

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS-UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA-CTEC
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL-PPGEC

JORGE LUIS OLIVEIRA SILVA

ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS PRODUZIDOS
COM DIFERENTES DOSAGENS DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

Maceió- Alagoas

2023

JORGE LUIS OLIVEIRA SILVA

ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS PRODUZIDOS
COM DIFERENTES DOSAGENS DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas - PPGEC/UFAL, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Materiais.

Orientadora: Dr. Karoline Alves Melo Moraes

Maceió- Alagoas

2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

- S586a Silva, Jorge Luis Oliveira.
Análise de propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes dosagens de agregados reciclados de concreto / Jorge Luis Oliveira Silva. – 2023.
107 f. : il. color.
- Orientadora: Karoline Alves Melo Moraes.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Maceió, 2023.
- Bibliografia: f. 91-101.
Apêndice: f. 102-107.
1. Agregado reciclado de concreto. 2. Concreto estrutural. 3. Dosagem de concreto. I. Título.

CDU: 66.972.12

Dedico este trabalho a meus pais,

Iva Maria e Josinaldo Ribeiro.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me abençoado em todos os momentos da minha vida e por sempre estar ao meu lado nos momentos mais difíceis. Sem ele NADA é possível. Ele é minha força minha fortaleza.

A minha orientadora, Karoline Alves Melo Moraes, pela pessoa e profissional que é. Obrigado por sua dedicação, por todo conhecimento compartilhado, compreensão, apoio e paciência e pelos sábios conselhos sempre que a procurei para conversar, sem sua orientação, nada disso seria possível.

Agradeço também aos professores Paulo César Correia Gomes e Cassia Vanessa Albuquerque de Melo, pela participação nas bancas de qualificação e defesa, que muito contribuíram para a melhoria desta dissertação.

Aos meus pais Iva Maria e ao meu irmão Luis Henrique, que sempre me incentivaram e acreditaram em meu potencial, e por entender os motivos da minha ausência de estar morando em outro estado (a saudade de vocês era diária). Obrigado por todo amor e confiança depositados a mim. Eu amo vocês.

Um agradecimento especial à minha família, as palavras não podem expressar o quão grato sou a todos vocês. Destaco aqui a minha Prima e madrinha Isabela, pela preocupação diária e pelas palavras de apoio, e a minha tia Ivonete (in memoriam) por compartilhar comigo todas as minhas conquistas, infelizmente você se foi enquanto estava em busca desta conquista, agora finalizo e sei que estaria muito feliz com a minha vitória. Te amo meu bem (impossível conter as lágrimas neste parágrafo).

A dona Grasiela (minha segunda mãe), presente que Deus colocou em minha vida, por tamanha atenção, preocupação, afeto e carinho, por me fazer sentir seguro e amenizar a saudade de estar longe da minha família de origem, você mora em meu coração sem pagar aluguel.

Aos meus amigos do PPGE e PPGMAT que me acompanharam desde o início dessa árdua caminhada e por tornarem essa jornada mais leve, não deixando esquecer da grande ajuda durante as minhas longas produções de concreto (sem vocês seria quase impossível moldar tantos Cp's), aqui vai a lista dos feras Yuri, Rafael, Leonardo, Thauany, Nora Nei, Jessica, Loran, Celiane, Adysson, Karlisson, Alexandre, Priscila, Jonathan e Pedro. Não posso esquecer também da arquiteta Luiza pelos momentos compartilhados conosco.

Aos amigos que ganhei da UFAL, Luiz e Beatriz, por abdicarem do seu tempo e demonstrarem total disponibilidade para com a minha pesquisa, meu muito obrigado. Ao melhor colaborador do Severinão, seu Cicero, pelo apoio, por desempenhar as suas funções com grande maestria, por fazer do nosso horário de café e almoço um passa tempo e diversão e pelas várias conversas nos momentos de descanso, você é nota mil.

Aos técnicos e funcionários do LEMA, Tassis, Jonas, Valdemir e Flabel pelo apoio na realização dos ensaios, pelas conversas e conselhos.

Agradeço à CAPES e a FAPEAL pela bolsa de estudo concedida, que me permitiu a dedicação ao mestrado em tempo integral.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para a realização desta dissertação.

RESUMO

Atualmente tem-se buscado alternativas mais sustentáveis dentro do setor da construção civil, como forma de diminuir as interferências danosas ao meio ambiente. Dentre estas alternativas destaca-se a utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de argamassas e concretos, sendo estes com ou sem função estrutural. Contudo, a utilização destes agregados é um tema que ainda carece de estudos, no sentido de buscar alternativas que visam compreender a interferência da substituição destes agregados na produção de novos concretos para fins estruturais. Assim, o presente estudo tem como objetivo principal avaliar a contribuição das dosagens de agregados reciclados de concreto (ARCO) nas propriedades dos concretos estruturais nos estados fresco e endurecido. Foram produzidos concretos com diferentes dosagens, utilizando o método proposto pela ABCP, variando-se o percentual de substituição de agregado natural por reciclado em 25%, 50%, 75% e 100%, bem como variando-se a dimensão do ARCO (miúdo e graúdo). O desempenho no estado fresco foi avaliado utilizando o ensaio de abatimento (*slump*). A avaliação das propriedades no estado endurecido foi realizada utilizando o ensaio de resistência à compressão, módulo de elasticidade e índices físicos dos concretos, tais como absorção de água, índice de vazios e massa específica real. Dos resultados do ensaio de consistência, índice de vazios, e absorção, todas as misturas apresentaram valores elevados. No que concerne aos resultados de resistência à compressão aos 28 dias, as misturas produzidas apresentaram valores satisfatórios com resultados acima de 20 MPa, observou-se também que a resistência foi afetada com o aumento do percentual de substituição do agregado reciclado de concreto, sendo mais evidente nas misturas com substituição apenas do agregado graúdo. Desta forma, fica evidente a interferência da dimensão do agregado nas propriedades dos concretos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. De modo complementar, os resultados demonstraram o potencial de utilização do ARCO, com possibilidade de substituição em grande parte o agregado natural, em contraponto à norma vigente, que limita o percentual de substituição em até 20% em aplicações para fins estruturais (classe de resistência de C20), sem trazer uma indicação clara se essa substituição refere-se ao agregado miúdo, graúdo ou a ambos.

Palavras-chave: Agregado reciclado de concreto; Concreto estrutural; Dosagem.

ABSTRACT

Currently, smarter alternatives have been sought within the civil construction sector, as a way to reduce harmful interference to the environment. Among these alternatives, the use of recycled concrete aggregates stands out for the production of mortars and concrete, with or without a structural function. However, the use of these aggregates is a subject that still needs studies, in the sense of seeking alternatives that aim to understand the interference of replacing these aggregates in the production of new concrete for abandoned purposes. Thus, the main objective of this study is to evaluate the contribution of recycled concrete aggregate (ARC) dosages on the properties of integrated concrete in the fresh and long-lasting states. Concretes with different dosages were produced, using the method proposed by ABCP, varying the percentage of replacement of natural aggregate by recycled in 25%, 50%, 75% and 100%, as well as varying the size of the ARCO (small and big). Fresh state performance was evaluated using the slump test. The evaluation of the properties in the durable state was carried out using the resistance to syndrome test, modulus of elasticity and physical indices of concrete, such as water absorption, voids index and real density. From the results of the consistency test, voids index, and absorption, all mixtures showed high values. With regard to the results of resistance to flex at 28 days, the mixtures produced showed advanced values with results above 20 MPa, it was also proven that the resistance was supported with the increase in the percentage of substitution of the recycled concrete aggregate, being more evident in mixtures with replacement of coarse aggregate only. In this way, the interference of the size of the aggregate in the properties of concrete is evident, both in the fresh state and in the lasting state. Complementarily, the results justified the potential use of ARCO, with the possibility of replacing the natural aggregate in large part, as opposed to the current standard, which limits the percentage of replacement to up to 20% in applications for functional purposes (resistance class of C20), without bringing a clear indication if this replacement refers to fine aggregate, coarse aggregate or both.

Keywords: Concrete Recycled aggregate; Structural concrete; Mix design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Coleta de RCC pelos municípios nas regiões do Brasil	21
Figura 2 – Fluxograma de operações para obtenção do agregado reciclado em sistema aberto.....	22
Figura 3- Relação entre o tamanho do ARCO e a absorção de água	37
Figura 4 – Fluxograma da pesquisa	48
Figura 5 - Fluxograma simplificado do processo de beneficiamento do AMRC	52
Figura 6 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural	53
Figura 7 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural.....	54
Figura 8 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC)	55
Figura 9 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)	55
Figura 10 – Agregados reciclados de concreto após a pré-molhagem	64
Figura 11 – Ensaio de abatimento do tronco de cone	65
Figura 12 – Execução do ensaio do módulo de elasticidade	67
Figura 13 – Resistência à compressão dos concretos com substituição do AGRC ..	70
Figura 14 – Resistência à compressão dos concretos com substituição do AMRC ..	71
Figura 15 – Resistência à compressão dos concretos produzidos.....	73
Figura 16 – Módulo de elasticidade dos concretos produzidos	74
Figura 17 – Boxplot das misturas produzidas aos 28 dias	78
Figura 18- Gráfico de correlação de Pearson.....	79
Figura 19 – Histograma (a) e gráfico Q-Q (b) dos resíduos para a idade de 28 dias	82
Figura 20- Gráfico de valores ajustados versus resíduos (a) e gráfico de resíduos versus ordem de coleta dos dados (b) para a idade de 28 dias.....	83
Figura 21 – Contribuição dos fatores controláveis na variável de resposta	83
Figura 22- Diferença entre as médias considerando o percentual de substituição do ARCO (a) e o tipo (dimensão) (b).....	85
Figura 23 – Diferença entre as médias considerando ambos os fatores (percentual de substituição e o tipo)	86
Figura 24- Gráfico de efeito dos fatores	87
Figura 25- Gráfico de interação entre os fatores	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Proporção dos constituintes	26
Tabela 2 – Requisitos geométricos, físico mecânicos e químicos de agregado reciclado para aplicação em concreto	0
Tabela 3– Dados relativos à massa unitária e massa específica dos agregados reciclados	35
Tabela 4: Dosagens em massa das pesquisas	43
Tabela 5: Propriedades dos concretos com agregados reciclados no estado fresco	45
Tabela 6: Propriedades do estado endurecido de concretos com ARCO	39
Tabela 7 – Características físicas do agregado miúdo natural.....	53
Tabela 8 – Características físicas do agregado graúdo natural	54
Tabela 9 – Características físicas dos agregados reciclados.....	56
Tabela 10 – Determinação do consumo de água.....	60
Tabela 11 – Volume compactado seco de agregado graúdo para um metro cúbico de concreto	61
Tabela 12 – Composição dos concretos (kg/m ³)	63
Tabela 13 – Propriedades físicas no estado fresco dos concretos produzidos	69
Tabela 14 - Propriedades no estado endurecido dos concretos produzidos	75
Tabela 15 – Valores individuais de resistência à compressão das misturas produzidas aos 28 dias	77
Tabela 16 – Medidas de tendência central e dispersão dos dados de resistência à compressão (MPa) dos concretos.....	78
Tabela 17 – Análise de variância (ANOVA)	80
Tabela 18- Testes de Normalidade e Homoscedasticidade dos resíduos.....	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais normas e guias recomendados em alguns países	25
Quadro 2 – Requisitos específicos dos agregados totais reciclados e compostos para uso em produtos e compósitos cimentícios.....	31
Quadro 3 – Recomendações dos agregados totais reciclados e compostos para uso em materiais cimentícios	32
Quadro 4 - Trabalhos que utilizaram ARCO com alteração na trabalhabilidade	38
Quadro 5 – Requisitos químicos do cimento Portland CII-F	49
Quadro 6 – Características físicas e mecânicos do cimento Portland CII-F	49
Quadro 7 – Ensaio e normas utilizados para caracterização dos agregados	52
Quadro 8 – Classe de agressividade ambiental	58
Quadro 9 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto	58
Quadro 10 – Condições de preparo em função do desvio padrão S_d	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGN: Agregado graúdo natural
AI: Areia industrial
AMN: Agregado miúdo natural
AGRC: Agregado graúdo reciclado de concreto
AMRC: Agregado miúdo reciclado de concreto
AR: Agregado reciclado
ARCO: Agregado Reciclado De Concreto
ARM: Agregado Reciclado Misto
a/c: Relação água cimento
CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente
f_{ck}: Resistência à compressão axial
IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MEC: Modelo de empacotamento compressível
MMA: Ministério do Meio Ambiente
RCC: Resíduos da Construção Civil
RSU: Resíduos Sólidos Urbanos
PNAM: Política Nacional do Meio Ambiente
PNRS: Política Nacional De Resíduos Sólidos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVO GERAL.....	17
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	19
2.2 AGREGADOS RECICLADOS	21
2.2.1 Aspectos da produção de agregados reciclados (beneficiamento)	21
2.2.2 Recomendações Normativas	23
2.3 PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS DOS ARCO	33
2.3.1 Composição granulométrica.....	33
2.3.2 Material pulverulento.....	34
2.3.3 Massa específica e massa unitária	34
2.4 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS COM ARCO NO ESTADO FRESCO .	37
2.4.1 Trabalhabilidade.....	37
2.4.2 Massa específica do concreto no estado fresco.....	39
2.5 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO	40
2.5.1 Absorção dos concretos.....	40
2.5.2 Resistência à compressão	41
2.5.3 Módulo de elasticidade.....	42
2.6 PANORAMA ATUAL DOS CONCRETOS DESENVOLVIDOS COM ARCO.....	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	49
3.1.1 Cimento.....	49
3.1.2 Agregado graúdo natural.....	49
3.1.3 Agregado miúdo natural	50
3.1.4 Agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)	50
3.1.5 Agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC)	51
3.1.6 Água.....	52
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	52
3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	57
3.3.1 Definição das dosagens	57
3.3.2 Procedimento de mistura	63
3.4 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO.....	65

3.4.1	Massa específica do concreto fresco	65
3.4.2	Consistência pelo abatimento do tronco de cone.....	65
3.5	PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO	66
3.5.1	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	66
3.5.2	Resistência à compressão	66
3.5.3	Módulo de elasticidade.....	66
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	67
4.	RESULTADOS.....	69
4.1	PROPRIEDADES DOS CONCRETOS	69
4.1.1	Propriedades no estado fresco	69
4.1.2	Propriedades no estado endurecido.....	70
5.	CONCLUSÃO	89
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90
	REFERÊNCIAS.....	91
	APÊNDICE A – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	102
	APÊNDICE B – TESTE DE <i>TUKEY</i>.....	105

1. INTRODUÇÃO

As questões ambientais, tanto quanto as econômicas e sociais, têm que ser compreendidas segundo um contexto de modelo de desenvolvimento das sociedades humanas. A visão histórica é sempre a chave para a compreensão das interligações que resultaram no modo de apropriação dos recursos naturais, pelo homem, bem como das relações sociais que formam a sociedade. Cada período da história da sociedade tem sua respectiva forma de apropriação dos recursos naturais que depende da tecnologia usada, finalidade com que estes recursos são apropriados, modo de descarte dos subprodutos, ou destinação dos produtos e recursos consumidos. Desta forma, a utilização destes recursos de forma racionalizada passa a ter papel fundamental, considerando-se que existe um limite de suporte dos sistemas naturais, em relação à amplitude do que a tecnologia dos processos produtivos proporciona (RANGEL, 2015).

O mesmo ocorre para a indústria da construção civil que, devido ao consumo de recursos e energia, torna-se responsável por impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos seus produtos, se tornando assim, uma das maiores geradoras de resíduos (NAGGALI, 2014).

Segundo Pablos *et al.* (2012), o material remanescente de obras na construção civil tem impacto expressivo e negativo, os efeitos do seu descarte são sentidos na qualidade da água, ar e solo, sendo imperativo a busca por soluções rápidas e eficazes associada à manutenção e qualidade dos produtos. Uma das alternativas para solucionar essa problemática é a substituição parcial do agregado reciclado de concreto na produção em novos concretos.

Segundo Souza (2011) por muitos anos, desde a segunda guerra mundial, a reciclagem de concreto tem sido praticada em larga escala na Europa e no Japão. Na Austrália, devido à escassez de espaços para construção de aterros sanitários e elevadas taxas cobradas para depósitos de resíduos nos aterros, existe um grande esforço para utilização de produtos reciclados.

O correto manejo dos resíduos de concreto, por meio do seu reuso promove múltiplos benefícios sociais e ambientais, uma vez que a substituição, no concreto, do agregado natural pelo reciclado reduz a extração de recursos naturais não renováveis no meio ambiente.

Contudo, há de se atentar ao fato de que algumas características dos agregados reciclados diferem das presentes nos agregados naturais, o que influi diretamente no comportamento do concreto (BAUER, 2008; ISAIA, 2007). Percebe-se, em relação aos agregados naturais, que os agregados reciclados possuem uma maior porosidade e absorção de água, menor densidade, maior variabilidade da sua composição e irregularidade do formato, assim como a diminuição significativa na resistência a esforços e à abrasão. Por sua vez, conforme citam Mehta e Monteiro (2014), o produto final também é afetado pela utilização dos agregados reciclados, indicado, por exemplo, pelo decréscimo da consistência e da resistência à compressão, quando submetido aos respectivos ensaios.

Entretanto, a aplicação deste tipo de material tem sido bastante incentivada através de pesquisas que apresentam resultados satisfatórios da sua aplicação (LEITE, 2013; RODRIGUES; FUCALE, 2014; TAHAR *et al.*, 2017; REIS, 2021; MAIA, 2022). Para Motta (2005), em muitos casos o agregado reciclado é a melhor alternativa econômica, não deixando a desejar em seu desempenho mecânico.

Resultados de resistência à compressão com o uso do Agregado Reciclado de Concreto (ARCO), considerando a dimensão do agregado (miúdo e graúdo) foram discutidos na literatura. Para Neville (1997) e Metha e Monteiro (2008), a utilização do Agregado Miúdo Reciclado de Concreto (AMRC) reduz a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, isto ocorre devido à elevada absorção de água existente decorrente da porosidade da argamassa de cimento, que tende a se concentrar na fração mais fina. Contudo, algumas pesquisas (HEINECK, 2012; CABRAL *et al.*, 2012) encontraram resultados satisfatórios em concretos e argamassas.

Para Gonzalez-Taboada *et al.* (2016) e Tam *et al.* (2018), as propriedades físicas, granulométricas e morfológicas do Agregado Graúdo Reciclado de Concreto (AGRC) são influenciadas pelos percentuais de argamassa presa ao agregado graúdo natural e pela resistência do concreto que deu origem a esse AGRC.

De acordo com Abreu (2015), estudos confirmam que é possível produzir concretos com finalidade estrutural constituídos de agregados reciclados que atendem à resistência à compressão mínima para fins estruturais, especificada na NBR 6118 (ABNT, 2014).

Observa-se na literatura que os estudos utilizando agregados reciclados de concreto são direcionados para verificação das propriedades mecânicas. Desta

forma, realizar uma avaliação de alguns parâmetros a exemplo da interferência da granulometria, nas propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido, torna-se relevante, para que este material seja utilizado de forma ampla e confiável além de atender as recomendações normativas.

1.1 Justificativa

Atualmente, o aumento da geração de resíduos e a severidade das leis ambientais geraram uma demanda de estudos de viabilidade de reuso dos materiais de construção e demolição, mais especificamente a utilização de RCC como agregados reciclados na própria construção civil em dosagens de concretos, buscando-se a mitigação de impactos sociais, ambientais e econômicos gerados por este segmento da economia.

Com a atualização da norma NBR 15116 (ABNT, 2021a), ficou regulamentada a utilização de agregados reciclados em concretos para fins estruturais. Contudo, de acordo com Gomes (2021), é um tema que ainda carece de estudos, no sentido de buscar alternativas que visam compreender e absorver a heterogeneidade presente nos agregados reciclados, considerado como o principal entrave de seu uso para fins estruturais.

Investir na disseminação da inserção de agregados reciclados para demais fins de reuso dentro da construção civil, através da implantação de políticas de incentivo à reciclagem, em conjunto com as políticas públicas, por meio da adoção de práticas de gestão integrada entre as esferas federal, estadual e municipal para uma adequada gestão e reciclagem, além do desenvolvimento de pesquisas evidenciando a eficiência do material, demonstram ser alternativas para aumentar a utilização destes tipos de resíduos.

Pesquisas já demonstraram a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento de agregados reciclados em obras de pavimentação viárias, entre outros destinos que não apresentem função estrutural. Contudo, para que a utilização dos agregados seja em maior escala, é essencial sua utilização em estruturas. Sendo assim, estudos sobre o comportamento mecânico de concreto produzidos com o ARCO são de grande importância para o aprimoramento de técnicas que aumentem sua credibilidade e, possibilitem sua utilização em demais

segmentos, podendo assim, aumentar de maneira considerável o consumo dos agregados reciclados, contribuindo cada vez mais com o meio ambiente.

Desta forma, essa pesquisa visa contribuir nos estudos de concretos dosados com agregados reciclados de concreto, com a finalidade de analisar os critérios estabelecidos pela norma NBR 15116 (ABNT, 2021a) para uso estrutural, no que diz respeito ao percentual de uso e a dimensão (miúdo e/ou graúdo).

No sentido de direcionar a elaboração desta dissertação, foram definidos os objetivos geral e específico apresentados a seguir:

1.2 Objetivo geral

Propõe-se como objetivo principal avaliar a contribuição da dosagem de agregados reciclados de concreto (ARCO) nas propriedades dos concretos estruturais nos estados fresco e endurecido.

1.3 Objetivos específicos

Como pontos específicos desta pesquisa, destacam-se:

- Verificar a interferência do percentual de ARCO.
- Analisar a influência da dimensão do agregado reciclado (miúdo e/ou graúdo) na produção dos concretos.

1.4 Estrutura do trabalho

Essa dissertação de mestrado encontra-se organizada em 5 capítulos, incluindo este primeiro capítulo, além das referências bibliográficas e apêndice.

No capítulo 1 apresenta-se a contextualização do tema (introdução), objetivos e justificativa da pesquisa.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão da literatura sobre os agregados reciclados, as recomendações normativas, principais propriedades características dos agregados reciclados de ARCO, e por fim as propriedades dos concretos com ARCO no estado fresco e estado endurecido.

O capítulo 3 apresenta o programa experimental, com o planejamento e metodologia dos ensaios, seleção e caracterização dos materiais, bem como o estudo de dosagem experimental realizado e as propriedades avaliadas, e a metodologia utilizada para a análise estatística.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões acerca dos ensaios realizados.

No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

Na sequência são apresentados as referências e o apêndice.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos de Construção e Demolição

Os Resíduos de Construção Civil (RCC) ou, simplesmente, entulhos, são Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados durante processos de construção, reforma, escavação ou demolição (ABRECON, 2021).

De acordo com Gusmão (2008) e segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), os RCC são em geral classificados como resíduos sólidos inertes, Classe II-B, visto que, quando submetidos a testes de solubilização, não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores ao padrão de potabilidade da água.

Segundo Cabral (2007), é de suma importância a classificação do RCC para definir sua destinação, principalmente em função da periculosidade. A resolução 469 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (BRASIL, 2015) classifica os resíduos da construção civil em quatro classes de acordo com a sua composição e origem, sendo:

- a) Classe A: resíduos provenientes de demolições e de perdas de construções e reformas, de obras de pavimentação, infraestrutura e terraplenagem, ou do processo de fabricação de materiais nos canteiros de obra, constituídos por diversos componentes como argamassa, concreto e cerâmica, com potencial de reciclagem ou de reutilização como agregado;
- b) Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, mas sem as características necessárias para serem utilizados como agregado, como papel, vidro, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso.
- c) Classe C: resíduos cuja reciclagem ainda não é possível devido à falta de tecnologias economicamente viáveis, que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- d) Classe D: resíduos considerados perigosos por sua composição, como tintas e solventes, ou por estarem contaminados ou prejudiciais à saúde.

Outra classificação importante aos RCC é a sua inclusão como RSU pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Sancionada pela Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), é um documento da Legislação Federal que integra a Política Nacional do Meio Ambiente (PNAM), coordenada pelo Ministério do

Meio Ambiente (MMA), órgão responsável pelo planejamento estratégico de ações referentes a esse setor.

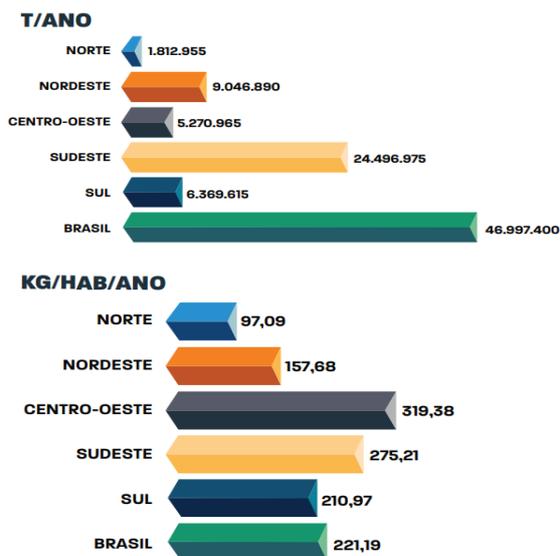
De acordo com Contreras *et al.* (2016), o RCC representa a maior parte dos resíduos sólidos urbanos em massa. A geração anual estimada de RCC no Brasil é de 500 kg por habitante. Quando esse número é multiplicado pelo número de habitantes em 2021, fornecido pelo IBGE (2021), o total de RCC é de aproximadamente 106,6 milhões de toneladas no país.

Comparando-se esse valor ao apresentado anteriormente pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2021), de aproximadamente 47 milhões de toneladas coletadas no ano de 2020, cerca de 221,2 kg por habitante/ano, percebe-se que existe uma grande variação nos números levantados. Esta variação mostra a dificuldade de quantificar a geração de resíduos em um país com tantos aterros não licenciados e com grande parte do material possuindo destinação imprópria.

No que se refere à coleta de RCC nas regiões brasileiras, conforme apresentado na Figura 1, de acordo com ABRELPE (2021), a região Sudeste se destaca no total de RCC coletado, por volta de 52% de participação em relação ao total coletado no país, o que corresponde a aproximadamente 24,5 milhões de toneladas coletadas em um ano.

Em relação à coleta per capita, a região que se destaca é a Centro Oeste, com quase 319 kg de RCC por habitante/ano.

Figura 1 – Coleta de RCC pelos municípios nas regiões do Brasil



Fonte: Abrelpe (2021)

Logo, fica evidente a necessidade de investir em alternativas eficientemente sustentáveis dentro do setor da construção civil, tendo em vista a grande geração de resíduos de construção e demolição, somada à necessidade de extração de agregados naturais. Deste modo, o reaproveitamento desses resíduos na produção de concretos, com substituição parcial dos agregados naturais por RCC transformado em agregados reciclados, apresenta-se benéfico com o intuito de minimizar os potenciais impactos ambientais na produção das misturas.

2.2 Agregados Reciclados

2.2.1 Aspectos da produção de agregados reciclados (beneficiamento)

A grande quantidade de resíduos gerados por diversos setores, mais especificamente a construção civil, que é também responsável pelo grande consumo de matéria prima, fez com que, ao longo dos anos, cada vez mais o conceito de sustentabilidade através da reciclagem ganhasse destaque. Contudo, em situação normal, o reaproveitamento dos resíduos de construção e demolição não poderia ser realizado, mas com o seu beneficiamento, a reutilização torna-se possível (LOVATO, 2007).

Este processo de beneficiamento dos resíduos de construção envolve desde a sua coleta e transporte, passando por separação, britagem e peneiramento, até a sua estocagem para posterior utilização, processo semelhante ao tratamento dado à produção de agregados naturais (TENÓRIO, 2007).

A Figura 2 apresenta de forma ilustrativa o processo de beneficiamento pelo qual o resíduo é submetido até que seja considerado como agregado reciclado.

Figura 2 – Fluxograma de operações para obtenção do agregado reciclado em sistema aberto



Fonte: Amorim (2016)

Para a cominuição dos RCC, torna-se necessário a utilização de equipamentos do tipo britadores, que podem ser de mandíbulas, de impacto, giratório e de cone, britador de rolo e moinho de martelos.

Santos (2008) afirma que são dois os tipos de britadores mais utilizados: britador de impacto e de mandíbulas. Com relação aos britadores de impacto, o autor expõe que estes apresentam alta relação de redução das peças, gerando grãos de forma cúbica e maior quantidade de finos. Os britadores de mandíbulas, possuem uma baixa relação de redução nas dimensões do material, fragmentam uma parcela dos agregados naturais, geram uma maior quantidade de grãos graúdos com alta tendência para geometria lamelar, além de apresentarem grãos fracos e com linhas de fratura muito pronunciadas. Já os britadores de martelo se

caracterizam como britadores secundários que produzem uma grande quantidade de material miúdo, sendo utilizados, de acordo com o autor supracitado, normalmente em conjunto com os britadores de mandíbulas.

De acordo com Cavalheiro (2011), o britador de mandíbulas despedaça o material por esmagamento, compressão, por meio do movimento periódico de ajuntamento e afastamento de uma superfície de britagem móvel contra outra fixa, já o britador de impacto quebra o material através da colisão em placas fixas de impacto. No que diz respeito ao britador giratório e de cone, de acordo com Nogueira (2015), a diminuição do tamanho do material ocorre pelo ajuste da compressão e do atrito.

Conforme Nogueira (2015), o processo de britagem dos agregados reciclados que são reaproveitados está diretamente influenciado pelo tipo de britador. Como afirma o autor, o beneficiamento depende exclusivamente do tipo de reciclado.

2.2.2 Recomendações Normativas

A norma NBR 15116 (ABNT, 2021a), que trata do uso de agregados reciclados de Classe A, conforme resolução 469 do (CONAMA) (BRASIL, 2015), na primeira edição de 2004 permitia o seu uso apenas para fins não estruturais, ou seja, para classes de resistências C10 e C15.

No que se refere aos tipos de agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland, de acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2021a), estes podem ser classificados em:

- Agregado composto - mistura de agregado reciclado e agregado natural
- Agregado reciclado cimentício (ARCI) - constituído por materiais cimentícios diversos (concretos, argamassas, blocos pré-moldados de concreto etc.), podendo incluir teores reduzidos de cerâmica vermelha
- Agregado reciclado de concreto (ARCO) - constituído por resíduos de concreto
- Agregado reciclado misto (ARM) - constituído por uma mistura de materiais cimentícios e materiais cerâmicos

A referida norma apresentou mudanças significativas na sua atualização, tais como (ABNT, 2021a):

- Cálculo da quantidade de água necessária para a realização da pré-molhagem dos agregados de RCC;
- Possibilidade do uso de agregados reciclados para dosagens de concretos com fins estruturais, desde que sejam respeitadas as devidas recomendações, como o uso restrito de ARCO, teor de substituição de 20% dos agregados convencionais pelo reciclado e uso em concretos das classes de agressividade I e II da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Contudo, considerando as regulamentações elencadas na NBR 15116 (ABNT, 2021a), é possível observar uma limitação no que se refere ao percentual de substituição do agregado reciclado, pois essa norma cita 20% de ARCO para concretos com fins estruturais, porém já há estudos que utilizam uma quantidade maior, com resultados satisfatórios (TAHAR *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2019; AFRICANO, 2021). Além disso, observa-se também uma lacuna de conhecimento no que diz respeito a dimensão do agregado que pode ser utilizado, ou seja, se seria miúdo ou graúdo. Esta informação é de suma importância, uma vez que a dimensão do material influencia diretamente nas propriedades do concreto conforme elencado por Rodrigues e Fucale (2014), Costa (2021) e Reis (2021).

No que concerne às normas internacionais, já há normas específicas para RCC com função estrutural, a exemplo do CUR-VB:1984 (Holanda), DIN 4226-100:2002 (Alemanha) e a OT 70085:2006 (Suíça).

Para Tomosawa (2005), algumas normas internacionais são ainda mais restritivas que a nacional em termos de teores de contaminantes e teores de sulfatos, além de definirem critérios de controle para agregados de RCC de alta qualidade.

Demais países europeus têm estabelecidos normas técnicas para produção de concreto estrutural reciclado, dimensionando e executando estruturas de concretos produzidas com as composições estabelecidas de agregados reciclados (METHA; MONTEIRO, 2014). O Quadro 1 apresenta as principais normas internacionais utilizadas em alguns países da Europa e da Ásia.

Quadro 1 – Principais normas e guias recomendados em alguns países

Países	Norma
Alemanha	DIN 4226-100 (2002): Aggregates for mortar and concrete part 100: “Aggregates for Mortar and Concrete - Recycled Aggregates”.
Hong Kong	WBTC No. 12/2002 Works Bureau Technical Circular No. 12 (2002): “Specification facilitating the use of recycled aggregates”.
Japão	Building Contractors Society of Japan (B.C.S.J) “Proposed standard for the use of recycled aggregates and RAC” (1977). Japanese industrial standard JIS A 5021 “recycled aggregate for concrete-Class H. (2005). Japanese industrial standard JIS A 5022 “recycled aggregate for concrete-Class M” (2007). Japanese industrial standard JIS A 5023 “recycled aggregate for concrete-Class L. (2006)
Reino Unido	BS 8500-2 (2002): “Concrete - Complementary British Standard to BS EN 206-1- Part 2: Specification for constituent materials and concrete”.
Holanda	CUR - Commissie voor van Uitvoering Research (1984, 1986, 1994).
Portugal	E471 (2006) “Guia para uso de agregados graúdos reciclados em concreto com ligante hidráulico” em NP EN 12620 - Agregados de Concreto.
Bélgica	PTV 406 (2003): Technical Prescriptions: “Recycled Aggregates from construction and Demolition Waste”.
Suíça	OT 70085 (2006) “Instruction technique. Utilization de matériaux de construction minéraux secondaires dans la construction d’abris.
Dinamarca	“Recommendation for the use of RA for concrete in passive environmental class”. “Addition to Danish Concrete Association N-34 for the use of recycled aggregate for concrete in passive environmental class” (1995).
Estados Unidos	ASTM C33:18 e ASTM C125:21 ASTM D8038-16 - Prática Padrão para Recuperação de Material de Base de Agregado Reciclado (RAB).

Fonte: PEDRO *et al.* (2018)

A maior parte dos documentos analisados indica limites para o conteúdo de finos dos agregados reciclados. A seguir serão discutidas as principais especificações de algumas normas apresentadas no quadro 1.

A norma E471 (LNEC, 2009) classifica os agregados reciclados em três classes: ARB1, ARB2 constituídos maioritariamente por concreto, misturado ou não com agregado não ligantes, e ARC (agregados reciclados compostos) constituídos por concreto, agregados não ligantes, elementos de alvenaria, não havendo exigências quanto às percentagens relativas de cada um deles. A Tabela 1 apresenta a proporção dos constituintes (EN 12620, 2002 *apud* LNEC, 2009).

Tabela 1- Proporção dos constituintes

Classe	Rc (%)	Rc+Ru (%)	Rb (%)	Ra (%)	X+ Rg (%)	FL (%)
ARB1		≥90	≤10	≤5	≤ 0,5	≤ 2
ARB2		≥70	≤30	≤5	≤ 1	≤ 2
ARC		≥90		≤10	≤ 2	≤ 2

Legenda: Rc- Concreto, produtos de concreto e argamassa, Ru- agregados não ligados, pedra natural e agregados tratados com ligantes hidráulicos, Ra- Materiais betuminosos, Rb- elementos de alvenaria de materiais argilosos, elementos de alvenaria de silicatos de cálcio e concreto celular não flutuante, Rg- Vidro, de silicatos de cálcio e concreto celular não flutuante, Rg- Vidro, FL- materiais flutuantes em volume, X- outros: materiais coesivos, plásticos, borrachas, metais e madeira.

Fonte: adaptado de E 471 (LNEC, 2009)

Quanto à aplicação, a norma E471 (LNEC, 2009) especifica o uso dos agregados ARB1 e ARB2 para utilização em concreto simples e concreto armado. Para aplicação em concreto armado, a proporção máxima de agregado reciclado de concreto é de 25% para os agregados de classe ARB1 e 20% para os agregados de classe ARB2. Quanto à utilização para concretos simples (enchimento ou regularização) em ambientes não agressivos, a percentagem de utilização não fica sujeita a qualquer limite. Quanto ao percentual de substituição, a NBR 15116 (ABNT, 2021a) também corrobora com esta limitação em até 20% para aplicações de ARCO em concretos com função estrutural.

Para a norma OT 70085 (DDPS, 2006), o uso dos agregados reciclados é dividido em 3 casos. No caso A (concreto dosado em central) a proporção máxima de agregado de concreto deve ser definida pelo fornecedor, respeitando existe um percentual regulamentado de 20 % Levando em consideração os requisitos de qualidade do concreto e garantia de uma boa trabalhabilidade, para este caso o limite é até 20%. No caso B (misturado no local) a proporção de agregados de concreto é limitada para cima, dependendo da qualidade do concreto. O cumprimento dos valores máximos leva em consideração que o concreto reciclado apresente características equivalentes ao concreto com 100% de agregados

naturais. Para este caso, considera-se que os concretos são produzidos no local, especificando o limite de substituição em 20% para classe de resistência $\geq B 35/25$, 25% de substituição para classe de resistência $\geq B 40/30$, 35% de substituição para classe de resistência $B 35/25$, e até 100% de substituição para classe de resistência $\leq B 25/15$. Para o caso C (deixado no local com proporção ilimitada de agregados reciclados), a utilização limita-se ao concreto sem requisitos especiais, sendo que tanto na fase de projeto quanto na execução devem ser consideradas as diferenças entre o concreto convencional e o concreto reciclado, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Vale ressaltar que, para a utilização dos agregados reciclados de forma ilimitada (caso C), a norma apresenta algumas recomendações relacionadas à preparação e execução do concreto com este tipo de agregado, a exemplo do aumento da relação a/c, proporção suficiente de cimento, diâmetro máximo do elemento, produtos químicos, pré e pós-tratamento do concreto.

No que concerne à norma WBTC No. 12 (DBOTGOTHK, 2002), a utilização do agregado reciclado é dividida em 3 apêndices. O apêndice A (especificação particular para concreto de mistura prescrita com agregado grosso 100% reciclado) é aplicável apenas ao concreto de resistência de 20 MPa. O agregado graúdo (10 mm a 20 mm) deve ser derivado apenas de concreto, com impedimento de utilização do agregado miúdo. Em relação à proporção, utilizando o agregado de 10 mm o traço deve ser de 1:1,8 e para o agregado de 20 mm, 1,8:0,9.

Em relação ao apêndice B (especificação particular para concreto de mistura projetada com 20% de agregado grosso reciclado), este é aplicável aos concretos de resistência de 25 a 35 MPa, para uso em geral, exceto em estruturas de retenção de água. Como recomendação deve ser utilizado somente o cimento Portland comum, quanto ao agregado graúdo (10 mm a 20 mm) deve ser constituído em 80% de agregado de rocha natural, e 20% de agregado reciclado de concreto, e o agregado miúdo reciclado não pode ser utilizado. Para ambos os métodos A e B a norma recomenda que os agregados graúdos devem ser completamente umedecidos antes de ser usado.

No apêndice C a referida norma especifica o uso do agregado reciclado como material de sub-base, composto por rocha triturada, concreto triturado ou material de demolição inerte triturado e pode conter até 12,5% em massa de areia natural. O agregado será considerado adequado se tiver um valor de solidez superior a 65 e

teor de sulfato solúvel em água inferior a 1,9 g. Para utilização do material como sub-base, também são apresentadas algumas recomendações a respeito da colocação e compactação do material.

Quanto a ASTM C33 (ASTM, 2018), são apresentadas algumas especificações para ambos os agregados reciclados (miúdo e graúdo). No que se refere ao agregado miúdo reciclado, este não deve ter mais de 45% passando por qualquer peneira, e o módulo de finura não deve ser inferior a 2,3 nem superior a 3,1. A dosagem de uma mistura de concreto pode ser dependente do módulo de finura de base do agregado miúdo a ser usado. A referida norma também apresenta a quantidade de substâncias deletérias para o agregado miúdo. Quanto à solidez, os agregados miúdos submetidos a cinco ciclos do ensaio de sanidade devem ter uma perda média ponderada de 10% quando for usado sulfato de sódio ou 15% quando for usado sulfato de magnésio.

Para o agregado graúdo, a norma apresenta os requisitos de classificação, limites para substâncias deletérias e os requisitos de propriedades físicas do agregado graúdo para o concreto. O especificador do agregado deverá designar a classe do agregado a ser utilizado na obra com base na severidade das intempéries, abrasão e outros fatores de exposição.

Observa-se que a norma europeia regulamenta a utilização do agregado reciclado para ambas as dimensões (miúdo e graúdo), levando em consideração as particularidades inerentes a cada agregado. Esta consideração é de fundamental importância, uma vez que a mudança na dimensão do agregado interfere nas propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido. Contudo, ao considerar a norma brasileira NBR 15116 (ABNT, 2021a), percebe-se que existe uma lacuna de conhecimento a respeito das especificações da dimensão do agregado.

Outra recomendação apresentada pela ASTM C33 (ASTM, 2018) refere-se à determinação do potencial de reação deletéria álcali agregado, para o agregado miúdo e graúdo.

Para as normativas e especificações do Japão (BCSJ, 1977 *apud* ALBERTE *et al.*, 2021), a absorção do agregado é um parâmetro bem relevante, admitindo-se valores máximos de absorção de 5% a 8%. Quanto à resistência à abrasão, a norma Japonesa A 5021 (JAPANESE, 2005 *apud* ALBERTE *et al.*, 2021) aborda limites de coeficiente de Los Angeles variando entre 40% e 50%. Quanto ao teor de sulfatos e

ao percentual de substituição do agregado reciclado, as normas japonesas não mencionam limites para esse parâmetro.

As normas Japonesas estão separadas de acordo com o uso. A norma JIS A 5021 (JAPANESE, 2005 *apud* ALBERTE *et al.*, 2021) é aplicada a concretos de até 40 MPa, a JIS A 5022 (JAPANESE, 2005 *apud* ALBERTE *et al.*, 2021) se destina a concretos com resistências menores, e a JIS A 5023 (JAPANESE, 2006 *apud* ALBERTE *et al.*, 2021) a concretos sem função estrutural.

A Tabela 2 apresenta um resumo comparativo dos requisitos exigidos nas normativas e especificações técnicas que regulamentam a utilização do agregado reciclado em concretos.

Tabela 2 – Requisitos geométricos, físico mecânicos e químicos de agregado reciclado para aplicação em concreto

País	Norma	Classificação		Requisitos para o agregado								
		Norma	Unificada	Dimensão mínima (mm)	Densidade seca a forno (kg/m)	Absorção de água (%)	Teor de cloretos (%)	Teor de sulfatos (%)	Teor de finos (%)	Absorção Los Angeles (%)	Passante na peneira 4 mm	Torrões de argila
Alemanha	DIN 4226-100	Tipo 1	ARC	4 mm	≥ 2.000	≤ 10	≤ 0,04	≤ 0,8	-	-	-	-
		Tipo 2	ARC			≤ 15						
		Tipo 3	ARCE	-	≤ 20							
		Tipo 4	ARM	-	≥ 1.500	-	≤ 0,15	-	-	-	-	-
Hong Kong	WBTC Nº 12	ARC	ARC	4 mm	≥ 2.000	≤ 10	≤ 0,05	≤ 1,0	≤ 4	-	≤ 5	-
Japão	BCSJ (1977)	AR	ARM	-	≥ 2.200	AG ≤ 7; AM ≤ 13	-	-	-	-	-	-
	JIS A 5021	ARH	ARC	-	≥ 2.500	AG ≤ 3; AM ≤ 3,5	≤ 0,04	-	-	≤ 35	-	-
	JIS A 5022	ARM	ARC	-	AG ≥ 2.300; AM ≥ 2.200	AG ≤ 5; AM ≤ 7	-	-	-	-	-	-
	JIS A 5023	ARL	ARC	-	-	AG ≤ 7; AM ≤ 14	-	-	-	-	-	-
Reino Unido	BS 8500-2	ARC	ARC	4 mm	-	-	-	≤ 1	≤ 5	-	-	-
		AR	ARCE		-	-	-	C)	≤ 3	-	-	-
	BRE DIGEST 433	AR 1	ARCE	4 mm	≥ 2.000	-	-	≤ 1	-	-	-	-
		AR 2	ARC		-	-	-		-	-	-	
	AR 3	ARM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Holanda	NEN 5905	ARC	ARC	-	≥ 2.000	-	≤ 0,05	≤ 1	-	≤ 40	-	-
		ARM	ARM	-		-			-		-	-
Bélgica	NBN B15-001	ARC	ARC	4 mm	≥ 2.000	≤ 9	≤ 0,06	≤ 1	≤ 3	-	-	-
		ARM	ARM		≥ 2.100	≤ 18			≤ 5	-	-	-
Suíça	OT 70085	ARC	ARC	-	-	-	≤ 0,12	≤ 1	≤ 5	-	-	-
		ARM	ARM	-	-	-				-	-	-

Fonte: adaptado de Alberte *et al.* (2021)

O Quadro 2 apresenta os requisitos para os agregados reciclados das subclasses ARCO, ARCI e ARM, e para os agregados reciclados totais e/ ou compostos de acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2021a). Esta aponta que os limites referentes ao agregado total devem atender aos critérios de ponderabilidade em massa entre os agregados graúdos e miúdos que o compõem, além de que devem ser atendidos para os usos previstos dos agregados reciclados.

Quadro 2 – Requisitos específicos dos agregados totais reciclados e compostos para uso em produtos e compósitos cimentícios

Ensaio		Limite (%)	Requisito	Método de ensaio
Materiais indesejáveis	Teor	<1	Anexos A e B	Anexos A e B
Argila em torrões	Teor	<3	ABNT NBR 7211	ABNT 7218
sulfatos	Teor	<0,1	ABNT NBR 7211	ABNT 9917
Cloretos	Teor para concreto simples	<0,2	ABNT NBR 7211	ABNT NBR 9917
	Teor para concreto armado	<0,1		
	Teor para concreto protendido	<0,01		
Absorção de água	Classe ARCO	<7	5.3	ABNT NBR 16917 (graúdo)
	Classe ARCI ou ARM	<12	5.3	ABNT NBR 16916 (miúdo)
Finos (< 0,075 mm)	Teor para concretos protegidos de desgaste superficial	<12	ABNT NBR 7211	ABNT NBR NM 46
	Teor para concretos submetidos a desgaste superficial	<10		

Fonte: ABNT NBR 15116 (2021a)

O Quadro 3 apresenta os limites recomendados de teor de cerâmica vermelha e granulometria dos agregados reciclados totais e/ou compostos, de acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2021a).

Quadro 3 – Recomendações dos agregados totais reciclados e compostos para uso em materiais cimentícios

Ensaio		Limite sugerido	Requisito	Método de ensaio
Teor de cerâmica vermelha ou branca não polida	Classe ARCO	0%	Anexos A e B	Anexos A e B
	Classe ARCI	<10 %		
	Classe ARM	< 40 %		
Granulometria	Agregado gráudo	4,75/ 12,5 mm	ABNT NBR 7211	ABNT NBR NM 248
		9,5/ 25 mm		
		19/ 31,5 mm		
		37,5/ 75 mm		
		h25/50 mm		
	Agregado miúdo	Zona utilizável	ABNT NBR 7211	ABNT NBR NM 248
Zona ótima				

Fonte: ABNT NBR 15116 (2021a)

De forma geral, levando em consideração a norma brasileira é possível observar que o fato de a utilização dos agregados reciclados ainda ser considerada uma atividade recente no país, quando comparada a países mais desenvolvidos, torna-se compreensível haver lacunas a respeito da normatização desses materiais.

Os resultados indicam diferentes abordagens adotadas pelos países quanto à regulamentação do agregado reciclado em diversas aplicações, identificando tendências e convergências quanto à composição dos agregados, requisitos geométricos, físicos, mecânicos e químicos bem como as medidas de controle de qualidade que devem ser seguidas ao utilizar este material.

Observa-se que as normas aplicáveis à utilização do agregado reciclado em concreto apresentam similaridades no que diz respeito aos requisitos físicos, químicos e mecânicos exigidos, sendo as exigências mais ou menos permissivas a depender do tipo de aplicação considerado (concreto não estrutural, estrutural e pré-fabricado).

Identifica-se também uma clara lacuna na norma brasileira no que diz respeito às especificações da dimensão do agregado, estipulando apenas os limites referentes aos percentuais de substituição do agregado reciclado. Para Alberte *et.al* (2021), é de suma importância fomentar o uso do agregado reciclado miúdo, com vistas a garantir sustentabilidade ao processo de reciclagem.

Observa-se que a norma brasileira apresenta conteúdos alinhados com as especificações de alguns países que já se encontram avançados no tema, a exemplo da Alemanha, Japão e Espanha. Entretanto, as normas necessitam de

constante atualização, de modo a minimizar suas limitações, apresentando também um maior detalhamento voltadas a direcionar o processo executivo, desde uso mais simples (pavimentação) até usos mais nobres (concreto estrutural) (ALBERTE *et al.*, 2021).

2.3 Propriedades características dos ARCO

Quando se analisa a incorporação de ARCO na produção de concretos, características importantes em relação a estes agregados devem ser consideradas, tais como composição granulométrica, teor de material pulverulento, massa específica, massa unitária e absorção de água.

De acordo com Tenório (2007), o conhecimento dessas características é tão importante quanto o conhecimento das propriedades do concreto, visto que, é a partir do entendimento das relações existentes entre esses dois conjuntos de dados que se pode proporcionar o emprego adequado e confiável dos agregados reciclados.

A seguir são avaliadas algumas propriedades dos agregados reciclados de concreto, as quais são fundamentais para a produção de concretos.

2.3.1 Composição granulométrica

De acordo com Malta (2012), os agregados reciclados de concreto, miúdo e graúdo, apresentam uma composição granulométrica mais contínua e com maior quantidade de finos oriundos da argamassa que se desprende do agregado natural.

Para Moraes *et al.* (2011), uma granulometria contínua permite maior possibilidade de interação entre as partículas, proporcionando maior compacidade, e maior resistência mecânica. Quanto ao estado fresco, de acordo com Metha e Monteiro (2014), a utilização de agregados com granulometria contínua possibilita a produção de concreto mais trabalháveis e econômicos. No estado endurecido, proporciona um concreto mais compacto, favorecendo a resistência à compressão e outras propriedades mecânicas (TERZIAN, 2005).

A granulometria dos agregados é um dos principais parâmetros para a dosagem do concreto, uma vez que exerce influência sobre a trabalhabilidade e

resistência mecânica. Para Arnold (2011), aspectos como módulo de finura, teor de finos e dimensão máxima do agregado, fornecidos através da composição granulométrica, também influenciarão a dosagem do concreto.

Alguns estudos afirmam que o agregado reciclado não se encaixa dentro de nenhuma faixa de graduações previstas em norma NBR 7211 (ABNT, 2009d) bem como apresentam valores de dimensão máxima características inferiores (CABRAL, 2007; MELO, 2019; MAIA *et al.*, 2022).

2.3.2 Material pulverulento

Os materiais pulverulentos são partículas minerais com dimensão inferior a 0,075 mm, presentes nos agregados, gerados no processo de reciclagem. Segundo a NBR 15116 (ABNT, 2021a), os teores de materiais pulverulentos podem atingir valores próximos a 15% em agregados provenientes de resíduos de concreto.

Na literatura (MARTINEZ *et al.*, 2016; PAN *et al.*, 2015; MALTA *et al.*, 2014) observa-se que os resíduos de concreto possuem teor de material pulverulento na faixa de 4% a 15%, e os resíduos mistos apresentarem teores mais elevados, entre 6% e 25%.

De acordo com Levy (2001), partículas finas (material com dimensão menor que 0,075 mm) possuem uma grande superfície específica e necessitam de maior quantidade de água para manter a trabalhabilidade desejada em uma mistura, o que pode provocar diminuição da resistência mecânica do concreto produzido.

Para Jimenez (2011), a presença de finos na mistura pode atuar como uma película sobre a superfície dos grãos e reduzir a aderência do agregado à pasta de cimento ou argamassa, prejudicando de forma direta a resistência do concreto.

2.3.3 Massa específica e massa unitária

De acordo com Metha e Monteiro (2014), para a dosagem de concretos é imprescindível avaliar o espaço ocupado pelas frações de agregado, abrangendo os poros no interior das partículas, através de uma unidade de volume. A NBR 16916 (ABNT, 2021b) e a NBR 16917 (ABNT, 2021c) são as normas que definem os procedimentos para o ensaio de massa específica dos agregados miúdo e graúdo, respectivamente. De acordo com estas, a definição da massa específica consiste na

relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo-se os vazios e poros permeáveis. No que se refere à massa unitária, a NBR 16972 (ABNT, 2021d) ressalta que pode ser definida como a massa das partículas dos agregados que ocupam uma unidade de volume, ou seja, o volume ocupado tanto pelos agregados quanto pelos vazios entre os grãos.

Para Cabral (2007), os agregados reciclados de concreto apresentam massa específica e massa unitária menores que as dos agregados naturais. Para o autor, a redução da massa específica ocorre em função das características dos componentes dos agregados reciclados, uma vez que estes são constituídos em parte pela argamassa do concreto original, já para a massa unitária essa redução é justificada pela própria densidade do material, influenciada também pela alta porosidade e a forma mais irregular das partículas dos agregados, permitindo o surgimento de vazios entre os grãos possibilitando essa redução.

Tabela 3– Dados relativos à massa unitária e massa específica dos agregados reciclados

Fração granulométrica	Tipo do agregado	Massa unitária (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)
Agregado graúdo	ARCO (1) (3) (4) (8) (9)	1,10 - 1,40	2,19 - 2,73
	ARM (2) (5)	1,02 - 1,29	1,93 - 2,64
Agregado miúdo	ARCO (1)(6) (7) (9)	1,14 - 1,46	1,92 - 2,67
	ARM (2) (4)	1,21 - 1,43	2,06 - 2,64

Fontes: (1) Cabral (2007); (2) Carneiro; (3) Cordeiro (2013); (4) Huda *et al.* (2014); (5) Bravo *et al.* (2015); (6) Cartuxo *et al.* (2015); (7) Evangelista *et al.* (2015); (8) Santos (2016); (9) Melo (2019)

É possível identificar, através da Tabela 3, uma grande dispersão entre os resultados de massa específica e massa unitária dos agregados reciclados. Contudo, é possível identificar maiores valores de massa específica e massa unitária em misturas contendo ARCO, evidenciando que estes apresentam menores variações no volume de materiais para produção de concretos, quando comparado com os ARM.

2.3.4 Absorção dos agregados

A absorção de água é uma propriedade de enorme importância, uma vez que se relaciona com a porosidade e com a resistência do material.

Gonçalves (2011) cita que os agregados reciclados de concreto possuem maior absorção de água quando comparados aos agregados naturais e isto pode promover uma redução na relação água/cimento interna, principalmente em regiões próximas ao agregado graúdo, resultando numa “cura interna” na zona de transição capaz de melhorar as propriedades do concreto.

Entretanto, de acordo com Leite (2001), a redução da relação água/cimento interna pode resultar em pastas excessivamente mais secas, prejudicando, portanto, a sua trabalhabilidade. Ainda de acordo com o autor supracitado, essa redução pode afetar o processo de hidratação do cimento, deixando uma elevada quantidade de partículas de cimento não hidratadas.

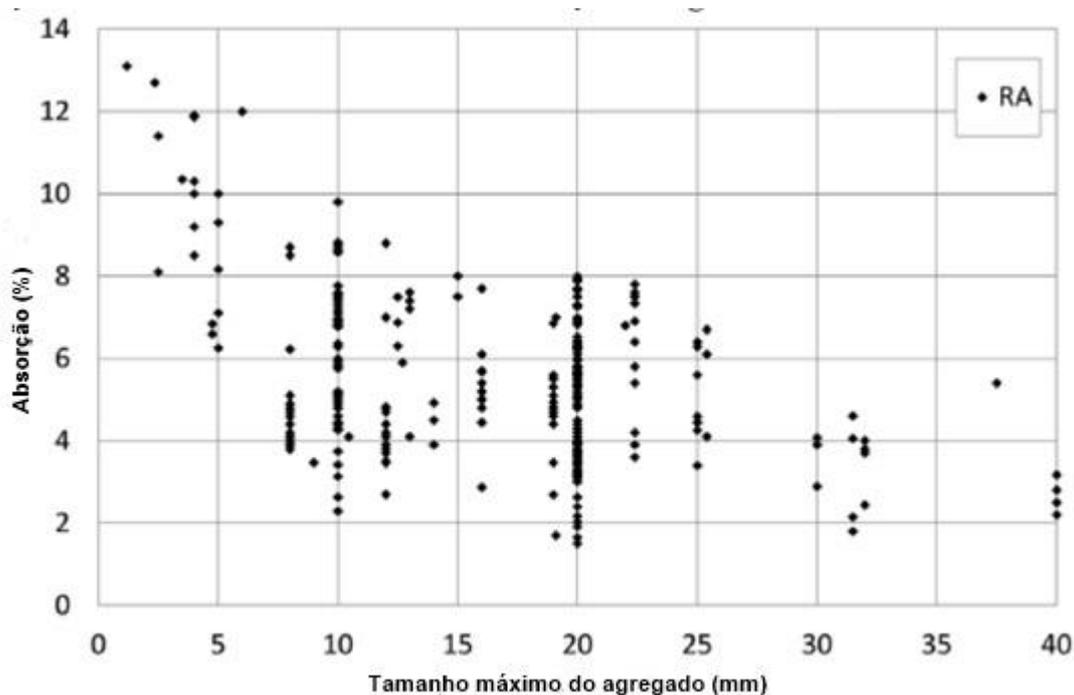
Este fato é corroborado por outros estudos, a exemplo dos trabalhos de Gonçalves (2011) e Mariano (2017), nos quais os autores constataram perda significativa da trabalhabilidade devido à maior absorção de água e pelo fato do AGRC possuir superfícies mais ásperas e formato lamelar.

Para Marmash (2000), o tipo de processamento é outro fator que influencia na taxa de absorção. Quando o processamento do agregado graúdo é feito a partir de sucessivas triturações, elimina-se uma maior quantidade de argamassa aderida e a qualidade do material melhora consideravelmente, em virtude da diminuição da absorção e do aumento da densidade.

Ainda no que concerne à absorção Butler (2003), Cabral (2007) e Werle (2010) observaram em seus estudos que os agregados graúdos reciclados de concreto, possuem uma alta taxa de absorção de água durante os primeiros 10 minutos de imersão, chegando a absorver cerca de 85% de toda a capacidade de absorção de água, com pouca variação no intervalo de 10 a 30 minutos.

Gonzalez-Taboada et al. (2016) analisaram um banco de dados com centenas de artigos, e observaram que os resultados de absorção de AGRC apresentam valores variando entre 1,12% a 8,82% com média de 5,06%. Para o AMRC foram encontrados valores entre 6,84% e 13,10% com média de 9,89%, conforme observado na Figura 3.

Figura 3- Relação entre o tamanho do ARCO e a absorção de água



Fonte: Adaptado de González-Taboada *et al.* (2016)

2.4 Propriedades dos concretos com ARCO no estado fresco

2.4.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto pode ser resumida como a quantidade de trabalho interno necessário para atingir a compactação máxima do material (NEVILLE, 2016).

No que diz respeito à trabalhabilidade, para atingir os mesmos valores de abatimento de concretos produzidos com agregados naturais, os concretos com agregados reciclados necessitam de mais pasta de cimento. Essa situação se deve, possivelmente, à maior absorção de água dos agregados graúdos reciclados, tornando a mistura mais seca. Além disso, devido ao formato lamelar dos AGRC, estes possuem uma maior fricção interna, fazendo com que seja necessário aumentar o teor de pasta para manter a mesma trabalhabilidade de concretos com agregados naturais (RAKSHVIR; BARAI, 2006).

Para Neville (1997), o teor de água nas misturas é o principal fator que influencia a trabalhabilidade, independentemente da relação a/c e do consumo de

cimento para determinado tipo de agregado. Quanto menor e mais anguloso o agregado, maior será o teor de água necessário para alcançar o abatimento pretendido. Quando o traço e a relação a/c são fixados, a trabalhabilidade irá depender somente da granulometria, textura e forma dos agregados.

De acordo com Metha e Monteiro (1994), a trabalhabilidade é uma propriedade composta de pelo menos dois componentes principais: consistência, que descreve a facilidade de mobilidade no concreto fresco, e a coesão, que descreve a resistência à exsudação ou à segregação.

Evidenciado que o agregado reciclado influencia diretamente na trabalhabilidade, diversos estudos foram realizados ao longo dos anos, conforme apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 - Trabalhos que utilizaram ARCO com alteração na trabalhabilidade

Autores	Dimensão do ARCO	Percentual de substituição	Principais resultados
Shi- Cong <i>et al.</i> (2012)	AGRC	0%,15%,30%,50%	A trabalhabilidade do concreto variou dentro da faixa de 170 mm a 280 mm, os autores afirmam que isso se deve ao fato do agregado ter sido utilizado em condições de secagem normal de secagem ao ar.
Tahar <i>et al.</i> (2017)	AGRC e AMRC	15%, 30%, 70% e 100%	Perda de trabalhabilidade influenciada pela substituição do agregado natural por reciclado. Para os autores, a perda de trabalhabilidade é menor com a substituição do agregado graúdo quando comparada à utilização do agregado miúdo reciclado.
Silva, Brito e Dhir (2019)	AGRC e AMRC	50% e 100%	Ressalta a influência da absorção dos agregados reciclados na trabalhabilidade dos concretos, elencando a importância da pré saturação como alternativa de compensação, comprovando através de bons resultados em suas misturas.

Fonte: Autor (2023)

Analisando o quadro 4 pode se observar através dos autores a influência do agregado reciclado na trabalhabilidade principalmente para percentuais acima de 20% atualmente regulamentado pela NBR 15116 (ABNT, 2021a).

Conforme os resultados apresentados pelos autores, a fim de obter misturas com uma trabalhabilidade adequada para as aplicações usuais, faz-se necessário aumentar o fator a/c uma vez que os agregados reciclados absorvem parte da água

de amassamento, bem como utilizar misturas com teor de argamassa mais altos e conseqüentemente uma maior quantidade de cimento, e por fim, a utilização de aditivos superplastificantes.

Observa-se também que misturas produzidas com AGRC até 20% apresentaram resultados satisfatórios nas propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido, apresentado valores similares aos concretos de referências, evidenciado desta forma, pouca interferência do agregado (MATIAS *et al.*, 2013; SANTOS, 2016). Por outro lado, para Tahar *et al.* (2017) a trabalhabilidade é reduzida com a inserção do (AGRC), em comparação as misturas produzidas com o agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC), evidenciado a interferência da granulometria nas propriedades no estado fresco.

Destaca Tenório (2007) que nos agregados reciclados fatores como a maior presença de grãos mais finos (teor de finos e/ou materiais pulverulentos), a forma mais lamelar ou angular dos grãos, a textura superficial mais rugosa e a maior porosidade (que tanto aumenta a rugosidade das partículas quanto permite ao agregado absorver parte da água de mistura) podem prejudicar a consistência do concreto.

Para Veras (2012), para a confecção do concreto com agregado reciclado deve-se ter uma atenção especial, visto que esse tipo de agregado possui uma maior capacidade de absorção de água interferindo diretamente na redução da trabalhabilidade, e exigindo, na maioria das vezes, uma correção no traço para manter as características do concreto natural, de forma a não afetar tanto o consumo de cimento e a resistência à compressão.

2.4.2 Massa específica do concreto no estado fresco

Os agregados reciclados de concreto detêm menor massa específica do que os agregados convencionais por serem compostos por materiais variáveis e com presença de partículas pulverulentas e elevada porosidade, impactando em maiores valores de absorção de água e de teor de pulverulentos em comparação aos agregados convencionais. A análise de alguns estudos comprova a ocorrência deste comportamento no concreto reciclado (CABRAL *et al.*, 2010; ARAÚJO *et al.*, 2016; FIGUEREDO; VARGAS, 2016; SOUZA, 2018).

De acordo com Metha e Monteiro (2014), a massa específica do concreto no estado fresco depende, além da massa específica do agregado e de sua porosidade, da sua textura e do seu tamanho.

Para Latterza (1998), a massa específica do concreto é influenciada pela massa específica menor do agregado reciclado o que faz com que o concreto se situe no limite entre concretos leves e convencionais.

2.5 Propriedades dos concretos no estado endurecido

2.5.1 Absorção dos concretos

Segundo Levy (2001), os concretos com ARCO se caracterizam por uma maior capacidade de absorção de água, sendo mais evidente no AMRC em comparação ao AGRC. Diferente do que ocorre em concretos com agregados naturais, nos concretos com agregados reciclados, a absorção e o índice de vazios não dependem exclusivamente da pasta do cimento, tendo os agregados grande influência. Em seu estudo, o autor verificou, utilizando agregado graúdo reciclado de concreto e deixando fixa a quantidade de pasta, que com o aumento do teor de agregados reciclados houve um aumento da absorção, assim como do índice de vazios. Essa maior capacidade de absorção dos concretos reciclados pode ser atribuída ao maior diâmetro dos poros capilares maiores e à proporção em volume dos capilares de menor diâmetro, o que os tornará a priori mais suscetíveis à ação dos agentes agressivos.

Sousa (2018) e Nanya (2018) concluíram em suas pesquisas que os concretos produzidos com agregados reciclados proveniente da cominuição do concreto, tendem a aumentar as taxas de absorção numa margem de 50% a 80% dos valores observados nos concretos convencionais, pelo fato de existir vários fatores que vêm influenciando essa propriedade de maneira negativa.

2.5.2 Resistência à compressão

O controle de qualidade do concreto tem grande importância na engenharia civil. Para isso diversos ensaios são necessários, entre eles, pode-se citar a resistência à compressão axial do concreto endurecido.

De acordo com Oliveira (2018), são vários os fatores que influenciam a resistência à compressão, tais como: idade do concreto (a resistência aumenta com o passar do tempo), qualidade dos agregados (propriedades físicas, comportamento mecânico, características morfológicas e composição química), a relação água/cimento (quanto maior for o teor de água para uma mesma massa de cimento, menor será a resistência do concreto).

Diversos estudos já foram realizados sobre a resistência à compressão axial de concretos fabricados com ARCO, concluindo que, para um mesmo consumo de cimento, a resistência é menor em concretos com agregados reciclados (MOREIRA, 2010; SILVA *et al.*, 2014; ZANGESKI *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2019, entre outros).

Os autores atribuem esses resultados à maior porosidade, menor resistência e formato normalmente mais lamelar destes agregados.

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

A respeito do percentual de substituição, Riaz *et al.* (2016) sugeriram que até 25% de substituição do agregado natural pelo ARCO praticamente não interfere na resistência do concreto.

Para Serifou *et al.* (2013), a resistência à compressão diminui gradualmente em relação ao aumento da porcentagem de ARCO. Além disso este comportamento não depende do tamanho dos grãos para concretos feitos com agregados reciclados de concreto com dimensão máxima inferior a 12,5 mm.

De um modo geral, diversos autores concluíram que é possível variar os teores de substituição de agregados reciclados pelo agregado natural na produção de concreto com e sem função estrutural, evidenciando resultados satisfatórios nas propriedades mecânicas dos concretos, conforme apresentados nas tabelas 4 e 5 (EVANGELISTA; BRITO *et al.*, 2010; CORINALDESI, 2011; PRASADA; MADHAVI,

2013; GOMES *et al.*, 2014; RANGEL, 2015; FROTTÉ *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2019; LY; FAR, 2019; AFRICANO, 2021).

2.5.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade determina o valor da rigidez de um material, ou seja, está relacionado à sua resistência; quanto maior é o seu valor, maior é o esforço a ser feito para deformar um material. Hoje esse conhecimento é uma ferramenta imprescindível para análise de projetos estruturais relacionados com as deformações e os modos de vibrações causadas pelas cargas aplicadas às estruturas (METHA; MONTEIRO, 2014).

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

A porosidade é uma das propriedades que mais afetam o módulo de elasticidade do concreto. Isso se deve ao fato de que a porosidade do agregado determina sua rigidez, o que, por sua vez, controla a capacidade do agregado de resistir à deformação da matriz (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os concretos reciclados, no geral, apresentam diminuição do módulo de elasticidade com o incremento de agregado miúdo reciclado de concreto em suas misturas (EVANGELISTA; BRITO, 2007). Esse fator é atribuído à relação a/c , à porosidade, ao teor e à massa específica dos agregados reciclados, que são algumas das variáveis que mais influenciam os valores do módulo de elasticidade.

Para Cabral *et al.* (2007), a redução do módulo de elasticidade tende a diminuir à medida que se eleva o teor de substituição, essa redução ocorre devido à maior porosidade dos AGRC em comparação aos agregados convencionais, logo, concretos contendo esses tipos de agregados tendem a ser menos rígidos.

Araújo *et al.* (2016) encontraram reduções médias de módulo de elasticidade numa margem de 6 a 12 %, para os autores essa redução foi influenciada pelos teores de substituição dos agregados naturais pelo reciclados. Resultados semelhantes foram encontrados no trabalho de Figueiredo e Vargas (2016) em que o módulo de elasticidade reduziu até 11%, 24% e 60% ao utilizar agregados

reciclados de concreto nas porcentagens de 30%, 60% e 100% em relação ao concreto convencional.

Seguindo a linha de raciocínio dos pesquisadores Metha e Monteiro (2008), se um concreto for produzido com agregados de maior porosidade ou menor massa específica os módulos de elasticidade poderão não alcançar a mesma ordem de grandeza quando comparados aos módulos de elasticidades de concretos produzidos com agregados mais densos.

2.6 Panorama atual dos concretos desenvolvidos com ARCO

Neste tópico, serão apresentados e discutidos dados reportados na literatura de alguns autores que utilizaram o agregado reciclado de concreto em suas pesquisas, apresentando algumas informações referentes as dosagens, propriedades dos concretos no estado fresco e no estado endurecido.

A Tabela 4 apresenta os dados da literatura utilizado pelos autores abaixo mencionados, apresentando dados como: percentual de substituição do agregado reciclado, diâmetro máximo do agregado, Módulo de finura, e o proporcionamento do traço em massa.

Tabela 4: Dosagens em massa das pesquisas

Autores	Percentual de substituição (%)	Diâmetro máximo do agregado (mm)	Módulo de finura	Proporcionamento (em massa)	Método de dosagem
Serifou <i>et al.</i> (2013)	0,50,100	10	-	-	Literatura
Africano (2021)	25,50,75,100	19	6,89	1:2,625:2,75:0,55	Literatura
Gomes (2021)	0,100	19	6,79	1:1,55:2,78:0,5	ABCP
Santos (2016)	20,40	19	6,71	Vários	IPT/ ABCP
Costa (2021)	0,25	4,75	3,15	Vários	MEC
Rangel (2011)	0,25,50	9,5	-	Vários	MEC
Reis <i>et al.</i> (2021)	0,20,50,100	4,75 e 19	2,31 e 6,38	Vários	ABCP
Ly e Far (2019)	0,25,50,100	10 e 20	-	Vários	Literatura
Maia <i>et al.</i> (2022)	100	19	-	1:1,98:3,12:0,6	ABCP

Fonte: Autor (2023)

Analisando a Tabela 4, no que se refere ao percentual de substituição do agregado reciclado é possível observar uma diversidade de valores utilizado na

literatura, apresentando inclusive na maioria dos trabalhos percentuais superiores ao regulamentado na NBR 15116 (2021a), com resultados satisfatórios e critérios atendidos para função estrutural.

Observa-se também que a maioria das pesquisas apresentadas preferem utilizar agregados graúdos reciclados com diâmetro máximo de 19 mm, isto pode ser justificado pela baixa absorção destes agregados em comparação àqueles de menor diâmetro haja vista a sua elevada porosidade. Entretanto, é possível utilizar agregados reciclados com dimensões menores que 19mm sem influenciar negativamente a mistura, realizando-se um estudo de dosagem e buscando minimizar a absorção dos concretos produzidos, conforme observado nos trabalhos desenvolvidos por Costa (2021) e Reis (2021).

Para o módulo de finura dos ARCO são encontrados valores próximos para uma mesma granulometria, apresentando valores superiores aos agregados naturais. Em relação ao traço, existem algumas variações a depender da: granulometria do agregado, do tipo de cimento, utilização de aditivos e adições, fator a/c, a fim de atender as propriedades no estado fresco e endurecido dos concretos.

Observa-se que os métodos de dosagem utilizados pelos autores reportados na literatura são distintos, reportando que não existe um método específico a ser utilizado em misturas cimentícias com agregado reciclado, contudo, o método da ABCP foi utilizado em 4 das 9 pesquisas reportadas da literatura e apresentadas na Tabela 4.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados obtidos na literatura, no estado fresco e na Tabela 6 os valores alcançados no estado endurecido, em estudos nos quais foram utilizados ARCO.

Tabela 5: Propriedades dos concretos com agregados reciclados no estado fresco

Autores	Ensaio	
	Espalhamento (mm)	Massa específica (kg/m ³)
Serifou et.al (2013)	-	-
Africano (2021)	-	-
Gomes (2021)	190-900	2.207,08 - 2.463,5
Santos (2016)	350-400	-
Costa (2021)	55-140	-
Rangel (2015)	100-135	-
Reis <i>et al.</i> (2021)	23-91	-
Ly e Far (2019)	95-180	2.229 - 2.299
Maia <i>et al.</i> (2022)	30-120	-

Fonte: Autor (2023)

Analisando a Tabela 5 é possível perceber os valores de trabalhabilidade encontrados através do ensaio do *slump test*. De maneira geral observa-se que a inserção dos agregados reciclados influencia diretamente na trabalhabilidade dos concretos, devido a diversos fatores, dentre estes destaca-se a absorção oriundas dos agregados de ARCO. Esta influência da absorção dos agregados, como efeito negativo na trabalhabilidade, é mais evidente nos trabalhos de Gomes (2021), Reis (2021) e Maia *et al.* (2022), justamente autores que utilizaram percentuais de substituição acima de 50%. No que se refere à massa específica, os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram menores valores.

Tabela 6: Propriedades do estado endurecido de concretos com ARCO

Autores	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)							Módulo de Elasticidade (GPa)							Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Massa específica (kg/m ³)
	0	15	20	25	40	50	100	0	15	20	25	40	50	100			
Substituição (%)	0	15	20	25	40	50	100	0	15	20	25	40	50	100	-	-	-
Serifou <i>et al.</i> (2013)	26,00	-	-	-	-	22,0	19,00	-	-	-	-	-	-	-	4,3- 13,0	-	-
Africano (2021)	41,18	-	-	-	-	34,69	34,78	25,67	-	-	-	-	24,81	24,40	2,48-2,83	5,92-6,44	2,39- 2,34
Gomes (2021)	30,46	-	-	-	-	-	15,11	30,93	-	-	-	-	-	21,76	-	-	2,20- 2,46
Santos (2016)	-	-	35,10	-	30,20	-	-	-	-	31,40	-	32,50	-	-	-	-	-
Costa (2021)	30,70	31,50	-	38,30	-	-	-	20,60	21,30	-	24,90	-	-	-	2,37- 6,32	5,33- 12,8	2,19- 2,24
Rangel (2015)	27,50	-	-	26,90	-	26,50	-	20,80	-	-	21,90	-	21,80	-	-	-	-
Reis (2021)	27,90	-	33,20	-	-	27,20	25,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maia <i>et al.</i> (2022)	32,32	-	-	-	-	-	25,34	-	-	-	-	-	-	-	5,65-8,78	-	-

Fonte: Autor (2023)

Analisando a Tabela 6, com os dados do concreto no estado endurecido reportados na literatura, é possível perceber valores de resistência à compressão com resultados satisfatórios e percentuais de substituição distintos, com resultados de resistência superiores a 20 MPa, atendendo as recomendações da NBR 6118 (2014), podendo desta forma ser utilizado para função estrutural.

Diante dos resultados reportados na literatura, utilizando-se os dados de dosagens, propriedades nos estados fresco e endurecido dos concretos, observa-se que é possível perceber a viabilidade da utilização de agregados reciclados de concreto em misturas cimentícias para fins estruturais. Os trabalhos apresentam resultados aceitáveis substituindo-se de 20% a 25% do agregado natural por reciclado, apresentando resultados similares à mistura convencional em relação à resistência à compressão e trabalhabilidade.

Entretanto, nas pesquisas que utilizaram percentuais de substituição em torno de 50% ou mais, observa-se que a trabalhabilidade das misturas apresentou valores de espalhamento baixos (REIS, 2021; MAIA, 2022), evidenciado a interferência do ARCO na trabalhabilidade. Autores como Africano (2021) não apresentaram dados dos concretos no estado fresco, porém este apresentou resultados de resistência à compressão com valores significativos para fins estruturais, com percentuais de substituição acima de 50%.

Desta forma, é importante que o concreto possua resultados de espalhamento satisfatórios, com o intuito de permitir uma maior aplicabilidade destes. Além do percentual de substituição, a granulometria do agregado influencia nas propriedades dos concretos, corroborando com os resultados de Reis (2021) e Costa (2021), autores que utilizaram agregados de AMRC.

Hafez *et al.* (2020) realizaram uma revisão crítica da aplicabilidade do agregado miúdo reciclado em concretos. De acordo com os autores, baseados nos levantamentos feitos, apresentam como conclusão de que a introdução de agregado miúdo reciclado é prejudicial à resistência mecânica. Isso ocorre por diversos aspectos, sendo o principal deles a necessidade de aumento da quantidade de água, e conseqüentemente aumento da a/c, a fim de conseguir uma trabalhabilidade próxima à da mistura com agregado natural.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia aplicada na etapa experimental do trabalho. Em seguida, é feita uma descrição da obtenção dos agregados reciclados e de suas propriedades, bem como das propriedades dos agregados naturais e dos demais materiais usados na composição dos concretos.

Segundo as definições de Gil (2010), a pesquisa classifica-se como descritiva, por “descrever as características do universo pesquisado”, explanatória, por “ter como objetivo proporcionar maior familiaridade com o objeto de estudo ou problema” e bibliográfica, isto é, “elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de artigos de periódicos, livros”.

A figura 4 apresenta o fluxograma experimental desta pesquisa, e na sequência são estabelecidas as variáveis de cada etapa.

Figura 4 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autor (2023)

3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa é o CP II-F 32, devido à disponibilidade local. O Quadro 5 e o Quadro 6 apresentam as características químicas e físicas requeridas por norma, respectivamente.

Quadro 5 – Requisitos químicos do cimento Portland CPII-F

	Resultados
Resíduo insolúvel	≤ 7,5
Perda ao fogo	≤ 12,5
Óxido de magnésio (MgO)	-
Trióxido de enxofre (SO ₃)	≤ 4,5

Fonte: adaptada da NBR 16697 (ABNT, 2018)

Quadro 6 – Características físicas e mecânicos do cimento Portland CPII-F

Características avaliadas	unidade	Resultados
Finura	%	≤12
Tempo de início de pega	min	≥60
Tempo de fim de pega	min	≤ 600
Expansibilidade a quente	mm	≤5
Expansibilidade a frio	mm	≤5
Resistência à compressão 1 dias	MPa	-
Resistência à compressão 3 dias	MPa	≥ 8,0
Resistência à compressão 7 dias	MPa	≥ 15,0
Resistência à compressão 28 dias	MPa	≥ 25,0
Resistência à compressão 91 dias	MPa	-
Índice de brancura	-	-
Enxofre na forma de sulfeto	%	-
Anidrido carbônico (CO ₂)	%	≤ 11,5

Fonte: adaptada da NBR 16697 (ABNT, 2018)

3.1.2 Agregado graúdo natural

Como agregado graúdo natural utiliza-se uma pedra britada de origem granítica, com dimensão máxima característica de 12,5 mm, proveniente do estado de Alagoas. O agregado foi lavado para retirada do material pulverulento ou qualquer impureza que pudesse conter e, posteriormente, foi seco em estufa a uma temperatura de 100 °C durante um período mínimo de 24 horas.

Optou-se por limitar a dimensão máxima característica do agregado graúdo a 12,5 mm, considerando-se a demanda de agregado graúdo com essas dimensões nas pedreiras locais.

3.1.3 Agregado miúdo natural

No que concerne ao agregado miúdo natural utiliza-se uma areia natural média oriunda de jazida situada no estado de Alagoas, o agregado foi seco em estufa a uma temperatura de 100 °C durante um período mínimo de 24 horas.

3.1.4 Agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)

Os agregados graúdos reciclados de concreto são originados do rompimento de corpos de prova (CP) de concreto com resistência média à compressão de 33 MPa, provenientes do controle de qualidade de construtoras e disponibilizados pelo Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA).

O processo de beneficiamento foi realizado por Silva *et al.* (2019), os quais descrevem que inicialmente os corpos de prova foram rompidos para obter a resistência à compressão, deixando-se fragmentar para diminuir o tamanho dos resíduos, devido à limitação na abertura dos britadores (britador de mandíbula e britador de martelos). Após o rompimento, os resíduos foram fragmentados de forma manual com o auxílio de uma marreta.

Na etapa de cominuição, a amostra foi fragmentada em dois britadores distintos. O britador de mandíbulas foi regulado para obter agregados com dimensões máximas de 25 mm, nesta etapa a amostra precisou passar 3 vezes pelo equipamento até restar muito pouco ou quase nada de material retido na peneira 25 mm. Essa amostra retida foi levada ao moinho de martelos, o qual possui uma grade fixa com abertura máxima de 21 mm, o que faz com que sejam produzidos agregados graúdos com dimensões menores que 25 mm, segundo Silva *et al.* (2019). Desse modo, pode ser obtido todo o agregado reciclado com apenas uma passagem no britador.

Para a presente pesquisa, todo o agregado reciclado beneficiado por Silva *et al.* (2019) foi misturado manualmente, em seguida, foi separado em agregados graúdo e miúdo, utilizando as peneiras estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT,

2009d). Como dimensão máxima para o agregado graúdo foi utilizado à peneira de 12,5 mm, desta forma, todo o material passante por essa peneira e retido na peneira de 4,75 mm ficou classificado como agregado graúdo. Optou-se por fixar a dimensão máxima do AGRC em 12,5 mm, com o intuito de manter o mesmo parâmetro do agregado graúdo natural.

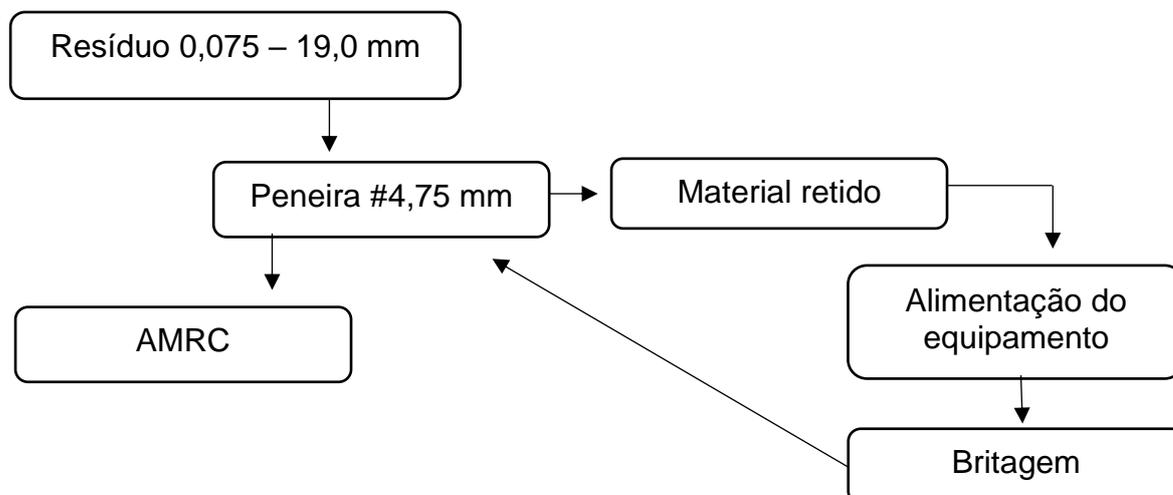
3.1.5 Agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC)

Para obtenção do agregado miúdo reciclado de concreto, o processo de cominuição foi o mesmo do agregado graúdo. Como limitação, para classificação como agregado miúdo, era necessário que o agregado se enquadrasse entre as peneiras 0,075 mm e 4,75 mm. Todo o material passante pela peneira de 0,075 mm foi considerado como material pulverulento e descartado. Desta forma, devido a pouca quantidade de agregado miúdo originado do processo de beneficiamento, fez-se necessário submeter todo o material retido na peneira de 12,5 mm a um novo processo de cominuição.

Na segunda etapa de beneficiamento (cominuição), a fim de obter a parcela de agregado miúdo requerida para as produções, utilizou-se o britador de mandíbulas no limite mínimo de abertura entre as placas, o que promove a saída do material reciclável em dimensões compatíveis a faixa granulométrica do agregado miúdo.

A Figura 55 apresenta o fluxograma do procedimento adotado para beneficiamento do resíduo e obtenção do AMRC, utilizando-se o britador de mandíbulas aliado ao peneiramento.

Figura 5 - Fluxograma simplificado do processo de beneficiamento do AMRC



Fonte: Autor (2023)

3.1.6 Água

Na produção dos concretos foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento de água da Universidade Federal de Alagoas.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Para se ter conhecimento das propriedades físicas na seleção dos agregados, os ensaios de caracterização seguem as recomendações das normas brasileiras contidas no Quadro 7.

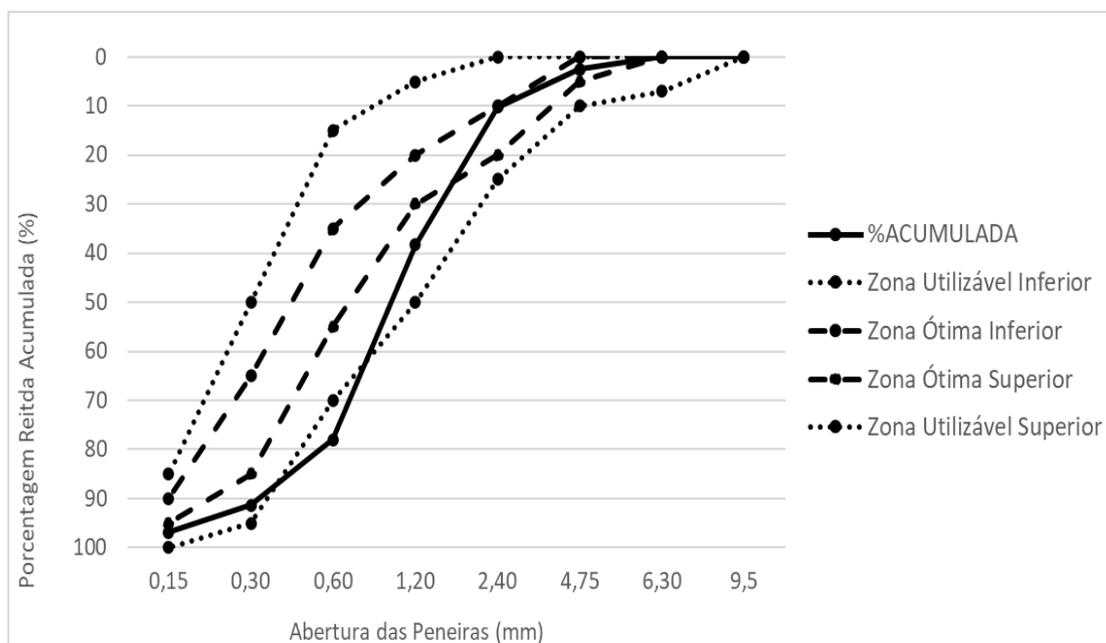
Quadro 7 – Ensaios e normas utilizados para caracterização dos agregados

Ensaio	Normas	
	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo
Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003a)	
D _{máx} e MF	NBR 7211 (ABNT, 2009d)	
Material pulverulento	NBR NM 16973 (ABNT, 2021e)	
Massa unitária	Estado Compactado (Método A), NBR 16972 (ABNT, 2021d)	
Absorção de água	NBR 16916 (ABNT, 2021b)	NBR 16917 (ABNT, 2021c)
Massa específica	NBR 16916 (ABNT, 2021b)	NBR 16917 (ABNT, 2021c)

Fonte: Autor (2023)

Na Figura 6 apresenta-se a curva granulométrica do agregado miúdo natural utilizado na elaboração deste trabalho, e na Tabela 7, as características físicas.

Figura 6 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural



Fonte: Autor (2023)

A Figura 6 mostra que a distribuição granulométrica do agregado miúdo natural está situada mais próximo da zona utilizável superior, apresentando apenas um ponto fora, correspondente à peneira de 0,6 mm, de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009d).

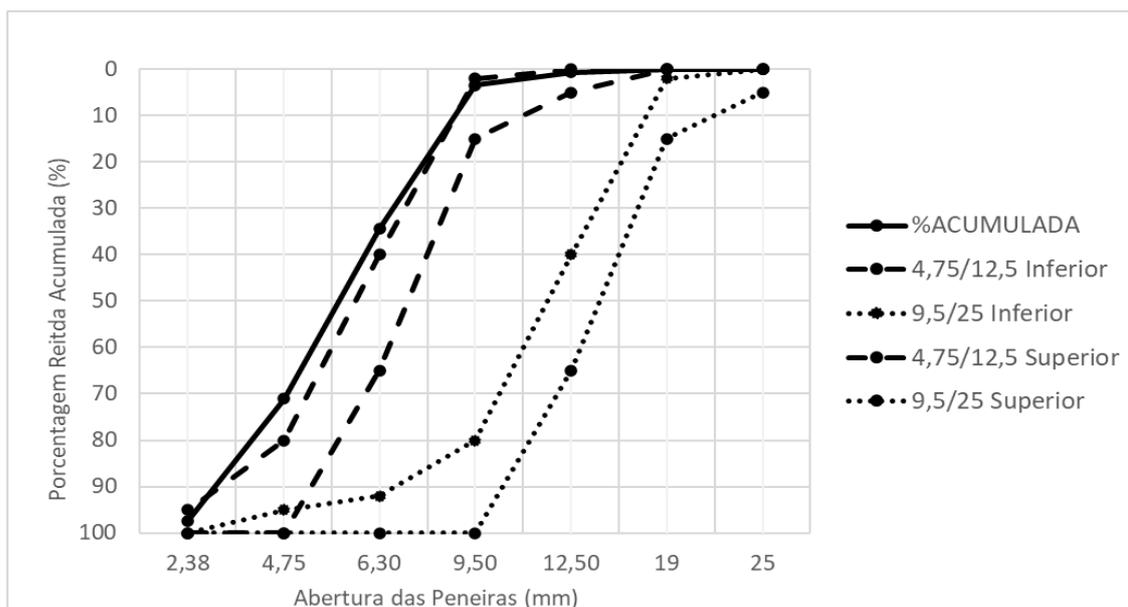
Tabela 7 – Características físicas do agregado miúdo natural

Características físicas do agregado miúdo	Resultados
Módulo de finura (mm)	3,17
Dimensão máxima característica (mm)	4,75
Massa unitária no estado compactado (g/cm ³)	1,54
Massa específica (g/cm ³)	2,33
Massa específica saturada superfície seca (g/cm ³)	2,36
Absorção de água (%)	0,86
Teor de Material pulverulento (%)	4,15

Fonte: Autor (2023)

A distribuição granulométrica do agregado graúdo natural está mostrada na Figura 7, e na Tabela 8, as características físicas destes agregados.

Figura 7 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural



Fonte: Autor (2023)

Tabela 8 – Características físicas do agregado graúdo natural

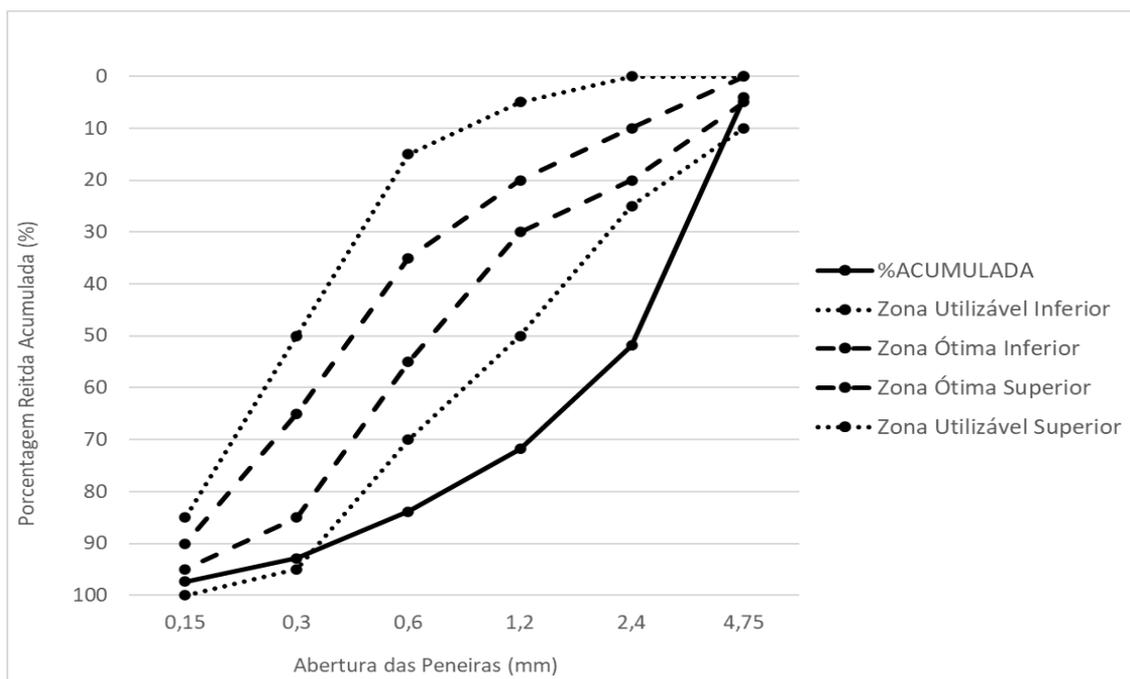
Características físicas do agregado miúdo	Resultados
Dimensão máxima característica (mm)	12,5
Massa unitária no estado compactado (g/cm ³)	1,46
Massa específica (g/cm ³)	2,57
Massa específica saturada superfície seca (g/cm ³)	2,59
Absorção de água (%)	1,26
Teor de Material pulverulento (%)	-

Fonte: Autor (2023)

A Figura 7 mostra que o agregado graúdo com dimensão máxima característica de 12,5 mm apresenta parte de suas partículas dentro da faixa que compreende os limites da zona 4,75mm/12,5mm inferior como também percentuais de massa retida acumulada abaixo desta zona nas peneiras de 4,75 mm e 6,30 mm.

No que concerne à caracterização dos agregados reciclados de concreto, as distribuições granulométricas dos agregados miúdo e graúdo estão apresentadas na Figura 8 e Figura 9, respectivamente, e as características dos agregados reciclados (miúdos e graúdos) estão apresentados na Tabela 9.

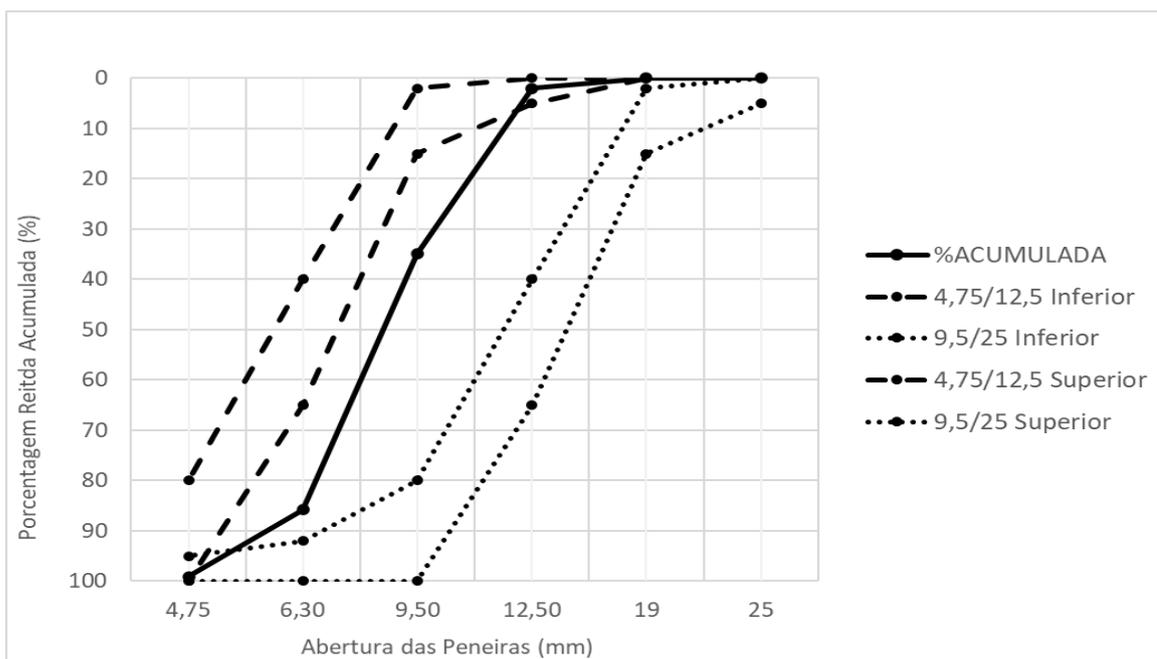
Figura 8 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC)



Fonte: Autor (2023)

Analisando a Figura 8, percebe-se que o agregado miúdo reciclado se encontra quase que totalmente fora das zonas granulométricas especificadas na NBR 7211 (ABNT, 2009d).

Figura 9 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)



Fonte: Autor (2023)

Analisando a Figura 9, percebe-se que o agregado graúdo reciclado de concreto não se situou dentro das zonas 4,75/12,5 e 9,5/25.

Tabela 9 – Características físicas dos agregados reciclados

Características físicas do agregado miúdo	Resultados	
	AMRC	AGRC
Módulo de finura (mm)	4,02	-
Dimensão máxima característica (mm)	4,75	12,5
Massa unitária no estado compactado (g/cm ³)	1,47	1,34
Massa específica (g/cm ³)	1,99	2,07
Massa específica saturada superfície seca (g/cm ³)	2,13	2,16
Absorção de água (%)	6,84	4,31
Teor de material pulverulento (%)	2,97	-

Fonte: Autor (2023)

Diante da Tabela 9, é possível observar que o AMRC e AGRC apresentaram massas específicas menores que as dos agregados naturais (Tabela 7 e Tabela 8), como já era esperado. Quanto aos requisitos que devem ser atendidos para uso previsto dos agregados reciclados como insumos em concretos, os valores de absorção de água foram atendidos, conforme a NBR 15116 (ABNT, 2021a), sendo limitado a 7% para agregado reciclado de concreto. Em relação ao valor do teor de material pulverulento, também se mostrou aceitável, uma vez que atende aos limites pré-estabelecidos pela referida norma, sendo 15% o limite máximo para agregado miúdo.

Levando em consideração as composições granulométricas dos agregados apresentadas, observou-se que existe um déficit de materiais em algumas peneiras, fazendo com que os agregados apresentem pontos fora das zonas utilizável e ótima, principalmente para os ARCO.

3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

3.3.1 Definição das dosagens

Inicialmente para definição das dosagens optou-se por utilizar o método da ABCP- Associação Brasileira de Cimento Portland, pela facilidade de obtenção de concreto convencional e concordando com outros trabalhos reportados na literatura que utilizaram o mesmo método em misturas produzidas com agregados reciclados apresentado na Tabela 4.

A partir do traço obtido com a aplicação do método ABCP, para concretos convencionais, foram feitas as devidas substituições dos agregados naturais por ARCO. Na utilização deste método, definiu-se a resistência à compressão do concreto de 20 MPa, valor mínimo para aplicações estruturais segundo as recomendações normativas. Vale ressaltar que, todo o cálculo de dosagem realizado utilizou-se da quantidade em massa do agregado natural, com isso, para as misturas produzidas com ARCO, realizou-se apenas a substituição do tipo de agregado mantendo-se a quantidade em massa do agregado natural.

O programa experimental aqui apresentado está desenvolvido para determinar as propriedades do concreto confeccionado em 3 diferentes composições de agregados reciclados de concreto (somente com o agregado graúdo, somente com o agregado miúdo e a combinação de ambos) em diversos teores de substituição, sempre tendo como referência o concreto convencional.

As substituições do agregado natural por agregado reciclado se deram nos teores de 25%, 50%, 75% e 100%. O teor de 25% foi utilizado por ser um percentual próximo à recomendação normativa para o uso de ARCO em concretos. Os demais teores decorrem da análise dos trabalhos reportados da literatura, chegando-se até a substituição total de agregados naturais por reciclados.

Desta forma, foram produzidas e moldadas 13 misturas, sendo que os concretos receberam as seguintes nomenclaturas:

- O primeiro termo refere-se ao material utilizado: CR - concreto reciclado, CCV- concreto convencional;
- O segundo termo refere-se ao percentual de substituição do agregado reciclado: 25%, 50%, 75% e 100%;

- O terceiro termo refere-se ao tipo de agregado reciclado que foi substituído: AG - agregado graúdo, AM - agregado miúdo, e AMG - agregados miúdo e graúdo.

Seguindo o método de dosagem da ABCP, inicialmente foi definida a relação água/cimento utilizando a curva de Abrams, adotando para o estudo de dosagem o cimento CII F para um concreto com resistência de 20 MPa aos 28 dias. Desta forma, foi encontrado um a/c de 0,5. Vale ressaltar que este a/c atende às recomendações prescritas na NBR 6118 (ABNT, 2014) em função da correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto, conforme apresentado no Quadro 8 e Quadro 9. Para o caso em questão foi considerado uma classe de agressividade II.

Quadro 8 – Classe de agressividade ambiental

Classe de agressividade Ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito Forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014)

Quadro 9 – Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
Relação a/c em massa	CA	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
	CP	≤0,60	≤ 0,55	≤0,50	≤0,45
Classe de Concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥C20	≥C25	≥C30	≥C40
	CP	≥C25	≥C30	≥C35	≥C40

CA: Correspondente a componentes e elementos estruturais de concreto armado.
 CP: Correspondente a componentes a elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014)

A seguir, apresenta-se o passo a passo de determinação do traço de referência, pelo método da ABCP, que foi adotado para a realização do trabalho.

A resistência de dosagem é calculada pela expressão (1), em conformidade com as recomendações da NBR 12655 (ABNT, 2022), em função do desvio padrão, aos 28 dias.

$$F_{cm_j} = F_{ck_j} + 1,65S_d \quad (1)$$

$$F_{cm_j} = 20 + 1,65 \cdot 4 = 26,6 \text{MPa}$$

Onde:

F_{cm_j} : é a resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade j dias, expressa em megaPascal (MPa)

F_{ck_j} : é a resistência característica de concreto à compressão, aos j dias, expressa em megaPascal (MPa)

S_d é o desvio padrão de dosagem, que pode variar em três condições distintas (A, B e C), ambas em função do controle de obra, conforme apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 – Condições de preparo em função do desvio padrão S_d

Condição A	$S_d = 4$ MPa	Materiais dosados em massa e água de emassamento é corrigida em função da correção da umidade dos agregados. Classe C10 a C80
Condição B	$S_d = 5,5$ MPa	Cimento dosado em massa, agregados dosados em massa combinada com volume, a umidade do agregado miúdo é determinada e o volume do agregado miúdo é corrigido através da curva de inchamento. Classe C 10 a C 25
Condição C	$S_d = 7$ MPa	Cimento medido em massa, agregados e água em volume, umidade dos agregados estimada. Classe C10 e C 15

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2022)

Desta forma, para todos os traços, no cálculo de dosagens foi considerado o valor calculado da resistência de dosagem (f_{cj}) como sendo 26,6 MPa.

Em relação ao consumo de água (C_a), considera-se um abatimento do tronco de cone na faixa de 80 a 100 mm, para uma dimensão máxima característica do agregado graúdo = 12,5 mm. Devido à falta de informação do consumo de água considerando o $D_{máx}$ do agregado, realiza-se uma interpolação com os valores de $D_{máx}$ dos agregados de 9,5 mm e 19 mm, apresentados na Tabela 10. Com isso,

pode-se determinar um consumo de água aproximado de 222 litros, para cada metro cúbico de concreto.

Tabela 10 – Determinação do consumo de água

Abatimento (mm)	Consumo de água aproximado (L/m ³)				
	D _{máx} agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Rodrigues (1990)

Feita a estimativa do consumo de água por metro cúbico de concreto e adotada a relação água/cimento, a estimativa do consumo de cimento pode ser obtida pela equação (2).

$$CC = \frac{Ca}{a/c} \quad (2)$$

Onde:

CC= Consumo de cimento por metro cúbico de concreto (kg/m³)

Ca = Consumo de água por metro cúbico de concreto (l/m³)

(a/c) = relação água/cimento (kg/kg)

Considerando Ca de 222 L/m³ e o fator a/c = 0,5, pode-se encontrar o valor de consumo de cimento em 444 kg para cada metro cúbico de concreto (CC=444 kg/m³).

A determinação do consumo de agregado graúdo é realizada em função dos seus diâmetros máximos característicos e do módulo de finura da areia (Tabela 11).

Tabela 11 – Volume compactado seco de agregado graúdo para um metro cúbico de concreto

	Dmáx (mm)				
	9,5	19	25	31,5	37,5
1,6	0,665	0,790	0,815	0,840	0,865
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Torrales *et al.* (2018)

Para encontrar o volume compactado seco de agregado graúdo para um metro cúbico de concreto, realizam-se duas interpolações. A primeira entre o módulo de finura uma vez que este é de 3,17, e a outra interpolação entre o Dmáx que é de 12,5 mm. Com isso, utilizando as informações apresentadas na Tabela 11 após as interpolações foi possível encontrar, para módulo de finura de 3,17 do agregado miúdo, com dimensão máxima característica de 12,5 mm, é possível obter um volume compactado seco por metro cúbico de concreto de 0,547.

Desta forma o consumo de brita pode ser obtido pela equação 3.

$$Cb = Vb \cdot Mu \quad (3)$$

$$Cb = 0,547 \cdot 1460 = 798,62 \text{ kg/m}^3$$

Onde:

Cb: é o consumo de agregado graúdo

Vb: Volume do agregado graúdo seco por m³ de concreto

Mu: Massa unitária compactada do agregado graúdo

Para determinação do consumo do agregado miúdo, é necessário determinar o volume do agregado miúdo, o qual é obtido utilizando-se os consumos e as

massas específicas dos agregados graúdos e do cimento utilizado, conforme a equação 4.

$$Vm = 1 - \frac{cc}{\gamma c} + \frac{cb}{\gamma b} + \frac{ca}{\gamma a} \quad (4)$$

$$Vm = 1 - \frac{444}{2970} + \frac{798,62}{2570} + \frac{222}{1000} = 0,32 \text{ m}^3$$

Onde:

V_m : Volume de areia

C_c : Consumo de cimento

C_b : Consumo de brita

C_a : Consumo de água

γ_c : massa específica do cimento

γ_b : massa específica da brita

γ_a : massa específica da água

Conhecendo o volume de agregado miúdo, pode-se obter o consumo de agregado miúdo pela equação 5.

$$C_m = \gamma_m \cdot V_m \quad (5)$$

Desta forma:

$$C_m = 2330 \cdot 0,32 = 745,6 \text{ kg/m}^3$$

Onde:

C_m : Consumo de agregado miúdo

γ_m : massa específica da areia

A apresentação do traço em massa é feita a partir das relações dos diferentes materiais em relação à massa de cimento, conforme a equação 6.

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_a}{C_c} \quad (6)$$

$$\frac{444}{444} : \frac{745,6}{444} : \frac{798,62}{444} : \frac{222}{444} = 1 : 1,68 : 1,80 : 0,5$$

A tabela 12 apresenta as proporções, em massa, dos traços desenvolvidos e utilizados, e as características das dosagens para cada variação de agregado. Para a produção dos concretos, o volume de mistura foi de 0,03 m³.

Tabela 12 – Composição dos concretos (kg/m³)

Legenda	Cimento	AMN	AGN	AMR	AGR	Água	Água de absorção	Teor de Argamassa
CCV	444	745,6	798,62	-	-	222	-	60%
CR25AG	444	745,6	598,97	-	199,66	222	23,15	60%
CR25AM	444	559,2	798,62	186,4	-	222	26,66	60%
CR25AMG	444	559,2	598,97	186,4	199,66	222	33,55	60%
CR50 AG	444	745,6	399,31	-	399,31	222	30,04	60%
CR50AM	444	372,8	798,62	372,8	-	222	37,06	60%
CR50AMG	444	372,8	399,31	372,8	399,31	222	50,84	60%
CR75AG	444	745,6	199,66	-	598,97	222	36,93	60%
CR75AM	444	186,4	798,62	559,2	-	222	47,47	60%
CR75AMG	444	186,4	199,66	559,2	598,97	222	68,13	60%
CR100AG	444	745,6	-	-	798,62	222	43,82	60%
CR100AM	444	-	798,62	745,6	-	222	57,87	60%
CR100AMG	444	-	-	745,6	798,62	222	85,42	60%

Traço: 1:1,68:1,80:0,5

Legenda: AMN (agregado miúdo natural), AGN (agregado graúdo natural), AMR (agregado miúdo reciclado) e AGR (agregado graúdo reciclado).

Fonte: Autor (2023)

3.3.2 Procedimento de mistura

Para as misturas produzidas com ARCO, visando minimizar o efeito da absorção de água gerada pelo agregado reciclado, foi calculada a água de absorção a fim de compensá-la em 100% do valor obtido. Desta forma, todas as amostras de AGRC e AMRC a serem utilizadas nas misturas passaram pelo processo de pré-molhagem, sendo imersas em água durante 15 minutos e, em seguida, depositadas na betoneira na etapa de inserção dos agregados. Para a pré-molhagem foi utilizado 100% da água de absorção, calculado em massa em proporção à quantidade de

ARCO utilizado na mistura. A Figura 1012 apresenta os agregados reciclados saturados após a adição da água de absorção.

Figura 10 – Agregados reciclados de concreto após a pré-molhagem



Fonte: Autor (2023)

Os concretos foram produzidos utilizando-se uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 150 litros e rotação de tambor de 34 rpm, conforme o seguinte procedimento de mistura:

- 1- Coloca-se 100% do agregado graúdo, natural e/ou reciclado (após o período de pré-molhagem, no caso do AGRC), no misturador parado;
- 2- Adiciona-se 50% da água da mistura, e liga o misturador por 1 minuto;
- 3- Adiciona-se o cimento e inicia a mistura por 2 minutos;
- 4- Coloca-se o agregado miúdo, natural e/ou reciclado (após o período de pré-molhagem, no caso do AMRC);
- 5- Adiciona-se os 50% restante da água de mistura e liga o misturador por 3 minutos;
- 6- Procede-se com a parada do misturador para limpeza por 1 minuto, com uma colher de pedreiro, removendo o material aderido nas paredes do misturador, caso seja necessário;
- 7- Para finalizar, aciona-se o misturador por mais 1 minuto.

3.4 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

3.4.1 Massa específica do concreto fresco

Foi feita a determinação da massa específica do concreto no estado fresco, conforme as prescrições da NBR 9833 (ABNT, 2008). Para realização do ensaio utilizou-se um recipiente com capacidade de 15 dm³, 260 mm de diâmetro e 283 mm de altura, atendendo as recomendações da presente norma.

3.4.2 Consistência pelo abatimento do tronco de cone

Após a mistura do concreto, foi verificada a sua consistência pelo abatimento do tronco de cone, segundo a NBR 16889 (ABNT, 2020). O ensaio consiste no preenchimento do molde tronco-cônico (Cone de Abrams) em três camadas, sendo cada camada adensada em 25 golpes. Posteriormente, é medida a altura do abatimento com a inversão do molde tronco de cone e posicionamento na horizontal da haste de adensamento (Figura 5), tendo dessa forma um parâmetro de medida da trabalhabilidade.

Figura 11 – Ensaio de abatimento do tronco de cone



Fonte: Autor (2023)

3.5 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

3.5.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Para a realização dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica foram utilizadas as prescrições da norma NBR 9778 (ABNT, 2005), sendo moldados dois corpos de prova para esta análise.

3.5.2 Resistência à compressão

O controle de resistência à compressão simples dos concretos foi realizado de acordo com a norma brasileira NBR 5739 (ABNT, 2018). Foram empregadas três repetições (3 corpos de prova) por idade (7, 14, 28 dias) para cada mistura analisada. Dessa forma, ao todo foram moldados 117 corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Para moldagem dos corpos de prova, antes da colocação da mistura, os moldes foram untados com óleo vegetal. Os processos de moldagem e adensamento foram realizados de acordo com as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2015). Após 24 horas os CPs foram desmoldados e mantidos em cura úmida por imersão em um taque contendo água saturada de cal hidratada (hidróxido de cálcio).

Após o processo de cura, os CPs foram retificados a fim de promover uma maior regularização da superfície. Para o rompimento dos CPs foi utilizada uma prensa com capacidade de carga de 200 tf existente no Laboratório de Estruturas e Materiais da UFAL.

3.5.3 Módulo de elasticidade

Para a realização do ensaio foram utilizados 3 CPs para cada, os quais foram submetidos à cura úmida até a idade do ensaio (28 dias a partir da concretagem). A carga de ruptura estimada foi a média das cargas de ruptura de 3 corpos de prova.

A Figura 12 mostra a preparação do corpo de prova para realizar um ensaio do módulo de elasticidade: posicionamento dos *strain gages* nas laterais, posicionamento do corpo de prova no centro da prensa, ajuste da prensa para que

ela se adeque ao corpo de prova. Todos os procedimentos utilizados estão de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2008).

Figura 12 – Execução do ensaio do módulo de elasticidade



Fonte: Autor (2023)

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com o intuito de comparar o efeito do tratamento do experimento, ou seja, verificar o efeito de duas variáveis qualitativas (fatores) foi realizada uma análise estatística, utilizando os dados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias das misturas produzidas com substituição do agregado reciclado miúdo e com substituição do agregado reciclado graúdo, bem como a mistura de referência, a fim de determinar se os resultados médios são diferentes entre si. Para a análise estatística não foram utilizados os dados referentes às misturas produzidas substituindo ambos os agregados reciclados (miúdo e graúdo), uma vez que através da Análise de variância (ANOVA) é possível obter o gráfico de interação entre os fatores.

Inicialmente foi realizado o teste de normalidade que é uma condição importante e exigida durante a realização de inferências a respeito de parâmetros

populacionais apresentado por *Shapiro-Wilk*, para identificar a hipótese de que a amostra tenha sido retirada de uma população normal. Além disso, foi necessário realizar o teste de homoscedasticidade de *Bartlett*, pois ele é um pressuposto que compara a média ponderada e a média geométrica das variâncias amostrais.

Em seguida, foi realizada a ANOVA buscando-se testar a igualdade entre três ou mais médias populacionais, embasado na análise de variância amostral, separando os dados amostrais em grupos de acordo com uma característica (fator). Quanto ao nível de significância, foi adotado 5%.

Foi aplicado o teste F aos resultados experimentais do teste de hipótese da ANOVA, comparando a média dos grupos por meio da formulação de hipóteses, onde a hipótese nula (H_0) corresponde à igualdade entre as médias amostrais ($\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$) e a hipótese alternativa (H_1) indica que há pelo menos uma diferença entre as médias ($\mu_i \neq \mu_j$), sendo $i \neq j$, com nível de significância (α), no qual o tratamento possui mais de dois níveis e natureza qualitativa.

Diante disso, quando em um experimento é realizada a ANOVA e identificado que a hipótese nula é rejeitada, então conclui-se que nem todas as médias são iguais entre si, no entanto pode existir médias iguais e médias diferentes. Para levantar este tipo de informação é necessário realizar testes que comparam as médias dos tratamentos e verificar quais tratamentos são de fato iguais e quais são diferentes entre si.

Dentre os métodos de separação das médias os principais são os de *Duncan* e *Tukey*, que tencionam comparar médias duas a duas, existindo uma possibilidade de sobreposição entre os grupos de médias, o que indica que há possibilidade de um mesmo tratamento pertencer a dois grupos de tratamentos. Para a presente análise foi utilizado o teste de *Tukey*.

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as propriedades dos concretos produzidos no estado fresco e endurecido, e por fim uma análise estatística utilizando os valores obtidos no ensaio de resistência a compressão aos 28 dias de todas as misturas produzidas.

4.1 Propriedades dos concretos

4.1.1 Propriedades no estado fresco

As propriedades no estado fresco, referentes aos concretos produzidos com ARCO, variando-se o percentual de substituição e a dimensão dos agregados, estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Propriedades físicas no estado fresco dos concretos produzidos

Misturas	<i>Slump test</i> (cm)	Massa específica real (g/ cm ³)
CCV	14,2	3,30
CR 25 AG	17,4	3,32
CR 25 AM	15,0	3,27
CR 25AMG	15,0	3,29
CR 50 AG	21,0	3,33
CR 50 AM	17,0	3,28
CR 50 AMG	19,0	3,25
CR 75 AG	20,5	3,29
CR 75 AM	19,0	3,23
CR 75 AMG	20,5	3,21
CR 100 AG	21,5	3,30
CR 100 AM	16,0	3,15
CR 100 AMG	20,0	2,94

Fonte: Autor (2023)

Para as propriedades físicas dos concretos no estado fresco, utilizando os valores obtidos no *slump test*, observa-se um maior abatimento das misturas produzidas com ARCO, apresentando valores superiores aos da mistura de referência.

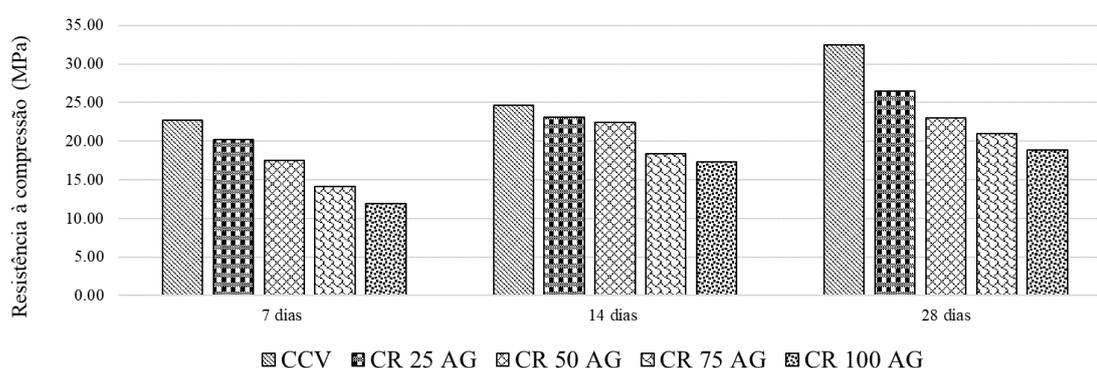
Essa maior trabalhabilidade por parte das misturas contendo agregado reciclado, pode ter sido influenciada pela pré molhagem dos ARCO. Esta metodologia foi adotada com o intuito de diminuir o efeito da absorção destes agregados e conseqüentemente garantir uma melhor trabalhabilidade da mistura.

Em relação à massa específica dos concretos, observa-se menores valores para os concretos dosados com agregados reciclados, seguindo as características destes.

4.1.2 Propriedades no estado endurecido

A avaliação do desempenho dos concretos no estado endurecido incluiu os resultados de resistência à compressão axial aos 7, 14 e 28 dias, substituindo -se apenas o ARCO graúdo (Figura 13), substituindo-se apenas o AMRC (Figura 14) e com todos os concretos produzidos, incluindo as produções com a substituição de ambos agregados de forma simultânea (Figura 15).

Figura 13 – Resistência à compressão dos concretos com substituição do AGRC



Fonte: Autor (2023)

Analisando os valores de resistência à compressão para as misturas com substituição apenas o AGRC, notou-se que ocorreu um decréscimo para todas as idades com o aumento do percentual de substituição do agregado reciclado, como já

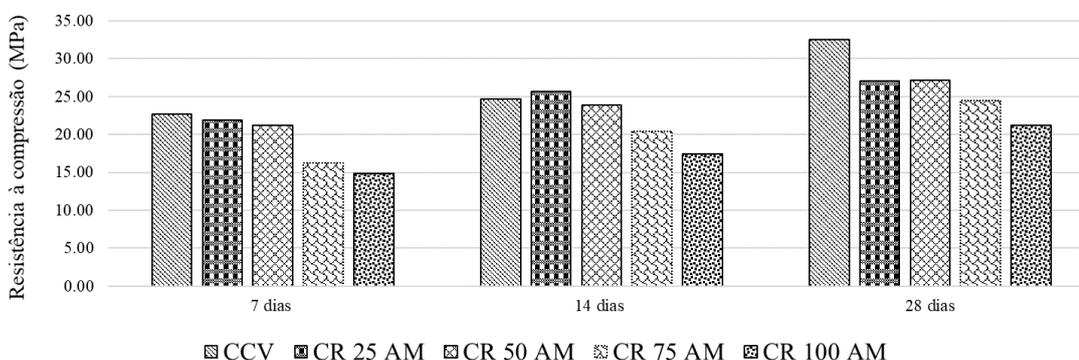
era esperado. Entretanto, apresentaram resultados de resistência à compressão satisfatórios, com valor superior a 20 MPa, para percentuais de substituição de até 75% aos 28 dias.

Com a substituição de 25% do agregado graúdo natural pelo reciclado, observa-se uma redução média de 12% na resistência à compressão quando comparado ao traço de referência, chegando a 48% ao considerar a mistura com 100% de substituição, ambos aos 7 dias. Esta redução decorre da maior porosidade existente no ARCO.

Observa-se um aumento gradativo na resistência ao longo da idade, seguindo uma mesma tendência de evolução para as 3 idades analisadas. Para todas as misturas, a resistência à compressão aos 7 dias atingiu em média 72% do valor alcançado aos 28 dias, havendo uma evolução em torno de 16% aos 14 dias e 12% aos 28 dias. Este comportamento em função da idade está dentro do esperado para misturas cimentícias.

A Figura 14 apresenta os resultados da resistência a compressão das misturas produzidas com a substituição apenas do AMRC.

Figura 14 – Resistência à compressão dos concretos com substituição do AMRC



Fonte: Autor (2023)

Analisando a Figura 14 observa-se uma redução na resistência à compressão das misturas produzidas substituindo apenas o ARCO miúdo, semelhante ao que ocorreu nas misturas produzidas substituindo-se o ARCO graúdo. Observa-se, porém, menor variação na resistência considerando a idade de 7 dias para os percentuais de 25% e 50%, apresentando resultados muito próximos ao concreto de referência.

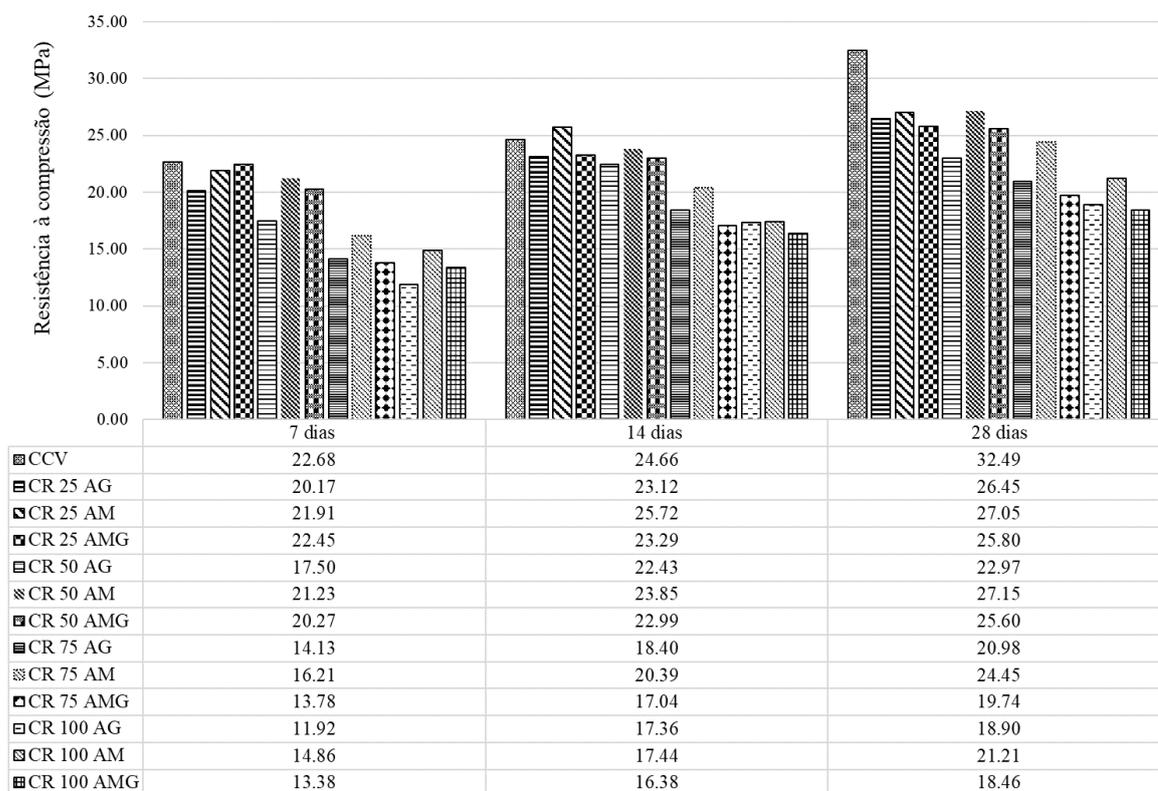
Com 100% de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado reciclado, a resistência à compressão apresentou, em média, 21,21 MPa aos 28 dias. Esse resultado mostra, para o traço em estudo, que é possível realizar a substituição de até 100% do agregado natural miúdo pelo agregado reciclado e ainda assim obter um concreto estrutural. Isso se deve, em grande parte, à qualidade do agregado reciclado utilizado, bem como a menor influência da porosidade do agregado reciclado devido ao menor tamanho da partícula.

Ao comparar as misturas produzidas com AMRC, aos 28 dias, é possível observar que mesmo com o aumento dos percentuais de substituição de 25% para 50% os resultados de resistência à compressão ficaram constantes, sendo observada uma redução significativa com os percentuais de 75% e 100%, corroborando, com o estudo das composições granulométricas apresentado no capítulo 3. Neste, foi evidenciado que o melhor percentual de substituição é 50% de agregado natural e 50% de agregado reciclado afim de obter uma melhor distribuição das partículas.

Quanto à evolução da resistência à compressão ao longo dos dias, a idade de 7 dias foi responsável por 71% da resistência aos 28 dias, sendo que nas idades de 14 e 28 dias observou-se aumento de 13% e 16%, respectivamente.

Na Figura 15 estão representados os valores de resistências a compressão de todas as misturas produzidas, com a substituição dos agregados reciclados (miúdo e graúdo) separadamente e com a substituição de ambos de forma simultânea.

Figura 15 – Resistência à compressão dos concretos produzidos



Fonte: Autor (2023)

Analisando a Figura 15, verifica-se que a maioria dos concretos apresentou resistência à compressão maior que 20 MPa aos 28 dias, enquadrando-se em concretos estruturais, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). Isto ocorreu para as misturas produzidas com 100% de ARCO em substituição ao agregado natural que utilizaram em sua composição o agregado graúdo (CR 100 AG; CR 100 AMG), e para a mistura produzida com 75% de ARCO quando substituídos ambos os agregados (miúdo e graúdo). Esta redução na resistência à compressão é esperada quando se utilizam agregados reciclados devido à sua característica de maior porosidade.

Observa-se, ainda, que para um mesmo percentual de substituição a mudança da dimensão do agregado reciclado (miúdo ou graúdo) influenciou no desempenho dos concretos no estado endurecido.

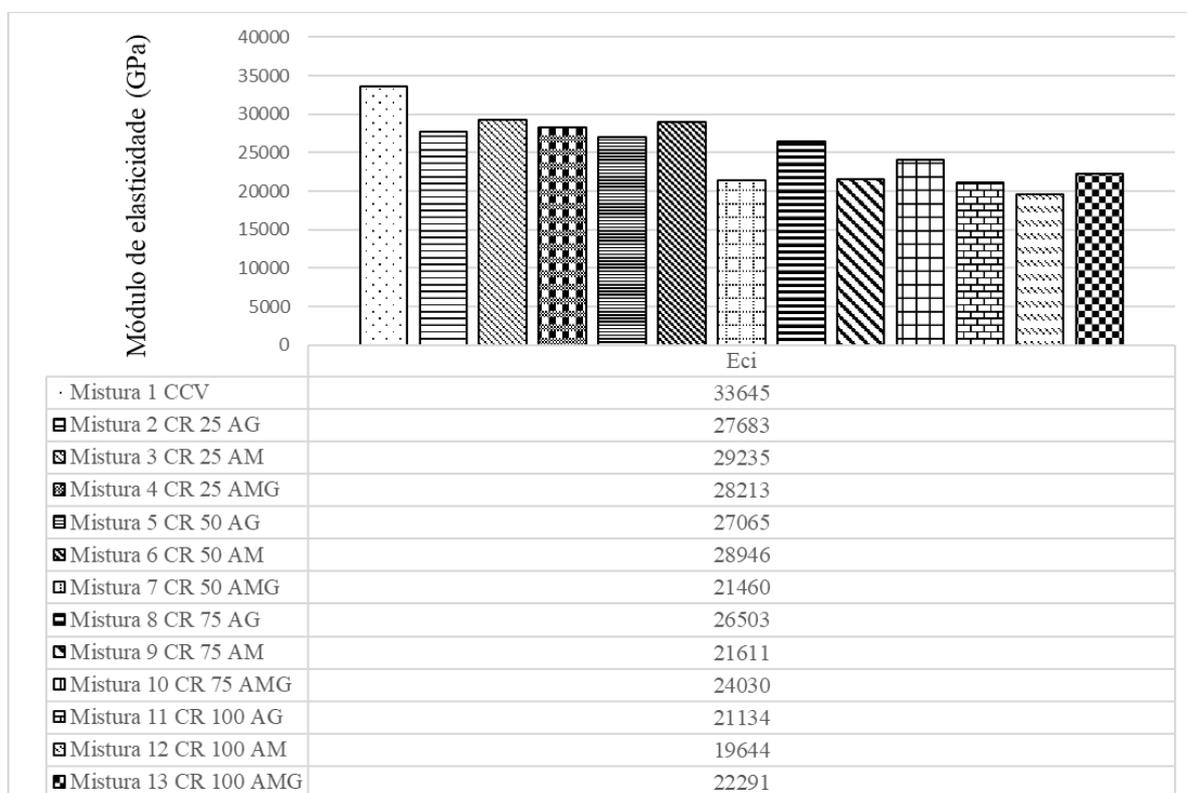
Todas as misturas produzidas com AMRC, independente do percentual de substituição, apresentaram valores de resistência à compressão superiores.

Esta redução da resistência nas misturas produzidas com o AGRC, pode ter sido influenciada pelo efeito da porosidade do agregado reciclado, mais evidente no agregado graúdo, devido ao tamanho da partícula.

Sob o viés da variação da parcela de agregado reciclado presente na mistura, é possível propor um contraponto à norma. Esta limita a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado em 20% para fins estruturais, No entanto, de acordo com os resultados obtidos pelo presente trabalho, corroborando também com os dados reportados na literatura, fica clara a obtenção de bons resultados de resistência à compressão com maiores percentuais dos agregados reciclados, o que permite a ampliação do espectro de utilização em concretos empregados em diferentes partes das etapas de concepção da edificação.

Os resultados do módulo de elasticidade estão apresentados na (Figura 16) e as propriedades físicas no estado endurecido dos concretos produzidos com ARCO, entre elas: ensaio de absorção por imersão, índice de vazios do concreto e massa específica real, apresentados na Tabela 14.

Figura 16 – Módulo de elasticidade dos concretos produzidos



Fonte: Autor (2023)

Analisado a Figura 16 é possível observar uma redução no módulo de elasticidade para as misturas produzidas com agregados reciclados em comparação à mistura de referência. Isso pode ser justificado pela maior porosidade existente nestes agregados, uma vez que a porosidade do agregado graúdo determina a sua rigidez o que, por sua vez, controla a capacidade de o agregado restringir a deformação da matriz.

Observa-se também que o módulo de elasticidade foi influenciado em maior proporção para as misturas com substituição apenas do agregado miúdo de ARCO, evidenciado a influência do tamanho do agregado nesta propriedade.

A fração volumétrica é outro fator que também afeta no módulo de elasticidade, é possível observar uma redução nos concretos com 75% e 100% de substituição do ARCO em média de 28% e 36%, respectivamente.

Na Tabela 14 são apresentados os resultados para as demais propriedades dos concretos no estado endurecido.

Tabela 14 - Propriedades no estado endurecido dos concretos produzidos

Misturas	<i>Índice de vazios (%)</i>	Absorção de água (%)	Massa específica real (g/cm ³)
CCV	13,85	6,38	2,52
CR 25 AG	17,01	7,56	2,53
CR 25 AM	16,05	8,12	2,53
CR 25AMG	17,08	8,16	2,52
CR 50 AG	17,02	8,13	2,52
CR 50 AM	16,79	8,02	2,51
CR 50 AMG	18,97	9,33	2,51
CR 75 AG	19,77	8,03	2,52
CR 75 AM	16,84	9,86	2,5
CR 75 AMG	22,04	11,29	2,51
CR 100 AG	19,68	7,87	2,5
CR 100 AM	16,42	9,91	2,47
CR 100 AMG	23,58	12,71	2,43

Fonte: Autor (2023)

Para as misturas contidas na Tabela 14, no tocante à absorção de água, os concretos produzidos com a inserção do agregado reciclado apresentaram uma absorção de água, em média, 6% maior quando comparados ao concreto convencional. Conforme discutido anteriormente, essa elevação da absorção pode ser justificada devido à própria característica do agregado, que apresenta maior porosidade, superfície irregular e altos percentuais de absorção de água.

No que concerne aos índices de vazios, todas as misturas produzidas com ARCO apresentaram valores superiores aos da mistura de referência, destacando-se as misturas CR 75 AMG e CR 100 AMG. Para um mesmo percentual, substituindo apenas o AM, foi possível observar que o aumento no índice de vazios foi menos expressivo em comparação ao que ocorreu quando usado o AG reciclado.

Observa-se, mais uma vez, a influência da dimensão do agregado, bem como da quantidade de agregados reciclados totais, especialmente nos percentuais de 50% e 75% de substituição.

Quanto aos valores de massa específica real, verificou-se que se mantiveram significativamente próximos, inclusive em relação ao CCV. Esse fator pode estar relacionado com a elevada quantidade de cimento utilizada nestas misturas, que se sobrepõe à influência do agregado reciclado na redução da massa específica. Essa elevada quantidade de cimento é uma consequência do método de dosagem escolhido.

Após a discussão de todas as propriedades dos concretos produzidos nos estados fresco e endurecido, conforme descrito na metodologia, utilizando os valores de resistência à compressão aos 28 dias foram realizadas algumas análises estatísticas. A Tabela 15 apresenta os valores da resistência à compressão de cada espécime, não sendo incluídas as misturas que usaram ao mesmo tempo agregados miúdo e graúdo reciclados, conforme explicitado no capítulo 3.

Tabela 15 – Valores individuais de resistência à compressão das misturas produzidas aos 28 dias

Identificação	Percentual				Resistência à Compressão (MPa)
	AGR	AMR	AGN	AMN	
CR25AG	25%	0%	75%	100%	26,72
CR25AG	25%	0%	75%	100%	26,10
CR25AG	25%	0%	75%	100%	26,53
CR50AG	50%	0%	50%	100%	22,66
CR50AG	50%	0%	50%	100%	22,41
CR50AG	50%	0%	50%	100%	23,85
CR75AG	75%	0%	25%	100%	20,98
CR75AG	75%	0%	25%	100%	20,48
CR75AG	75%	0%	25%	100%	21,48
CR100AG	100%	0%	0%	100%	18,35
CR100AG	100%	0%	0%	100%	19,35
CR100AG	100%	0%	0%	100%	18,98
CR25AM	0%	25%	100%	75%	26,91
CR25AM	0%	25%	100%	75%	26,53
CR25AM	0%	25%	100%	75%	27,72
CR50AM	0%	50%	100%	50%	26,22
CR50AM	0%	50%	100%	50%	29,84
CR50AM	0%	50%	100%	50%	25,41
CR75AM	0%	75%	100%	25%	23,22
CR75AM	0%	75%	100%	25%	25,10
CR75AM	0%	75%	100%	25%	25,03
CR100AM	0%	100%	100%	0%	20,98
CR100AM	0%	100%	100%	0%	20,98
CR100AM	0%	100%	100%	0%	21,66
CCV0	0%	0%	100%	100%	32,78
CCV0	0%	0%	100%	100%	32,96
CCV0	0%	0%	100%	100%	31,71

Fonte: Autor (2023)

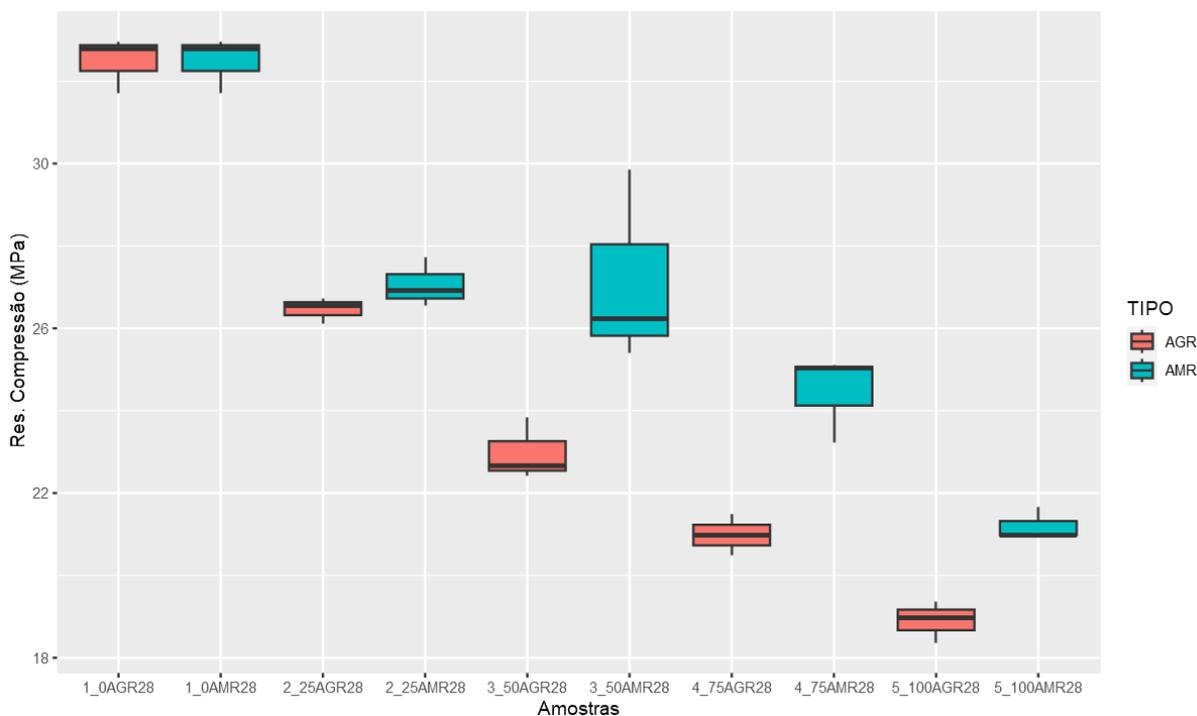
Para a elaboração da análise experimental foram identificadas 2 variáveis independentes (fatores) - dimensão e percentual, e 1 variável dependente - resistência à compressão axial. Logo, foram considerados esses fatores de controle para um tempo fixo de 28 dias de cada corpo de prova. A Tabela 16 apresenta todas as medidas de tendências central e dispersão para cada mistura produzida, enquanto a Figura 17 mostra os gráficos de caixa. Pode-se observar inicialmente que os gráficos produzidos não apresentam *outliers*, indicando assim que os dados concordam entre si e que nenhum dado anômalo estava presente. Portanto, todos os dados foram incorporados na análise.

Tabela 16 – Medidas de tendência central e dispersão dos dados de resistência à compressão (MPa) dos concretos

Misturas	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)	Média Aritmética (MPa)	Mediana (MPa)	Desvio- Padrão (MPa)	1º Quartil	2º Quartil
0 AGR28	31,72	32,97	32,49	32,78	0,67	32,25	32,87
0 AMR 28	31,72	32,97	32,49	32,78	0,67	32,25	32,87
25 AGR 28	26,10	26,73	26,45	26,54	0,32	26,32	26,63
25 AMR 28	26,54	27,72	27,05	26,91	0,60	26,72	27,31
50 AGR 28	22,42	23,85	22,98	22,67	0,76	22,54	23,26
50 AMR28	25,41	29,85	27,16	26,23	2,36	25,82	28,04
75 AGR 28	20,48	21,48	20,98	20,98	0,50	20,73	21,23
75 AMR 28	23,22	25,10	24,45	25,03	1,06	24,12	25,06
100 AGR 28	18,36	19,36	18,90	18,98	0,50	18,67	19,17
100 AMR 28	20,98	21,66	21,20	20,98	0,39	20,98	21,32

Fonte: Autor (2023)

Figura 17 – Boxplot das misturas produzidas aos 28 dias

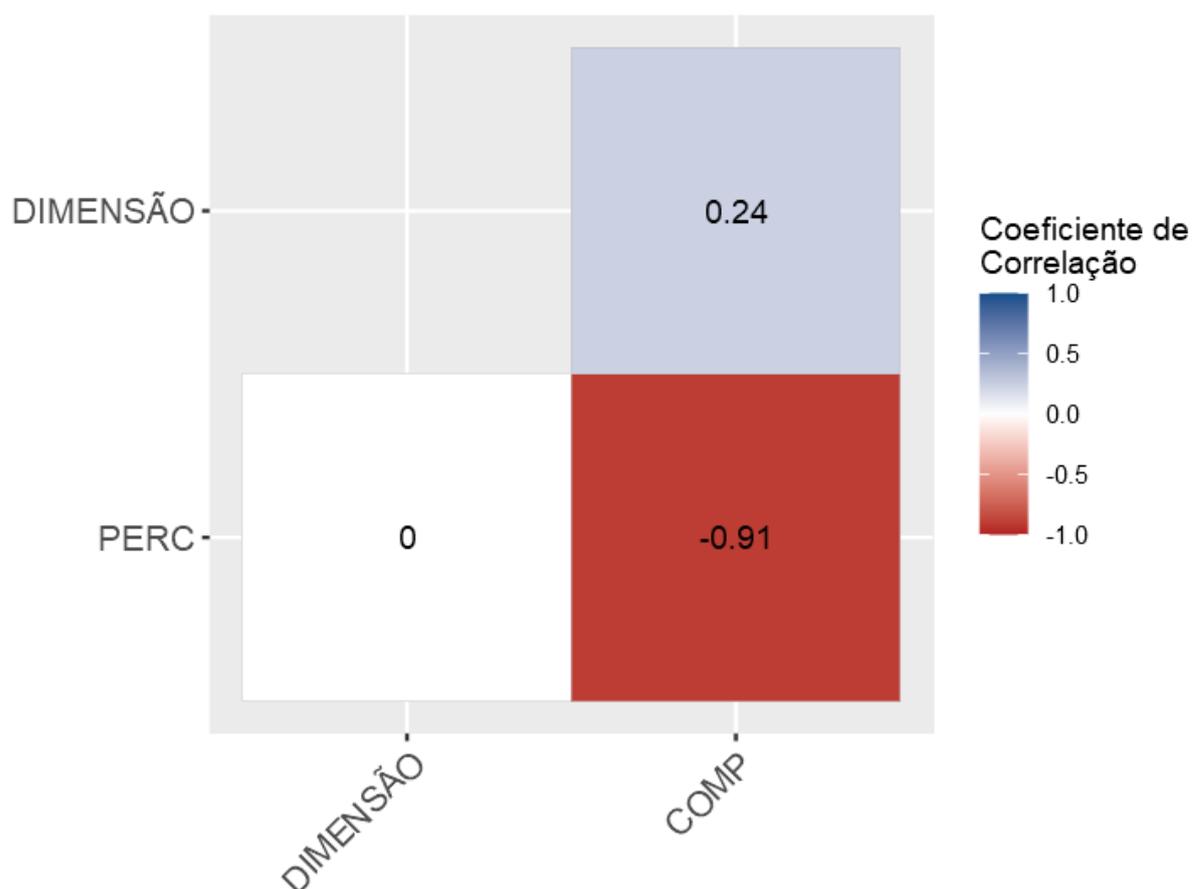


Fonte: Autor (2023)

Ainda sobre a Figura 17, foi possível extrair inicialmente características importantes sobre o comportamento dos concretos produzidos com ARCO. A resistência à compressão diminui com o aumento do percentual de substituição do agregado reciclado, sendo mais evidente nas misturas produzidas substituindo-se apenas o agregado graúdo reciclado.

Outra forma de verificar a relação das variáveis independentes do tipo de agregado e do percentual de substituição na resistência à compressão é através do gráfico de correlação de Pearson apresentado na Figura 18.

Figura 18- Gráfico de correlação de Pearson



Fonte: Autor (2023)

Pode se observar que a correlação entre o percentual de substituição e a dimensão (miúdo ou graúdo) é igual a zero, o que de fato mostra um forte indício na independência entre essas variáveis. Contudo, ao verificar a correlação entre a

dimensão do agregado e a resistência à compressão, é possível observar um pequeno coeficiente de correlação de 0,24 entre as variáveis, evidenciando pouca relação desta variável nos valores de resistência a compressão. Em contrapartida, quando se analisa a correlação entre o percentual de substituição do ARCO e a resistência à compressão, a relação é fortemente negativa, indicando que com o aumento do percentual a resistência à compressão tende a decair drasticamente.

Após a análise descritiva e exploratória dos dados, para uma melhor investigação dos fatores sobre a resistência à compressão axial dos concretos com ARCO, realizou-se a ANOVA. Foram considerados como fatores o percentual, a dimensão dos agregados e a interação entre os fatores a fim de verificar estes possuem efeitos significativos estatisticamente na resistência à compressão axial do concreto. As conclusões foram embasadas admitindo que quando o valor-P for inferior ao nível de significância (5%), então o fator possui efeito significativo sobre a variável de resposta, caso contrário, não há diferenças significativas entre as médias dos tratamentos, ou seja, não há evidências estatísticas sobre a contribuição do fator para a variável de resposta. Na Tabela 17, tem-se os dois fatores controláveis analisados e os dados da ANOVA.

Tabela 17 – Análise de variância (ANOVA)

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	Valor-P
Percentual	527,7895	4	131,9474	141,384	0
Dimensão	33,5148	1	33,5148	35,9118	0
Interações	19,3753	4	4,8438	5,19	0,0049
Resíduos	19,6651	20	0,93		
Total	599,34	29			

Fonte: Autor (2023)

Analisando os dados apresentados na Tabela 17, através dos valores controláveis (percentual de substituição e dimensão), bem como a interação entre ambos, é possível verificar que o valor-P foi inferior a 0,05, o que indica que há uma influência entre esses fatores significativa sobre a variável de resposta e que também existe uma interação significativa entre esses fatores.

Após os resultados da ANOVA, é necessário testar os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias. Dessa forma para verificação dessas premissas foram utilizados os resíduos, aplicando-se o teste de normalidade de

Shapiro-Wilk para verificar a hipótese de que a amostra tenha sido retirada de uma população normal, uma vez que o teste de hipóteses e os métodos de estimação são aplicados a partir de uma suposição de normalidade dos dados da amostra.

Realizou-se, ainda, o teste de homoscedasticidade de *Bartlett*, o qual considera que a amostra atende às condições de homoscedasticidade quando o valor-P é maior que o nível de significância adotado (5%).

Dessa forma, analisando os resultados apresentados na Tabela 18, verifica-se que os valores-P no teste de *Shapiro-Wilk* e *Bartlett* são maiores que o nível de significância de 5%, indicando a normalidade das variâncias dos dados. Dessa forma, os dados seguem os pressupostos da ANOVA, não sendo necessária a aplicação de um teste não paramétrico.

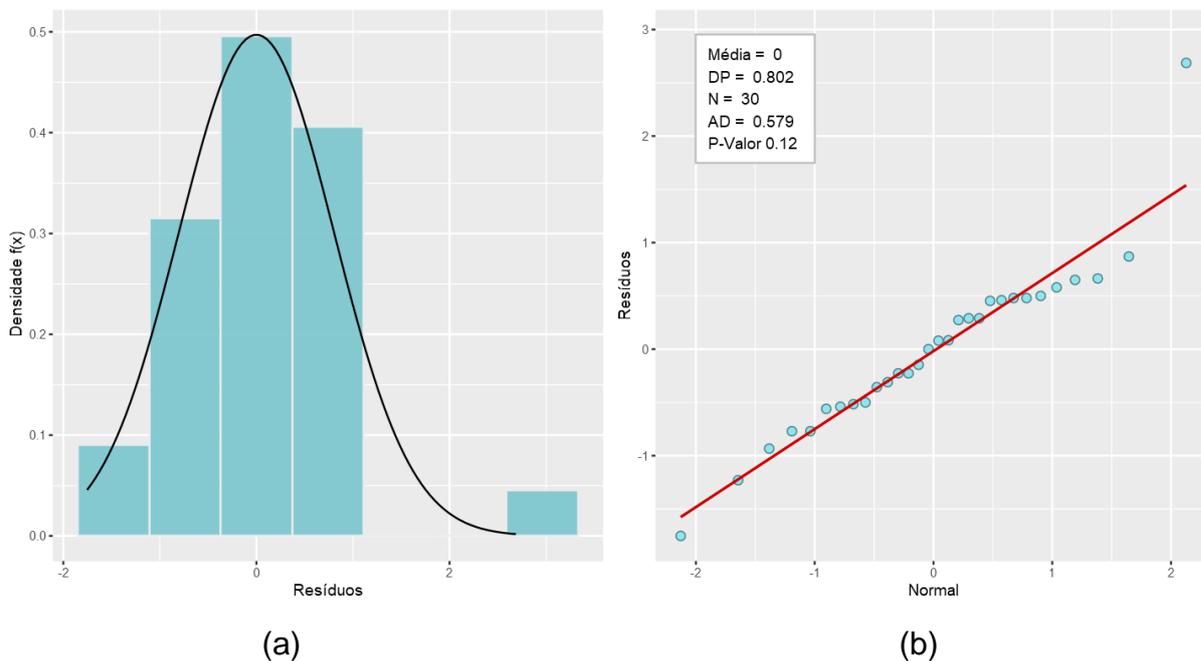
Tabela 18- Testes de Normalidade e Homoscedasticidade dos resíduos

<p>Teste de Normalidade de <i>Shapiro- Wilk</i></p> <p>Valor-P= 0,1229</p>
<p>Teste <i>Bartlett</i> de Homogeneidade das Variâncias (Homoscedasticidade)</p> <p>Valor-P= 0,1804</p>

Fonte: Autor (2023)

Na Figura 19a, observa-se a distribuição dos resíduos através de um histograma e sua curva de Gauss associada, sendo possível observar o comportamento normal dos dados residuais. Outra ilustração útil para verificação da normalidade é o gráfico quartil-quartil ou gráfico Q-Q, onde se checa a adequação da distribuição de frequência dos dados à uma distribuição de probabilidade. Dessa forma, na Figura 19b, a linearidade e boa aderência dos dados à reta sugere que os dados são normalmente distribuídos.

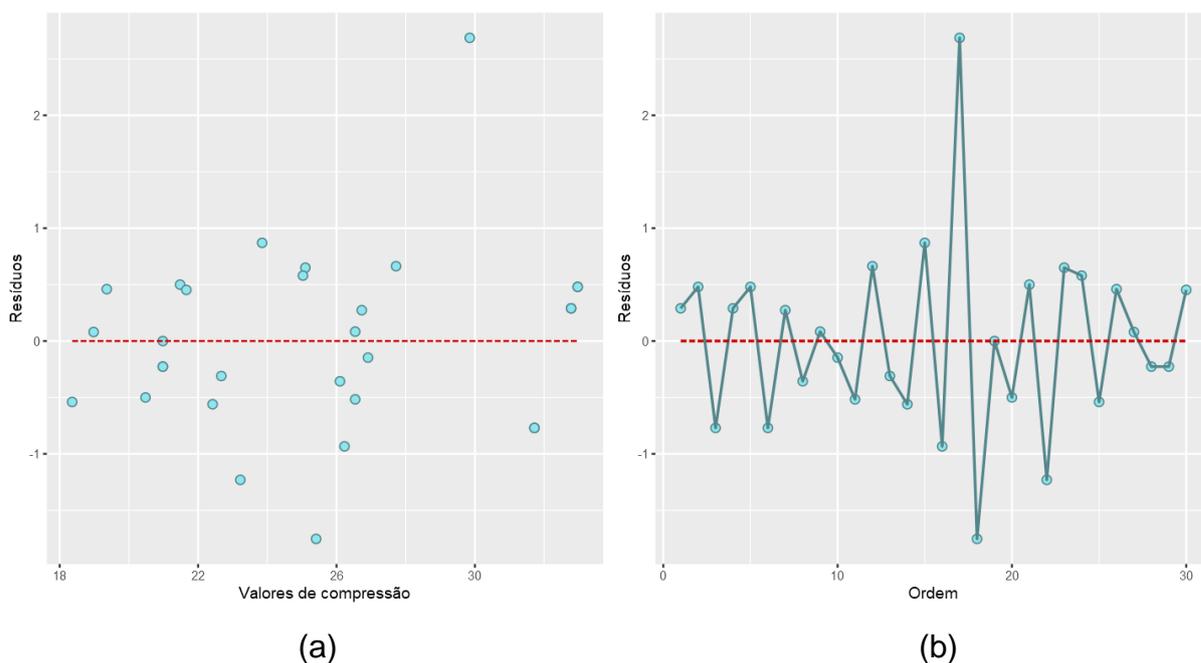
Figura 19 – Histograma (a) e gráfico Q-Q (b) dos resíduos para a idade de 28 dias



Fonte: Autor (2023)

Vale ressaltar que os resíduos devem apresentar variância constante (homogeneidade de variâncias), sem padrão aparentes com maiores valores próximos de zero e sem a presença de outliers, como pode ser observado na Figura 20a. Outra pressuposição importante se trata da distribuição aleatória dos resíduos, devendo apresentar ordem de coleta dos dados aleatória e sem correlação, como indicado na Figura 20b.

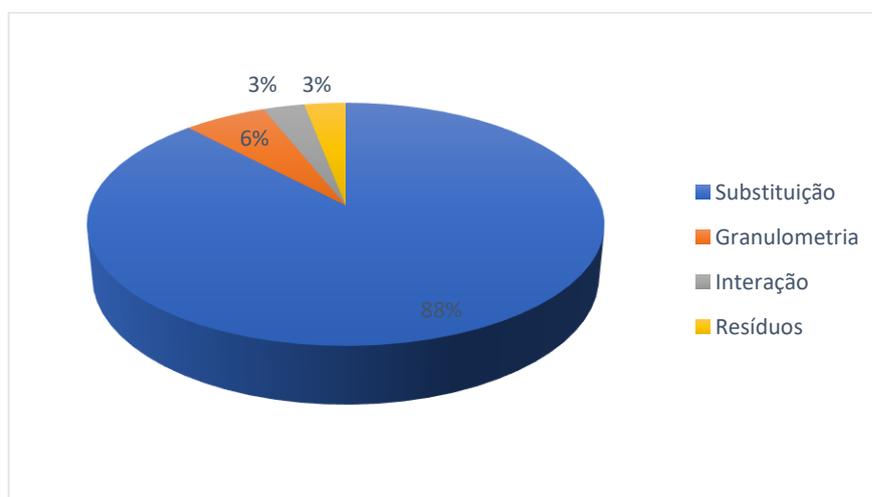
Figura 20- Gráfico de valores ajustados versus resíduos (a) e gráfico de resíduos versus ordem de coleta dos dados (b) para a idade de 28 dias



Fonte: Autor (2023)

Pela Figura 21, tem-se o percentual de contribuição de cada fator controlável na variável de resposta, onde estes foram calculados dividindo a soma dos quadrados das fontes de variação da ANOVA, presentes na Tabela 17, pela soma dos quadrados total. A partir disso, nota-se que o percentual de substituição representa 88%, o que provavelmente indica que é o fator que mais contribuiu com a variável de resposta.

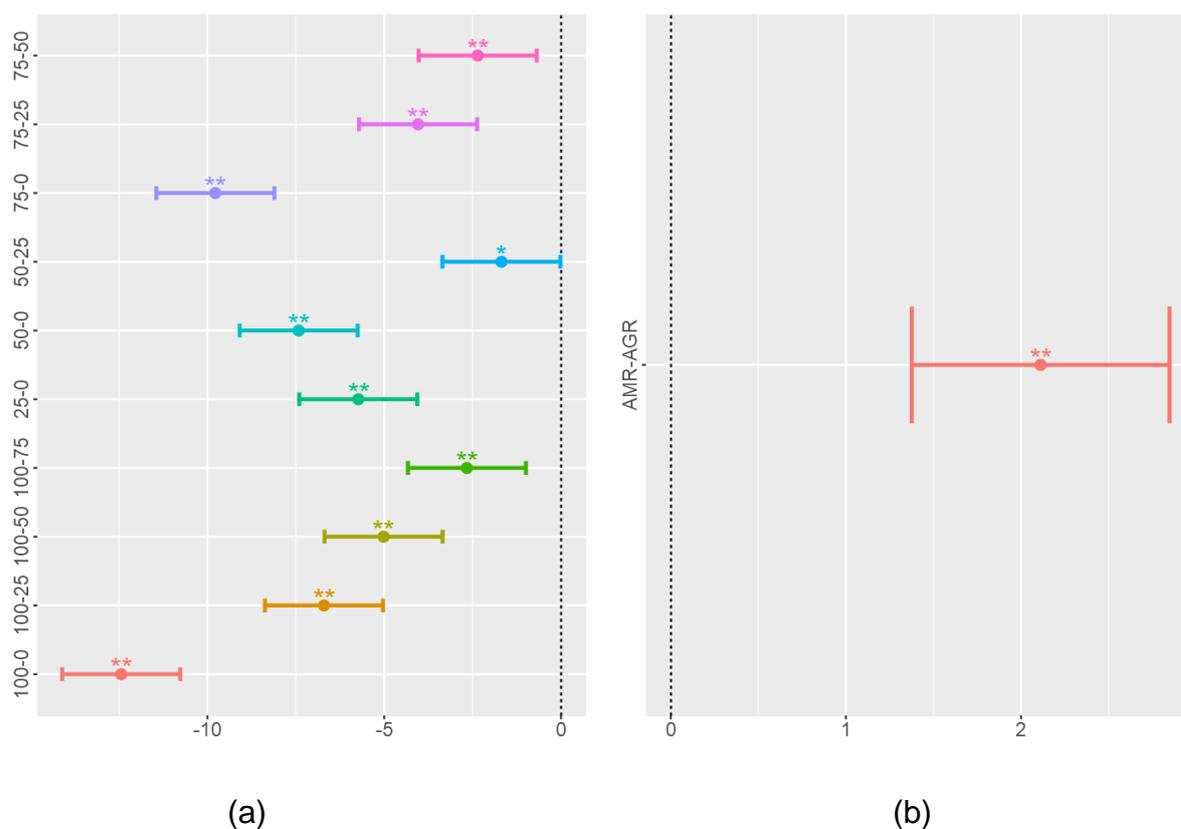
Figura 21 – Contribuição dos fatores controláveis na variável de resposta



Fonte: Autor (2023)

Diante disso, pela análise de variância há indícios de que pelo menos uma das médias do tratamento é diferente das demais, no entanto, ela não mostra onde estão as diferenças. Em virtude disso, é necessário realizar um teste de comparação para encontrar quais as médias diferem uma das outras. Para isso, foi utilizado o método de *Tukey* que tenciona comparar pares de médias, nele considera-se que há diferenças significativas entre duas médias amostrais quando o valor-P for menor que o nível de significância adotado (5%). As diferenças entre as médias inicialmente foram apresentadas considerando apenas um fator, na Figura 22a estão apresentadas as diferenças entre as médias considerando-se apenas o percentual de substituição, e na Figura 22b as diferenças entre as médias considerando apenas o tipo (dimensão) dos agregados.

Figura 22- Diferença entre as médias considerando o percentual de substituição do ARCO (a) e o tipo (dimensão) (b)



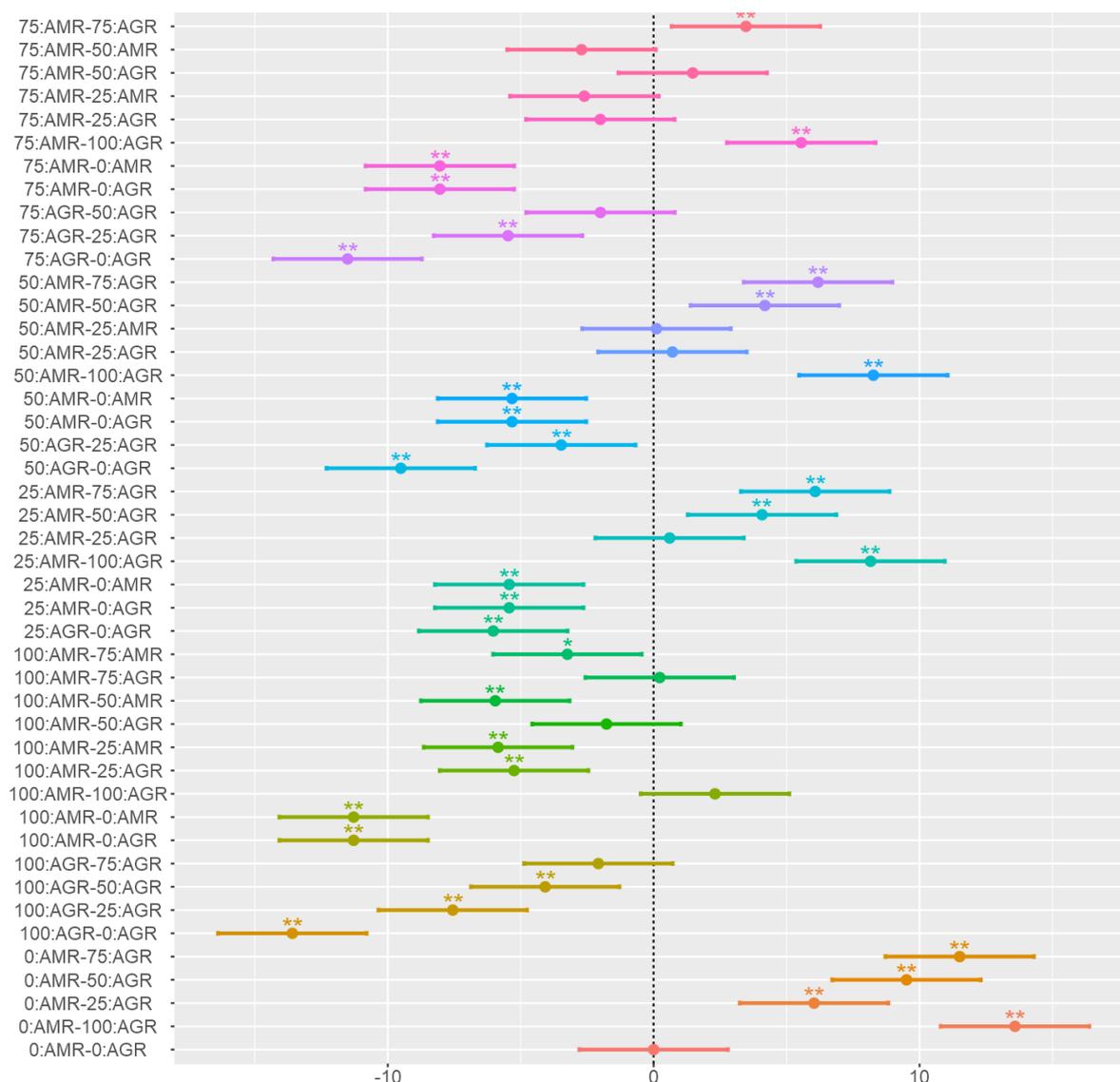
Fonte: Autor (2023)

Observa-se na Figura 22a, considerando apenas o percentual de substituição do ARCO, que nenhuma combinação pode ser considerada igual, uma vez que as linhas estão representadas de forma desordenada, sem uma similaridade de início e fim com as demais. Isso demonstra que existe diferença nas médias entre as combinações influenciada nesta análise pelo percentual do agregado reciclado.

Quanto à Figura 23b, analisando-se apenas o tipo (grúdo ou miúdo), é possível verificar que existe uma diferença entre eles, evidenciado que as misturas produzidas com substituição apenas do agregado miúdo apresentam melhores valores médios de resistência à compressão, conforme elencado nos resultados apresentados anteriormente.

Na Figura 23 observa-se graficamente as diferenças entre as médias utilizando o teste de *Tukey* com os dois fatores, percentual de substituição e tipo.

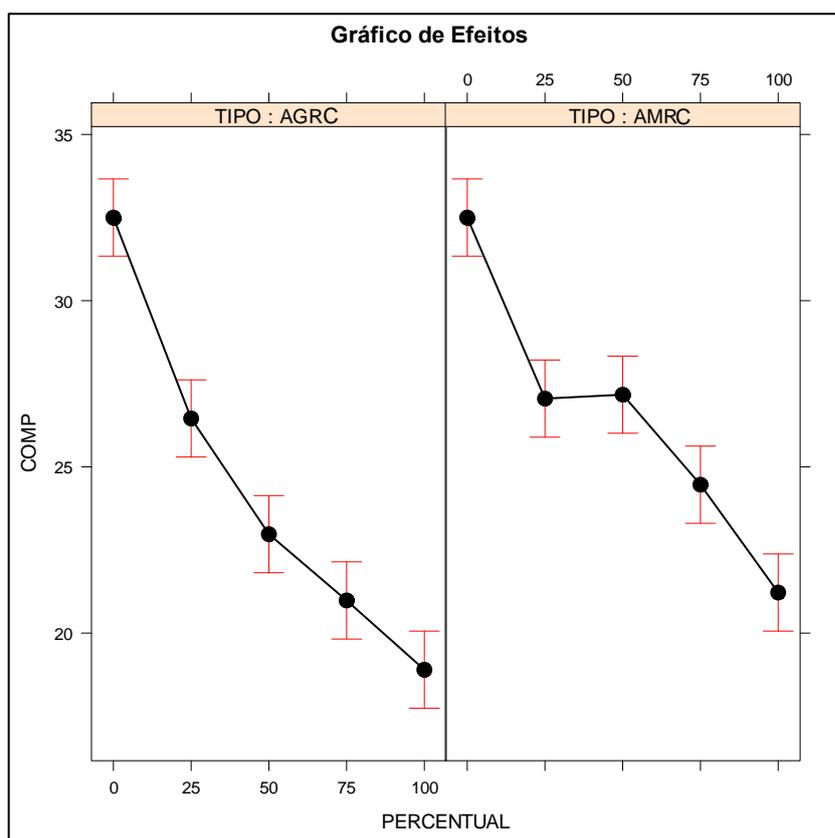
Figura 23 – Diferença entre as médias considerando ambos os fatores (percentual de substituição e o tipo)



Observa-se através do teste do *Tukey* (Figura 23) que existe uma interação entre os fatores percentual *versus* tipo. Misturas produzidas com 100% de ARCO substituindo apenas um tipo de agregado apresentaram maiores distancias entre as médias, quando comparadas à mistura de referência. Ao verificar a linha de tendência valor 0 da mistura de referência, é possível verificar que algumas misturas com ARCO apresentam medias dentro do intervalo e cruzam a linha de tendência, a exemplo das misturas 25 AMR *versus* 25AGR, 100 AMR *versus* 75 AGR e 100 AMR *versus* 50 AGR). Com isso, pode-se sugerir que estas misturas podem ser consideradas iguais à mistura produzidas apenas com o agregado natural.

A Figura 24 apresenta o gráfico de efeitos dos fatores na variável de resposta. Percebe-se que a resistência à compressão axial tende a cair mais rapidamente para as misturas produzidas substituindo-se apenas o agregado graúdo quando comparado às misturas produzidas com substituição do agregado miúdo apenas. Isso se deve ao fato de que, no concreto, o cimento e a brita são os principais responsáveis pela resistência mecânica, logo, ao se realizar a substituição da brita natural por reciclada transfere-se a responsabilidade da resistência à compressão totalmente ao cimento, ao contrário da substituição apenas do agregado miúdo, que é um material de enchimento, mantendo-se o suporte das tensões de forma equilibrada. Percebe-se também que entre 25% e 50% de AMRC não aconteceram grandes variações na resistência à compressão.

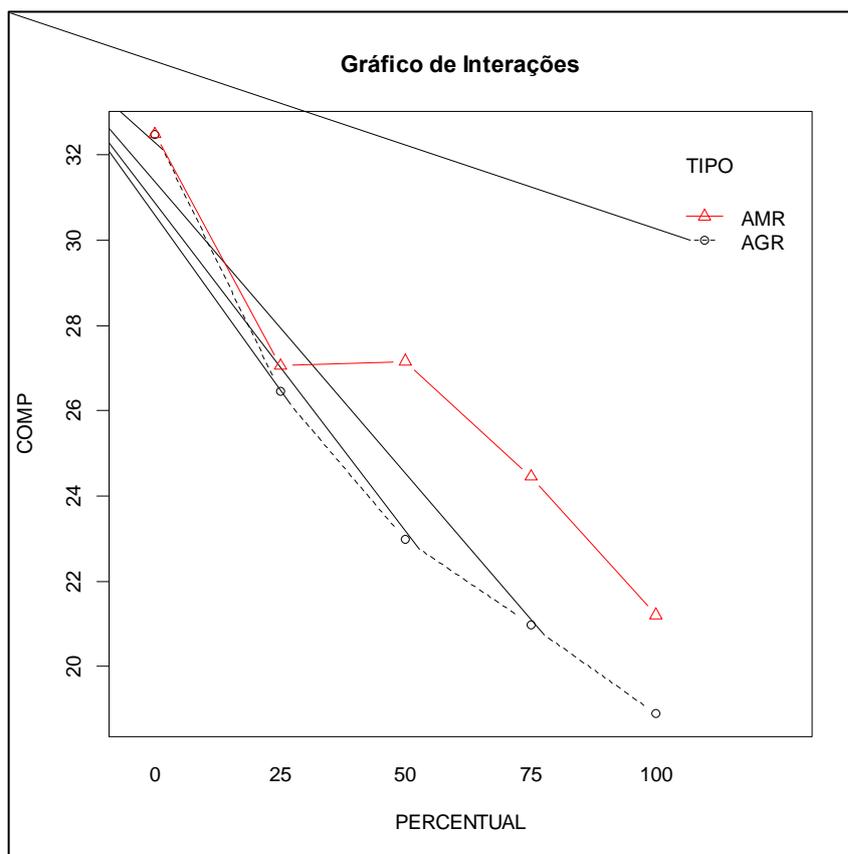
Figura 24- Gráfico de efeito dos fatores



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 25 está representado o gráfico de interação entre fatores para as misturas produzidas substituindo-se apenas o agregado reciclado graúdo, ou apenas o agregado reciclado miúdo.

Figura 25- Gráfico de interação entre os fatores



Fonte: Autor (2023)

Observa-se na Figura 25 que as misturas produzidas substituindo-se apenas o agregado reciclado graúdo, apresentam uma queda na resistência à compressão de forma mais expressiva quando comparadas às misturas produzidas substituindo-se apenas o agregado miúdo reciclado. Para ambas, a resistência é influenciada de forma negativa ao elevar o percentual de substituição do agregado reciclado. Independente do percentual de substituição, as retas tendem a não interagir, apresentando valores mais distantes a partir de 50% de substituição do ARCO.

5. CONCLUSÃO

5.1 Considerações finais

Ao se optar pela realização de substituição dos agregados miúdo e graúdo por agregados reciclados, a pesquisa visou evidenciar a abrangência de alterações nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido e, a partir disso, ser possível estabelecer novos planejamentos experimentais para a viabilização de dosagens que possam alcançar comportamentos mínimos esperados aos concretos para fins estruturais.

De modo complementar, o valor médio de resistência à compressão aos 28 dias acima de 20 MPa obtido no concreto reciclado indica a viabilidade da incorporação total de agregados reciclados miúdos, em aplicações para fins estruturais (classe de resistência de C20). Para misturas utilizando apenas o AGRC, o percentual de substituição ficou limitado em 75%, e com a utilização de ambos (miúdo e graúdo) o limite de substituição para ser classificado como função estrutural ficou entre o percentual de 50% a 75%. Com isso, é possível observar a interferência da dimensão do ARCO nos valores de resistência à compressão dos concretos.

Para as demais misturas que apresentaram valores de resistência à compressão inferiores a 20 MPa (substituindo-se em 100% o AGRC e em 75% e 100% os dois agregados simultaneamente) os concretos podem ser utilizados em aplicações não estruturais, a exemplo de pavimentação e componentes para alvenarias de infraestrutura urbana como blocos, meios-fios.

Desta forma, os resultados obtidos mostraram-se, em parte, coerentes com os presentes na literatura, apresentando as propriedades dos concretos produzidos com o ARCO, e como a inserção deste material influência nos resultados.

Vale ressaltar que a utilização de agregado reciclado é uma realidade em outros países, de modo que é importante a pesquisa continuada com parcerias público-privadas, como também a realização de outros estudos, buscando-se meios de adequar as propriedades dos agregados reciclados e estabelecer limites de substituições acima de 20% (percentual atualmente preconizado pela NBR 15116/2021 de agregados convencionais por reciclados para ambas as dimensões (miúdo e graúdo).

Desta forma, compreende-se que a norma NBR 15116/2021 é conservadora, no que se refere ao percentual de substituição do agregado natural pelo reciclado, uma vez que se faz necessário realizar outras investigações além das propriedades mecânicas dos concretos com a utilização destes agregados, a exemplo do que foi discutido na presente pesquisa, a fim de expandir a utilização dos ARCO em misturas cimentícias.

Quanto às propriedades no estado fresco, todas as misturas produzidas com ARCO em diversos teores (25%, 50%, 75% e 100%), apresentaram uma trabalhabilidade adequada para concretos convencionais que podem ser lançados manualmente ou bombeados, portanto, aplicáveis em diversas ocasiões. Isso pode ter ocorrido pela eficiência da pré-molhagem, fazendo com que a água utilizada na mistura não fosse absorvida pelo agregado.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Buscando dar continuidade aos estudos realizados, sugerem-se os seguintes temas para serem abordados em futuras pesquisas:

Realizar estudo semelhante substituindo o agregado reciclado misto.

Análise do índice de forma dos agregados reciclados utilizados;

Realizar uma análise de microscopia eletrônica de varredura para compreender sobre a zona de transição do agregado;

Uso de modelagem computacional para propiciar uma análise maior da variação nos percentuais, permitindo-se trabalhar com intervalos de substituição intermediários (30%, 40%, 60%) dos agregados sem gerar esforço experimental e consumo exacerbado de materiais;

Analisar a viabilidade econômica da utilização dos traços estudados na presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABREU, I. L. R.; LACERDA, E.; MAGALHÃES, A. G. **Influência da utilização dos agregados reciclados na profundidade de carbonatação do concreto.** Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto. Bonito: IBRACON, 2015.

AFRICANO, N. A. **Concreto com agregado graúdo reciclado de resíduo da construção e demolição para fins estruturais.** Dissertação. Mestrado em engenharia civil.) Universidade Estadual Paulista, 2021.

ALBERTE, E. P. V.; HANDRO, J. B. Estado do conhecimento acerca de especificações técnicas e normativas para agregados reciclados de RCD. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 305-320, jul./set. 2021. ISSN 1678-8621 **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.**
<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000300553>.

AMORIM, T. F. **Propriedades de durabilidade de concreto autoadensável leve com agregado reciclado.** Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. **Concreto: Ciência e Tecnologia** – Capítulo: Concreto com Agregados Reciclados. São Paulo: IBRACON, Editor G. C. Isaia, v. II, p. 1731-1767, 2011.

ARAÚJO, D. L.; FELIX, L. P.; SILVA, L. S.; SANTOS, T. M. Influência de agregados reciclados de resíduos de construção em propriedades mecânicas do concreto. REEC -**Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 1, Goiânia, GO, 2016.

ARNOLD, D. C. M; **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas.** Dissertação. Mestrado em engenharia civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

_____**NBR NM 16916:** Agregado miúdo- Determinação da densidade e absorção de água, Rio de Janeiro, 2021b.

_____**NBR NM 16917:** Agregado graúdo- Determinação da densidade e da absorção de água, Rio de Janeiro, 2021c.

_____**NBR NM 16972:** Agregados- Determinação da massa unitária e do índice de vazios, Rio de Janeiro, 2021d.

_____**NBR NM 16973:** Agregados- Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem, Rio de Janeiro, 2021e.

_____. **NBR NM 27:** Agregados- Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório, Rio de Janeiro, 2009a.

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

_____. **NBR 5738:** Concreto- Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR 5739:** Concreto- Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos- Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concretos endurecidos- Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009c.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto- Especificação, Rio de Janeiro, 2009d.

_____. **NBR 45:** Agregados- Determinação de massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland- Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **ABNT NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto armado -Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. O que é entulho. ABRECON. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/entulho/o-que-e-entulho/>>. Acesso em: 25 abr. 2022.

_____. **Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015.** ABRECON. São Paulo. 2015.

_____. **Tabela resolução CONAMA N° 307**, 05 de julho de 2002. ABRECON. 15 de agosto de 2017. Disponível em: < https://abrecon.org.br/wp-content/uploads/abrafati_abrecon.pdf >. Acesso em: 25 abr. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021.** ABRELPE. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: Download Panorama 2021 – Abrelpe Acesso em: 18 abr. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-33-** Standard specification for concrete aggregates. United States, 2018.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** 5ª Edição revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 490 p. V. 1.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, em 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, Casa Civil, Superintendência para Assuntos Jurídicos, 2010. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 25 abr. 2022.

_____. **Resolução Conama nº 307**, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Diário Oficial da União, Brasília, n. 136, p. 95-96, 17 jul. 2002.

_____. **Resolução Conama nº 469**, de 29 de julho de 2015. Altera a Resolução CONAMA n 307, de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Diário Oficial da União, Brasília, Publicação DOU, de 30/07/2015, páginas 109 e 110.

_____. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, Secretaria de Qualidade Ambiental. Brasília, 2020. 187 p.

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

BRITO, J. D.; ALVES, F. Concrete With recycled aggregates: the Portuguese experimental research. DE civil-IST, Technical University of Lisbon, **Portugal Materials and Structures, Springer**, v.43, n.1.p.35-51,2010.

BUILDING CONTRACTORS SOCIETY OF JAPAN. **Proposed standard for the use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete**. Tokyo, 1977.

BUTTLER, A. M. **Concreto com Agregados Graúdos Reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 23. 187 f. São Paulo. Dissertação. Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concreto produzido com agregado reciclado, considerando-se a variabilidade de composição do RCC**. São Carlos/SP: Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007;

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. Modelagem da resistência a compressão de concretos produzidos com agregados reciclados de RCD. **Minerva**. V.4 (1), p.75-84,2007.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 254f. Tese. Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v.24, n.4, p. 421-430, 2010.

CARNEIRO, J. A. **Uso de agregado reciclado e fibras de aço em concreto simples e concreto armado sob flexão**. 2011. 159 f. 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.

CARTUXO, F.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. *et al.*, Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates–Influence of the superplasticizer, **Construction and Building Materials**, v. 89, pp. 36-47, 2015.

CORINALDESI, V. Structural concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate: from investigation to design. Università Politecnica delle Marche - **Construction and Building Materials**, Ancona, Italy, v. 24, p. 1616–1620 *Advances in Civil Engineering*, Hindawi, 2011.

CONFÉDÉRATION SUISSE. **OT 70085**: instruction technique: utilisation de matériaux de construction minéraux secondaires dans la construction d'abris. Berne, 2006.

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

COSTA. **Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos produzidos com agregados miúdos reciclados e metacaulim dosados pelo modelo de empacotamento compressível**. Dissertação. Mestrado em Engenharia civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

DEVELOPMENT BUREAU OF THE GOVERNMENT OF THE HONG KONG. **WBTC – Works Bureau Technical Circular No. 12/2002**: specifications facilitating the use of recycled aggregates. Hong Kong, 2002.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v.29, p. 397-401, 2007.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. D. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**. Lisboa - Portugal, 2010. v. 32, p. 9–14, 2010.

FIGUEIREDO, N.; VARGAS, A., **Análise da influência do uso de agregados reciclados da região de Criciúma/SC nas propriedades mecânicas de concretos estruturais**, Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC, Brasil, 2016.

FROTTÉ, C. *et al.* Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. **Revista Matêrial** (Rio de Janeiro), SciELO Brasil, v. 22, 2017, Departamento Acadêmico de Construção Civil – UTFPR, 2017.

GERIN, M.; SALES, A.; NARDIN, S. Mechanical and physical properties of recycled aggregates concrete. In: **Revista Tecnológica**, Universidade Estadual de Maringá.2019.

GOMES, H. C. **Agregados reciclados em concretos para mitigação de impactos da indústria da construção civil**. Trabalho de conclusão de curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.Varginha,2021.

GOMES, M.; BRITO, J. D.; BRAVO, M. Mechanical performance of structural concrete with the incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers**, v. 26, n. 10, p.04014076, 2014.

GONÇALVES, M. S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos**. 2011. 116f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil- Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

GONZÁLEZ-TABOADA, I.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; CARRO-LÓPEZ, D. Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis. **Mater. Construcc.** 66 [323], e 089. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2016.06415>. 2016

GUSMÃO, A. D. **Manual de Gestão de Resíduos Sólidos da Construção Civil**. Camaragibe: CCS Gráfica Editora, 2008.

HAFEZ, H.; KURDA, R.; KURDA, R. *et al.* A critical review on the influence of fine recycled aggregates on technical performance, environmental impact and cost of concrete. **Applied Sciences**, v. 10, pp. 1-24, 2020.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado (1993)**. 248 f. Tese. Doutorado em Engenharia de Construção Civil– Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HUDA, S. B.; ALAM, M. S. Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete. **Construction and building materials**, v. 65, p. 574-582,2014.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON. 2007. V. 2.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. **JIS A 50 21**: recycled aggregate for concrete-Class H. Tokyo, 2005.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. **JIS A 50 2122**: recycled aggregate for concrete-Class M. Tokyo, 2007.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. **JIS A 50 2123**: recycled aggregate for concrete-Class L. Tokyo, 2006.

JIMÉNEZ, A. M. G. **Estudo experimental de um resíduo de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação**. 2011. 123 f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. E 471: **Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos**. Lisboa, 2009.

LATTERZA, L. M. **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição. Um novo material para fabricação de painéis leves de vedação**. Dissertação. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 1998.

LEITE, M. B. **Avaliação das Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. Porto Alegre, 2001. 270f. Tese. Doutorado em Engenharia– Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

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

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**, Tese. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2001.

LY, B. T.; FAR, H. Investigation on properties of coarse reclaimed aggregates and the effects on concrete strength and workability *Structural Concrete*, **Wiley Online Library**, v.20, n. 5, p. 1622–1630, 2019.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. 2007. Dissertação. Mestrado em Engenharia. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MAIA, P. S.; JUNIOR, L. A. S.; SALLES, P. V.; CARVALHO, M. V. S. Avaliação técnica de concreto estrutural fabricado com agregado graúdo de resíduos de construção e demolição. **Research, Society and Development**, v.11, n.8, 2022.

MALTA, J. O. **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição**. 2012. 1792 f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana -Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

MALTA, J. O.; SILVEIRA, V. S.; GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D. **Ambiente Construído** 14, 1 (2014) 85.

MARIANO, R. D. **Efeito da adição do pó de retifica de compósitos fenólicos nas propriedades de matrizes cimentícias**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil. Escola Politécnica, Universidade federal da Bahia, Salvador, 2017.

MARTÍNEZ, P. S.; CORTINA, M. G.; MARTÍNES, F. F. 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** 118, p. 162-169, 2016.

MATIAS, D.; BRITO, J.; ROSA, A.; PREDO, D. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizer. **Construction and Building Materials**, 44, 101109.10.1016/j.conbuildmat.2013.03.011, 2013.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª ed. São Paulo: Ibracon. 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedade e Materiais**. 2ª Edição. São Paulo: IBRACON, p. 751, 2014.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1ª Edição, Editora PINI, 1994.

MELO, C. V. A. **Avaliação e determinação de parâmetros para otimização de esqueleto granular em atendimento à autodensibilidade de concretos**. Tese. Doutorado em Materiais. Programa de Pós graduação em materiais da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

MIRANDA, L. F. R.; TORRES, L.; VOGT, V.; BROCARD, F. L. M.; BARTOLI, H. Panorama atual do setor de reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. In: **XVI encontro nacional de tecnologia do ambiente construído**. São Paulo. 2016.

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

MORAES, N. C., SILVA, J. M., LIMA, H. M. Uso de entulho de construção civil como sistema de cobertura para abatimento de drenagem ácida de mina em uma mina abandonada de pirita. **REM: R. Esc. Minas**, v. 64, n. 2, pp. 213-218, 2011.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 134p. Dissertação (Mestrado)- Universidade de São Paulo, 2005.

NAGGALI, A. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. São Paulo: Oficina de textos, 2014.

NANYA C. S. **O uso de resíduos de construção civil como substituto de agregados naturais em concretos: avaliação de alguns parâmetros de durabilidade**. 2018. Dissertação. Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Programa de pós-graduação em Estruturais e Construção Civil da Universidade de São Carlos – São Paulo.

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

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2.ed. São Paulo: PINI. 738p. 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5.ed. Porto Alegre, 2016.

NOGUEIRA J. R. S. **Avaliação da influência do método da mistura nas propriedades de concreto produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto**. 2015. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil. Programa em Engenharia Civil da Universidade do vale do Rio dos Sinos-UNISINOS- São Leopoldo, 2015.

OLIVEIRA, C. F. **Análise das propriedades do concreto quando utilizado após início de pega: tempo de utilização de concreto estrutural vencido**. Dissertação. Mestrado em construção civil- Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018.

PABLOS, J. M.; SICHIERI, E. P.; ZAGO, M. S. A. Study for utilization of industrial solid waste, generated by the discharge of casting sand agglomeration with clay and of blast furnace slag. *in: Concrete composition. Key Engineering Materials (Online)*, v.517, p.611-616, 2012.

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.

PAN, Z.; HE, L.; QIU, L.; KORAYEM, A. H.; LI, G.; ZHU, J. W.; COLLINS, F.; LI, D.; DUAN, W. H.; WANG, C. Mechanical properties and microstructure of a graphene-cement oxide composite. **Construction and Building Materials**, v.58, p. 140–147, 2015.

PEDRO, D.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; BRAVO, M. Technical Specification Proposal for Use of High-Performance Recycled Concrete Aggregates in High-Performance Concrete Production. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, p. 1-1, 2018.

PRASADA, R. D.; MADHAVI, M. A study on partially used recycled coarse aggregate cement concrete. **Asian journal of civil engineering** (building and housing), v. 14, n. 6, p. 917-933.2013.

RANGEL, C. S. **Influência de agregados graúdos reciclados nas propriedades estruturais de concretos de resistência normal e de alto desempenho**. 2015. 204f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

RAKSHVIR, M.; BARAI, S. V. Estudos sobre concreto reciclado à base de agregados. **Resíduos Manag Res**. 2006 Jun;24(3):225-33. doi: 10.1177/0734242X064820. 16784165.

REIS G. R.; SILVA, C. P.; LIMA, H. J. N. Avaliação do uso de agregados reciclados na fabricação de concreto. **Inter scientia**, v.8 n.1 (2021).

RIAZ, M. R.; HAMEED, R.; ILYAS, M.; AKRAM, A.; SIDDIQI, Z. A Mechanical characterization of recycled aggregate concrete Pakistan **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 16. p. 25-32, 2016.

RODRIGUES, C. R. S.; FUCALE, S. Dosagem de Concretos Produzidos com Agregado Miúdo Reciclado de Resíduo de Construção e Demolição. **Ambiente Construído**, v. 14, p. 99–111, 2014.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. ET-67. São Paulo: ABCP,1990.

SANTOS, A. N. **Diagnóstico da situação dos resíduos de construção e demolição (RCD) no município de Petrolina (Pe)**. 2008.111f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

SANTOS, A. A. M. **Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto: dosagem e produção**. **Dissertação**. Mestrado em Engenharia Civil- Programa de pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2016.

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

SERIFOU, M.; SBARTAÏ, Z. M.; YOTTE, S.; BOFFOUÉ, M. O.; EMERUWA, E.; BOS, F. A Study of Concrete Made with Fine and Coarse Aggregates Recycled from Fresh Concrete Waste. **Journal of Construction Engineering**, v. 2013, (2013).

Shi-cong Kou, Bao-jian Zhan, Chi-sun Poon. Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete, **Construction and Building Materials**, Volume 28, Issue 1, 2012, Pages 549-556, ISSN 0950 0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.027>.

SILVA, O. F. **Estudo experimental e numérico de agregado graúdo reciclado tratado para aplicação em concreto**. Tese. Doutorado em Ciência dos materiais. Universidade Federal de Alagoas, 2020.

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

SILVA, K. A. N; LIMA, I. E. P; GOMES, P. C. C. Produção e Caracterização de agregados graúdos e miúdos reciclado de concreto por dois processos de cominuição distintos. 6º encontro nacional sobre aproveitamento de resíduos na construção civil. **Anais...** Pag. 383- 397.2019.

SILVA, R.; BRITO, J. D.; DHIR, R. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. **Journal of Cleaner Production**. Elsevier, v. 236, p. 117629, 2019.

SOUZA, W. F. **Estudo sobre a aplicação de agregado reciclado de concreto em construção de pavimentos**. Dissertação. Mestrado em Ciências- Programa de pós-graduação em Engenharia de Transportes. Universidade de São Paulo, 2011.

TAHAR, Z.; NGO, T.; HADJ, E. *et al.* Effect of Cement and Admixture on the Utilization of Recycled Aggregates in Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 91–102, 2017.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de Propriedades do Concreto Produzido com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição Visando Aplicações Estruturais**. Maceió, 2007. 157f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

TERZIAN, P. **Concreto pré-fabricado. Concreto Ensino Pesquisas e Realizações**. IBRACON, volume 2, 2005.

TOMOSAWA, F. *et al.* The Way Concrete Recycling Should Be. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 3, n.1. 2005. P. 3-16.

TORRALES, B. M.; COUTO, A. F.; NOGUEIRA, G. S. F.; SANDOVAL, G. F. B; ALVES, G. P; Souza, I. C; Paulino, R. S. E. Estudo Comparativo De Diferentes Métodos De Dosagem De Concretos Convencionais. **Revista de Engenharia e tecnologia**. V.10, N°1, 2018.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Ibracon, 2011.

VERAS, L. M. **Estudo Das Propriedades Do Concreto Com Diferentes Proporções De Agregados De Resíduos De Construção Civil Com E Sem Saturação Prévia**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

WERLE, A. P. **Determinação de Propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

ZAREEI, S. A.; AMERIA, F.; BAHRAMIA, N.; SHOAEI, P.; MUSAEI, H. R.; NURIANA, F. Green high strength concrete containing recycled waste ceramic aggregates and waste carpet fibers: Mechanical, durability, and microstructural properties. **Journal of Building Engineering**. v. 26, p. 100914, 2019.

APÊNDICE A – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Tabela A1- Granulometria natural – Miúdo

		AMOSTRA 1 (kg)	0,959	AMOSTRA 2 (kg)	0,958		
PENEIRA (mm)	MASSA RETIDA (g)		AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA		
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	% RETIDA	% RETIDA	% RETIDA	%ACUMULADA	
4,75	23,34	25,72	2,43	2,68	2,56	2,56	
2,4	74,65	72,23	7,78	7,54	7,66	10,22	
1,2	266,74	271,4	27,81	28,33	28,07	38,29	
0,6	379,19	381,04	39,54	39,77	39,66	77,95	
0,3	130,19	126,32	13,58	13,19	13,38	91,33	
0,15	53,92	51,82	5,62	5,41	5,52	96,85	
0,075	21,68	21,31	2,26	2,22	2,24	99,09	
FUNDO	9,29	8,16	0,97	0,85	0,91	100,00	
TOTAL	959	958					
					D. MAXIMO	4,75	
					M. FINURA	3,17	

Fonte: Autor (2023)

Tabela A2- Granulometria natural – Graúdo

		AMOSTRA 1 (kg)	1941,82	AMOSTRA 2 (kg)	1958,84		
PENEIRA (mm)	MASSA RETIDA (g)		AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA		
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	% RETIDA	% RETIDA	% RETIDA	%ACUMULADA	
25	0	0	0,00	0,00	0,00	0	
19	0	0	0,00	0,00	0,00	0	
12,5	18,76	7,21	0,97	0,37	0,67	0,67	
9,5	44,75	62,98	2,30	3,22	2,76	3,43	
6,3	606,02	602,43	31,21	30,75	30,98	34,41	
4,75	705,7	722,4	36,34	36,88	36,61	71,02	
2,38	512,45	516,49	26,39	26,37	26,38	97,40	
FUNDO	54,14	47,33	2,79	2,42	2,60	100,00	
TOTAL	1941,82	1958,84					
					D. MAXIMO	12,5	
					M. FINURA	1,10	

Fonte: Autor (2023)

Tabela A3 - Granulometria AMRC

			AMOSTRA 1 (kg)	0,5	AMOSTRA 2 (kg)	0,5
PENEIRA (mm)	MASSA RETIDA (g)		AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA	
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	% RETIDA	% RETIDA	% RETIDA	%ACUMULADA
4,75	22860	16950	4,74	3,47	4,11	4,11
2,4	268740	194500	55,71	39,86	47,78	51,89
1,2	95940	97000	19,89	19,88	19,88	71,78
0,6	47660	69660	9,88	14,28	12,08	83,85
0,3	29930	57170	6,20	11,72	8,96	92,81
0,15	10810	33080	2,24	6,78	4,51	97,32
0,075	6050	18240	1,25	3,74	2,50	99,82
FUNDO	420	1360	0,09	0,28	0,18	100,00
TOTAL	482410	487960				
					D. MAXIMO	4,75
					M. FINURA	4,02

Fonte: Autor (2023)

Tabela A4 - Granulometria AGRC

			AMOSTRA 1 (kg)	2.0	AMOSTRA 2 (kg)	2.0
PENEIRA (mm)	MASSA RETIDA (g)		AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA	
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	% RETIDA	% RETIDA	% RETIDA	%ACUMULADA
19	0	0	0,00	0,00	0,00	0
12,5	39670	39130	2,02	1,99	2,01	2,01
9,5	650600	640700	33,17	32,60	32,89	34,89
6,3	989670	1007120	50,46	51,25	50,85	85,75
4,75	264140	261120	13,47	13,29	13,38	99,13
FUNDO	17130	17130	0,87	0,87	0,87	100,00
TOTAL	1961210	1965200				
					D. MAXIMO	12,5
					M. FINURA	2,22

Fonte: Autor (2023)

Tabela A5 – Material Pulverulento

Agregado	Massa inicial (g)	Amostra 1	% do mat	Amostra 2	% do mat	Média	% do mat (média)	Material pulverulento (%)
Nat Miúdo	1000	959	95,9	958	95,8	958,50	95,85	4,15
AMRC	500	482,41	96,48	487,96	97,59	485,19	97,03	2,97

Fonte: Autor (2023)

Tabela A6- Absorção de água

Agregado	Amostra 1 %	Amostra 2 %	Média %
Nat Miúdo	0,98	1,54	1,26
Nat Graúdo	0,84	0,88	0,86
AGRC	4,31	4,27	4,31
AMRC	7,64	6,04	6,84

Fonte: Autor (2023)

Tabela A7- Massa específica saturada superfície seca

Agregado	Amostra 1 (g/cm ³)	Amostra 2 (g/cm ³)	Média (g/cm ³)
Nat Miúdo	2,30	2,41	2,36
Nat Graúdo	2,56	2,62	2,59
AGRC	2,19	2,13	2,16
AMRC	2,08	2,18	2,13

Autor (2023)

APÊNDICE B – TESTE DE *TUKEY*

Tabela B1 – Resultados do teste de *Tukey* considerando apenas o percentual de substituição

Percentual	diff	lwr	upr	p adj
25-0	-5.73333	-7.40263	-4.06403	1.87E-08
50-0	-7.41833	-9.08763	-5.74903	2.04E-10
75-0	-9.775	-11.4443	-8.1057	1.25E-12
100-0	-12.4367	-14.106	-10.7674	3.26E-14
50-25	-1.685	-3.3543	-0.0157	0.047196
75-25	-4.04167	-5.71097	-2.37237	4.75E-06
100-25	-6.70333	-8.37263	-5.03403	1.25E-09
75-50	-2.35667	-4.02597	-0.68737	0.003399
100-50	-5.01833	-6.68763	-3.34903	1.69E-07
100-75	-2.66167	-4.33097	-0.99237	0.000987

Fonte: Autor (2023)

Tabela B2 – Resultado do teste de *Tukey* considerando apenas a dimensão do ARCO

Column1	diff	lwr	upr	p adj
AMR-AGR	2.112	1.376039	2.847961	7.5 E-06

Fonte: Autor (2023)

Tabela B3 – Resultados do teste de *Tukey* entre os fatores percentual de substituição e dimensão

Column1	diff	lwr	upr	p adj
25:AGR-0:AGR	-	-	-	8.566631E+08
50:AGR-0:AGR	6.033333E+14	8.826986E+14	3.239681E+14	4.907980E+05
75:AGR-0:AGR	9.510000E+14	1.230365E+14	6.716347E+14	1.615228E+04
100:AGR-0:AGR	1.151000E+03	1.430365E+14	8.716347E+14	7.354783E+02
0:AMR-0:AGR	1.359000E+03	1.638365E+14	1.079635E+14	1.000000E+00
25:AMR-0:AGR	0.000000E+00	2.793653E+14	2.793653E+14	3.910651E+09
50:AMR-0:AGR	5.433333E+14	8.226986E+14	2.639681E+14	5.159241E+09
75:AMR-0:AGR	5.326667E+14	8.120319E+14	2.533014E+14	8.879972E+06
100:AMR-0:AGR	8.040000E+02	1.083365E+14	5.246347E+14	2.307661E+04
50:AGR-25:AGR	1.128333E+14	1.407699E+14	8.489681E+14	7.994191E+14
	3.476667E+14	6.270319E+14	6.830141E+14	

75:AGR-25:AGR	-	-	-	3.496414E+09
100:AGR-	-	-	-	
25:AGR	5.476667E+14	8.270319E+14	2.683014E+14	2.488914E+07
0:AMR-25:AGR	7.556667E+14	1.035032E+14	4.763014E+14	8.566631E+08
25:AMR-25:AGR	6.033333E+14	3.239681E+14	8.826986E+14	9.984670E+14
50:AMR-25:AGR	6.000000E+14	2.193653E+14	3.393653E+14	9.948374E+14
75:AMR-25:AGR	7.066667E+14	2.086986E+14	3.500319E+14	3.043460E+14
100:AMR-	-	-	-	
25:AGR	2.006667E+14	4.800319E+14	7.869859E+14	6.304234E+09
75:AGR-50:AGR	-	-	-	
100:AGR-	-	-	-	
50:AGR	2.000000E+00	4.793653E+14	7.936525E+14	3.082562E+14
0:AMR-50:AGR	4.080000E+02	6.873653E+14	1.286347E+14	1.499829E+14
25:AMR-50:AGR	9.510000E+14	6.716347E+14	1.230365E+14	4.907980E+05
50:AMR-50:AGR	4.076667E+14	1.283014E+14	6.870319E+14	1.513754E+14
75:AMR-50:AGR	4.183333E+14	1.389681E+14	6.976986E+14	1.126583E+14
100:AMR-	-	-	-	
50:AGR	1.470000E+02	1.323653E+14	4.263653E+14	6.911913E+14
100:AGR-	-	-	-	
75:AGR	1.773333E+14	4.566986E+14	1.020319E+14	4.591879E+14
0:AMR-75:AGR	-	-	-	
25:AMR-75:AGR	2.080000E+02	4.873653E+14	7.136525E+14	2.635287E+14
50:AMR-75:AGR	1.151000E+03	8.716347E+14	1.430365E+14	1.615228E+04
75:AMR-75:AGR	6.076667E+14	3.283014E+14	8.870319E+14	7.697713E+08
100:AMR-	6.183333E+14	3.389681E+14	8.976986E+14	5.925334E+08
75:AMR-	3.470000E+02	6.763475E+14	6.263653E+14	8.142520E+14
100:AMR-	2.266667E+13	2.566986E+14	3.020319E+14	9.999996E+14
0:AMR-100:AGR	1.359000E+03	1.079635E+14	1.638365E+14	7.354783E+02
25:AMR-	8.156667E+14	5.363014E+14	1.095032E+14	6.967564E+06
100:AMR-	8.263333E+14	5.469681E+14	1.105699E+14	5.593334E+06
50:AMR-	5.550000E+02	2.756347E+14	8.343653E+14	2.895207E+09
100:AMR-	2.306667E+14	4.869859E+14	5.100319E+14	1.626617E+14
25:AMR-0:AMR	-	-	-	
50:AMR-0:AMR	5.433333E+14	8.226986E+14	2.639681E+14	3.910651E+09
75:AMR-0:AMR	-	-	-	
100:AMR-0:AMR	5.326667E+14	8.120319E+14	2.533014E+14	5.159241E+09
50:AMR-25:AMR	8.040000E+02	1.083365E+14	5.246347E+14	8.879972E+06
75:AMR-25:AMR	-	-	-	
100:AMR-25:AMR	1.128333E+14	1.407699E+14	8.489681E+14	2.307661E+04
50:AMR-0:AMR	1.066667E+14	2.686986E+14	2.900319E+14	1.000000E+15
75:AMR-0:AMR	-	-	-	
100:AMR-0:AMR	2.606667E+14	5.400319E+14	1.869859E+14	8.010715E+14

100:AMR- 25:AMR	- 5.850000E+14	- 8.643653E+14	- 3.056347E+14	1.352371E+09
75:AMR-50:AMR	- 2.713333E+14	- 5.506986E+14	- 8.031919E+14	6.136307E+14
100:AMR- 50:AMR	- 5.956667E+14	- 8.750319E+14	- 3.163014E+14	1.036051E+09
100:AMR- 75:AMR	- 3.243333E+14	- 6.036986E+14	- 4.496808E+14	1.515429E+14

Fonte: Autor (2023)