei comigo cada ensinamento e cada jeitinho teu. Sinto muitas saudades suas.

Às minhas orientadoras, Angela Borges Masuero e Denise Dal Molin, pela dedicação, pela presença, as todas as reuniões realizadas ao longo do processo, às explicações ricas de experiência e saber, por acreditarem em meu potencial ao aceitarem me orientar e por me incentivar a quebrar meus limites e ir mais além. Obrigada por todo o conhecimento que me passaram, o qual fez eu me tornar uma pesquisadora mais experiente na área de concreto com agregado reciclado, área essa que tenho um amor diferenciado. Foi um privilégio de ser orientanda de duas mulheres que, por sinal, são referências em suas áreas de atuação.

Aos “amigos de anos” que estiveram comigo nessa caminhada, me incentivando e apoiando, mesmo de longe, para chegar ao êxito deste trabalho. Que vibram e torcem em cada conquista da minha vida e por todo o carinho fornecido (saibam que o sentimento é recíproco). Agradeço, ainda, a todos os momentos que passamos, os quais estão em lugar especial no meu coração, dividindo nossas tristezas e multiplicando as nossas alegrias. Vocês são demais e serão sempre lembrados com muito carinho.

Aos amigos do LAMTAC/NORIE pela parceria e companheirismo de sempre. Com certeza é um grupo diferenciado no meio da pesquisa. Aqui, quero fazer um agradecimento especial às minhas “manas”, Aline Zini, Jéssica Bersch e Thais da Silva. À Aline Zini por toda a força que proporciona para nosso grupo, pela sua alegria nos momentos não tão bons que surgiram nos dias de laboratório e aos aprendizados de como lidar com alguma situação que surgisse no processo (“complicado”). À Jéssica por ser minha companheira de caminho para casa pela Osvaldo aranha, dividindo nossas preocupações e alegrias de conquistar o final de uma etapa do nosso trabalho e por ser minha companheira (e muitas vezes ajudante) de sábados no laboratório, juntamente com a Thais, que agradeço por ser minha duplinha de cantorias pelo laboratório, por me defender (“Ela vai moldar hoje sim”) e por me ajudar em uma das minhas últimas moldagens com sua melhor compactação de corpos de prova cilíndricos de concreto. Enfim, gurias, independente do nosso futuro, a nossa amizade já é especial e quero levar ela para sempre na minha vida! Amo muito vocês <3

Aos bolsistas LAMTAC/NORIE por toda a ajuda e auxílio em todo o processo da realização desse trabalho, principalmente aos bolsistas do grupo RCD Guilherme Andrade, Luiza Ferreira e Luan Machado, por todo o auxílio e dedicação ao meu trabalho. Sem a ajuda de vocês não iria ter conseguido completar cada etapa. Valeu toda a poeira, cada bombona completada e barulho feito no laboratório. Ainda, faço um agradecimento aos bolsistas Bernardo e Lucas, que, mesmo com outras atividades no laboratório, não hesitaram em me dar auxílio quando precisei. Também, aos laboratoristas, Airton Freitas e Ari Furquim, pelo auxílio oferecido em todas as etapas desse trabalho.

Ao professor João Masuero pelo seu tempo que dedicou em me transmitir seu vasto conhecimento e explicações na análise estatística dos resultados obtidos na pesquisa.

As empresa Pauluzzi Blocos cerâmicos e Votorantim cimentos pelas doações de materiais que foram essenciais para a elaboração deste trabalho.

E, por fim, e não menos importante, a aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, meu singelo e sincero muito obrigada!

“Nenhuma sociedade poderá atingir o desenvolvimento sustentável sem que a construção civil, que lhe dá suporte, passe por profundas transformações”

(JOHN, 2001)

RESUMO

DESSUY, T. Y. **Concreto com substituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregado miúdo reciclado de resíduos da construção civil (RCC)**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

O concreto é um dos materiais mais utilizados do setor da construção civil, cuja produção demanda por recursos naturais finitos, os quais são explorados de forma inadequada, gerando grande impacto ambiental. Também, a própria indústria da construção civil gera impacto ambiental ao descartar inadequadamente na natureza seus resíduos gerados. Assim, a reciclagem dos resíduos da construção civil e sua incorporação na própria cadeia produtiva, principalmente como agregado reciclado no concreto, desempenha papel importante no quesito sustentabilidade. Com o intuito de desenvolver materiais que reduzem o impacto ambiental, o foco principal do trabalho é analisar os reflexos da substituição total do agregado miúdo reciclado por diferentes tipos de agregados miúdos reciclados de resíduos da construção civil (RCC) nas propriedades de concretos. Para tal, o programa experimental contou com a produção de oito agregados reciclados constituídos de diferentes proporções de concreto, cerâmica e argamassa, alta e baixa resistência, beneficiados em britador de mandíbula, que foram comparados, além da areia natural, que serviu como referência, e uma areia reciclada mista, que está em processo de patenteamento, proveniente de diversos processos de beneficiamento. Foram produzidos concretos com traços 1:3,5, 1:5,0 e 1:6,5, em massa, com os quais foi possível traçar as curvas de dosagem para todos os concretos produzidos. Avaliou-se as propriedades de resistência à compressão, absorção por capilaridade e velocidade do pulso ultrassônico, aos 28 dias, além da massa específica dos concretos no estado fresco no momento de sua produção. Considerando os ensaios realizados e os resultados obtidos, conclui-se que, em relação à resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados de composição controlada se mostram bons resultados, uma vez que a maior resistência foi obtida no traço CAR3_3,5. Sob o ponto de vista de absorção capilar e velocidade ultrassônica, os melhores resultados foram obtidos no concreto referência, sendo as maiores velocidades observadas no concreto referência, que apresentaram menores absorções, independente dos traços. Porém, os concretos reciclados ainda se mostraram com comportamento positivo para ambas propriedades. Além disso, sobre o ponto de vista econômico e de sustentabilidade, concluiu-se que os concretos com agregado miúdo reciclado, no geral, possuem menores consumos de cimento em relação ao concreto com agregado natural, principalmente o concreto com agregado miúdo reciclado AR3, que obteve o menor consumo de cimento. Diante as conclusões, o concreto com agregado miúdo reciclado se mostra viável para a prática de substituir, totalmente, os agregados convencionais em concretos.

Palavras-chave: Agregado. Reciclado. Concreto.

ABSTRACT

DESSUY, T. Y. **Concrete produced with total replacement of natural fine aggregate by different types of fine aggregates recycled from construction waste (CWR)**. 2021. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

Concrete is one of the most used materials in the construction industry, whose production requires finite natural resources, which are exploited inappropriately, generating great environmental impact. Also, the construction industry itself generates environmental impact by improperly disposing of its generated waste in nature. Thus, the recycling of construction waste and its incorporation into the production chain itself, especially as recycled aggregate in concrete, plays an important role in sustainability. In order to develop materials that reduce the environmental impact, the main focus of this work is to analyze the effects of the total replacement of recycled fine aggregate by different types of fine aggregates recycled from construction waste (CCW) in the properties of concrete. To this end, the experimental program included the production of eight recycled aggregates consisting of different proportions of concrete, ceramic and mortar, high and low strength, processed in a jaw crusher, which were compared, besides the natural sand, which served as reference, and a mixed recycled sand, which is in the process of being patented, derived from different processing methods. Concrete was produced with 1:3.5, 1:5.0 and 1:6.5, in mass, with which it was possible to plot the dosage curves for all the concretes produced. The properties of compressive strength, capillary absorption and ultrasonic pulse velocity were evaluated at 28 days, in addition to the specific mass of the fresh concrete at the time of production. Considering the tests performed and the results obtained it can be concluded that, in relation to the compressive strength of the concretes with recycled aggregates of controlled composition, good results are shown, since the highest strength was obtained in the mix CAR3_3.5. From the point of view of capillary absorption and ultrasonic velocity, the best results were obtained in the reference concrete, with the highest velocities observed in the reference concrete, which presented lower absorption, regardless of the mixtures. However, the recycled concretes still showed positive behavior for both properties. Moreover, from the economic and sustainability point of view, it was concluded that the recycled fine aggregate concrete, in general, have lower cement consumption compared to concrete with natural aggregate, especially the concrete with recycled fine aggregate AR3, which had the lowest cement consumption. Given the conclusions, the concrete with recycled fine aggregate is feasible for the practice of totally replacing conventional aggregates in concrete.

Keywords: Agreggate. Recycled. Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Agregado saturado em misturas de concreto	42
Figura 2 – Agregado não saturado em misturas de concreto.....	43
Figura 3 – Método de mistura em dois estágios (TSMA)	44
Figura 4 – Programa experimental	54
Figura 5 – Distribuição granulométrica do cimento utilizado.....	58
Figura 6 – Distribuição granulométrica da brita utilizada.....	59
Figura 7 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos	61
Figura 8 – Distribuição granulométrica do fundo areia natural.....	62
Figura 9 – Distribuição granulométrica do fundo VC-areia.....	62
Figura 10 – Distribuição granulométrica do fundo concreto alta resistência	63
Figura 11 – Distribuição granulométrica do fundo concreto baixa resistência	63
Figura 12 – Distribuição granulométrica do fundo argamassa alta resistência	63
Figura 13 – Distribuição granulométrica do fundo argamassa baixa resistência	64
Figura 14 – Distribuição granulométrica do fundo cerâmica alta resistência	64
Figura 15 – Distribuição granulométrica do fundo cerâmica baixa resistência	64
Figura 16 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo natural – Ampliação 10x	65
Figura 17 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado VC-areia – Ampliação 10x.....	65
Figura 18 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR1 – Ampliação 10x	66
Figura 19 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR2 – Ampliação 10x	66
Figura 20 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR3 – Ampliação 10x	66
Figura 21 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR4 – Ampliação 10x	66
Figura 22 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR5 – Ampliação 10x	66
Figura 23 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR6 – Ampliação 10x	66
Figura 24 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR7 – Ampliação 10x	67
Figura 25 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR8 – Ampliação 10x	67
Figura 26 – Beneficiamento das areias recicladas AR1, AR2, AR3, AR4, AR5, AR6, AR7 e AR8.....	69
Figura 27 – Nomenclatura das misturas de concreto estudadas	71
Figura 28 – Ordem de colocação dos matérias para produzir os concretos reciclados	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resíduos da construção civil (RCC) nos diferentes países.....	17
Tabela 2 – Destinação de resíduos da construção civil em aterros de alguns países	18
Tabela 3 – Recomendações de uso de agregados reciclados.....	20
Tabela 4 – Operações unitárias de tratamento de minérios	26
Tabela 5 – Composição dos RCD nas diferentes cidades brasileiras	30
Tabela 6 – Massa específica de agregados miúdos reciclados encontrada na bibliografia	33
Tabela 7 – Taxa de absorções de acordo com a literatura	34
Tabela 8 – Taxa de absorção dos agregados reciclados	34
Tabela 9 – Métodos de determinação da absorção dos agregados reciclados conforme NEDELJKOVIC <i>et al.</i> (2021)	35
Tabela 10 – Recomendações de uso de agregados reciclados de RCD.....	38
Tabela 11 – Metodologia de compensação parcial do agregado miúdo reciclado	41
Tabela 12 – Caracterização física do cimento	57
Tabela 13 –Caracterização física do agregado graúdo natural	58
Tabela 14 – Denominação e constituição das areias recicladas	60
Tabela 15 –Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural e reciclados	61
Tabela 16 – Caracterização física dos diferentes fundos.....	62
Tabela 17 – Caracterização dos agregados miúdos	67
Tabela 18 – Caracterização dos materiais que originaram as diferentes composições dos agregados miúdos reciclados	70
Tabela 19 – Dosagem dos concretos	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de normas técnicas

AMN: Agregado miúdo natural

AMR: Agregado miúdo reciclado

CV: Coeficiente de variação

EE: Escola de Engenharia

F_{ck}: Resistência característica à compressão

F_{cm}: Resistência característica média à compressão

LAMTAC: Laboratório de Materiais e Tecnologias do Ambiente Construído

LCT: Laboratório de Caracterização Tecnológica

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Construção

NBR: Norma brasileira regulamentadora

NR: Norma regulamentadora

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

RCC: Resíduos da construção civil

RSU: Resíduos sólidos urbanos

S_d: Desvio

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USP: Universidade de São Paulo

VC-Areia: Areia produzida no LCT

Δ_{ref} : Diferença entre valor obtido no concreto reciclado – valor obtido do concreto referência

+: Maior

-: Menor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	22
1.3	DELIMITAÇÕES	22
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
2	AGREGADO RECICLADO DE RCC	25
2.1	AGREGADO MIÚDO RECICLADO	28
2.1.1	Variabilidade.....	29
2.1.2	Composição granulométrica	30
2.1.3	Massa específica e unitária	32
2.1.4	Absorção de água.....	34
2.1.5	Formato e textura	36
3	CONCRETO COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE RCC	37
3.1	PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM AMR	40
3.2	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	44
3.3	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	47
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	54
4.1	DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS.....	55
4.1.1	Variáveis dependentes.....	55
4.1.2	Variáveis independente	55
4.1.3	Variáveis controláveis ou Fixas	56
4.1.4	Variáveis não controláveis	57
4.2	MATERIAIS UTILIZADOS	57
4.2.1	Cimento	57
4.2.2	Agregado graúdo natural.....	58
4.2.3	Agregados miúdos natural (AMN) e reciclados (AMR)	60
4.2.3.1	Beneficiamento da VC-areia	68
4.2.3.2	Beneficiamento da AR1, AR2, AR3, AR4, AR5, AR6, AR7 e AR8.....	68
4.2.4	Água	70
4.3	DOSAGEM DOS CONCRETOS	70
4.3.1	Ajuste do teor ótimo de argamassa	71
4.3.2	Traços dos concretos	72
4.4	MOLDAGEM E ADENSAMENTO DOS CONCRETOS	73

4.5	CURA DOS CONCRETOS.....	76
4.6	MÉTODOS DE ENSAIO	76
4.7	ESTUDO ESTATÍSTICO.....	76
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	78
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	81
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICE A – Resultados da resistência à compressão	94
	APÊNDICE B - Resultados da absorção por capilaridade (72h).....	96
	APÊNDICE C - Resultados da absorção por capilaridade (3h, 6h, 24h e 42h).....	98
	APÊNDICE D - Resultados da velocidade do pulso ultrassônico	100

1 INTRODUÇÃO

Uma das mais importantes tecnologias descobertas para a humanidade, e para o setor da construção, é o concreto. Seu uso foi altamente disseminado a partir do século XX com a ocorrência da revolução industrial e devido às suas características (maleabilidade em diversos tamanhos e formas, boa trabalhabilidade, resistência à água e baixo custo), tornando-se um dos materiais mais utilizados na construção civil (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE; BROOKS, 2014; NEVILLE, 2015).

A grande disseminação de seu uso fez com que recursos naturais finitos utilizados na construção civil fossem explorados devido ao aumento da sua demanda, muitas vezes de modo inadequado, gerando impacto ambiental sem compensação posterior. Com isso, estudos vêm sendo realizados com o objetivo de viabilizar a substituição de matérias primas convencionais do concreto por materiais alternativos reciclados, que atendam o desempenho esperado, do ponto de vista técnico, econômico e ambiental, sendo o último ainda pouco explorado pela comunidade científica.

Um dos estudos que vem tomando proporções significativas no meio científico, com alta potencialidade de ser aplicado no mercado consumidor, é a prática de substituição, de forma parcial ou total, de agregados convencionais por agregados reciclados de resíduos da construção civil (RCC) no concreto, podendo ter ganhos ambientais ao reaproveitar um resíduo na própria indústria geradora, reduzindo a prática de exploração de recursos naturais finitos e de sua disposição inadequada.

Considerando as premissas anteriores, o presente trabalho tem o intuito de encontrar soluções sustentáveis para a indústria da construção civil, ao avaliar as propriedades de concretos confeccionados com agregados miúdos reciclados. Assim, no presente capítulo será apresentado o contexto no qual o assunto está inserido, expondo situações atuais e dados científicos, bem como as razões que levaram à escolha do estudo no referido tema. Também, serão apresentados o objetivo principal do presente trabalho, os objetivos específicos que foram definidos para alcançar o objetivo principal, além das limitações e delimitações criadas ao decorrer da realização do trabalho e a forma como o trabalho será estruturado para que haja bom entendimento do tema em questão.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

Desde o período paleolítico, com o surgimento dos caçadores-coletores, o ser humano vem extraindo e utilizando materiais provenientes da natureza, fazendo com que a magnitude do impacto ambiental seja crescente e gerando problemas de sustentabilidade. O avanço do processo de industrialização, o crescimento populacional global e o aumento do consumo por matérias para o desenvolvimento da infraestrutura fazem com que a extração de materiais seja crescente (MISTRÍ *et al.*, 2020).

Krausmann *et al.* (2018) observaram a extração global de recursos naturais dos países no período de 1900 a 2015 e puderam observar um crescimento de 12 Gt/ano a 89 Gt/ano, o qual foi observado nos quatro grupos de materiais analisados (minérios metálicos, minérios não metálicos, biomassa e materiais fósseis) e foi mais significativo nas taxas de extração de biomassa e materiais não metálicos, a partir da década de 1960. Além disso, os mesmos autores presumiram uma extração de materiais total, em 2050, de 218 Gt/ano, sendo sua maioria representada por materiais primários como areia, cascalho e rocha.

Da extração global dos recursos minerais, 50% dos recursos extraídos são destinados para serem utilizados na indústria da construção civil, os quais são, majoritariamente, materiais não metálicos, que são compostos especialmente de agregados (UNEP, 2019). Por esse fato, a indústria da construção civil é considerada um dos setores que mais utiliza os recursos naturais (MAGALHÃES; DANILEVICZ; SAURIN, 2017; TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018)

O Brasil é um país que possui abundância de agregados naturais, logo, sua escassez não é uma preocupação frequente (ABREU, 2016). Estimou-se que o consumo de agregados no Brasil foi de 617 milhões de toneladas no ano de 2020, sendo estimado, para 2021, o consumo de 653 milhões de toneladas. Desses, 272 milhões de toneladas de brita e 381 milhões de toneladas de areia (SINDIPEDRAS, 2020). Porém, algumas cidades brasileiras já estão tendo a necessidade de transportar agregados de suas cidades vizinhas, devido à alta demanda por agregados (ABREU, 2016).

A utilização dos recursos naturais, principalmente dos não renováveis, para fins de construção, gera grande quantidade de resíduos de construção e demolição, classificando a indústria da construção civil como uma das mais geradoras de resíduos (SILVA; BRITO; DHIR, 2014; MAGALHÃES; DANILEVICZ; SAURIN, 2017; NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Concretos produzidos com substituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregado miúdo reciclado de resíduos da construção civil (RCC)

Representando um dos maiores fluxos de resíduos no mundo (WANG *et al.*, 2017; ISLAM, 2019) e compo de 30% a 40% da quantidade total dos resíduos sólidos urbanos gerados (WANG *et al.*, 2018; AKHTAR e SARMAH, 2018), os resíduos provenientes da indústria da construção civil são resíduos inertes que podem ser constituídos de concreto, tijolo, argamassa, cerâmica, metal, plástico, madeira e vidro e podem ser provenientes da ausência de gestão do processo construtivos ou de demolições ocorridas nas edificações, devido à necessidade de realizar novas construções (LEITE, 2001; LEITE; MONTEIRO, 2016; MENEGAKI e DOMINGOS, 2018) ou devido à ocorrência de algum tipo de desastre natural (AKHTAR; SARMAH, 2018; MENEGAKI e DOMINGOS, 2018).

No cenário internacional, há a geração de 10 bilhões de toneladas, anualmente, de resíduos da construção civil (WU *et al.*, 2019). No cenário nacional, sua geração é de 82,5 milhões de toneladas por ano, podendo esses representarem, quando transformados em agregados reciclados, cerca de 5% do total de agregados comercializados no mercado brasileiro, com custo de venda 10% inferior que o agregado natural (ABRELPE, 2021). A tabela 1 mostra a geração de resíduos da construção civil de diversos países, bem como sua representatividade nos RSU e sua taxa de reciclagem.

Tabela 1 – Resíduos da construção civil (RCC) nos diferentes países

Pais	Geração	Total do RSU	Taxa de reciclagem	Referência
Austrália	27 milhões t/ano	44%	76%	AG (2020)
Brasil	47 milhões t/ano	52%	-	ABRELPE (2021)
China	3 bilhões t/ano	-	-	MA <i>et al.</i> (2020)
Estados Unidos	600 milhões t/ano	292 milhões ton/ano	52%	EPA (2018)
UE (28 países)	800 milhões t/ano	-	70%	DE GRANULATS (2020)

Fonte: Elaborada pela autora.

Habitualmente, a geração de resíduos da construção civil está diretamente relacionada com o grau de desenvolvimento do país e de seus hábitos de consumo, sendo os de maiores atividades econômicas responsáveis pela maior geração (AMORIM, 2018). Também, há uma volumosa geração de resíduos em países que estão em desenvolvimento, como as regiões da Ásia, Rússia e América do Sul, que exploram os recursos naturais para as atividades de construção e aumentam a demanda agregada do mundo (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018).

A inexistência de um plano de processamento específico para os resíduos da construção civil, principalmente em países com baixo grau de desenvolvimento, faz com que, devido à sua grande geração, sejam dispostos inadequadamente em locais clandestinos ou em aterros sanitários sem nenhum tratamento posterior (PINTO, 1999; JOHN, 2000; SILVA; BRITO; DHIR, 2014; MENEGAKI; DAMINGOS, 2018) ao invés de serem reciclados e/ou reutilizados (SOLÍS-GUZMÁN *et al.*, 2009; SILVA; BRITO; DHIR, 2014, MENEGAKI; DAMINGOS, 2018), gerando impactos adversos à sociedade e ao meio ambiente (POON *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2018).

Os resíduos da construção e demolição, quando dispostos inadequadamente na natureza, poluem o solo, danificam a paisagem e proporcionam ameaça à saúde pública, uma vez que cria nichos de vetores patológicos, como ratos, moscas, baratas, vermes, bactérias, vírus e fungos (AMORIM, 2018). Grande quantidade dos resíduos da construção e demolição são dispostos em aterros. Estima-se que, em média, 35% dos resíduos da construção civil gerados são destinados para aterros sanitários sem tratamento prévio (SOLÍS-GUZMÁN *et al.*, 2009; SILVA; BRITO; DHIR, 2014, MENEGAKI; DAMINGOS, 2018). Em alguns países, a destinação em aterros possui taxas ainda maiores, a exemplo da cidade de Bangladesh (ISLAM, 2019) e Nova Zelândia (AKHTAR; SARMAH, 2018). A tabela 2 mostra a porcentagem de resíduos da construção civil de alguns países que possuem como destinação final os aterros.

Tabela 2 – Destinação de resíduos da construção civil em aterros de alguns países

País	Austrália	Bangladesh	EUA	Nova Zelândia
Disposição em aterros	23%	85-90%	24%	100%
Referência	AG (2020)	ISLAM (2016)	EPA (2018)	AKHTAR; SARMAH (2018)

Fonte: Elaborada pela autora.

Tratar os resíduos apenas na sua fim de linha, ocorrências de externalidades e inconformidades de objetos de gerenciamento de resíduos da construção e demolição com instrumentos de design, divisão das técnicas de seu gerenciamento, custos altos de gerenciamento e a cultura da indústria e do comportamento dos resíduos dentro da mesma, são cinco causas que fazem uma gestão de resíduos serem classificadas como ineficiente, intensificando a quantidade de resíduos gerados e dispostos inadequadamente (AJAVI *et al.*, 2015). A gestão inadequada dos resíduos da construção e demolição faz com que haja grande preocupação quanto aos seus impactos ambientais gerados, devido à exploração dos recursos naturais finitos e à disposição inadequada dos resíduos na natureza (ALI AKHTAR e SARMAH, 2018).

Estimar a quantidade de resíduos gerados na construção e demolição e verificar quais são as causas da sua geração é de suma importância para a sua melhor gestão, além de possibilitar a tomada de decisões para a resolução da problemática da disposição inadequada dos resíduos na natureza e proporcionar o alcance do desenvolvimento sustentável (ISLAM, 2019), o qual requer a dissociação da utilização dos recursos naturais e das pressões ambientais geradas pelo crescimento econômico (HATFIELD-DODDS *et al.*, 2017).

A reciclagem e o reaproveitamento dos resíduos da construção civil são formas de gestão eficiente para reduzir os impactos ambientais, conservar os recursos naturais e proporcionar benefício econômico (ZHENG; CHEN; XU, 2016; JIN *et al.*, 2017). A reciclagem é considerada prática mais atrativa, sendo uma das alternativas existentes que possibilitam a sustentabilidade na construção civil, principalmente, na construção em concreto (MISTRI *et al.*, 2020; SANTOS; AZEREDO; NEVEU, 2020; MELO SILVA *et al.*, 2020).

O concreto é o material mais utilizado na indústria da construção e é o material que mais consome recursos naturais, além de gerar grande quantidade de resíduos devido à sua demolição, principalmente resíduos de concreto (WANG *et al.*, 2017). Logo, incorporar agregados reciclados de resíduos da construção e demolição em concretos é uma das alternativas mais promissoras (WANG *et al.*, 2017; SANTOS; AZEREDO; NEVEU, 2020; MELO SILVA *et al.*, 2020; PLAZA *et al.*, 2021), uma vez que reduziria a exploração dos recursos naturais e possibilitaria uma alternativa de uso para os resíduos gerados (ISLAM, 2019; BERREDJEM, 2020).

Países do mundo todo estão introduzindo normatizações e legislações referentes à utilização de agregados reciclados de resíduos da construção e demolição, na própria indústria da construção civil, a fim de minimizar a geração final dos resíduos e impactos gerados pelo setor (AKAHTA; SARAMAH, 2018). A tabela 3 mostra recomendações de uso em concretos de resíduos da construção como agregado reciclado de alguns países, bem como suas especificações quando ao tipo de agregado, densidade máxima, absorção máxima de água, substituição máxima permitida e resistência máxima.

Tabela 3 – Recomendações de uso de agregados reciclados

País	Tipo de Agregado	Densidade máxima (Kg/m ³)	Absorção máxima de água (%)	Substituição máxima (%)		Uso	Resistência máxima (MPa)
				Graúdo	Miúdo		
Brasil	ARC ¹	s.e	7% - AG 12% - AM	100	100	Concreto não estrutural	15
Hong Kong	ARC ¹	2000	10	20 ou 100	0	Concreto estrutural	C20 (100% de substituição) C35 (20% de substituição)
Alemanha	ARC ¹ I	2000	10	20-35	0	Concreto estrutural	C30/37 (20% de substituição)
	ARC ¹ II	2000	15	20-35	0		C25/30 (35% de substituição)
	ARA ³ III	1800	20	s.e ⁴		Concreto não estrutural	s.e ⁴
	ARM ²	1500	s.e ⁴				
Reino Unido	ARC ¹	s.e ⁴	s.e ⁴	20	0	Concreto estrutural	C40/50
	ARM ²	s.e ⁴	s.e ⁴	s.e	0	Concreto não estrutural	s.e ⁴
	ARC ¹	2000	s.e ⁴	100	(a) ⁵	Ambiente não agressivo	C40/50
	ARM ²	2000	s.e ⁴				C20/25
Portugal	ARC ¹ I	2200	7	25	0	Concreto estrutural	C40/50
	ARC ¹ II	2200	7	25	0		C35/45
	ARM ²	2000	7	s.e ⁴	0	Concreto não estrutural	s.e ⁴
Japão	ARM ²	2200	7	100	100	Concreto não estrutural	18
Suíça	ARC ¹	s.e ⁴	s.e ⁴	100	100	Concreto reforçado	C30/37
	ARM ²	s.e ⁴	s.e ⁴			Concreto não estrutural	s.e ⁴
Dinamarca	ARC ¹	2200	s.e ⁴	100	20	Ambiente não agressivo	C40
	ARC ¹	2200	s.e ⁴				C20
	ARM ²	1800	s.e ⁴				

Notas: ¹Agregado reciclado de concreto; ²Agregado reciclado misto; ³Agregado reciclado de alvenaria; ⁴Sem especificação; ⁵Somente misturado com agregado graúdo natural;

Fonte: Silva (2019).

Valorizar os agregados reciclados de resíduos da construção civil, em particular o agregado miúdo reciclado, é imprescindível para mitigar os problemas ambientais relacionados com o esgotamento das reservas naturais de agregados e disposição em locais inapropriados (ULSEN *et al.*, 2010). Logo, melhorar a qualidade do agregado reciclado de RCC é necessário para atingir maior potencial de circularidade desses na indústria da construção, que pode ser alcançada através de operações de beneficiamento por processamento mineral e aplicações de metodologias, conferindo-lhes grande potencial de utilização em materiais cimentícios como concretos e argamassas (ULSEN, 2006; ULSEN *et al.*, 2010; FIGUEIREDO *et al.*, 2020). Contudo, essa prática ainda é limitada por esses apresentarem diferentes propriedades em relação ao agregado natural, limitando grande parte de sua utilização ao leito de estradas (WANG *et al.*, 2018).

Na maioria das economias mundiais, devido à falta de conhecimento e de estruturas regulatórias sobre a utilização de resíduos da construção civil reciclados e reprocessados na própria indústria da construção, grande parte desses resíduos não são utilizados em substituições de materiais de construção, sendo o processo de estímulo de utilização variável de cada país. Porém, espera-se que sua utilização, futuramente, se torne parte substancial do mercado (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018).

A maioria das pesquisas com agregados reciclados de RCC têm se centralizado no estudo das características de agregados graúdos reciclados (PLAZA *et al.*, 2021). Porém, a utilização de agregados miúdos reciclados em concretos vêm crescendo continuamente e é defendida por vários pesquisadores da área, os quais vem discutindo a influência da sua incorporação nas propriedades do concreto (LEITE, 2001; ZAHARIEVA *et al.*, 2003; VIEIRA; DAL MOLIN, 2004; CABRAL, 2007; EVANGELISTA; BRITO, 2007; RODRIGUES; FUCALE, 2014; BRAVO *et al.*, 2017; KURDA; BRITO; SILVESTRE, 2017; NETO; SALES; SALES, 2018; SANTANA, 2018; SILVA, 2019; NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Diante das premissas citadas, o presente trabalho se justifica em estudar as propriedades dos concretos com substituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregados miúdos reciclados, comparando seus resultados com o concreto com agregado natural (referência), de modo a contribuir com as produções científicas e incentivar sua utilização como agregados reciclados em concretos, proporcionando a preservação do meio ambiente, ao proporcionar alternativas que evitam a disposição inadequada dos resíduos da construção civil.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral deste trabalho é avaliar as propriedades de concretos confeccionados com substituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregados miúdos reciclados mistos de resíduos da construção civil (RCC).

Para cumprir o objetivo geral do trabalho, foram definidos objetivos específicos, que são:

- Avaliar a influência da substituição do agregado miúdo natural por agregados reciclados de diferentes composições na sua massa específica dos concretos no estado fresco;
- avaliar a influência da substituição do agregado miúdo natural por agregados reciclados de diferentes composições nas propriedades físicos-mecânicas, como: resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e velocidade do pulso ultrassônico;
- avaliar a influência de dois tipos de metodologias de beneficiamento na produção dos agregados reciclados nas propriedades do concreto avaliadas nesta pesquisa; e
- identificar, entre os diferentes tipos de agregados miúdo reciclados mistos, qual proporciona concretos, de diferentes níveis de resistência, com mais baixo impacto ambiental, avaliado através do menor consumo de cimento por m³ para igualdade de resistência.

1.3 DELIMITAÇÕES

Devido ao concreto ser um objeto de estudo amplo, com inúmeros parâmetros que influenciam nos resultados, houve a necessidade de impor limites na quantidade de variáveis que foram estudadas no presente trabalho. Desse modo, o presente estudo restringiu-se em analisar a influência da substituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregados miúdos reciclados mistos. As delimitações definidas, referente ao assunto, extensão e fatores em estudo do presente trabalho, são:

- Avaliação do concreto no estado fresco através do ensaio de massa específica;
- avaliação do concreto no estado endurecido através do ensaio de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e velocidade do pulso ultrassônico;

- utilização de cimento CP-IV-32 na confecção dos concretos, devido a esse ser o mais utilizado na região metropolitana de Porto Alegre – RS;
- adoção de uma faixa de valor fixo no abatimento do tronco de cone e de consistência dos concretos no seu estado fresco, através do ensaio *slump test* e de consistência utilizando a mesa de Graff, respectivamente;
- adoção de três teores de material seco nos concretos, sendo eles 1:3,5; 1:5,0 e 1:6,5;
- utilização da cura úmida nos corpos de prova confeccionados de concreto para realização das avaliações propostas no presente trabalho.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O referido trabalho está estruturado em cinco capítulos. No primeiro capítulo está apresentado o contexto referente ao tema em estudo, o objetivo geral e os objetivos específicos, descrição das delimitações do objeto em estudo e a estruturação do trabalho.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica referente aos agregados reciclados, descrevendo conceitos, normativas e suas características em comparação com o agregado convencional, dando ênfase ao agregado miúdo reciclado.

O terceiro capítulo expõe uma revisão bibliográfica referente ao uso de agregados miúdos reciclados de resíduos de construção civil (RCC) em concretos, explanando sobre a sua influência, em seu estado fresco e endurecido, nas propriedades estudadas, no caso, na sua trabalhabilidade, massa específica no estado fresco, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e velocidade do pulso ultrassônico. Discute ainda a tecnologia de produção de concretos com AMR.

No quarto capítulo está descrito o programa experimental da pesquisa, abordando o planejamento do referido experimento, que expõe as definições das variáveis do trabalho e do estudo estatístico que foi empregado para analisar os resultados obtidos, definição e caracterização dos materiais utilizados para confecção de concretos, produção dos agregados miúdos reciclados, confecção dos corpos de prova propriamente ditos, cura empregada e os ensaios laboratoriais que foram realizados para atingir os objetivos definidos no trabalho.

No quinto capítulo foram descritos e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados. Além disso, para dar maior confiabilidade aos resultados, realizou-se estudo estatístico através da análise de variância.

No capítulo sexto são apresentadas as conclusões do trabalho perante aos resultados obtidos, bem como recomendações pertinentes ao presente trabalho com uma análise crítica dos resultados.

2 AGREGADO RECICLADO DE RCC

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através da resolução nº 307, alterada pelas resoluções de nº 348/2004, 431/2011, 448/2012 e 469/2015, prescreve critérios, diretrizes e procedimentos de gestão dos resíduos da construção civil de modo a minimizar os impactos ambientais, conceitua os resíduos da construção civil, no artigo 2º, como: “São os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (CONAMA, 2002, p.01).” Para efeito da mesma resolução, o mesmo órgão classifica os resíduos da construção civil em classe A, classe B, classe C e classe D, sendo a classe A os resíduos reutilizáveis como agregados em concretos e argamassas.

Há outras classificações referentes aos resíduos da construção e demolição, como as citadas na NBR 10004 (ABNT, 2004), que classifica os resíduos sólidos de acordo com o processo ou atividade que o originou, com sua constituição e características, comparando esses atributos com resíduos que possuem seu impacto ao meio ambiente e saúde pública conhecido, além de classificar os resíduos sólidos conforme inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Assim, classifica os resíduos sólidos em duas classes, sendo elas classe I e classe II (A e B), sendo a classe II B os materiais inertes, como os resíduos da construção civil.

Transformar resíduos provenientes da construção civil em agregados reciclados requer a realização de beneficiamento mineral, que tem como objetivo produzir um agregado reciclado com qualidade adequada, tanto física quanto química, para obter condições possíveis de sua utilização como matéria-prima na própria indústria da construção civil (ANGULO, 2005; ULSEN, 2006). O beneficiamento mineral constitui-se de sequências de operações unitárias, as quais são realizadas em equipamentos provenientes do setor da mineração, que podem ser adaptados para tal fim ou simplesmente utilizados como tal (LIMA, 1999; LEITE, 2001; ANGULO, 2005; JADOVSKI, 2006; ULSEN, 2006).

Chaves (2006) considera quatro tipos de operações unitárias de tratamentos de minérios, sendo: Redução de tamanho, separação de tamanho, separação por concentração e auxiliares. A descrição das operações unitárias, sua conceituação, tipo de operação e equipamentos industriais utilizados, estão demonstradas na tabela 4, cuja operações, além de serem empregadas para o beneficiamento de agregados naturais, são utilizadas para a produção de agregados reciclados de resíduos da construção civil, tanto graúdo quanto miúdos (ANGULO, 2005).

Tabela 4 – Operações unitárias de tratamento de minérios

Operação unitária	Conceituação	Tipo de operação	Equipamentos industriais utilizados
Cominuição	Operações realizadas para reduzir o tamanho das partículas para o seu transporte, uso final ou/e para operações sequenciais	Britagem	Mandíbula, giratório, impacto, rolos, etc.
		Moagem	Moinho de bolas, de barras, de martelo, vibratório, Raymond, etc.
Separação de tamanho	Operações realizadas nas partículas para separá-las por tamanho	Classificação	Moinho de bolas, de barras, de martelo, vibratório, Raymond, etc.
		Peneiramento	Rotativo, vibratório
Concentração	Operações realizadas para aumentar o teor de mineral útil, as quais removem outros minerais (sub-produtos) ou materiais contaminantes. Utilizada especialmente quando existem vários tipos de minerais presentes	Por densidade	Calha simples, calha estrangulada, espirais, mesa plana, jigge, mesa vibratória, ciclones ou cones de meio denso, equipamentos de meio denso.
		Por susceptibilidade magnética	Imã de mão, separador de rolos induzidos, separador magnético de alto gradiente
		Por condutividade elétrica	Separador de rolos, separador de placas, separador de alta tensão
		Físico química de superfície	Condicionadores, células ou colunas de flotação

Nota: As operações auxiliares são referentes ao transporte, secagem e homogeneização.

Fonte: CHAVES, 2006; ANGULO, 2005

Para determinar qual melhor processo de beneficiamento empregado, é necessário ter conhecimento do grau de contaminação do resíduo e qual será sua utilização final, podendo ser encaminhados para aterros ou sendo matéria prima no setor da construção civil, como preenchimento de drenagem, pavimentação e concreto (HANSEN, 1992; JADOVSKI, 2006). Realizar a seleção dos resíduos da construção civil, previamente ao processo de seu beneficiamento, é de suma importância devido a possibilidade de haver contaminantes (como o gesso) e/ou de materiais indesejáveis (madeira, aço, vidro, papel, plástico, entre outros) na sua constituição (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011; SILVA; BRITO e DHIR, 2014).

Portanto, recomenda-se separar a fração mineral da não mineral para atingir melhor eficiência ambiental e econômica (ULSEN, 2006), além de separar os tipos existentes de resíduos da construção civil (separar o resíduo de concreto do resíduo misto) para garantir melhor qualidade do agregado reciclado, uma vez que, agregados reciclados de concretos tendem a serem menos porosos que os agregados reciclados mistos (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011).

Para normatizar a utilização de agregados reciclados de resíduos da construção civil no Brasil, criou-se a normativa NBR 15116 (ABNT, 2021). De acordo com esta normativa, os agregados reciclados de RCC são definidos como sendo “*material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção classe A, com características técnicas para a aplicação em obras de engenharia*” e são classificados em agregado reciclado cimentício (ARCI), agregado reciclado de concreto (ARCO) e agregado reciclado misto (ARM), cuja suas conceituações estão descritas, na respectiva normativa, como:

- **Agregado reciclado cimentício (ARCI):** “*Agregado reciclado constituído predominantemente por materiais cimentícios diversos (concretos, argamassas, blocos pré-moldados de concreto etc.), podendo incluir teores reduzidos de cerâmica vermelha*”;
- **Agregado reciclado de concreto (ARCO):** “*Agregado reciclado constituído predominantemente por resíduos de concreto*”; e
- **Agregado reciclado misto (ARM):** “*Agregado reciclado constituído por uma mistura de materiais cimentícios (concretos, argamassas, blocos pré-moldados de concreto etc.) e materiais cerâmicos (blocos e telhas de cerâmica vermelha etc.)*”.

Ulsen (2006) cita que os agregados reciclados de RCD podem ser denominados de Tipo I (ou cinza) e Tipo II (ou vermelho). O tipo I, ou cinza, seria composto por resíduos da construção de origem cimentícia, o qual inclui concretos e argamassas. Já o tipo II, ou vermelhos, seriam compostos, predominantemente, por material cerâmico.

Silva, Brito e Dhir (2014) classificam os agregados reciclados em quatro categorias: Agregados de concreto reciclado, agregados de alvenaria reciclada, agregados mistos reciclados e agregados reciclados de construção e demolição, sendo esse último conceituado como agregados reciclados que não podem ser identificados quanto sua composição e origem. Essas quatro categorias poderão ser provenientes de três tipos de materiais derivados dos resíduos da construção e demolição: Concreto triturado, alvenaria triturada e entulho misto de demolição.

Determinar as características dos resíduos que irão dar origem ao agregado reciclado é de suma importância, já que esse parâmetro influencia diretamente nas propriedades do material que irá incorporar os agregados reciclados em sua constituição. Portanto, características como a composição e resistência dos resíduos, tipo de britador empregado e número sequenciais de britagem que irão ser realizadas para produzir o agregado, devem ser consideradas (AKBARNEZHAD *et al.*, 2013). Além disso, os agregados reciclados de resíduos da construção civil, assim como os agregados naturais, devem ser caracterizados quanto à sua composição granulométrica, massa específica, massa unitária, absorção, umidade superficial, forma e textura superficial da partícula, previamente à sua utilização em concretos, substituindo parcialmente ou totalmente o agregado natural (AMORIM, 2018).

É tão importante o conhecimento das características dos agregados reciclados quanto do conhecimento das propriedades dos concretos que fazem o uso desse tipo de material, já que, é a partir dos resultados de caracterização, juntamente com os resultados das propriedades dos concretos, que garantem seu emprego seguro como agregado em concretos (TENÓRIO, 2007). As características dos agregados reciclados dependem de diversos fatores, como: constituição do agregado reciclado, local e período de coleta, tipo de operação unitária empregada, granulometria e porosidade do agregado reciclado (ÂNGULO, 2000; CABRAL, 2007). De modo geral, os agregados reciclados tendem a possuir menor densidade aparente, serem mais porosos e mais frágeis em relação ao agregado natural (CABRAL, 2007).

O controle de qualidade de agregados reciclados utilizados como substitutos do agregado convencional em concretos está diretamente relacionado com a determinação da sua massa específica/densidade aparente e de sua absorção de água, propriedades que são indicadores da porosidade do material (DAMINELI *et al.*, 2016), e da escolha do processos de beneficiamento, o qual tem a finalidade de igualar, ou aproximar, as características dos agregados reciclados com a dos agregados convencionais (SILVA, 2017).

2.1 AGREGADO MIÚDO RECICLADO

Existem diferenças entre as características dos agregados miúdos naturais das características dos agregados miúdos reciclados de RCC, e, ainda, há diferenças entre as características dos agregados miúdos reciclados das características dos resíduos da construção civil que deram origem ao mesmo. Os agregados miúdos reciclados possuem diferentes composições, resultando em

Concretos produzidos com substituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregado miúdo reciclado de resíduos da construção civil (RCC)

variações composicionais e características. Desse modo, concretos produzidos com estes agregados apresentam maior variabilidade em suas propriedades, que são influenciadas pelas características dos agregados (TENÓRIO, 2007; PEDROZO, 2008).

O agregado miúdo reciclado possui constituição variável de materiais com propriedades distintas, tendo como característica fundamental a maior porosidade em comparação com o agregado miúdo natural, devido a presença de pasta de cimento endurecida em sua superfície, característica que influencia diretamente outras propriedades do agregado, como: Massa específica, absorção de água, módulo de elasticidade, dureza e durabilidade (TENÓRIO, 2007; PEDROZO, 2008; MOREIRA, 2010; SILVA, BRITO; DHIR, 2014; AMORIM, 2018).

2.1.1 Variabilidade

Em dada quantidade de resíduo proveniente de obras da indústria da construção civil, possui diferentes tipos de materiais constituintes, sendo materiais inorgânicos, orgânicos e minerais, caracterizando essa massa como de constituição heterogênea (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011; AMORIM, 2018; NETO; SALES; SALES, 2018). A diversificação na composição dos resíduos da construção civil se deve à grande quantidade de materiais utilizados na indústria da construção civil (ZORDAN, 1997; NETO; SALES; SALES, 2018).

Grande parte desta massa de material descartado possui alto valor agregado e boa resistência mecânica, devido a presença de materiais, como: concreto endurecido, argamassa endurecida, tijolos, pedaços de cerâmica, areia, pedras britadas e entre outros tipos, que são materiais com grande potencial de se tornarem matéria-prima na indústria da construção (PEDROZO, 2008; SILVA, BRITO; DHIR, 2014; AMORIM, 2018).

A variabilidade presente na composição dos RCD produz agregados reciclados com características distintas nos diferentes países, estados, cidades e, até mesmo, de bairros de uma mesma cidade (CARNEIRO *et al.*, 2001). Essa diferença de composição presente nos RCD nos diferentes locais é devido à adoção de diferentes estratégias na construção das edificações e de distintos materiais utilizados (ZORDAN, 1997; PINTO, 1999; ANGULO, 2000) ou, ainda, de intervenções realizadas, de forma corretiva ou conservatórias, nas mesmas (ANGULO, 2000). Ou seja, a variação na composição poderá ocorrer de região geográfica, época do ano, tipo e estágio de obra, entre outras (ZORDAN, 1997; NETO; SALES; SALES, 2018). A tabela 5 mostra a composição de diferentes tipos de resíduos da construção e demolição em diferentes cidades brasileiras.

Tabela 5 – Composição dos RCD nas diferentes cidades brasileiras

Autor	Local de análise	Constituição (%)			
		Concreto endurecido	Argamassa endurecida	Cerâmica Vermelha	Outros
JORDAN (1997)	Ribeirão Preto (SP)	21,1 ¹	37,4 ¹	20,8 ¹	20,70
BRITO (1999)	São Paulo (SP)	8	24	33	35,0
JOHN e AGOPYAN (2000)	Campinas (SP)	21	37	21	21,0
CARNEIRO <i>et al.</i> (2001)	Salvador (BA)	20	33	14	33,0
LEITE (2001)	Porto Alegre (RS)	15,9	25,9	25,9	32,3
SARDÁ (2003)	Blumenau (SC)	18,4	²	30,2	51,4
LOVATO (2007)	Novo Hamburgo (RS)	27,3	34,9	23,2	14,6
LOVATO (2007)	São Leopoldo (RS)	26,9	22,5	32,8	17,8
OLIVEIRA <i>et al.</i> (2011)	Fortaleza (CE)	10,1	34,1	14,1	41,7

¹Valores médios; ²Argamassa está contida na porcentagem do concreto e cerâmica

Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com a tabela, nota-se que, nas várias cidades brasileiras, o percentual que mais se destaca na constituição do RCD é o de materiais inertes com potencial de reaproveitamento como agregado reciclado, como concreto, argamassa e cerâmica, como foi constatado nos estudos de PEDROZO (2008).

A grande heterogeneidade presente na composição dos resíduos da construção civil e, logo, do agregado reciclado, influencia diretamente nas propriedades de concretos produzidos utilizando os mesmos, já que influencia diretamente nas características dos agregados reciclados, como: forma, textura, porosidade, massa específica, entre outras (CABRAL *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2011). Assim, gerenciar a variabilidade desse material resultaria em um controle da dispersão dos resultados obtidos nas características dos concretos com agregado reciclado (MOREIRA, 2010; WU *et al.*, 2019).

2.1.2 Composição granulométrica

A distribuição granulométrica pode influenciar na trabalhabilidade, resistência mecânica, absorção de água, permeabilidade, consumo de aglomerante, entre outros (TOPÇU, 2004). Assim, a granulometria do agregado reciclado deve ser considerada para produzir concretos com misturas mais trabalháveis, mais compacto e com melhor desempenho técnico (LEITE, 2001).

A composição granulométrica dos agregados miúdos reciclados deve atender os limites especificados na normativa NBR 7211 (ABNT, 2019), bem como a dos agregados convencionais. Porém, não é obrigatório que as curvas granulométricas do AMR estejam nas zonas estabelecidas em norma se há estudos preliminares de dosagem que comprovem sua aplicabilidade

Concretos produzidos com substituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregado miúdo reciclado de resíduos da construção civil (RCC)

(SANTANA, 2018). Logo, uma das maneiras de obter um agregado reciclado adequado para utilizar como material de substituição do agregado natural em concretos é realizando o seu peneiramento, buscando alcançar curvas semelhantes às dos agregados naturais (LIMA, 1999).

A distribuição granulométrica do agregado reciclado irá depender dos tipos de operações e equipamentos utilizados em seu beneficiamento, do tipo e da granulometria antecessora ao beneficiamento do resíduo, entre outras condições (GONÇALVES, 2001). Assim, a granulometria do agregado reciclado possui grande variabilidade, mesmo fazendo uso de equipamento de britagem equivalente, dessa forma, as curvas granulométricas são influenciadas pela composição dos resíduos a serem britados, do número de estágios e tipo de britador utilizado (ÂNGULO, 2000).

De um modo geral, a granulometria dos agregados reciclados miúdos é contínua (CARRIJO, 2005; MALTA, 2012), a qual proporciona um melhor empacotamento da estrutura granular de concretos, contribuindo na melhora da sua resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016). Além disso, apresenta uma composição granulométrica mais grossa, proporcionando um módulo de finura levemente maior que a dos agregados miúdos convencionais (ZAHARIEVA et al., 2003).

Além disso, a distribuição granulométrica dos agregados miúdos é um dos fatores que regem a dosagem de concretos, uma vez que, agregados reciclados com menores dimensões, possuem maior superfície específica, aumentando a demanda de água nas misturas dos concretos com esses agregados e do seu consumo de cimento, por consequência. Portanto, a análise da superfície específica dos agregados reciclados é importante na análise da trabalhabilidade e resistência do concreto (PEDROZO, 2008; NEVILLE, 2016; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Leite (2001) obteve curvas granulométrias contínuas no agregado miúdo reciclado, demonstrando um bom arranjo entre as partículas. Além disso, o módulo de finura dos agregados miúdos reciclados obtiveram valor semelhante ao agregado miúdo convencional, logo, a demanda de água para lubrificar os grãos deveria ser a mesma. Porém, na prática, isso não acontece devido a outras características que influenciam na demanda de água para o concreto, como por exemplo forma e textura das partículas dos agregados reciclados.

Rodrigues (2011) realizou a análise granulométrica do agregado miúdo reciclado, conforme a normativa NBR 7211 (ABNT, 2019), e verificou que o mesmo se encontrava nos limites estabelecidos na normativa, tanto inferior quanto superior, igualmente conforme o agregado miúdo natural utilizado em sua pesquisa. Além disso, o módulo de finura do agregado miúdo reciclado

foi 10% inferior ao do agregado miúdo natural, o que acarretou em um aumento na superfície específica do agregado miúdo reciclado, ocasionando um aumento no consumo de água e de aglomerante na mistura do concreto. Malta (2012) também constatou que esse encontrava nos limites estabelecidos na normativa, apresentando uma granulometria mais contínua que o agregado miúdo convencional utilizado em seu trabalho.

2.1.3 Massa específica e unitária

A massa específica aparente de um material depende da sua porosidade, uma vez que considera os poros internos por unidade de volume. Já a massa unitária considera o volume ocupado pelos agregados e os vazios entre os grãos, assim, propriedades como tamanho dos grãos e forma influenciam na massa unitária (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Os agregados miúdos reciclados possuem massas específicas aparentes e unitárias inferiores a dos agregados convencionais (LEITE, 2001; ZAHARIEVA *et al.*, 2003; VIEIRA; DAL MOLIN, 2004; EVANGELISTA; BRITO, 2007; PEDROZO, 2008; RODRIGUES; FUCALE, 2014; BRAVO *et al.*, 2017; KURDA; BRITO; SILVESTRE, 2017; SANTANA, 2018; SILVA, 2019; NASCIMENTO *et al.*, 2020).

O menor valor de massa específica é atribuído à sua menor densidade, proporcionada pela maior porosidade dos materiais que constituem os agregados miúdos reciclados de RCC, sendo que, quanto mais poroso são seus materiais constituintes, menor será sua massa específica (LIMA, 1999; PEDROZO, 2008; CARNEIRO, 2011; SILVA, 2019). Já a redução da massa unitária dos agregados reciclados é atribuída à forma mais irregular das suas partículas, que aumenta os vazios entre os grãos, além da sua menor densidade devido a sua alta porosidade (SANTOS, 2016).

Leite (2001) afirma que os resultados de massa específica e unitária são variados, independente se os agregados reciclados possuem constituição semelhantes entre si. Essa diferença nos resultados encontrados pelos autores pode ser devido a dois fatores: as diferentes características dos materiais constituintes dos agregados reciclados (granulometria, composição e tipo de beneficiamento realizado) e do método empregado para realizar o ensaio de caracterização (LEITE, 2001; ABREU, 2016). A tabela 6 mostra alguns resultados de massa específica encontradas na literatura.

Tabela 6 – Massa específica de agregados miúdos reciclados encontrada na bibliografia

Autores	Massa específica (Kg/m ³)		Massa Unitária (Kg/m ³)		Tipo de agregado reciclado	Local de coleta
	AMN	AMR	AMN	AMR		
LEITE (2001)	2,63	2,53	1,54	1,21	Misto	Aterro de inertes – Porto Alegre, BR
ZAHARIEVA <i>et al.</i> (2003)	2,16 ± 0,30*	2,60*	-	-	Misto	Recicladora – Fretin, França
VIEIRA e DAL MOLIN (2004)	2,62	2,51	-	-	Misto	Obra de demolição - Maceió, BR
EVANGELISTA e BRITO (2007)	2,554	1,913	-	-	Concreto	Concretos produzidos em laboratório
YAPRAK <i>et al.</i> (2011)	2,65	2,31	-	-	Concreto	Concretos produzidos em laboratório
ALIABDO; ABD-ELMOATY; HASSAN (2014)	2,56	2,04	-	-	Cerâmica	Tijolos triturados - Egito
	2,63	2,08	-	-		
RODRIGUES e FUCALE (2014)	2,62	2,54	-	-	Misto	Edifício residencial - Recife, BR
		2,91	-	-		
BRAVO <i>et al.</i> (2017)	-	2,61	-	-	Misto	Recicladora - Leiria, PT
		2,55	-	-		
KURDA; BRITO; SILVESTRE (2017)	2,600 2,594	2,61	-	-	Concreto	Recicladora – Porto, PT
		2,218	-	-		
SANTANA (2018)	2,62 2,5	1,48	1,33	-	Misto	Recicladora – Lisboa, PT
		2,10	1,42	-		
						Concretos produzidos em laboratório
						Serviços de reformas e pontos de coleta – Feira de Santana, BR

Nota: */m³

Fonte: elaborada pela autora.

É indispensável o conhecimento prévio do valor de massa específica dos agregados reciclados para a dosagem de concretos. Por obter valores inferiores ao do agregado natural, é recomendável que seja feita uma compensação em volume dos traços em massa pré-estabelecidos de concretos convencionais, evitando que ocorra traços com volumes maiores de agregados reciclados de um mesmo traço unitário, já que, o volume do agregado reciclado corresponde à uma maior massa de agregado natural, distorcendo os volumes de concreto convencional e reciclado (LEITE, 2001; CABRAL *et al.*, 2010; VIEIRA; DAL MOLIN, 2004; SANTANA, 2018).

Também, a massa específica dos agregados influencia diretamente no comportamento mecânico dos concretos para uma mesma relação a/c, pois, ao reduzir a massa específica, aumenta a porosidade do concreto e, conseqüentemente, reduz sua resistência à compressão (MOREIRA, 2010). Ainda, a massa específica é influenciada pela absorção de água do agregado, uma vez que é diretamente influenciada pela porosidade do agregado. Ao aumentar a porosidade do agregado, aumenta sua absorção e reduz sua massa específica (ANGULO, 2005).

2.1.4 Absorção de água

Os agregados miúdos reciclados, devido à sua elevada porosidade, em comparação com os agregados convencionais, tendem a possuírem maiores taxas de absorção de água (LEITE, 2001; LOVATO, 2007; ANGULO; FIGUEIREDO, 2011; RODRIGUES; FUCALE, 2014; BRAVO *et al.*, 2017; KURDA; BRITO; SILVESTRE, 2017 SANTANA, 2018). Da mesma maneira que ocorre na massa específica e na massa unitária, há variações em seus resultados entre os autores, a qual é devida, também, à porosidade de seus materiais constituintes e do método de ensaio de caracterização empregado (LOVATO, 2007). A tabela 7 mostra valores de taxa de absorção de água encontrados na literatura.

Tabela 7 – Taxa de absorções de acordo com a literatura

Autor	Taxa de absorção (%)		Tipo de agregado miúdo
	AMN	AMR	
LEITE (2001)	-	8,60	Misto
ZAHARIEVA <i>et al.</i> (2003)	2,0	12,0 ± 1,5	Misto
VIEIRA e DAL MOLIN (2004)	-	14,65	Misto
EVANGELISTA e BRITO (2007)	0,8	13,1	Concreto
YAPRAK <i>et al.</i> (2011)	1,22	4,28	Concreto
RODRIGUES e FUCALE (2014)	1	10	Misto
BRAVO <i>et al.</i> (2017)	-	12,9; 10,1; 8,6 e 8,4	Misto
KURDA; BRITO; SILVESTRE (2017)	0,4	8	Concreto
SANTANA (2018)	0,8	13,3	Misto

Nota: AMN: Agregado miúdo natural; AMR: Agregado miúdo reciclado.

Fonte: elaborada pela autora.

Os diferentes resultados encontrados na bibliografia, conforme a tabela 8, pode ser devido à composição de cada resíduo que constituem o agregado miúdo reciclado. Agregados reciclados que possuem maiores proporções de material cerâmico, tendem a possuir maiores taxas de absorção que os agregados miúdos reciclados constituídos de material cimentício (REIS, 2009; CABRAL *et al.*, 2010; MOREIRA, 2010; ANGULO; FIGUEIREDO, 2011; GUO *et al.*, 2018). A tabela 8 mostra as taxas de absorção de três tipos de agregados miúdos reciclados, que foram estudados em concretos por diferentes autores, os quais possuem, em sua composição, 100% de concreto, 100% de argamassa e 100% de cerâmica (tijolos cerâmicos triturados).

Tabela 8 – Taxa de absorção dos agregados reciclados

Autor	AN	RMC	RMA	RMCE
CABRAL <i>et al.</i> , (2009)	0,42%	7,55%	4,13%	10,69%
YAPRAK <i>et al.</i> (2011)	1,22	4,28	-	-
ALIABDO; ABD-ELMOATY; HASSAN (2014)	0,65%	-	-	15,5
	1,3%			18,3

Nota: AN: Natural miúdo; RMC: Reciclado miúdo de concreto; RMA: Reciclado miúdo de argamassa; RMCE: Reciclado miúdo de cerâmica;

Fonte: elaborada pela autora.

Concretos produzidos com substituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregado miúdo reciclado de resíduos da construção civil (RCC)

Os agregados miúdos naturais possuem baixa absorção de água em razão da sua baixa porosidade, o que acaba não influenciando nas misturas do concreto (CARNEIRO, 2011). Já a maior absorção de água por parte dos agregados miúdos reciclados irá interferir diretamente na relação água/cimento e na trabalhabilidade das misturas do concreto, proporcionando concretos mais secos (menos trabalháveis) e com relação a/c efetiva menores (LIMA, 1999; LEITE, 2001; ETXEBERRIA et al., 2007; LÓPEZ-GAYARRE et al., 2009; FERREIRA et al., 2011). Essa maior absorção pode ser atribuída ao teor de finos presentes nos agregados miúdos reciclados, sendo considerado, muitas vezes, uma absorção mais elevada à absorção do agregado graúdo reciclado. Desta forma, é necessário um estudo metuculoso da sua absorção antes da dosagem do concreto reciclado (RODRIGUES, 2014; PICCINALI, 2022).

Há diferentes metodologias empregadas para caracterizar os agregados reciclados quanto a sua absorção, algumas dessas estão demonstradas na tabela 9, bem como seu método, tipo de agregado reciclado que pode ser aplicado e o tempo de duração do ensaio.

Tabela 9 – Métodos de determinação da absorção dos agregados reciclados conforme NEDELJKOVIC *et al.* (2021)

Referência	Método	Tipo de agregado	Tempo de duração (h)
EM 1097-6 (2013)	Método da cesta de arame	Graúdo e miúdo	24
LEITE (2001)	Método do picnômetro	Graúdo e miúdo	24
IFSTTAR n°78	Imersão	Graúdo e miúdo	24
TAM <i>et al.</i> (2008)	Saturação e secagem	Graúdo	24
TEGGUER (2012)	Avaliação real da absorção de água	Graúdo	144
ZHAO; REMOND; DAMIDOT (2013)	Método de pesagem hidrostática	Graúdo	144
RODRIGUES; EVANGELISTA; BRITO (2013)	Baseado na relação entre teor de pasta de cimento no Frca ¹ e seu WAC ²	Miúdo	24
BENDIMERAD; ROZIERE; LOUKILI (2015)	Método picnômetro e escala hidrostática	Miúdo	24
RUEDA <i>et al.</i> (2015)	Teste de picnômetro e pesagem hidrostática	Graúdo	240
YACoub; DJERBI; FEN-CHOG (2018)	Analizador eletrônico de umidade	Miúdo	0,5
LI; LIU; TIAN (2018)	Vácuo combinado com evaporação	Miúdo	-
SOSA <i>et al.</i> (2018)	Centrifugação e frasco volumétrico	Miúdo	24
LI; LIU; ZHONG (2019)	Condutividade elétrica	Miúdo	24
	Absorção na pasta de cimento	Miúdo	24

¹ agregado miúdo reciclado de concreto; ² Relação a/c;

Fonte: Adaptado de NEDELJKOVIC *et al.* (2021)

2.1.5 Formato e textura

Os agregados miúdos reciclados possuem, geralmente, formato mais lamelar com arredondamento angular e textura mais rugosa e porosa que os agregados convencionais, que possuem formato mais arredondado e textura mais lisa (ÂNGULO, 2000; LEITE, 2001; PEDROZO, 2008). Ainda, os agregados miúdos reciclados, normalmente, possuem arredondamento mais angular que os agregados graúdos reciclados (HANSEN, 1992).

O formato dos agregados miúdos reciclados será influenciado pelo tipo de britador que será utilizado para seu beneficiamento (REIS, 2009). Britadores de mandíbulas produzem partículas com arredondamento mais angulares e forma lamelar, com linhas de fraturamento pronunciadas, sendo os britadores mais usuais em usinas de recicladoras (ULSEN *et al.*, 2019) Já britadores giratórios formam grãos mais arredondados e britadores de impacto produzem grãos mais íntegros com formas mais cúbicas (LIMA, 1999).

O formato irregular e textura áspera dos agregados miúdos reciclados influencia no consumo de pasta no concreto, a qual é maior, em comparação ao agregado convencional, para produzir concretos mais trabalháveis, devido à sua maior área específica e dificuldade de rolamento dos grãos (LEITE, 2001), o que acarreta no aumento do custo final do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Também, a forma irregular e a textura superficial mais áspera dos agregados influencia diretamente na demanda de água da mistura, aumentando a demanda para uma mesma trabalhabilidade (NEVILLE; BROOKS, 2014).

Além de influenciarem as características no estado fresco de concretos, o formato e textura dos agregados miúdos reciclados influenciam na resistência do concreto, uma vez que superfícies mais rugosas podem aumentar a ancoragem mecânica e melhorar a aderência entre pasta e agregado, levando ao maior fechamento da zona de transição, o que ocasiona maiores resistências, principalmente à tração e à flexão (LEITE, 2001; TENÓRIO, 2007).

3 CONCRETO COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE RCC

Os agregados ocupam cerca de 2/3 a 3/4 da composição de concretos de cimento Portland, sendo estes conceituados como materiais de enchimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE E BROOKS, 2016). Muitas vezes, são considerados como materiais inertes, conceituação considerada equívoca, já que suas características, como: forma, textura, tamanho, densidade e porosidade, influenciam diretamente as propriedades do estado fresco, e suas propriedades mecânicas, reatividade e composição química, além das citadas anteriormente, influenciam nas propriedades do estado endurecido do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014; HOVER, HOLLAND; LOBO, 2020).

Como ocorre nos agregados convencionais, as características dos agregados reciclados influenciam diretamente nas propriedades dos concretos, a qual dependerá do tipo e da qualidade do agregado reciclado (LOVATO, 2007). A incorporação de agregados reciclados em concretos é limitada em virtude de suas distintas características, quando comparados com o agregado natural e entre si, e ainda, em razão da inexistência de normatizações que padronizam fatores de utilização, por exemplo, que definem qual o melhor tipo de agregado que deve ser utilizado (de demolição, de concreto, de alvenaria, de peças cerâmicas, etc.) e qual porcentual de substituição do agregado convencional por agregado reciclado (ABREU, 2016).

Para que seja possível sua utilização de agregado reciclado em concretos, os agregados reciclados devem atender as normativas e recomendações exigidas em cada local (ÂNGULO, 2005; CABRAL, 2007). Os Países estão introduzindo normatizações e legislações referentes à utilização de agregados reciclados de resíduos da construção e demolição na própria indústria da construção civil como agregado reciclado, a fim de conscientizar sua população dos perigos que este material poderá causar ao meio ambiente se não bem gestado (AKAHTA; SARMAH, 2018). A tabela 10 mostra algumas normativas utilizadas nos países e suas especificações quando ao tipo de agregado, densidade máxima, absorção máxima de água, substituição máxima permitida, seus usos e resistência máxima atingida, desenvolvida por SILVA (2019).

Tabela 10 – Recomendações de uso de agregados reciclados de RCD

País	Tipo de Agregado	Densidade máxima (Kg/m ³)	Absorção máxima de água (%)	Substituição máxima (%)		Uso	Resistência máxima (MPa)
				Graúdo	Miúdo		
Brasil	ARC ¹	s.e	7% - AG 12% - AM	100	100	Concreto não estrutural	15
	ARM ²	s.e	12% - AG 17% - AM				
Alemanha	ARC ¹ I	2000	10	20-35	0	Concreto estrutural	C30/37 (20% de substituição) C25/30 (35% de substituição)
	ARC ¹ II	2000	15	20-35	0		
	ARA ³ III	1800	20	s.e ⁴	s.e ⁴	Concreto não estrutural	s.e ⁴
	ARM ²	1500	s.e ⁴				
Hong Kong	ARC ¹	2000	10	20 ou 100	0	Concreto estrutural	C20 (100% de substituição) C35 (20% de substituição)
RILEM	ARC ¹	2400	3	100	(a) ⁵	Ambiente seco e molhado, não agressivo	Sem limitação C50/60 C16/20
	ARC ¹	2000	10				
	ARA ³	1500	20				
Reino Unido	ARC ¹	s.e ⁴	s.e ⁴	20	0	Concreto estrutural	C40/50
	ARM ²	s.e ⁴	s.e ⁴	s.e	0	Concreto não estrutural	s.e ⁴
Holanda	ARC ¹	2000	s.e ⁴	100	(a) ⁵	Ambiente não agressivo	C40/50 C20/25
	ARM ²	2000	s.e ⁴				
Portugal	ARC ¹ I	2200	7	25	0	Concreto estrutural	C40/50 C35/45
	ARC ¹ II	2200	7	25	0		
	ARM ²	2000	7	s.e ⁴	0	Concreto não estrutural	s.e ⁴
Japão	ARM ²	2200	7	100	100	Concreto não estrutural	18
Suíça	ARC ¹	s.e ⁴	s.e ⁴	100	100	Concreto reforçado	C30/37
	ARM ²	s.e ⁴	s.e ⁴			Concreto não estrutural	s.e ⁴
Dinamarca	ARC ¹	2200	s.e ⁴	100	20	Ambiente não agressivo	C40 C20
	ARC ¹	2200	s.e ⁴				
	ARM ²	1800	s.e ⁴				

Notas: ¹Agregado reciclado de concreto; ²Agregado reciclado misto; ³Agregado reciclado de alvenaria; ⁴Sem especificação; ⁵Somente misturado com agregado graúdo natural;

Fonte: Adaptado de Silva, 2019.

Concretos produzidos com substituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregado miúdo reciclado de resíduos da construção civil (RCC)

A utilização de agregados miúdos reciclados de resíduos da construção civil em concretos é defendida por vários pesquisadores, os quais vêm discutindo a influência dessa incorporação nas propriedades do concreto (PINTO, 1999; JOHN, 2001; LEITE, 2001; ZAHARIEVA *et al.*, 2003; VIEIRA; DAL MOLIN, 2004; EVANGELISTA; BRITO, 2007; PEDROZO, 2008; RODRIGUES; FUCALE, 2014; BRAVO *et al.*, 2017; KURDA; BRITO; SILVESTRE, 2017; SANTANA, 2018; SILVA, 2019; NASCIMENTO *et al.*, 2020; HASSEN; FAROUN; MOHAMMED, 2021).

Alguns autores usam agregados miúdos reciclados produzidos de aterros ou recicladoras (LEITE, 2001; ZAHARIEVA *et al.* 2003; BRAVO *et al.*, 2017; SANTANA, 2018; MALYSZ, DAL MOLIN; MASUERO, 2020) e outros produzem os agregados miúdos reciclados, controlando suas características (YAPRAK *et al.* 2011; KURGA; BRITO; SILVESTRE, 2011). Também, além de utilizar os agregados miúdos reciclados, incorporam adições como fino com a finalidade de melhorar as propriedades do concreto, como cinza volante (CORINALDISE E MORICONI, 2009; KURDA *et al.*, 2017).

O concreto com agregado miúdo reciclado é mais poroso que os concretos com agregados convencionais, logo, a resistência e a durabilidade dos concretos reciclados não é apenas influenciada pela porosidade da pasta de cimento, o que ocorre com concretos com agregados convencionais, mas também pela própria porosidade do agregado (YAPRAK *et al.*, 2011; ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011; RODRIGUES; FUCALE, 2014). Quanto maior for a porosidade da matriz cimentícia, do agregado reciclado e da interface entre o agregado e matriz de cimento, maior será a redução da resistência à compressão (REIS, 2009; YAPRAK *et al.*, 2011; CARTUXO *et al.*, 2015; HASSEN; FAROUN; MOHAMMED, 2021).

Além disso, a porosidade dos concretos está intimamente associada à relação a/c, propriedade que influencia nas propriedades do mesmo, principalmente na resistência à compressão (LEITE, 2001; CABRAL, 2010; PICCINALI *et al.*, 2022). Essa relação tende a aumentar à medida que aumenta a incorporação de agregado reciclado na mistura, devido a maior porosidade e, conseqüentemente, maior taxa de absorção do agregado reciclado, confeccionando concretos com maior quantidade de vazios, menor massa específica e maior absorção de água (LEITE, 2001; YAPRAK *et al.*, 2011; RODRIGUES; FUCALE, 2014).

3.1 PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM AMR

Produzir concreto com agregado reciclado requer metodologias específicas que consideram as características distintas deste tipo de agregado, principalmente, sua menor massa específica e maior absorção (AMARIO, 2019). Deve-se, então, ter um controle de qualidade dos agregados reciclados, o qual implica na determinação dessas características, as quais são indicadores da porosidade do material (DAMINELI *et al.*, 2016).

Quando não se considera as características dos agregados reciclados, há uma perda de trabalhabilidade e coesão do concreto com uma igual relação a/c do concreto referência, sendo necessário adicionar água a medida que se aumenta o teor de agregado reciclado. E esse incremento de água é maior para concretos com agregado miúdo reciclado, quando comparado com concretos com agregado graúdo reciclado, devido à sua maior absorção (RODRIGUES, 2014).

O método de dosagem empregado e as condições de umidade inicial do agregado reciclado são parâmetros que influenciam diretamente no comportamento de concretos reciclados (TAM; TAM WANG, 2007; BRAND; ROESLER; SALAS, 2015). Usualmente, utiliza-se método de dosagem tradicional para dosar um concreto com agregado convencional (DAMINELI *et al.*, 2016; AMARIO, 2019). Porém, como os agregados reciclados possuem características peculiares em relação ao agregado convencional, durante a dosagem e produção das misturas de concretos reciclados, faz necessário a adoção de procedimentos que tem como intuito o não comprometimento das propriedades dos concretos reciclados, como: compensação do volume do agregado reciclado, compensação da absorção do agregado reciclado e adoção de metodologias de sequencias e tempo de misturas (SILVA, 2016).

Quando se considera traços de concretos com agregados convencionais, em massa, para realizar os traços dos concretos com agregado reciclado, a compensação de volume dos agregados reciclados deve ser realizada em razão do seu menor valor de massa específica (LEITE, 2001; CABRAL *et al.*, 2009; VIEIRA; DAL MOLIN, 2004; SANTANA, 2018). A compensação de volume servirá para evitar uma maior quantidade de agregado reciclado nos traços dos concretos reciclados, demandando de uma maior quantidade de cimento para produzir traços proporcionais ao traço referência (CABRAL *et al.*, 2009).

Devido à maior absorção do agregado reciclado, a trabalhabilidade do concreto é afetada (GÜNEYISI *et al.*, 2016; GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2017). Para evitar esta perda na trabalhabilidade em misturas de concretos com agregados miúdos reciclados, faz-se compensação da água absorvida pelo agregado reciclado (LEITE, 2001; CABRAL *et al.*, 2007; EXEBERRIA *et al.*, 2007; EVANGELISTA; BRITO, 2010; LEITE; MONTEIRO, 2016; SANTANA, 2018; ANDRADE *et al.*, 2020), a utilização de aditivos superplastificantes (PEREIRA; EVANGELISTA; BRITO, 2012; LI *et al.*, 2012) ou, ainda, a junção de duas metodologias (LEITE; MONTEIRO, 2016; SANTOS, 2016; SANTANA, 2018).

A utilização da metodologia de compensação de água é mais vantajosa em relação à utilização de aditivos, quando considera quesitos econômicos e ambientais (DAMINELI *et al.*, 2016). Porém, para essa prática deve haver uma metodologia criteriosa, determinando o teor de água absorvida pelo agregado reciclado por métodos adequados, para que não haja a ocorrência de segregação e enfraquecimento da zona de transição (AMORIM, 2018). Leite (2001), em seus estudos referentes a concretos com agregados reciclados, cita que não é necessário compensar a água absorvida pelo agregado reciclado de forma total, sendo que uma compensação parcial seria suficiente para obter propriedades admissíveis nos concretos, desde que esta fosse baseada na absorção dos agregados, no caso do estudo da referida autora, pela curva de absorção dos agregados.

É imprescindível a avaliação de formas mais adequadas de considerar a capacidade de absorção destes agregados na compensação de água da mistura de concretos com agregado reciclado (BRAND; ROESLER; SALAS, 2015). A tabela 11 mostra algumas metodologias adotadas, por diferentes autores, que compensam parcialmente a água que os agregados reciclados absorveriam.

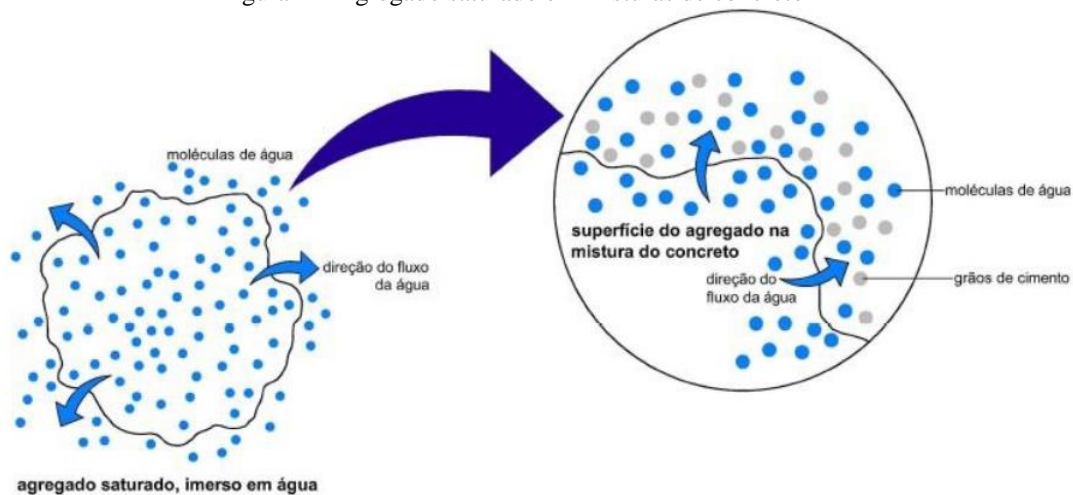
Tabela 11 – Metodologia de compensação parcial do agregado miúdo reciclado

Autor	Ensaio de absorção utilizado	Taxa de compensação (%)	Observações
Leite (2001)	Taxa de absorção sobre o tempo	50	Compensação 10 min antes da mistura
Reis (2009)	Taxa de absorção sobre o tempo	75	Compensação 10 min antes da mistura
Evangelista e Brito (2010)	Taxa de absorção sobre o tempo	50	Compensação 10-20 min antes da mistura
Brand, Roesler e Salas (2015)	-	80 e 85	Compensação 24h antes da mistura
Cartuxo <i>et al.</i> (2016)	Taxa de absorção sobre o tempo	77,4	Compensação 10 min antes da mistura
Eckert e Oliveira (2017)	Taxa de absorção sobre o tempo	80	Compensação 5 min antes da mistura
Andrade <i>et al.</i> (2020)	Taxa de absorção sobre o tempo	80	Compensação 5 min antes da mistura

Fonte: Elaborado pela autora.

Como a recomendação é que seja evitado o uso dos agregados reciclados nas condições extremas de umidade e em condições seca, Poon et al. (2004) e Padovan (2013) afirmam que compensação parcial de água é uma solução adequada no caso de agregados. Já no caso de condições de saturação, a água livre presente na sua superfície do grão de agregado poderá reter partículas do cimento, além da possibilidade de ocorrência da movimentação de água do agregado para a matriz cimentícia, proporcionando um aumento na relação a/c na zona de transição e reduzindo a aderência entre pasta e agregado, ocasionando o aumento da porosidade desta região e a redução da resistência do concreto (LEITE; MONTEIRO, 2016). Além disso, poderá ocorrer a exsudação de água da massa de concreto durante o lançamento, o que ocasiona, também, a redução da resistência à compressão (GONZÁLEZ-FONTEBOA *et al.*, 2011). Esse comportamento é demonstrado na figura 1.

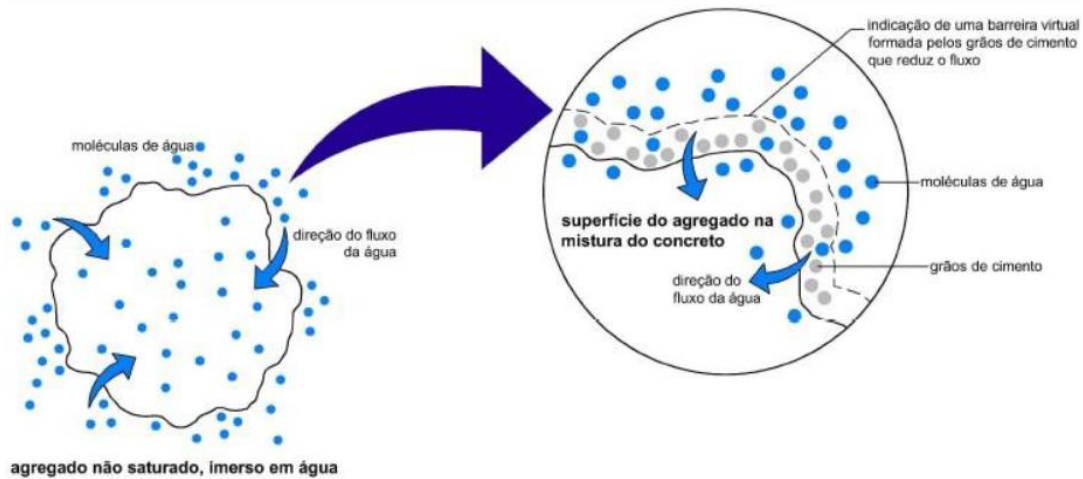
Figura 1 – Agregado saturado em misturas de concreto



Fonte: PADOVAN, 2013.

Já quando utilizado em condição seca, ou não saturado, haverá a absorção contínua da água de amassamento da mistura de concreto, o que proporciona a formação de vazios na zona de transição, prejudicando as propriedades do concreto (LEITE; MONTEIRO, 2016). Além disso, poderá ocorrer a redução da resistência do concreto em razão da não hidratação de grãos de cimento devido à falta de água de amassamento (MALTA *et al.*, 2014). Esse comportamento é demonstrado na figura 2.

Figura 2 – Agregado não saturado em misturas de concreto



Fonte: PADOVAN, 2013.

Poon et al., (2004) avaliaram a influência dos teores de umidade no agregado reciclado nas propriedades do concreto, os quais foram estudadas em condições de seco ao ar, seco em estufa e saturado superfície seca. Com os estudos realizados, os autores puderam observar que trabalhabilidade e a resistência à compressão em concretos com agregados secos em estufa e em superfície saturada seca foram mais afetadas em comparação à essas propriedades nos concretos com agregados reciclados secos ao ar, no qual obteve valores de trabalhabilidade e resistência próximos aos encontrados no concreto referência.

Além disso, a simples colocação do material e os tempos de mistura dos concretos podem influenciar nas propriedades dos concretos reciclados (SILVA, 2016). Uma das metodologias mais utilizadas, e estudadas, é a desenvolvida por TAM, GAO e TAM (2005), a qual é denominada por *two-stage mixing approach* (TSMA) ou, na língua portuguesa, método de mistura em dois estágios. Essa metodologia pode ser empregada tanto para concretos com agregados graúdos reciclados, quanto para concretos com agregados miúdos reciclados.

A metodologia TSMA consiste em adicionar o agregado miúdo com o agregado graúdo no misturador mecânico e realizar a mistura destes componentes por 60s. Após, adiciona 50% da água de amassamento e mistura por 60s, adicionando o aglomerante ao fim deste tempo e misturando por mais 30s. Após término do tempo de 30s, adiciona o restante da água e mistura por 120s, onde será produzido o concreto no final deste processo. As etapas descritas estão demonstradas na figura 3.

Figura 3 – Método de mistura em dois estágios (TSMA)



Fonte: TAM, GAO e TAM, 2005.

Essa metodologia tem como intuito a melhoria da zona de transição dos concretos com agregados reciclados, a qual é alcançada pela formação de uma fina camada de pasta de cimento, ocorrida na primeira etapa da metodologia com os 50% da água de amassamento, sobre a superfície do agregado que irá preencher as fissuras e vazios dos agregados reciclados. O restante da água é adicionada, na segunda etapa da metodologia, para completar o processo de mistura da massa de concreto.

Para verificar a melhoria da zona de transição, os próprios autores realizaram microscopia eletrônica de varredura (MEV) em concretos reciclados com mistura convencional e mistura em dois estágios e concluíram que as fissuras dos agregados reciclados foram preenchidas nos concretos reciclados que utilizaram o procedimento da metodologia TSMA, obtendo uma zona de transição com menos vazios e fissuras quando comparado com concretos reciclados que foi utilizado a mistura convencional.

3.2 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

A trabalhabilidade dos concretos com agregados reciclados é influenciada diretamente pelas características de alta absorção, textura áspera, superfície rugosa e formato irregular, características estas que acabam reduzindo a água livre do concreto, proporcionam maior travamento nas misturas de concreto e, conseqüentemente, reduzindo a mobilidade das misturas (LEITE, 2001; LEITE; FIGUEIREDO FILHO; LIMA, 2013; ARAÚJO *et al.*, 2016; SANTOS, 2016).

De um modo geral, a trabalhabilidade de concretos com agregados miúdos reciclados tende a diminuir a medida que aumenta sua incorporação na mistura, fazendo com que seja necessária uma maior quantidade de água para atingir a mesma trabalhabilidade da mistura do concreto convencional (YAPRAK *et al.*, 2011; RODRIGUES e FUCALE, 2014; SILVA *et al.*, 2015).

Concretos produzidos com substituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregado miúdo reciclado de resíduos da construção civil (RCC)

Lovato (2007) em seus estudos com concretos com agregado reciclado para alcançar a mesma trabalhabilidade do concreto convencional, a qual foi medida com abatimento do tronco de cone, teve a necessidade de aumentar a quantidade de água das misturas de concreto reciclado, aumentando, conseqüentemente, a relação a/c efetiva dos concretos reciclados. Outros autores seguiram a mesma metodologia e chegaram nas mesmas observações (PADOVAN, 2013; SANTOS et al., 2017)

Além disso, o grau de saturação na compensação dos agregados reciclados influencia na trabalhabilidade. Reis (2013) estudou a influência do grau de saturação do agregado reciclado em três níveis, sendo eles 60%, 80% e 100%, e concluiu que quanto maior for o grau de saturação, maior é o valor dos abatimentos dos concretos e que o grau de saturação de 60% obteve resultados menores de abatimento em comparação com a mistura do concreto referência, resultado atribuído à maior absorção dos agregados reciclados. Esse mesmo comportamento foi constatado nos estudos de Figueiredo Filho (2011), o qual concluiu que ao aumentar o percentual da taxa de compensação de água dos agregados reciclados, há um aumento na fluidez das misturas dos concretos.

A trabalhabilidade pode ser avaliada pelos ensaios de abatimento do tronco de cone, espalhamento na mesa de Graff e Ensaio VeBe. A avaliação da trabalhabilidade das misturas de concretos reciclados pelo abatimento de tronco de cone se mostra ineficiente devido à alta variabilidade encontrada nos resultados (LEITE, 2001; FIGUEIREDO FILHO, 2011) em razão das características de textura rugosa e formato irregular dos agregados reciclados, que causa aumento do atrito interno entre os grãos, o que impossibilita o fluxo de escoamento, ocasionando o aumento na quantidade de água na mistura para atingir valores iguais aos concretos convencionais (LEITE; FIGUEIREDO FILHO; LIMA, 2013). Além disso, por se tratar de um ensaio que tem a força da gravidade como única força atuante, a diferença da massa específica dos agregados reciclados faz com que suas medidas sejam alteradas (MOREIRA, 2010).

Figueiredo Filho (2011) e Leite et al. (2013) recomendam realizar ensaio de escoamento na mesa de Graff ou ensaio Vebe, metodologias nas quais utilizam elemento dinâmico para determinação da trabalhabilidade, reduzindo o atrito interno dos grãos das misturas, mesmo para incrementos menores de teores de água. Ou ainda, utilizar estudos reológicos para avaliar a trabalhabilidade de misturas de concretos reciclados (MOREIRA, 2010).

A trabalhabilidade de misturas com AMR tende a crescer com o aumento o teor de substituição, quando comparado com o concreto com agregado graúdo reciclado. Esse comportamento pode ser explicado pela presença de finos na mistura, o que ocasiona maior lubrificação dos grãos. Além disso, quando a mistura de concreto contém relações a/c maiores, menores são os valores de trabalhabilidade, em razão da menor quantidade de cimento na mistura, gerando um concreto com uma mistura mais áspera (LEITE, 2001). A menor trabalhabilidade dos concretos com agregado miúdo reciclado também é devido à sua maior demanda de água, que é em razão das características deste agregado, como formato angular, superfície rugosa e maior porosidade (NEDELJKOVIC *et al.*, 2021).

A maior demanda de água nos concretos com agregados miúdos reciclados causa, durante a produção dos concretos, a ascensão da água livre na superfície da mistura devido a sua maior porosidade e grande quantidade de finos (LEITE; MONTEIRO, 2016). Essa ascensão de água livre será maior quando os agregados miúdos reciclados forem usados em condição seca nas misturas de concreto (NEDELJKOVIC *et al.*, 2021).

Para obter uma mesma trabalhabilidade, concretos que possuem agregados miúdos reciclados em sua composição, necessitam de uma relação a/c maior, que tende a aumentar quanto maior for o teor de substituição, diminuindo a resistência do concreto. Desse modo, para manter a resistência do concreto será necessário, para uma mistura, maior consumo de cimento, elevando o custo do concreto com agregado reciclado (LEITE, 2001).

A massa específica do concreto no estado fresco é em função da massa específica de seus materiais constituintes, principalmente dos agregados, e da presença de ar no interior da mistura, no caso, do grau de compactação da mistura (FONSECA, 2006). Dessa forma, a massa específica do concreto com agregados reciclados de RCD, usualmente, é menor que a de concretos com agregados convencionais, em razão da sua maior porosidade, formato mais irregular e ao tipo do agregado reciclado utilizado. E essa redução, no valor de massa específica, será maior quanto maior for a incorporação de agregados miúdos reciclados (LEITE, 2001; YAPRAK *et al.*, 2011; RODRIGUES e FUCALE, 2014; SILVA *et al.*, 2015).

LEITE (2001) constatou redução na massa específica do concreto no estado fresco em concretos com agregados reciclados, sendo essa redução maior quanto maior foi o teor de substituição do agregado, visualizando uma redução de 16% da massa específica do concreto com 100% de substituição do agregado miúdo e graúdo reciclado quando comparado com a massa específica do concreto referência. Além disso, a relação a/c aumentou com a diminuição da massa específica.

Carijo (2005), em seus estudos, avaliou as variações da massa específica da mistura do concreto em estado fresco, levando em consideração a influência da relação a/c e a massa específica dos agregados. Concluiu que, quanto maior for a redução da massa específica do agregado e quanto maior for o aumento da relação a/c, há a redução da massa específica do concreto em estado fresco.

Kurga, Brito e Silvestre (2011) avaliaram a massa específica de concretos com agregados miúdos e graúdos reciclados e concluíram que a massa específica foi menor quanto maior foi o teor de substituição. Além disso, constatou que a massa específica de concretos com agregado miúdo reciclado foi menor que a dos concretos com agregado graúdo reciclado e as misturas que fizeram uso de aditivo obtiveram maiores massas específicas em comparação com as misturas em aditivo.

Santana (2018) concluiu que a massa específica, para o mesmo traço estudado (1:m) apresentou redução de 3% a medida que aumentava o teor de substituição do agregado miúdo reciclado e relacionou esse comportamento com a menor massa específica dos agregados miúdos reciclados em comparação ao agregado convencional.

3.3 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

A incorporação de agregados miúdos reciclados pode influenciar diretamente nas propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos (PICCINALI, 2022). Não há um consenso se o uso de agregado miúdo é benéfico ou não como substituição aos agregados convencionais, uma vez que os resultados são muito variáveis, muitas vezes inferiores (EVANGELISTA; BRITO, 2010; YAPRAK *et al.*, 2011; RODRIGUES; FUCALE, 2014; CARTUXO *et al.*, 2015), iguais (EVANGELISTA; BRITO, 2007; PEDROZO, 2008) ou ainda algumas vezes superiores (LEVY; HELENE, 2007; CABRAL *et al.*, 2009; NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Os valores de resistências dos concretos com agregados miúdos reciclados são, muitas vezes, considerados satisfatórios. Esse melhor desempenho é atribuído ao teor de material fino, em sua composição, constituídos de grãos de cimento não hidratados ou por possuírem atividade pozolânica. Porém, esses finos poderão gerar impactos negativos em algumas propriedades, quando em grande quantidade, ao necessitar de maior quantidade de água nas misturas devido a sua maior superfície específica (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011).

Além disso, as resistências menores ocorridas nos traços com 100% de substituição, mesmo em reduções menores, são referentes à necessidade de maior quantidade de água nas misturas para atingirem a mesma trabalhabilidade do concreto referência, aumentando a relação a/c efetiva das misturas e diminuindo a resistência do concreto (BEHERA, MINOCHA e BHATTACHARYA, 2019).

A matriz do concreto produzido com agregados reciclados também influencia a sua resistência à compressão. Quando a matriz do concreto for menos resistente que os agregados reciclados, estes irão influenciar na resistência mecânica do concreto, já que a matriz será o elo mais fraco. Porém, quando a matriz do concreto tiver maior resistência que o agregado reciclado, o agregado reciclado irá influenciar na resistência do concreto, sendo ele o elo mais fraco do sistema (CABRAL, 2007). Além disso, em razão do agregado reciclado possuir maior porosidade que o agregado convencional, a resistência de concretos que são produzidos com agregados reciclados, não é apenas controlada pela porosidade da pasta de cimento, o que ocorre com concretos com agregados convencionais, mas, também, pela própria porosidade do agregado (ANGULO e FIGUEIREDO, 2011).

Os resultados de absorção por capilaridade seguem uma tendência que, quanto maior a substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado, maior será a absorção por capilaridade. Esse comportamento gera um concreto com menor qualidade devido a maior porosidade do agregado reciclado, quando comparado com o concreto com agregado convencional. Essa maior porosidade irá produzir concretos com maior absorção de água (GONÇALVES, 2001; EVANGELISTA e BRITO, 2010; RODRIGUES e FUCALE, 2014; ANDRADE *et al.*, 2020).

Ainda, resultados referentes à velocidade do pulso ultrassônico em concretos com agregado miúdo reciclado são semelhantes ou menores ao do concreto com agregado miúdo convencional, sendo a velocidade menor quanto maior o número de vazios (MALTA, 2012; SAMPAIO, 2013; NASCIMENTO, 2020). A avaliação do número de vazios pode ser relacionada com a homogeneidade do concreto, que é uma propriedade avaliada pelo ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU), ensaio não destrutivo que tem como princípio determinar a velocidade de uma onda ultrassônica através da estrutura de concreto (NBR 8802, 2019).

Evangelista e Brito (2007) estudaram concretos com agregados miúdos reciclados de concreto em porcentagens de substituição, do agregado miúdo convencional por reciclado, de 0, 10, 20, 30, 50 e 100% e concluíram que, aos 28 dias, não houve diferenças significativas entre os traços, os quais, obtiveram resistências de 59,4MPa (CR), 62,2MPa (C10R), 58,4MPa (C20R), 61,3MPa(C30R), 60,8MPa (C50R) e 61,0MPa (C100R). Esse comportamento poderá ser em razão, segundo os autores, a uma possibilidade da presença de teores de cimento no agregado miúdo reciclado, tanto hidratado quando não hidratado, aumentando a quantidade de cimento na mistura.

Levy e Helene (2007) produziram concretos com agregados miúdos reciclados de concreto e de alvenaria, nos traços 1:3, 1:4,5 e 1:6,0, substituindo 0%, 20%, 50% e 100% do agregado miúdo natural. Nos seus estudos concluíram que, na idade de 28 dias, as maiores resistências à compressão foram encontradas no traço 1:3, sendo que, no respectivo traço, com agregado miúdo de concreto, a maior resistência foi obtida no concreto com substituição de 20%, seguindo com o concreto referência, com 100% e 50%, sendo que a resistência dos concretos com 50% e 100% possuem uma diferença de 0,3MPa. Já com a substituição com agregado miúdo de alvenaria, o maior resultado de resistência foi no concreto com substituição de 50%, seguido do de 20%, referência e 100%.

Pedrozo (2008) estudaram agregados graúdos e miúdos reciclados, os quais substituíram o agregado graúdo e miúdo natural em 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Para os concretos produzidos com o agregado miúdo reciclado, não houve diferenças significativas nos valores de resistências com o aumento da incorporação, fato esse devido, segundo o autor, a redução da relação a/c efetiva e ao efeito filler causado pelos finos. Já para os concretos com agregado graúdo reciclado, as resistências diminuíram com o aumento do teor de substituição, diferença essa, em comparação com o concreto convencional, que chegou em 20% para a substituição de 100%.

Cabral *et al.* (2009) em seus estudos estimaram os valores de resistência à compressão de concretos com agregado miúdo reciclado por meio de modelos matemáticos, considerando relação a/c de 0,45, 0,6 e 0,75 usando 100% de agregado miúdo, 100% de agregado graúdo e 100% de agregado miúdo e graúdo para diferentes cidades brasileiras. Os autores concluíram que quanto maior foi a relação a/c das misturas dos concretos, menores eram as resistências e que concretos com agregados miúdos reciclados, substituindo isoladamente, obtiveram maiores resistências em comparação aos concretos com agregado graúdo reciclado e concretos com o uso combinado de agregado graúdo e miúdo reciclado. Também, concluíram que houve uma diferença de resistência entre os concretos com agregado miúdo reciclado e concretos de agregado graúdo reciclado de 27,2% menor e uma diferença de 30% menor quando os concretos com agregado miúdo reciclado eram comparados com as resistências dos concretos com agregados reciclados combinados (agregado miúdo reciclado e agregado graúdo reciclado).

Evangelista e Brito (2010) estudaram concretos com substituição de 0%, 30% e 100% do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de concreto, concluíram que a resistência à compressão teve uma leve redução com o aumento da substituição, atingindo valores de 59,3MPa (CR), 57,3 (C30R) e 54,3 (C100R). Os autores também analisaram a absorção por capilaridade e concluíram que o aumento da substituição levou um aumento da relação a/c das misturas e, conseqüentemente, aumentou a absorção de água por capilaridade, sendo esse aumento observado em todos os tempos analisados (3h, 6h, 24h e 72h).

Yaprak *et al.* (2011) estudaram concretos com agregados miúdos reciclados de concreto (corpos de prova de concreto britados em laboratório) na porcentagem de substituição de 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 100% e utilizando aditivo superplastificante. Nos seus estudos, concluíram que, aos 28 dias, ao aumentar o teor de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado, a resistência do concreto diminuía. Sendo que a redução no valor da resistência do concreto referência foi de, aproximadamente, 34% em comparação ao concreto com 100% de agregado miúdo reciclado. Além disso, concluíram que concretos com 10% de agregado miúdo reciclado poderiam ser produzidos para uma resistência de 30MPa, já os concretos com 20% a 50% de substituição, poderia produzir concretos com 25MPa. Essa redução na resistência, de acordo com os autores, foi devido ao transporte da água absorvida do interior do agregado para a zona de interface em razão da vibração do concreto, produzindo uma zona de transição com fator a/c maior e, conseqüentemente, mais fraca. Ainda, os autores avaliaram a absorção de água por capilaridade dos concretos e puderam observar que as taxas de absorção capilar variaram de 1,67%

Concretos produzidos com substituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregado miúdo reciclado de resíduos da construção civil (RCC)

a 1,92% e foram aumentando com o aumento da substituição do agregado convencional por agregado miúdo reciclado, comportamento esse atribuído pelo aumento da relação a/c.

Malta (2012) avaliou a velocidade de ondas ultrassônicas de concretos com agregado miúdo reciclado com substituição de 0%, 25% e 50%, sendo, ainda, analisado mais dois traços com substituição de 25% e 50% utilizando método de compensação de água, os quais foram moldados com 4 métodos de dosagem. O autor analisou que os valores de velocidades do pulso ultrassônico não tiveram diferença significativa entre os diferentes métodos analisados. Logo, a porosidade dos concretos produzidos pelos diferentes métodos de dosagem é a mesma, devido a uniformidade, ou homogeneização, dos concretos serem considerados iguais nos diferentes métodos.

Sampaio (2013) produziu concretos com agregado miúdo reciclado em substituição de 0%, 50% e 100% e concluiu que os valores alcançados de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas estão entre 4.000 a 4.500 m/s, valores esses considerados equivalentes aos encontrados em concretos convencionais. O autor observou que quanto maior foi a substituição do agregado miúdo reciclado, menor foi a velocidade do pulso ultrassônicos, sendo o menor valor encontrado para o concreto de 100% de substituição e o maior valor para o concreto referência. O concreto com 50% de substituição atingiu valores próximos aos obtidos no concreto referência.

Rodrigues e Fucale (2014) produziram concretos com agregado miúdo reciclado misto em substituições de 0%, 50% e 100% nos traços 1:3,5, 1:5,0 e 1:6,5 e verificaram, na idade de 28 dias, que os concretos com agregado miúdo reciclado obtiveram pouca redução na sua resistência à compressão em comparação ao concreto convencional, sendo que o concreto com 50% não houve grandes influências em seu resultado e o concreto com 100% houve uma redução de até 2%. Esse comportamento foi atribuído, pelos autores, à ação cimentante dos grãos de cimento não hidratados que o agregado miúdo reciclado poderia conter. Além disso, os autores avaliaram a absorção por capilaridade dos concretos e concluíram que com o aumento da substituição, aumentou a absorção por capilaridade. Também, observaram que as propriedades dos concretos estavam interligadas, ao aumentar a substituição do agregado miúdo na composição dos concretos, aumentou a relação a/c, aumentando a quantidade de vazios na estrutura do concreto, diminuindo a massa específica e, conseqüentemente, o aumento na absorção de água.

Cartuxo *et al.* (2015) estudaram concretos com agregado miúdo reciclado de concreto em 3 misturas (sem aditivo plastificante, com aditivo superplastificante 1 e com aditivo superplastificante 2) substituindo o agregado miúdo convencional em 0%, 10%, 30%, 50% e 100%. Concluíram que nas três misturas houve uma redução na resistência à compressão com o aumento da substituição, sendo que os concretos de 100% de substituição obtiveram reduções de 17%, 29% e 20% comparadas às resistências dos concretos referência. Porém, utilizando os aditivos, houve um aumento na resistência à compressão comparado aos concretos sem uso de aditivo, sendo o aditivo 2 obtendo os maiores aumentos nas resistências. Os autores também avaliaram a propriedade de absorção por capilaridade dos concretos e concluíram que nas três misturas houve um aumento na absorção de água por capilaridade ao aumentar a substituição do agregado miúdo convencional por miúdo reciclado. Ainda, observaram que esse aumento na absorção de água foi mais significativo para concretos com 100% de substituição devido, segundo aos autores, ao maior valor obtido na relação a/c desse concreto.

Nascimento *et al.* (2020) estudaram a resistência à compressão de concretos com substituição de 0%, 50% e 100% de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado misto, cujo traço unitário dos concretos foi de 1:1,4:2,4:0,50. Com esse estudo puderam observar, aos 28 dias de cura, um aumento de resistência à compressão no concreto com 50% de agregado miúdo reciclado de RCC misto, o qual obteve um aumento na resistência à compressão de 4,6% em relação ao concreto referência (0% de substituição) e um aumento de 26,4% em comparação ao concreto de 100% de agregado miúdo reciclado de RCC misto. Assim, com esse estudo, puderam concluir que a utilização de 50% de agregado reciclado miúdo de RCC misto confere eficiência mecânica em concretos. Também, analisaram a velocidade da onda ultrassônica dos concretos e concluíram que a velocidade ultrassônica foi menor para os concretos com agregado miúdo reciclado quanto maior foi a porcentagem de substituição, atribuindo esse comportamento ao índice de vazios e devido à grande quantidade de finos. Além disso, classificou a qualidade do concreto como “boa” devido aos valores de velocidade estarem em torno de 3500 e 4500 m/s.

Andrade *et al.*, (2020) produziram concretos com agregado miúdo reciclado de concreto em substituição de 0%, 25% e 50% ao agregado miúdo natural com utilização de dois tipos de aditivos (Classe C30 e C60) e dois tipos de cimento (Classe C30 e C60). Concluíram que, com o aumento da incorporação do agregado miúdo reciclado, houve o aumento na absorção por capilaridade do concreto. Esses resultados, segundo os autores, estavam relacionados com a resistência do

concreto, em que, para concretos de menor resistência (C30), obteve maiores valores de absorção em comparação com concretos de altas resistências (C60).

Hassen, Faroun e Mohammed (2021) estudaram concretos com substituição do agregado miúdo e graúdo natural por agregados miúdos e graúdos de concreto triturado antigo em 0%, 50% e 100%. Os autores concluíram que houve a redução de resistência para os concretos com agregado reciclado, tanto miúdo quanto graúdo, em comparação com o resultado obtido no concreto referência. Ainda, observaram que o concreto com substituição de 100% do agregado miúdo e graúdo natural por reciclado obtém as menores reduções, sendo os valores obtidos de resistência à compressão do concreto com 100% de agregado miúdo reciclado pode ser utilizado na produção de concretos com resistências razoáveis.

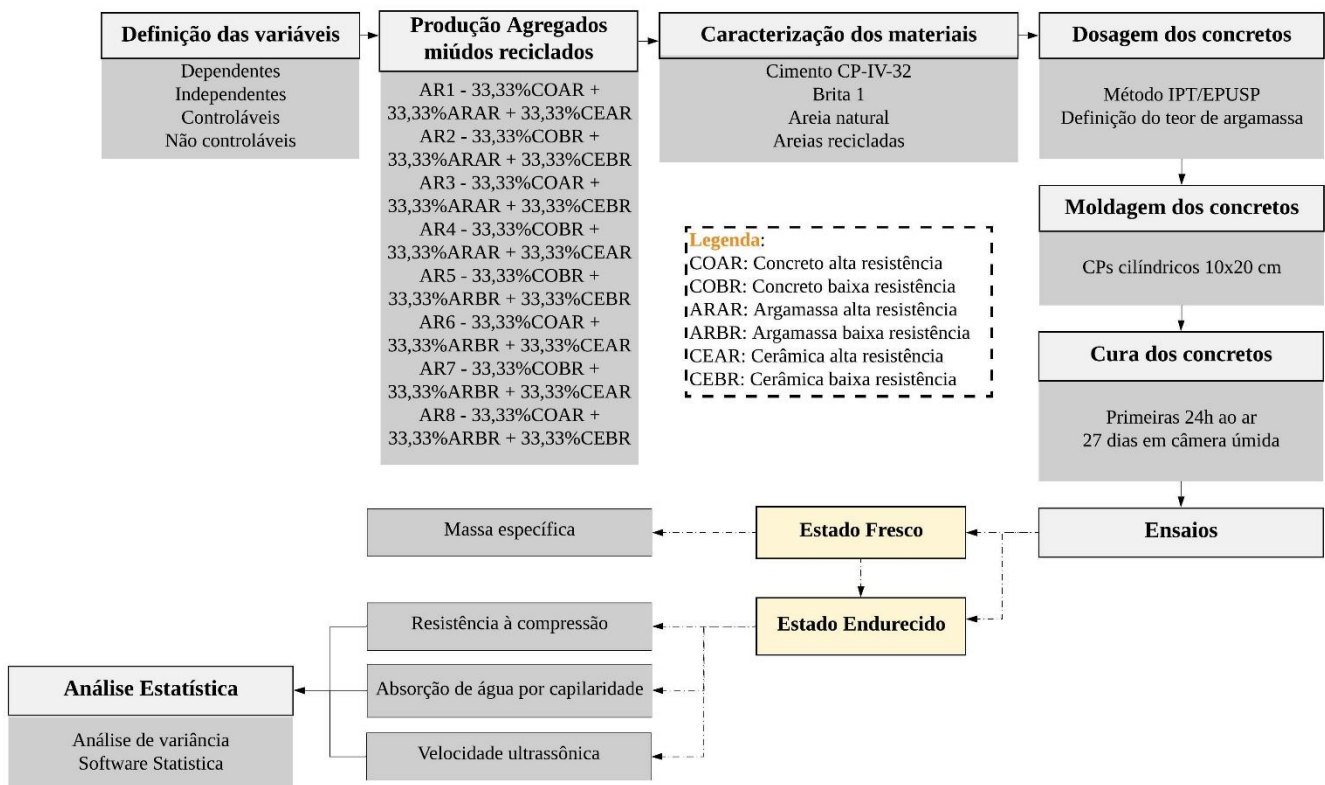
PICCINALI et al (2022) realizaram revisão bibliográfica referente à influência do agregado miúdo e graúdo reciclado nas propriedades mecânicas e ambientais do concreto e notaram que, com o compilado de resultados obtidos por diferentes autores, a substituição de 50% do agregado miúdo natural por reciclado diminui a resistência à compressão de concretos em torno de 15%. Já quando substitui 100% do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado a redução aumenta em 22%. Além disso, notaram que concretos produzidos com agregado miúdo reciclado atingem resistências à compressão superiores a 35MPa, desde que essa substituição fosse em até 25%, sendo que, à medida que aumenta essa substituição, reduz a resistência à compressão.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A utilização de um planejamento experimental permite a estruturação de uma metodologia baseada em uma sequência de ensaios e conceitos estatísticos que objetivam a otimização da execução e análise do objeto em estudo, a qual testa hipóteses formuladas acerca do fenômeno que está sendo analisado, permitindo a compreensão das causas responsáveis pelo comportamento constatado na pesquisa.

Desta forma, para atender os objetivos propostos no presente trabalho, o programa experimental foi elaborado de modo que permitisse a avaliação das propriedades, no estado fresco e endurecido, de concretos produzidos com substituição total do agregado miúdo natural por agregados miúdos reciclados de resíduos da construção civil, os quais foram comparados com as mesmas propriedades do concreto convencional. O programa experimental está demonstrado na figura 4, e será melhor especificado nos itens subsequentes do presente capítulo.

Figura 4 – Programa experimental



Fonte: elaborado pela autora.

Concretos produzidos com substituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregado miúdo reciclado de resíduos da construção civil (RCC)

4.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

Ao instituir um programa experimental é necessário que sejam definidas as variáveis que serão medidas, testadas ou analisadas ao longo do experimento. Essas são denominadas de variáveis dependentes, independentes, controláveis e não controláveis. As variáveis do presente trabalho serão descritas nos itens subsequentes.

4.1.1 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes, também denominadas de variáveis de resposta, são aquelas que são medidas para caracterizar a resposta do experimento, no caso do presente trabalho, as propriedades do estado fresco e endurecido de concretos produzidos com agregados miúdos reciclados de RCD e com agregado miúdo convencional, por meio da avaliação do efeito das variáveis independentes. Considerando os objetivos definidos no referido trabalho, as variáveis dependentes selecionadas para compor os ensaios principais são:

- Massa específica no estado fresco do concreto;
- resistência à compressão;
- absorção capilar; e
- velocidade do pulso ultrassônico;

Também, foi definido variável dependente para compor ensaio complementar, que irá realizada a fim de obter dados que auxiliam em conclusões referentes ao comportamento dos concretos. Essa variável dependente é massa específica no estado fresco, ensaio esse escolhido como critério de controle de qualidade, já que, com sua determinação, é possível calcular rendimento, consumo de cimento, volume total dos componentes da betoneira e teor de ar de concretos;

4.1.2 Variáveis independente

As variáveis independentes são conceituadas como aquelas que se desejam verificar sua influência nas variáveis de resposta. Considerando o objetivo principal do trabalho, optou-se em definir como variáveis independentes três teores de materiais secos e nove tipos diferentes de agregados miúdos reciclados.

O teor de agregado seco e o tipo de agregado miúdo reciclado podem influenciar, diretamente, nas propriedades de concretos. O primeiro é relacionado com a quantidade de material que será necessário para produzir determinado traço de concreto, indicando qual dos traços estudados poderá gerar um concreto com propriedades mais interessantes para determinado fim. Já o segundo é devido à análise da influência das suas diferentes caracterizações (porosidade, forma, resistência, dentre outras), as quais são, na maioria das vezes, provenientes de seus distintos processos de beneficiamento e constituições.

4.1.3 Variáveis controláveis ou Fixas

As variáveis denominadas de controláveis ou fixas são aquelas que possuem certa influência na variável de resposta, mas que não se tem interesse em analisar essa influência. No referido trabalho, as variáveis fixas são:

- Distribuição granulometria dos agregados miúdos natural e reciclado;
- teor de substituição do agregado miúdo natural por reciclados;
- porcentagem da constituição dos materiais dos agregados miúdos reciclados;
- compensação de água dos agregados miúdos reciclados;
- tipo de cimento;
- tipo de agregado graúdo natural;
- metodologia de dosagem dos concretos;
- teor de argamassa;
- trabalhabilidade obtida pelo ensaio de abatimento e mesa de Graff;
- laboratorista responsável para realização dos ensaios;
- tipo de cura;
- idade do concreto para ensaios; e
- temperatura da área de concretagem.

4.1.4 Variáveis não controláveis

Como variável não controlável observada, no presente trabalho, está a umidade relativa do ar.

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados na confecção dos concretos, bem como seus ensaios de caracterização, que têm como intuito o conhecimento de suas propriedades para uma adequada dosagem e conhecimento do comportamento do concreto, serão descritos nos itens subsequentes.

4.2.1 Cimento

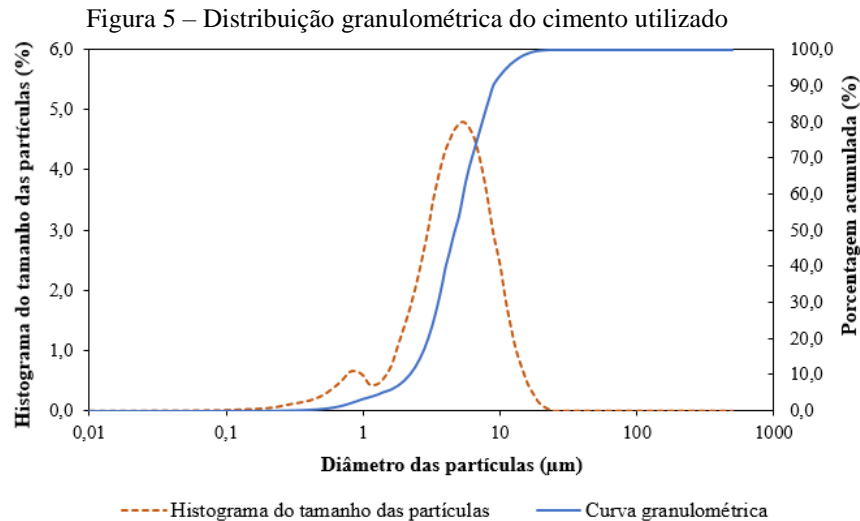
O cimento utilizado no desenvolvimento do trabalho foi o cimento Portland pozolânico (CP IV 32), classe de resistência de 32MPa. Sua caracterização se deu através da massa específica (NBR 16605 (ABNT, 2017)), consistência normal (NBR 16606 (ABNT, 2018)), início e fim de pega (NBR 16607 (ABNT, 2018)), no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) e granulometria a laser em granulômetro Particle Size Analyser, CILAS 1180 liquid, utilizando álcool isopropílico como meio dispersante, no Laboratório de Inovação em Cimentos Ecoeficientes (LINCE) Os resultados encontrados estão apresentados na tabela 12 e a composição granulométrica está apresentada na figura 5.

Tabela 12 – Caracterização física do cimento

Caracterização		Resultados	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018)
Massa específica (g/cm ³)		2,89	-
Consistência normal (%)		34	-
Pega	Início	160min	≥ 60 min
	Fim	280min	≤ 720 min
Granulometria a laser	D_{10} (μm)	1,396	-
	D_{50} (μm)	4,730	-
	D_{90} (μm)	9,067	-
	$D_{médio}$ (μm)	5,271	-

Fonte: elaborada pela autora.

Conforme os resultados apresentados na tabela 12, nota-se que atendem aos limites estabelecidos pela normativa NBR 16697 (ABNT, 2018), que especifica o CP IV 32. Além disso, verifica que 90% das partículas apresentam diâmetro menor que 9,067 μm e que a média dos diâmetros das partículas de cimento é de 5,271 μm.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.2 Agregado graúdo natural

O agregado graúdo natural (AGN) utilizado no trabalho foi brita de origem basáltica. Para obter uma amostra representativa e caracterizar o agregado graúdo natural, realizou-se amostragem, com auxílio de um amostrador de calhas rifladas tipo jones, conforme prescrições da normativa NBR 16915 (ABNT, 2021). Também, para que o agregado graúdo natural não tivesse teores de material pulverulento ou de substâncias indesejáveis, foi realizada sua lavagem em betoneira de tambor de eixo horizontal com capacidade de 320 litros, utilizando água proveniente do abastecimento público.

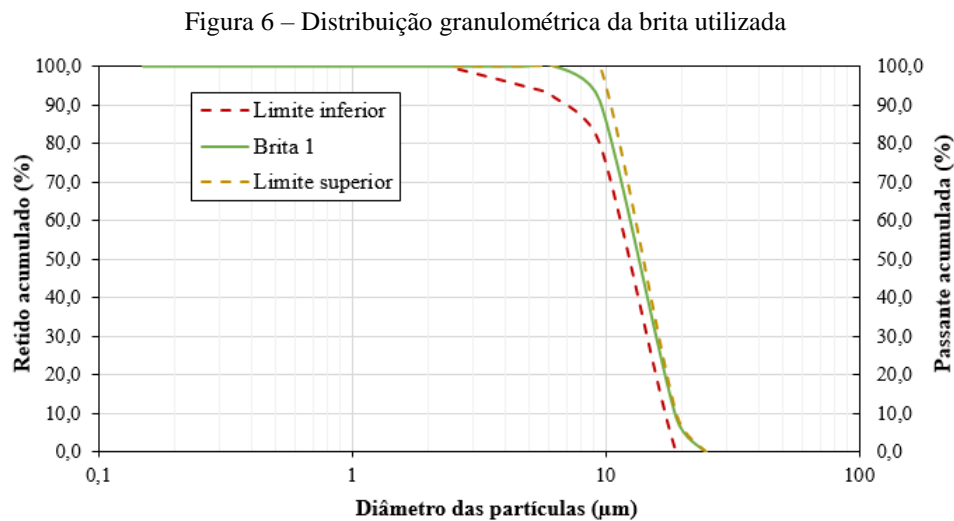
Com o quarteamento e lavagem realizados, caracterizou-se o agregado graúdo através da composição granulométrica e dimensão máxima característica (NBR NM 248 (ABNT, 2003)) Massa específica (NBR 16917 (ABNT, 2021)), massa unitária (NBR 45 (ABNT, 2009)), absorção de água (NBR 16917 (ABNT, 2021)) e índice de forma (NBR 7809 (ABNT, 2019)), cujos resultados estão demonstrados na tabela 12 e a curva granulométrica apresentada na figura 6.

Tabela 13 –Caracterização física do agregado graúdo natural

Propriedades avaliadas	Resultado
Massa específica (g/cm ³)	2,794
Massa unitária (g/cm ³)	1,661
Absorção de água (%)	1,030
Índice de forma	1,149 (Alongada)
Numeração	Brita 1

COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA		
Abertura de peneiras (mm)	% em massa (média)	
	Retido	Retido acumulado
25	0	0
19	9	9
9,5	82	91
6,3	9	100
4,75	0	100
2,36	0	100
1,18	0	100
0,6	0	100
0,3	0	100
0,15	0	100
fundo	0	100
Dimensão máxima característica (mm)	25 mm	
Módulo de finura	6,91	

Fonte: elaborada pela autora.



Fonte: elaborado pela autora.

Nota-se, de acordo com a figura 6, que o agregado graúdo convencional, utilizado no trabalho, sai dos limites estabelecidos na normativa NBR 7211 (ABNT, 2019), tanto inferior quanto superior, para partículas de dimensão acima de 10 mm. Além disso, nota-se que a curva granulométrica do agregado graúdo natural segue uma tendência de formar um “S” alongado na vertical, comportamento típico de uma distribuição uniforme.

4.2.3 Agregados miúdos natural (AMN) e reciclados (AMR)

Nesta pesquisa, foram utilizados 10 tipos de agregados miúdos: uma areia natural de origem quartzosa proveniente do Rio Jacuí, extraída de jazidas do município de Porto Alegre – RS, considerada referência, uma areia reciclada de composição mista obtida através de inúmeras etapas de beneficiamento, denominada de VC-areia e descrita no item 4.2.3.1, e oito tipos de areias recicladas constituídas de concreto, argamassa e cerâmica, tanto de alta quanto de baixa resistência, com beneficiamento padrão utilizando britador de mandíbulas, cuja denominação e constituição, está demonstrada na tabela 14 e são descritas no item 4.2.3.2.

Tabela 14 – Denominação e constituição das areias recicladas

Denominação	Constituição						Composição
	Concreto		Argamassa		Cerâmica		
	Alta resist.	Baixa resist.	Alta resist.	Baixa resist.	Alta resist.	Baixa resist.	
AR1	33,33%	-	33,33%	-	33,33%	-	33,33%COAR + 33,33%ARAR + 33,33%CEAR
AR2	-	33,33%	33,33%	-	-	33,33%	33,33%COBR + 33,33%ARAR + 33,33%CEBR
AR3	33,33%	-	33,33%	-	-	33,33%	33,33%COAR + 33,33%ARAR + 33,33%CEBR
AR4	-	33,33%	33,33%	-	33,33%	-	33,33%COBR + 33,33%ARAR + 33,33%CEAR
AR5	-	33,33%	-	33,33%	-	33,33%	33,33%COBR + 33,33%ARBR + 33,33%CEBR
AR6	33,33%	-	-	33,33%	33,33%	-	33,33%COAR + 33,33%ARBR + 33,33%CEAR
AR7	-	33,33%	-	33,33%	33,33%	-	33,33%COBR + 33,33%ARBR + 33,33%CEAR
AR8	33,33%	-	-	33,33%	-	33,33%	33,33%COAR + 33,33%ARBR + 33,33%CEBR

COAR = Concreto alta resistência; COBR = Concreto baixa resistência; ARAR = Argamassa alta resistência; ARBR = Argamassa baixa resistência; CEAR = Cerâmica alta resistência; CEBR = Cerâmica baixa resistência.

Fonte: elaborada pela autora

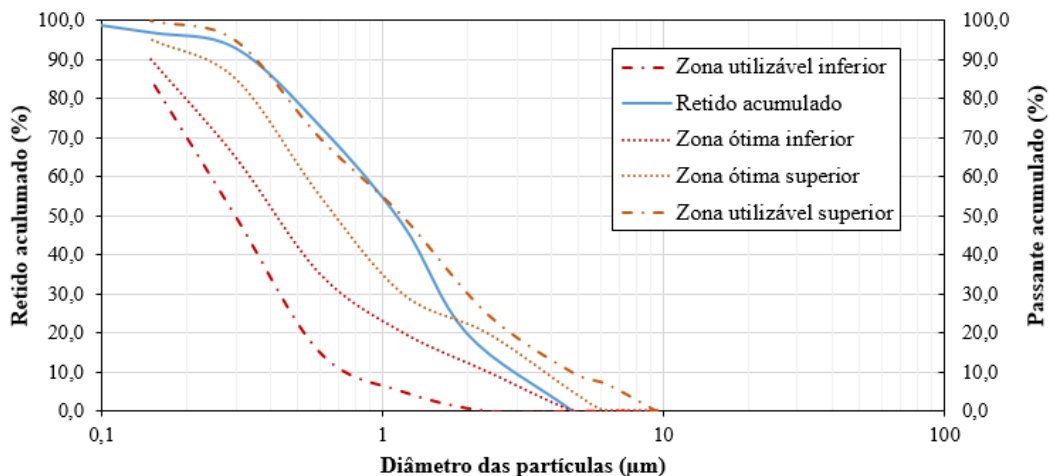
Para eliminar a influência da variável do tamanho dos grãos, utilizou-se a mesma composição granulométrica para o agregado miúdo natural e agregados miúdos reciclados. A correção foi realizada no agregado miúdo natural (AN) e nos agregados miúdos reciclados AR1, AR2, AR3, AR4, AR5, AR6, AR7 e AR8, de modo que ficassem com a mesma distribuição granulométrica da VC-areia, através de peneiramento mecânico a seco. Para isso, com a determinação das porcentagens retidas da VC-areia, pesou o material correspondente à cada peneira, para que cada fração fosse acondicionada em bombona, e, no final, fosse possível montar cada areia correspondente à quantidade requerida para cada mistura, garantindo que a mesma distribuição granulométrica fosse mantida. A VC-areia também foi peneirada e suas frações acondicionadas em bombonas distintas para controle de sua composição granulométrica. A distribuição granulométrica e a curva granulométrica do agregado natural e dos reciclados estão apresentado na tabela 15 e figura 7, respectivamente.

Tabela 15 –Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural e reciclados

COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA		
Abertura de peneira (mm)	% em massa (média)	
	Retido	Retido acumulado
4,8	0	0
2,4	0	0
2,0	20	20
1,18	28	48
0,6	25	73
0,3	20	93
0,15	4	97
0,075	3	100
Dimensão máxima característica (mm)	2 mm	
Módulo de finura	3,31	

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 7 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos



Fonte: elaborado pela autora.

Observa-se, conforme a figura 7, no geral, os agregados miúdos estão dentro das zonas utilizáveis superior e inferior, e fora da zona ótima superior em grande parte da sua extensão. Ainda, nota-se, que a curva tende à forma de um S suavizado e alongado, comportamento típico de uma distribuição contínua, considerada como sendo ideal pela normativa NBR 7211 (ABNT, 2009).

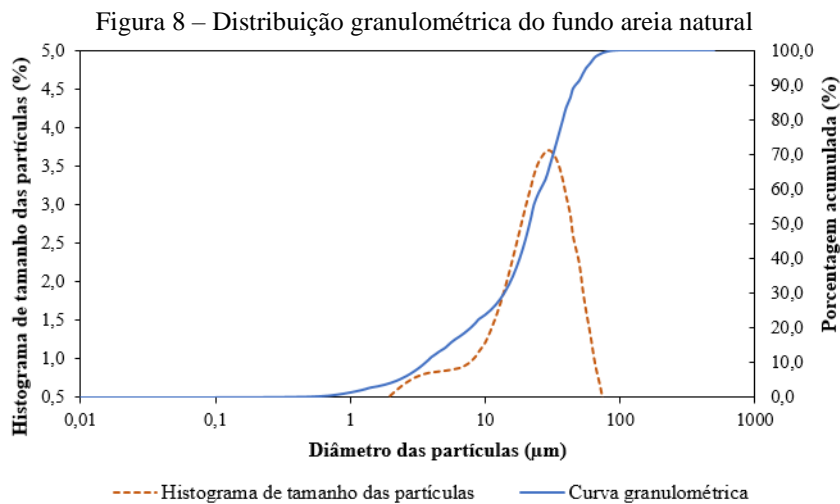
Também, realizou-se granulometria a laser dos grãos passantes na peneira 0,075mm da areia natural, VC-areia e dos seis tipos de materiais estudados no trabalho (concreto alta resistência, concreto baixa resistência, argamassa alta resistência, argamassa baixa resistência, cerâmica alta resistência e cerâmica baixa resistência) em granulômetro *Particle Size Analyser*, CILAS 1180 liquid, utilizando álcool isopropílico como meio dispersante, para verificar a

distribuição destes fundos. Os resultados obtidos estão demonstrados na tabela 16 e as curvas granulométricas dos respectivos fundos estão demonstradas na figura 8 a figura 15.

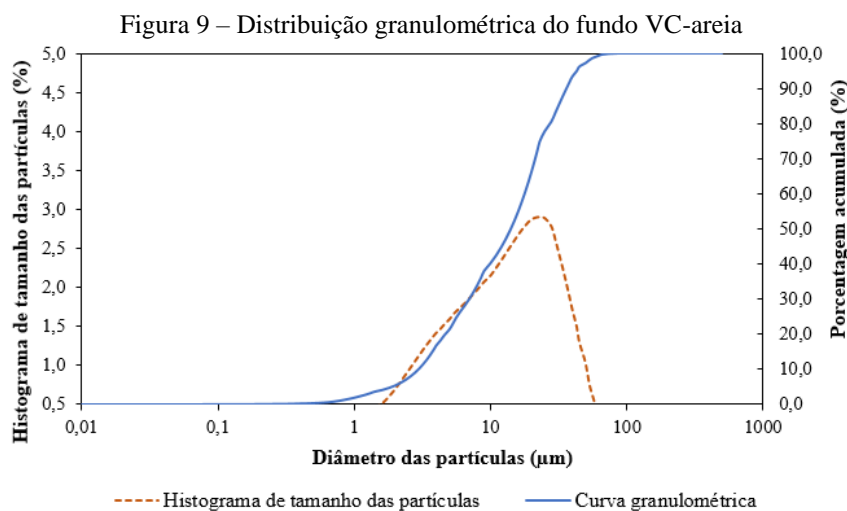
Tabela 16 – Caracterização física dos diferentes fundos

Fundo	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	$D_{\text{médio}}$ (μm)
Areia natural	2,709	21,146	47,179	24,175
VC-areia	2,021	12,074	34,593	16,175
Concreto alta resistência	2,431	11,648	32,032	15,312
Concreto baixa resistência	2,354	11,558	32,019	15,252
Argamassa alta resistência	2,789	14,813	36,823	18,183
Argamassa baixa resistência	1,972	6,722	13,328	7,576
Cerâmica alta resistência	1,994	17,548	41,616	20,550
Cerâmica baixa resistência	2,021	12,074	34,593	16,175

Fonte: elaborada pela autora.

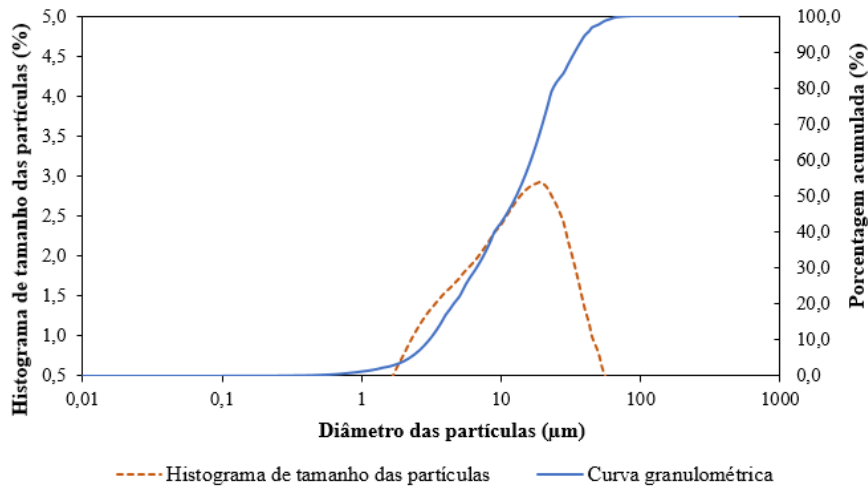


Fonte: elaborado pela autora.



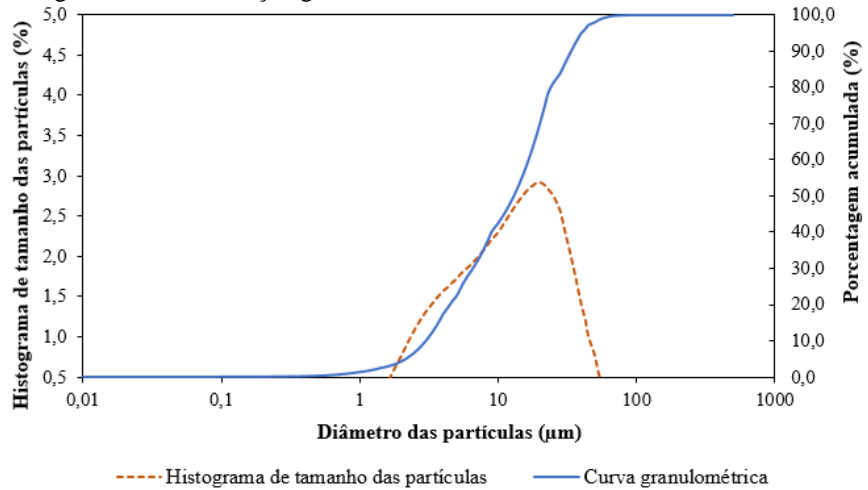
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 10 – Distribuição granulométrica do fundo concreto alta resistência



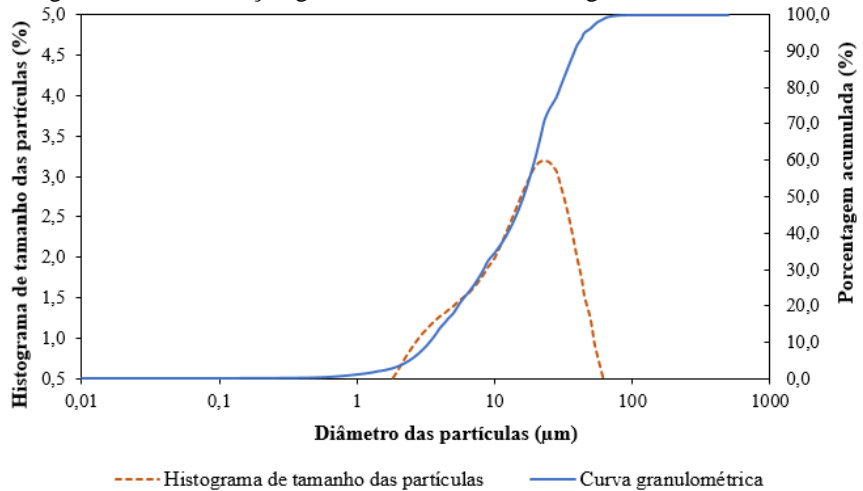
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 11 – Distribuição granulométrica do fundo concreto baixa resistência



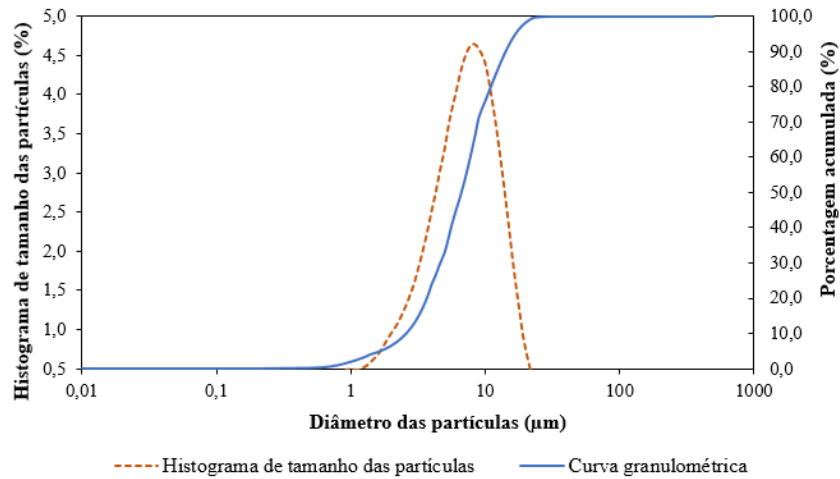
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 12 – Distribuição granulométrica do fundo argamassa alta resistência



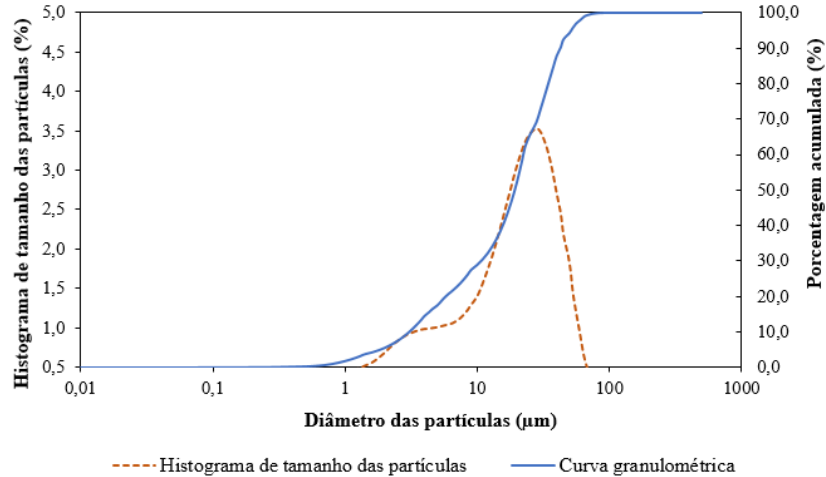
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 13 – Distribuição granulométrica do fundo argamassa baixa resistência



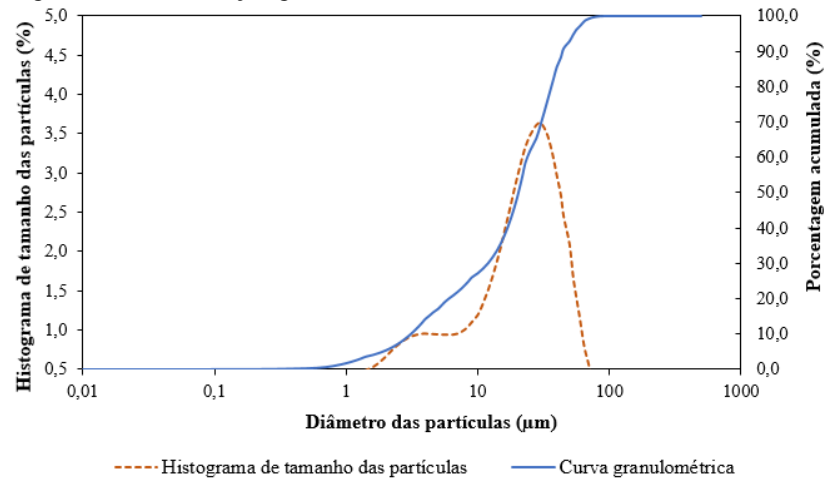
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 14 – Distribuição granulométrica do fundo cerâmica alta resistência



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 15 – Distribuição granulométrica do fundo cerâmica baixa resistência



Fonte: elaborado pela autora.

Nota-se que, conforme tabela 16, o fundo da areia natural obteve o maior diâmetro médio, seguido do fundo da cerâmica alta resistência. Já os fundos com os menores diâmetros médios são o da argamassa baixa resistência, seguido pelo concreto de baixa resistência, o qual possui diâmetro médio próximo ao fundo concreto de alta resistência. Também, observou a partir da tabela 16, que os fundos de concreto, tanto de alta quanto de baixa resistência, não obtiveram grandes variações em suas dimensões entre eles, mas, quando comparados com os demais, obtiveram maiores valores. Já com os fundos de cerâmica e argamassa a diferença de dimensão é maior entre às altas resistências e baixas resistências. Esse comportamento pode ser atribuído à resistências dos materiais, que quanto maior for, menor a produção de finos.

Ainda, de acordo com as figuras 8 a 15, observa-se, nos histogramas de tamanho de grãos, que as distribuições de tamanho de partículas segue uma tendência para as resistências altas e baixas dos tipos de materiais e a distribuição granulométrica do agregado miúdo VC-areia se assemelha à do concreto de alta e de baixa resistência. Já observando as curvas granulométricas, nota-se uma tendência, em todos os fundos analisados, de uma granulometria contínua.

Para a constatação das diferenças de morfologia e textura entre o agregado miúdo convencional e os agregados miúdos reciclados, bem como a possibilidade da presença de contaminantes nos agregados, foram realizadas análises visuais com auxílio de uma lupa estereoscópica Zeiss Stemi 508doc Stereo Microscope, com aumento máximo de 100x por uma lente ocular de aumento de 10x e uma lente objetiva de duplo aumento, sendo suas imagens demonstrados na figura 16 a figura 25.

Figura 16 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo natural – Ampliação 10x



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 17 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado VC-areia – Ampliação 10x



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 18 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR1 – Ampliação 10x



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 19 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR2 – Ampliação 10x



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 20 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR3 – Ampliação 10x



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 21 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR4 – Ampliação 10x



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 22 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR5 – Ampliação 10x



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 23 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR6 – Ampliação 10x



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 24 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR7 – Ampliação 10x



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 25 – Fotografia com lupa estereoscópica do agregado miúdo reciclado AR8 – Ampliação 10x



Fonte: elaborada pela autora.

Conforme as figuras apresentadas anteriormente, verifica-se que a areia natural apresenta formas mais arredondas e textura lisa (figura 16), características que são atribuídas devido ao desgaste superficial contínuo que sofre nos leitos dos rios, perdendo seus vértices e arestas. Já os demais agregados miúdos reciclados (figura 17 a 25), que foram submetidos ao procedimento de britagem, possuem vértices e arestas bem definidas, tendo uma forma mais angulosa e rugosa. Além disso, nos agregados miúdos reciclados que possuem controle de composição, nota-se que as areias compostas por materiais de alta resistência, como a AR1 (figura 18) possuem, predominantemente, formato mais lamelar e as compostas por materiais de baixa resistência, como AR5 (figura 22), possuem formato mais cúbico.

A caracterização dos dez agregados miúdos utilizados para a produção dos concretos foi feito através do ensaio de massa específica (NBR 16916 (ABNT, 2021)), massa unitária (NBR 16972 (ABNT, 2021)) e absorção (NBR 16916 (ABNT, 2021)). Seus resultados estão demonstrados na tabela 17, na qual observa-se que o maior valor de massa específica e de menor absorção foram obtidos nos agregados miúdos natural (AN), seguido do reciclado VC-areia. Já os demais agregados miúdos reciclados, os quais possuem constituição controlada, possuem alta taxa de absorção e menor massa específica, com valores tecnicamente semelhantes.

Tabela 17 – Caracterização dos agregados miúdos

Propriedades avaliadas	AN	VC-areia	AR1	AR2	AR3	AR4	AR5	AR6	AR7	AR8
Massa Específica Seca (g/cm ³)	2,49	2,39	2,00	1,99	1,99	1,98	1,98	2,06	2,01	1,97
Massa unitária (g/cm ³)	1,54	1,41	1,19	1,19	1,19	1,20	1,19	1,24	1,26	1,22
Absorção (%)	2,56	4,37	12,27	11,82	11,46	11,73	12,14	10,95	11,36	13,16

Fonte: elaborada pela autora.

4.2.3.1 Beneficiamento da VC-areia

O agregado miúdo reciclado misto, denominado de VC-areia, foi produzido com sequências de britagens (primária à quaternária), peneiramentos e classificação pneumática de resíduos da construção civil. Destes, 50% provenientes de uma recicladora localizada no município de Várzea Grande – SP e os outros 50% de uma recicladora do município de Guarulhos – SP. O processo de beneficiamento da VC-areia está descrito em Ulsen *et al.* (2021).

Inserir a VC-areia no programa experimental do trabalho teve como propósito avaliar qual impacto que os inúmeros processos de beneficiamento na produção de agregados miúdos reciclados de resíduos da construção civil produzem nas propriedades do concreto, comparando-a com agregados miúdos reciclados obtidos através de sequências de britagem em britador de mandíbulas.

4.2.3.2 Beneficiamento da AR1, AR2, AR3, AR4, AR5, AR6, AR7 e AR8

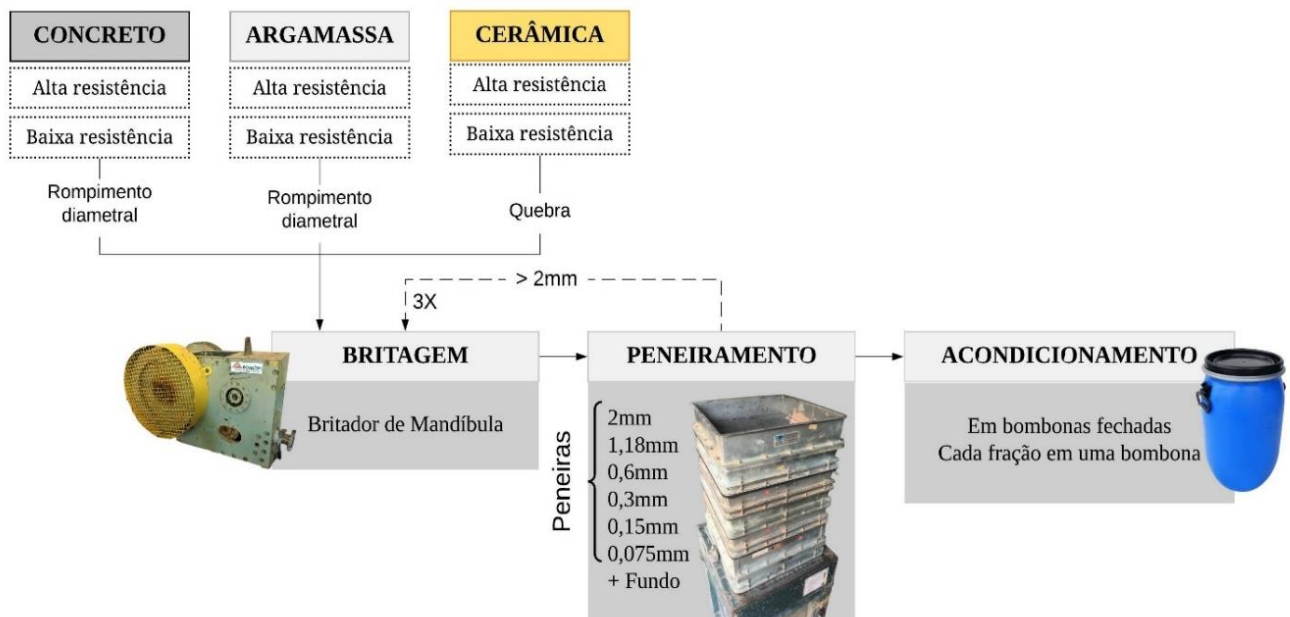
O beneficiamento dos agregados miúdos reciclados mistos AR1, AR2, AR3, AR4, AR5, AR6, AR7 e AR8 deu-se através de britagem primária utilizando britador de mandíbulas (sem a aplicação de qualquer tipo de processo de moagem) e peneiramento, a fim de expressar a realidade prática ocorrida em as recicladoras brasileiras de resíduos da construção civil.

Inicialmente, os materiais eram rompidos diametralmente ou quebrados, processos estes que tiveram como objetivo a redução do seu tamanho para, posterior, colocação dos fragmentos em britador de mandíbula. O material passante na saída do britador era inserido em peneirador mecânico que continha as seguintes peneiras: 2mm, 1,18mm, 0,6mm, 0,3 mm, 0,15mm, 0,075mm e fundo, por no mínimo 15 minutos. Após esse tempo, verificava-se se havia material passante de uma fração à outra; caso afirmativo, em cada peneira eram realizados movimentos circulares com o material, até constatar que não houvesse mais material passante.

O material retido na peneira 2mm retornava para o britador para uma nova britagem até que esse processo completasse 3 ciclos. A escolha por três ciclos de retorno ao britador foi devido à constatação que ao retornar o material britado mais que 3 vezes, este passava direto pelas mandíbulas com pouca ou nenhuma redução do seu tamanho e, conseqüentemente, haveria apenas gasto energético no processo. Então, esse material foi descartado no final do processo de britagem dos materiais.

Ao final de cada peneiramento, acondicionou-se cada fração em bombonas devidamente vedadas, com o objetivo de evitar a troca de umidade com o ambiente e possíveis contaminações do material por substâncias indesejáveis provindas do próprio laboratório em funcionamento. O processo de beneficiamento das areias está demonstrado na figura 26.

Figura 26 – Beneficiamento das areias recicladas AR1, AR2, AR3, AR4, AR5, AR6, AR7 e AR8.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os materiais britados foram corpos de prova de concretos de alta e de baixa resistência à compressão, corpos de prova de argamassas de alta e de baixa resistência à compressão e blocos cerâmicos de alta e baixa resistência à compressão. Selecionar os materiais para compor as areias recicladas teve como intuito o controle de sua composição e a garantia do conhecimento das propriedades desses materiais, evitando o surgimento de variáveis adicionais na análise e conclusão sobre os resultados experimentais.

A resistência à compressão de todos os materiais foi analisada antes da britagem, já que esta foi estipulada como característica principal para classificar quais materiais eram definidos como alta e baixa resistência para, então, compor as areias, e foi determinada em prensa hidráulica, modelo EMIC DL20000, com capacidade máxima de 2000 kN. As características dos materiais que deram origem às areias recicladas são demonstrados na tabela 18.

Tabela 18 – Caracterização dos materiais que originaram as diferentes composições dos agregados miúdos reciclados

Material	Produção	Traço (c : a : b : a/c)	Misturador	Faixa de resistência	Cura	Abatimento/ Consistência	Materiais
Concreto Alta Resistência	Em laboratório	1: 0,11 ¹ : 1,10: 1,98; 0,19	Planetário (120l)	80-100MPa	Úmida	120±20mm	CP V Areia natural Brita 1
Concreto Baixa Resistencia	Em laboratório	1:2,94:3,54; 0,6	Planetário (120l)	20-30MPa	Úmida	120±20mm	CP IV Areia natural Brita 1
	Em concreteira	-	-	Fck = 30MPa	Úmida	-	-
Argamassa Alta Resistência	Em laboratório	1:3	-	35-60MPa	Úmida	320±20mm	CP V Areia natural Brita 1
Argamassa Baixa Resistência	Em laboratório	50kg de argamassa industrializada para 8,55 litros de água.	Planetário (120l)	2-3,5MPa	Climatizada	300±20mm	Industrializada
Cerâmica Alta Resistencia	Empresa – Adquirido em forma de doação	-	-	8-12MPa	-	-	-
Cerâmica Baixa Resistencia	Empresa – Adquirido em forma de doação	-	-	1,80-3MPa	-	-	-

Nota: ¹Proporção de sílica ativa

Fonte: elaborada pela autora.

4.2.4 Água

A água utilizada para a produção dos concretos foi água potável proveniente da rede pública de abastecimento do município de Porto Alegre - RS, a qual é de responsabilidade do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) pelo seu controle e distribuição.

4.3 DOSAGEM DOS CONCRETOS

O método de dosagem escolhido para o referido trabalho foi o IPT/EPUSP, descrito por Helene e Terzian (1992) (HELENE; TERZIAN, 1992). Consiste em determinar um teor ótimo de argamassa para, no mínimo, três traços, sendo esses denominados de rico, intermediário e pobre em relação à quantidade de cimento, apresentando como resultado final um diagrama de dosagem que relaciona resistência à compressão (f_c), relação água/cimento (a/c), teor de agregados secos (m) e consumo de cimento (C) por m^3 de concreto. Mesmo sendo uma metodologia de dosagem, por método experimental, criada para concretos com agregados naturais, mostra-se adequada para

dosar concretos com agregados miúdos reciclados (RODRIGUES; FUCALE, 2014; MOITINHO; LEITE, 2015; SANTOS, 2016; SANTANA, 2018).

A trabalhabilidade do concreto foi avaliada pelo ensaio de abatimento de tronco de cone, definido na NBR 16889 (ABNT, 2020)), e pela mesa de Graff, metodologia de ensaio prescrita na NBR NM 68 (ABNT, 2014)). Para ambos, os valores de consistência foram fixados em $120\pm 20\text{mm}$ e $450\pm 40\text{mm}$, respectivamente. O abatimento do tronco de cone é usualmente utilizado em trabalhos com concretos e nas obras da construção civil. Já a escolha por avaliar consistência pela mesa de Graff, deveu-se ao fato de ser um ensaio que utiliza equipamento simples, com fácil manuseio, podendo ser aplicado em canteiros de obra, e que apresenta resultados satisfatórios para misturas de concretos com agregados reciclados (MOITINHO; LEITE, 2015; SANTOS, 2016; SANTANA, 2018).

Definiu-se que os concretos produzidos tivessem, para cada agregado miúdo reciclado, 3 teores de material seco (3,5, 5,0 e 6,5). Para os três teores, substituiu 100% do agregado miúdo convencional por nove agregados miúdos reciclados de RCC, juntamente com o concreto referência. A escolha por substituir 100% do agregado miúdo convencional se deu através da necessidade de verificar a eficiência da substituição total de um dos recursos naturais utilizados como matéria prima do concreto.

Cada mistura produzida foi identificada de acordo com o agregado miúdo reciclado utilizado em sua constituição e o teor de agregados secos definidos, totalizando 30 misturas diferentes, cuja nomenclatura utilizada consta na figura 27.

Figura 27 – Nomenclatura das misturas de concreto estudadas



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.1 Ajuste do teor ótimo de argamassa

O teor ótimo de argamassa foi determinado a partir de tentativas e observações práticas, as quais avaliaram aspectos como homogeneidade, compacidade e coesão da mistura do concreto com agregado miúdo convencional. Para obter o teor ótimo de argamassa no traço intermediário foram realizados os acréscimos sucessivos de cimento, areia e água, sem o uso de adições ou aditivos, partindo de um teor de argamassa inicial de 40% até o momento em que a mistura do

concreto se apresentou coeso, sem vazios entre os agregados e na superfície, sem desprendimento dos agregados e abatimento pré-fixado de 120 ± 20 mm. O teor de argamassa encontrado foi de 55%, tanto para o concreto referência, quanto para o concreto com agregado miúdo reciclado.

4.3.2 Traços dos concretos

Como o teor de argamassa definido em 55% e considerando os três teores de agregado secos (m): 3,5, 5,0 e 6,5, foram obtidos as seguintes quantidades de materiais por mistura, demonstrados na tabela 19.

Tabela 19 – Dosagem dos concretos

Mistura	Teor de argamassa (%)	Teor de agregado seco	Traço unitário			Quantidade dos materiais (em kg)		
			c	a	b	Cimento	Areia	Brita
CAN	55%	3,5	1	1,475	2,025	27,16	40,06	55
		5,0	1	2,300	2,700	20,37	46,85	55
		6,5	1	3,125	3,375	16,30	50,93	55
CVC	55%	3,5	1	1,475	2,025	18,27	25,91	37
		5,0	1	2,300	2,700	13,70	30,31	37
		6,5	1	3,125	3,375	10,96	32,94	37
CAR1	55%	3,5	1	1,475	2,025	27,16	32,16	55
		5,0	1	2,300	2,700	20,37	37,61	55
		6,5	1	3,125	3,375	16,30	40,88	55
CAR2	55%	3,5	1	1,475	2,025	27,16	32,04	55
		5,0	1	2,300	2,700	20,37	37,47	55
		6,5	1	3,125	3,375	16,30	40,72	55
CAR3	55%	3,5	1	1,475	2,025	27,16	32,07	55
		5,0	1	2,300	2,700	20,37	37,50	55
		6,5	1	3,125	3,375	16,30	40,76	55
CAR4	55%	3,5	1	1,475	2,025	27,16	31,93	55
		5,0	1	2,300	2,700	20,37	37,34	55
		6,5	1	3,125	3,375	16,30	40,59	55
CAR5	55%	3,5	1	1,475	2,025	27,16	31,85	55
		5,0	1	2,300	2,700	20,37	37,25	55
		6,5	1	3,125	3,375	16,30	40,49	55
CAR6	55%	3,5	1	1,475	2,025	27,16	33,13	55
		5,0	1	2,300	2,700	20,37	38,75	55
		6,5	1	3,125	3,375	16,30	42,11	55
CAR7	55%	3,5	1	1,475	2,025	27,16	32,36	55
		5,0	1	2,300	2,700	20,37	37,84	55
		6,5	1	3,125	3,375	16,30	41,13	55
CAR8	55%	3,5	1	1,475	2,025	27,16	31,72	55
		5,0	1	2,300	2,700	20,37	37,09	55
		6,5	1	3,125	3,375	16,30	40,32	55

Fonte: elaborada pela autora.

Nota-se, de acordo com a tabela 20, que a quantidade de agregado miúdo reciclado foi diferente para todos as misturas de concreto reciclado, mesmo possuindo o mesmo traço unitário. Isso se deu porque a substituição foi feita de forma a manter o volume de material constante, uma vez que, de forma geral, a massa específica do agregado miúdo reciclado é inferior à do convencional. Desta forma, efetuou-se o cálculo do volume equivalente à substituição do volume ocupado pelo agregado convencional, conforme equação 1

$$M_{amr} = M_{amn} \times \frac{\gamma_{amr}}{\gamma_{amn}} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

M_{amr} : massa do agregado miúdo reciclado (kg),

M_{amn} : massa do agregado miúdo convencional (kg),

γ_{amr} : massa específica do agregado miúdo reciclado (kg/dm³)

γ_{amn} : massa específica do agregado miúdo convencional (kg/dm³).

Além disso, teve-se um cuidado meticoloso referente à composição granulométrica dos agregados miúdos. Para cada agregado miúdo, sendo convencional ou reciclado, foram peneirados e acondicionados em bombonas por fração para, após a definição da quantidade de cada agregado miúdo por mistura, realizar suas montagens através da pesagem dos materiais por fração, garantindo que a granulometria dos agregados fosse mantida a mesma para todas as misturas.

4.4 MOLDAGEM E ADENSAMENTO DOS CONCRETOS

No tempo antecedente de 24h ao procedimento de moldagem dos corpos de prova, realizou-se a compensação de 80% da água absorvida pelo agregado miúdo reciclado. A compensação de 80% da água de absorção total dos agregados reciclados é um valor estudado por diferentes autores (ECKERT; OLIVEIRA, 2017; ANDRADE *et al.*, 2020; NEDELJKOVIC *et al.*, 2021) e tem como intuito minimizar os problemas de perda de trabalhabilidade dos concretos reciclados e evitar que o agregado reciclado absorva parte da água de amassamento do concreto, alterando a relação a/c efetiva da mistura. Além disso, a escolha de compensar a água absorvida nos agregados miúdos reciclados 24 horas antes da moldagem foi pelo fato de que o ensaio de absorção dos mesmos foi realizado com submersão de 24 horas, como prescreve a norma, logo, o valor que ele absorve é em 24horas.

O procedimento de compensação de água foi realizado em sala climatizada em $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e se deu através dos seguintes processos:

- acondicionamento do agregado miúdo produzido em superfície plana e limpa;
- realização da homogeneização do agregado miúdo seco com o intuito de distribuir os diferentes tamanhos de grãos do três distintos materiais;
- pesagem da quantidade de água necessária para atingir 80% da absorção total de água, para cada areia;
- aspersão da água de compensação na superfície do agregado miúdo distribuído na superfície plana e limpa;
- homogeneização dos agregados miúdos reciclados compensados com 80% da água de absorção (Para o processo de aspersão de água e homogeneização foi estipulado uma duração de, no máximo, 15 minutos, a fim de evitar a perda de água para o ambiente); e
- acondicionamento dos agregados miúdos em bombonas bem vedadas com o intuito de não haver possibilidades de perder umidade para o ambiente, sendo que as mesmas eram pesadas ao fim do processo de compensação e no início do procedimento de moldagem para verificar perdas de umidade.

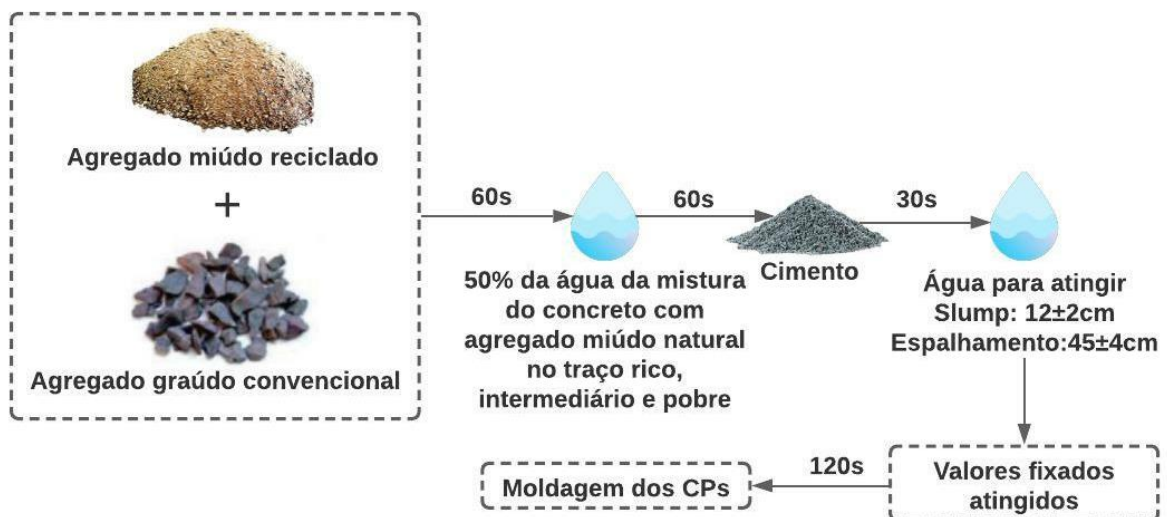
Com os agregados miúdos pré-saturados em 24 horas, realizou-se a mistura dos concretos em misturador mecânico com capacidade de 320 litros, previamente imprimado com uma fina camada de cimento, areia e água, e em sala climatizada em $23\pm 2^{\circ}\text{C}$. A imprimação do misturador mecânico tem como objetivo evitar a perda da argamassa das misturas de concreto ao tambor e pás da betoneira, em especial na primeira mistura.

Os materiais utilizados para confeccionar a mistura do concreto convencional foram colocados na betoneira segundo a metodologia tradicional de ordem de inserção utilizada no LAMTAC/NORIE: 100% do agregado natural, parte da água, 100% do cimento, 100% do agregado miúdo natural e, por fim, água para atingir o abatimento requerido. Para as misturas dos concretos com agregado miúdo reciclado, utilizou-se a metodologia de colocação de materiais no misturador mecânico proposta por TAM, GAO e TAM (2005), que consiste em colocar os agregados miúdos e graúdos, tanto convencional quando reciclado, por 60s em misturador mecânico, coloca 50% da água de

dosagem, mistura por mais 60s, acrescenta o cimento, mistura por 30s, coloca os outros 50% da água de dosagem e deixa por 120s na betoneira misturando. Após esses procedimentos, a moldagem dos corpos de prova é realizada.

Para o presente trabalho, fez-se duas adaptações ao método, que foram: após inserir a quantidade de cimento e misturar por 30s, colocação da quantidade de água, gradualmente, por tempo necessário para atingir valores fixados de abatimento de tronco de cone ($120\pm 20\text{mm}$) e espalhamento pela mesa de Graff ($450\pm 40\text{mm}$); e utilização de 50% da água obtida na mistura do concreto referência, para os três teores de agregado seco, como referência para os concretos reciclados, na primeira etapa do método, já que a água não era definida antes da moldagem das misturas. A metodologia de Tam, Gao e Tam (2005) adaptado, está demonstrada na figura 30.

Figura 28 – Ordem de colocação dos matérias para produzir os concretos reciclados



Fonte: Elaborado pela autora.

Após os 120 segundos de mistura, foram moldados os corpos de prova necessários para realizar o programa experimental, segundo a NBR 5738 (ABNT, 2016) adotando o adensamento mecânico, que consistiu em vibrar duas camadas da mistura, de igual espessura, por 15 segundos cada, metodologia essa adotada no LAMTAC/NORIE. Foram moldados, por mistura, 11 corpos de prova cilíndricos $10\times 20\text{cm}$, totalizando, para as 30 misturas definidas no programa experimental, em 330 corpos de prova moldados.

4.5 CURA DOS CONCRETOS

A fim de manter uma umidade superficial suficiente para uma adequada hidratação do cimento e, assim, atingir propriedades desejáveis no concreto foi realizada a cura dos corpos de prova conforme preconiza a norma NBR 5738 (ABNT, 2016).

Nas primeiras 24 horas a cura foi ao ar, em superfície plana e temperatura ambiente, cobertos por lona plástica, e 27 dias de cura em câmara úmida com temperatura e umidade controladas ($23\pm 2^\circ\text{C}$ e 95%, respectivamente), totalizando em tempo de cura de 28 dias.

4.6 MÉTODOS DE ENSAIO

Os concretos produzidos foram avaliados através das suas propriedades no estado fresco e endurecido, na idade de 28 dias de cura. No estado fresco, avaliou-se a massa específica das misturas dos concretos segundo a NBR 9833 (ABNT, 2009).

No estado endurecido, avaliou a resistência à compressão axial (NBR 5739 (ABNT, 2018)) em 4 corpos de prova cilíndricos 10x20cm por traço, o qual foi selecionado por ser a propriedade mecânica que é usualmente empregada nos projetos e serve como parâmetro de controle de qualidade do concreto. Também, avaliou absorção por capilaridade (NBR 9779 (ABNT, 2013)) em 3 corpos de prova cilíndricos 10x20cm por traço e velocidade de ondas ultrassônicas (NBR 8802 (ABNT, 2019)) em 4 corpos de prova cilíndricos 10x20cm por concreto, ensaios que tiverem como objetivo, respectivamente, avaliar o transporte de água líquida para a estrutura interna capilar do concreto e sua homogeneidade.

Os corpos de prova dos ensaios do estado endurecido foram submetidos à cura ao ar (1 dia) e úmida (27 dias). O ensaio de velocidade de ondas ultrassônicas foram submetidos, além das curas descritas anteriormente, a cura em câmara climatizada por 7 dias, com o objetivo de estabilizar a umidade dos corpos de prova e esta não influenciar nos resultados.

4.7 ESTUDO ESTATÍSTICO

Para uma maior confiabilidade aos resultados obtidos no presente trabalho, realizou-se estudo estatístico com o auxílio do software Statística®, o qual constituiu-se de análise de variância (ANOVA), comparação múltipla de médias e efeitos das variáveis independentes nas variáveis dependentes e teve como razão de investigar a influência das variáveis: Teor de material seco (traço)

Concretos produzidos com substituição total do agregado miúdo natural por diferentes tipos de agregado miúdo reciclado de resíduos da construção civil (RCC)

e o tipo de agregado miúdo sobre a resistência à compressão, absorção por capilaridade e velocidade do pulso ultrassônico dos concretos, além de analisar as interações das variáveis independentes nas variáveis de resposta.

A análise de variância (ANOVA) objetiva verificar se existe diferença significativa entre as médias das variáveis independentes e se essas exercem algum tipo de influência nas variáveis de resposta. Para tal, adotou-se uma metodologia que se baseia na análise de dois fatores independentes usando o método das somas, que tem como base o método das matrizes das médias dos fatores controláveis (individuais ou pelas suas combinações) e de seus desvios. O método da soma consiste em determinar a soma ao quadrado (SQ) dos desvios das variáveis independentes e suas interações. Também considerou os desvios independentes de cada tratamento, inclusive do erro, suas médias quadradas (MQ) e realização de teste F, determinações essas que tiveram como objetivo verificar o quanto a média quadrada do experimento é variável, quando essa é comparada com a média quadrada do erro.

Com o teste F realizado, calculou-se a probabilidade de ocorrência do tratamento e, assim, se verificou a significância do efeito das variáveis independentes nas variáveis de resposta. Para tal, considerou-se um nível de significância de 5% e hipótese nula de que não existe uma diferença entre as médias das combinações possíveis, ou seja, as variáveis que possuem uma diferença de suas média menor que 5%, seriam considerados um valor raro suficiente para negar a hipótese nula e essa possui influência significativa na variável de resposta.

A comparação múltipla de médias, utilizando o método de tukey, consistiu em verificar se há diferenciação entre as médias dos pares das variáveis dependentes ao mudar os níveis das variáveis independentes, que resultaram como significativas na análise de variância, de modo a complementar a análise de variância. Para isso, considerou-se a média dos resultados obtidos para cada tratamento e um certo limite de decisão, o qual foi comparado com a diferença entre as médias. Se o limite de decisão for maior que a diferença entre as médias, os níveis das variáveis controláveis que estão sendo analisadas irão apresentar diferença, já quando for menor, as variáveis não irão se diferenciar. Ainda, o desvio dos resultados poderá interferir no limite de decisão.

Também, foram analisados os efeitos dos diferentes níveis das variáveis independentes, que resultaram como significativas na ANOVA, nas variáveis de resposta, através de gráficos que compararam os efeitos dessas variáveis, isolados ou combinados, e a mudança que ocorreu nas variáveis controláveis.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar as propriedades no estado fresco (massa específica) e endurecido (resistência à compressão aos 28 dias, absorção por capilaridade e velocidade do pulso ultrassônico) de concretos com substituição total do agregado miúdo natural por diferentes agregados miúdos reciclados de resíduos da construção civil (RCC), além do concreto convencional que serviu como parâmetro de referência para os concretos reciclados. Além disso, realizou-se um estudo referente ao consumo de cimento dos concretos para verificar qual dos concretos possuía o mais baixo impacto ambiental.

Para tais considerações, fez-se o uso dos resultados de caracterização dos agregados miúdos, tanto natural quanto reciclados, os quais auxiliaram no entendimento dos comportamentos obtidos nos concretos em estudo, principalmente, dos concretos com agregado miúdo reciclado, cujas características possuem influência maior nas propriedades do concreto em relação ao agregado convencional.

Considerando os resultados obtidos no programa experimental, e as discussões realizadas ao longo do presente trabalho, pode-se concluir:

- **Quanto à massa específica no estado fresco:** A massa específica do concreto em estado fresco foi maior no concreto referência e menor nos concretos com agregado miúdo reciclado, obtendo uma máxima redução de 6,73% em relação ao concreto referência. Todos os concretos analisados são considerados com densidade normal.
- **Quanto à resistência à compressão:** Apesar dos concretos convencionais terem uma relação a/c superior ao dos concretos com agregados reciclados, para um mesmo traço e para o mesmo abatimento, estatisticamente todos os concretos produzidos possuíram a mesma resistência à compressão aos 28 dias, com exceção do traço CAR3_3,5, que obteve um aumento de 16,10% em relação ao concreto referência. De acordo com as faixas de

resistências alcançadas, nota-se que os concretos reciclados podem ser usados em concretos para produzir

- **Quanto à absorção por capilaridade:** As misturas de concreto com agregado miúdo convencional, para todos os traços, absorveram as menores quantidades de água em comparação aos concretos com agregados miúdos reciclados. Além disso, houve um aumento máximo de absorção por capilaridade de 68,34% em relação aos concretos reciclados do concreto referência, ocorrido na mistura CAR2_6,5.
- **Quanto à velocidade do pulso ultrassônico:** As maiores velocidades do pulso ultrassônico foram obtidas no concreto com agregado miúdo convencional, seguindo o mesmo comportamento apresentado pelos concretos nos ensaios de absorção de água. A redução máxima ocorrida foi de 6,20% em relação aos concretos reciclados do concreto referência no traço CAR6_6,5;
- **Quanto ao consumo de cimento para igualdade de resistência:** Para uma mesma resistência, o consumo de cimento foi menor, em geral, nos concretos com agregado miúdo reciclado, sendo o menor consumo encontrado com o agregado miúdo reciclado AR3 (redução de 18,73% (C30), 14,81% (C25) e 11,41% (C20)), o qual obteve os maiores resultados de resistência à compressão do experimento, para ambos os traços. Além disso, nota-se que os concretos com agregado miúdo VC-areia e AR7 resultaram em consumos de cimento maior em comparação ao concreto referência, porém, resultados próximos (aumento de 0,81% (C30) 0,53% (C25) e 0,30% (C20); e aumento de 4,57% (C30), 4,80% (C25) e 4,98% (C20), respectivamente). Já o AR8 obteve os maiores consumos de cimento do experimento (aumento de 14,83% (C30), 7,5% (C25) e 2,36% (C20)). O menor consumo de cimento encontrado na maioria dos concretos com agregado reciclado representa ganho significativos em questões ambientais e econômicas, já que o cimento é o material que mais impacta ambientalmente e que proporciona maiores custos nas misturas dos concretos.
- **Quanto ao uso da VC-areia na produção de concretos:** Se mostrou viável, pois apresenta o mesmo nível de resistência à compressão e absorção de água capilar dos concretos convencionais. Especificamente quanto à absorção capilar, o impacto foi positivo, uma vez que a maioria dos concretos com agregados reciclados possuiu pior desempenho.

- **Quanto a origem dos agregados miúdos reciclados:** A origem dos agregados reciclados não influenciou na resistência à compressão do concreto, mas influenciou na absorção por capilaridade e na velocidade do pulso ultrassônico, onde os concretos com agregado miúdo natural, concretos com agregado miúdo reciclado VC-areia e concretos com agregado miúdo de composição controlada se diferenciaram, em uma forma geral. Ainda, notou-se que, muitas vezes, não houve uma tendência nos resultados nos concretos com agregado miúdo reciclado com composição controlada, a qual pode ser atribuída aos dois lados presentes na caracterização dos agregados miúdos reciclados, sendo eles: resistência e forma. As resistências dos agregados influenciam diretamente na porosidade e, conseqüentemente, na resistência à compressão e na absorção dos concretos, já a forma irá impactar diretamente na demanda de água das misturas, sendo os mais resistentes predominantemente lamelares.

Diante das conclusões expostas, o uso de agregados miúdos reciclados em concretos, cuja substituição foi total ao agregado miúdo convencional, mostrou-se promissor perante aos ensaios realizados. Além disso, pode-se concluir, considerando o beneficiamento dos agregados miúdos reciclados do presente trabalho, que um processo de beneficiamento convencional (britagem em britador de mandíbula e peneiramento) se mostrou viável na produção de agregados miúdos reciclados e adequados para uso em concretos.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade na presente pesquisa, sugere-se os seguintes trabalhos:

- Avaliar a influência do uso de diferentes tipos de agregado reciclados com composição controlada no comportamento do concreto quanto à carbonatação;
- Avaliar a influência do uso de diferentes tipos de agregado reciclados com composição controlada no comportamento do concreto quanto à difusão de íons cloro;
- Avaliar a influência do uso de diferentes tipos de agregado reciclados com composição controlada no comportamento do concreto quanto a corrosão da armadura por íons cloro;
- Avaliar a influência do uso de diferentes tipos de agregado reciclados com composição controlada no comportamento do concreto com porcentagens diferentes dos materiais de constituição; e
- Avaliar a influência do uso de diferentes tipos de agregado reciclados com composição controlada no comportamento do concreto quanto à expansão do concreto.

REFERÊNCIAS

ABREU, Iara Lilian Rocha de. **Contribuição ao estudo da influência da utilização de agregados miúdos reciclados provenientes de usinas concreteiras na carbonatação do concreto.** 2016. Dissertação (Mestrado em Construção civil) - Programa de Pós-graduação em Construção Civil - Universidade Federal de Minas Gerais – Minas Gerais, Brasil, 2016.

AJAYI, Saheed O. et al. Waste effectiveness of the construction industry: Understanding the impediments and requisites for improvements. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 102, p. 101-112, 2015.

AKBARNEZHAD, Ali et al. Effects of the parent concrete properties and crushing procedure on the properties of coarse recycled concrete aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 12, p. 1795-1802, 2013.

AKHTAR, Ali; SARMAH, Ajit K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262-281, 2018.

ALMEIDA, Danillo de et al. ARGAMASSA ADERIDA, O ELO FRACO NO CONCRETO RECICLADO: UMA REVISÃO. **MIX Sustentável**, v. 8, n. 1, p. 78-89, 2022.

ALIABDO, A. A.; ABD-ELMOATY, A. E. M.; HASSAN, H. H. Utilization of crushed clay brick in concrete industry. **Alexandria Engineering Journal**, v. 53, n. 1, p. 151–168, mar. 2014.

AMORIM, Aldo Siervo de. **Análise crítica da viabilidade econômica e ambiental do processo de reciclagem de resíduos de construção civil no âmbito de um município.** 2018. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de pesquisas energéticas e nucleares - Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2018.

ANDRADE, T.; SILVA, A. J. C. Patologia das Estruturas. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. Cap.32, p.953-983.

ANDRADE, Gabriella Puente de et al. Design of structural concrete mixtures containing fine recycled concrete aggregate using packing model. **Construction and Building Materials**, v. 252, p. 119091, 2020.

ANGULO, Sérgio C.; FIGUEIREDO, AD de. **Concreto com agregados reciclados.** ISAIA, GC **Concreto: ciência e tecnologia.** São Paulo: Arte Interativa, 2011.

ANGULO, Sérgio Cirelli. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2005.

ANGULO, Sérgio Cirelli. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2001.

ARAÚJO, Daniel Lima et al. Influência de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção em Propriedades Mecânicas do Concreto. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 1, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (**ABRELPE**). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021. São Paulo: ABRELPE, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: dezembro de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NM 68**: Concreto – Determinação da consistência na mesa de Graff. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7809**: Agregado Graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecidos – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16606**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16607**: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16915**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 16917**: Agregado Graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972**: Agregado Graúdo – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecidos – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2013.

BEHERA, Monalisa; MINOCHA, A. K.; BHATTACHARYYA, S. K. Flow behavior, microstructure, strength and shrinkage properties of self-compacting concrete incorporating recycled fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 228, p. 116819, 2019

BERREDJEM, Layachi; ARABI, Nourredine; MOLEZ, Laurent. Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete. **Construction and Building Materials**, v. 246, p. 118421, 2020.

BRAND, Alexander S.; ROESLER, Jeffery R.; SALAS, Andres. Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 83-89, 2015.

BRAVO, M. et al. Superplasticizer's efficiency on the mechanical properties of recycled aggregates concrete: Influence of recycled aggregates composition and incorporation ratio. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 129-138, 2017.

BRITO, J.A. Cidade versus entulho. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., São Paulo, 1999. Anais. São Paulo, Comitê Técnico CT206 Meio Ambiente (IBRACON), 1999. p.56-67.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2003.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra et al. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 4, p. 421-430, 2010.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2007.

CARNEIRO, Alex P. et al. Caracterização do entulho de Salvador visando a produção de agregado reciclado. **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO-ENTAC**, 2000.

CARNEIRO, Jodilson Amorim. **Uso de agregado reciclado e fibras de aço em concreto simples e concreto armado sob flexão**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, 2011.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2005.

CARTUXO, F. BRITO, J; EVANGELISTA, L.; JIMÉNEZ, J. R; LEDESMA, E. F; Increased durability of concrete made with fine recycled concrete aggregates using superplasticizers. **Journal Materials**. v. 9, p. 1–26, 2016.

CHAVES, Arthur Pinto; PERES, A. E. C. Britagem, peneiramento e moagem. **São Paulo: Editora Signus**, 2006.

CONAMA Resolução Nº 307. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Governo Federal. Ministério do Meio Ambiente: Brasília, 2002.

CORINALDESI, Valeria; MORICONI, Giacomo. Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. **Construction and building materials**, v. 23, n. 1, p. 289-294, 2009.

DAMINELI, Bruno L. et al. Rapid method for measuring the water absorption of recycled aggregates. **Materials and Structures**, v. 49, n. 10, p. 4069-4084, 2016.

DE GRANULATS, Union Europeenne des Producteurs. A Sustainable Industry for a Sustainable Europe Annual Review 2019-2020. **European Aggregates Association, Brussel-Belgium**, p. 1-38, 2012.

ECKERT, M.; OLIVEIRA, M. Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 416-424, 2017.

EPA, 2018. Construction and Demolition Debris Generation in the United States, 2015. **U.S.Environmental Protection Agency Office of Resource Conservation and Recovery**. Acesso em: https://www.epa.gov/sites/production/files/201809/documents/construction_and_demolition_debris_generation_in_the_united_states_2015_final.pdf.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p.735-742, 2007.

EVANGELISTA, Luis; DE BRITO, Jorge. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and concrete composites**, v. 29, n. 5, p. 397-401, 2007.

EVANGELISTA; L.; BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and concrete composites**, v. 32, p. 9-14, 2010.

FIGUEIRÊDO FILHO, J. G. L. **Avaliação da trabalhabilidade de concretos contendo agregado reciclado de argamassa**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2011.

FIGUEIREDO, Paula Oliveira et al. Influência dos métodos de britagem nas propriedades do agregado reciclado de concreto. **Ambiente Construído**, v. 20, p. 99-111, 2020.

FONSECA, A. P. **Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

GARCIA, Eduardo et al. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica**, v. 61, p. 251-258, 2015.

GONÇALVES, Rogrigo Dantas Casillo. **Agregados reciclados de concreto – Um novo material para dosagens estruturais**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de estruturas) – Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2001.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; CARRO, L. D.; SEARA-PAZ, S. Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2335-2342, 2011.

GONZÁLEZ-TABOADA, Iris et al. Analysis of rheological behaviour of self-compacting concrete made with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 18-25, 2017.

GÜNEYISI, Erhan et al. Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 622-630, 2016.

GUO, H; SHI, C; GUAN, X; ZHU, J; DING, Y; LING, T; ZHANG, H; WANG, Y. Durability of recycled aggregate concrete – A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 251-259, 2018.

HANSEN, Torben C. (Ed.). **Recycling of demolished concrete and masonry**. CRC Press, 1992.

HASSAN, Ruaa Yousif et al. Mechanical properties of concrete made with coarse and fine recycled aggregates. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

HATFIELD-DODDS, Steve et al. Assessing global resource use and greenhouse emissions to 2050, with ambitious resource efficiency and climate mitigation policies. **Journal of Cleaner Production**, v. 144, p. 403-414, 2017.

HELENE, Paulo RL; TERZIAN, Paulo. Manual de dosagem e controle do concreto, Ed. **PINI, S. Paulo, SP**, 1992.

HOVER, Kenneth C.; HOLLAND, Terence C.; LOBO, Colin L. Incorporating Recycled and Crushed-Concrete Aggregates in Structural Concrete. **Concrete International**, v. 42, n. 7, p. 26-31, 2020.

ISLAM, Rashidul et al. An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. **Waste Management**, v. 95, p. 10-21, 2019.

JADOVSKI, Iuri. **Diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição**. 2005. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia civil) Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2005.

JIN, Ruoyu et al. An empirical study of perceptions towards construction and demolition waste recycling and reuse in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 126, p. 86-98, 2017

JOHN, Vanderley M. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. **São Paulo**, v. 102, 2000.

KRAUSMANN, Fridolin et al. From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015. **Global Environmental Change**, v. 52, p. 131-140, 2018.

KRAUSMANN, Fridolin; WEISZ, Helga; EISENMENGER, Nina. Transitions in sociometabolic regimes throughout human history. In: **Social Ecology**. Springer, Cham, 2016. p. 63-92.

KURDA, R.; DE BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. Influence of recycled aggregates and high contents of fly ash on concrete fresh properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 84, p. 198–213, 1 nov. 2017.

LEITE, M. B.; FIGUEIREDO FILHO, J. G. L.; LIMA, P. R. L. Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate. **Materials and Structures**, v.46, p.1765-1778, 2013.

LEITE, M. B.; MONTEIRO, P. J. M. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. **Cement and Concrete Research**, v. 81, p. 38-48, 2016.

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do sul, Porto Alegre, Brasil, 2001.

LEVY, Salomon; HELÈNE, Paulo. Durability of concrete mixed with fine recycled aggregates. **Exacta**, v. 5, n. 1, p. 25-34, 2007.

LI, W.; XIAO, J.; SUN, Z.; KAWASHIMA, S.; SHAH, S. P. Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches. **Construction and Building Materials**, v. 35, p.1045-1055, 2012.

LIMA, JAR de. Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos. **São Carlos**, v. 240, 1999.

LIMA, José Antônio Ribeiro de. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. São Paulo: USP, 1999. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1999.

LOVATO, Patrícia Silveira. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, Brasil, 2007.

MA, Mingxue et al. Challenges in current construction and demolition waste recycling: A China study. **Waste Management**, v. 118, p. 610-625, 2020.

MAGALHÃES, Ruane Fernandes de; DANILEVICZ, Ângela de Moura Ferreira; SAURIN, Tarcisio Abreu. Reducing construction waste: A study of urban infrastructure projects. **Waste management**, v. 67, p. 265-277, 2017.

MALTA, Juliana Oliveira. **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, 2012.

MALYSZ, Gabriela Nunes; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho; MASUERO, Angela Borges. Study of the influence of jigging of recycled coarse aggregate on the compressive strength of concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, 2020

MARTÍNÉZ, P. S.; CORTINA, M. G.; MARTÍNEZ; F. F.; SANCHEZ, A. R. Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. **Journal of Cleaner Production**, v. 118, p. 162–169, 2016.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedade e materiais**. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO SILVA, Guilherme Tavares de et al. Resíduos de construção e demolição em tecnologia de concreto: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 46883-46896, 2020.

MENEGAKI, Maria; DAMIGOS, Dimitris. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. 8-15, 2018.

MISTRI, Abhijit et al. A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 117894, 2020.

MOREIRA, Lucia Hiromi Higa. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

NASCIMENTO, Carlos Fernando Gomes do et al. Viabilidade da substituição parcial do resíduo de construção civil pelo agregado miúdo nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 62073-62081, 2020.

NEDELJKOVIĆ, Marija et al. Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. **Journal of Building Engineering**, p. 102196, 2021.

NEVILLE, Adam M.; BROOKS, Jeffrey John. **Tecnologia de concreto**. Bookman Editora, 2014
NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto-5ª Edição**. Bookman Editora, 2015.

OLIVEIRA, Maria Elane Dias de et al. Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, p. 219-224, 2011.

PADOVAN, R. G. **Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto**. 2013. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

PEDROZO, Ruben Francisco Esteche. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil. 2008.

PEREIRA, P.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J. The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 34, p. 1044–1052, 2012.

PICCINALI, Andrea et al. Impact of Recycled Aggregate on the Mechanical and Environmental Properties of Concrete: A Review. **Materials**, v. 15, n. 5, p. 1818, 2022.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** 1999. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PLAZA, P. et al. Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes. Physical and mechanical properties and CO2 emissions. **Construction and Building Materials**, v. 285, p. 122926, 2021.

Poon, C. -S., Yu, TW & Ng, LH (2001). Um guia para gerenciamento e minimização de resíduos de construção e demolição. Capítulo 1, Departamento de Engenharia Civil e Estrutural. Universidade Politécnica de Hong Kong. Hong Kong. (10) (PDF) *A Aplicação de Agregado Reciclado para a Sustentabilidade Urbana da Indústria de Construção de Hong Kong.*

POON, Chi Sun et al. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and concrete research**, v. 34, n. 1, p. 31-36, 2004.

POON, Chi Sun et al. Quantifying the impact of construction waste charging scheme on construction waste management in Hong Kong. **Journal of construction engineering and management**, v. 139, n. 5, p. 466-479, 2013.

REIS, Carine Nunes da Silva. **Influência da utilização de agregado miúdo de RCD na aderência aço-concreto reciclado.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Brasil, 2009.

RODRIGUES, CR de S. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil 2011.

RODRIGUES, Clarissa Ribeiro de Sá; FUCALE, Stela. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 99-111, 2014.

SANTANA, V. M. De. **Estudo de dosagem de concretos com agregados miúdos de resíduos de construção e demolição usando uma adaptação do método de dosagem do ipt.** 2018.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Feira de Santana, Feira de Santana, Brasil, 2018.

SANTANA, Thiago da Silva; PEREIRA, Cláudio Henrique de Almeida Feitosa. Avaliação da influência da utilização de agregado miúdo reciclado em argamassas estabilizadas. **Ambiente Construído**, v. 20, p. 305-318, 2020.

SANTOS, Ana Amélia Mota dos. **Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto: dosagem e produção**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Brasil, 2016.

SANTOS, O. J. S; FONTES, C. M. A; LIMA, P. R L; Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal. **Revista Matéria**, v. 22, p. 103-113, 2017.

SANTOS, Felipe Sombra dos; AZEREDO, Pedro Henrique de Araújo; NEVEU, Diego Macedo. Avaliação de concreto sustentável contendo teores de resíduos de agregados reciclados. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 45457-45471, 2020.

SARDÁ, M. **Diagnóstico do entulho gerado na cidade de Blumenau: potencialidade de uso em obras públicas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2003.

SILVA, Guilherme Tavares de melo et al. Resíduos de construção e demolição em tecnologia de concreto: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 46883-46896, 2020.

SILVA, Carla Mabel Medeiros de Albuquerque. **Durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto submetidos a tratamentos com cimento portland e moagem**. 2019. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2019.

SILVA, Guilherme Augusto de Oliveira. **Avaliação da durabilidade de concretos contendo agregados reciclados de resíduos de construção civil (RCC)**, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, 2017.

SILVA, R. B.; ÂNGULO, S. C.; PILEGGI, R. G; SILVA, C. O. Concretos secos produzidos com agregados reciclados de RCD separados por densidade. **Ambiente Construído**, v. 15, p. 335-349, 2015.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201-217, 2014.

SINDIPEDRAS, 2020. **Volume de agregados**. Disponível em: <http://www.sindipedras.org.br/site/volume.php>.

SOLÍS-GUZMÁN, Jaime et al. A Spanish model for quantification and management of construction waste. **Waste Management**, v. 29, n. 9, p. 2542-2548, 2009.

SOUZA, Beatriz Cordeiro de; PAES, Cássia Nayara dos Santos; BARBOZA, Lucas da Silva. Estudo do agregado graúdo reciclado de concreto como agente de cura interna. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 25, 2020.

TAM, Vivian WY; GAO, X. F.; TAM, Chi M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and concrete research**, v. 35, n. 6, p. 1195-1203, 2005.

TAM, Vivian WY; SOOMRO, Mahfooz; EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272-292, 2018.

TAM, Vivian WY; TAM, Chi Ming; WANG, Yongli. Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 10, p. 1928-1939, 2007.

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

TOPÇU , B. S. SENDEL. **Propriedades do concreto produzido com agregado de concreto**. *Cem Concr Res*, 34 (2004) , pp. 1307 – 1312

STRINGARI, DOUGLAS; SCHACKOW, ADILSON; EFFTING, CARMEANE. Atividade pozolânica de rejeitos de cerâmica vermelha para uso em substituição ao cimento em argamassas. In: **II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis**, João Pessoa, Paraíba, Brasil

ULSEN, Carina et al. High quality recycled sand from mixed CDW—is that possible?. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 29-42, 2021.

ULSEN, Carina et al. Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 494-502, 2019.

ULSEN, C. et al. Technological characterization of fine fraction from brazilian C&D waste. In: **2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment**. RILEM Publications SARL, 2010. p. 449-458.

ULSEN, Carina. **Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2006.

UNEP. *Waste to Energy: Considerations for Informed Decision-Making*. 2019. Universidade de São Paulo, 2019.

VIANA, Luís Antônio da Cunha; SALES, Angela Teresa Costa; SALES, Lucila Costa. Efeitos da variabilidade de agregados de RCD sobre o desempenho mecânico do concreto de cimento Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, 2018.

VIEIRA, Geilma Lima; DAL MOLIN, Denise Carpena Coutinho. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Ambiente construído**, v. 4, n. 4, p. 47-63, 2004.

VIEIRA, T. et al. Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware. **Materials & Design**, v. 90, p. 767-776, 2016.

VINAY KUMAR, B. M; ANANTHAN, H.; BALAJI, K. V. A. Experimental studies on utilization of coarse and finer fractions of recycled concrete aggregates in self compacting concrete mixes. **Journal of Building Engineering**, v. 9, p. 100–108, 2017.

WANG, Jianyun et al. Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates. **Journal of cleaner production**, v. 156, p. 355-366, 2017.

WU, Huanyu et al. Status quo and future directions of construction and demolition waste research: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 240, p. 118163, 2019.

YAPRAK, H. et al. **Effects of the Fine Recycled Concrete Aggregates on the Concrete Properties**. International Journal of the Physical Sciences, v. 6, p. 2455-2461, may 2011.

ZAHARIEVA, Roumiana et al. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 2, p. 223-232, 2003.

ZHENG, Huahai; CHEN, Zongping; XU, Jinjun. Bond behavior of H-shaped steel embedded in recycled aggregate concrete under push-out loads. **International Journal of Steel Structures**, v. 16, n. 2, p. 347-360, 2016.

ZORDAN, Sergio Eduardo et al. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, 1997.

APÊNDICE A – Resultados da resistência à compressão

APÊNDICE B - Resultados individuais da absorção por capilaridade (72h)

**APÊNDICE C - Resultados individuais da absorção por capilaridade
(3h, 6h, 24h e 42h)**

APÊNDICE D - Resultados individuais da velocidade do pulso ultrassônico