

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

THAUANY ALVES PASTOR

ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO PARA A GERAÇÃO DE BLOCOS RECICLADOS

Maceió - AL

2024

THAUANY ALVES PASTOR

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DO USO DE RESÍDUOS DE DEMOLIÇÃO PARA A
GERAÇÃO DE BLOCOS RECICLADOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – PPGEC/UFAL, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas e materiais.

Orientador: Prof. Dr. Wayne Santos de Assis.

Maceió - AL

2024

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

P293a

Pastor, Thauany Alves.

Análise de viabilidade do uso de resíduos de demolição para a geração de blocos reciclados / Thauany Alves Pastor. - 2024.

152 f. : il.

Orientador: Wayne Santos de Assis.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 125-132.

Apêndices: f. 133-152.

1. Reciclado misto (Agregados). 2. Concreto, Blocos de. 3. Planejamento experimental. I. Título.

CDU:691.32



Universidade Federal de Alagoas
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº 7

Em sessão pública, aos 22 dias do mês de abril do ano de dois mil e vinte e quatro, às 14h00min, Sala de reunião 2 do Laboratório de Computação Científica e Visualização da UFAL, foi iniciada a defesa de dissertação de mestrado da aluna THAUANY ALVES PASTOR tendo como tema: "Análise da viabilidade do uso de resíduos de construção e demolição para a geração de blocos reciclados", como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, na área de concentração de ESTRUTURAS E MATERIAIS. A Banca Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. WAYNE SANTOS DE ASSIS (UFAL - Presidente - ORIENTADOR), Prof. Dr. PAULO CESAR CORREIA GOMES (UFAL - Examinador Interno) e Prof. Dr. MANOEL MARTINS DOS SANTOS FILHO (UFAL - Examinador Externo à Instituição). A candidata fez a apresentação da dissertação em 51 minutos. A defesa foi encerrada às 16 horas e 02 minutos.

Após o encerramento da defesa, em reunião confidencial, a Banca Examinadora, com base no Regimento Interno, decidiu por APROVAR a dissertação de mestrado, condicionada à realização das correções apresentadas pela Banca Examinadora, se houver, e entrega da versão final da tese, no prazo máximo de 60 dias, a contar da data da defesa, de acordo com o Termo de Compromisso assinado pela candidata.

Prof. Dr. WAYNE SANTOS DE ASSIS (Orientador - PPGEC/UFAL)

CPF: 918.887.355-20

Prof. Dr. PAULO CESAR CORREIA GOMES (Avaliador Interno - PPGEC/UFAL)

CPF: 468.814.504-78

Prof. Dr. MANOEL MARTINS DOS SANTOS FILHO (Avaliador Externo - UFS)

CPF: 112.780.724-20

Documento assinado digitalmente
 **MANOEL MARTINS DOS SANTOS FILHO**
Data: 22/04/2024 21:59:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. MANOEL MARTINS DOS SANTOS FILHO, IFAL

Examinador(a) Externo(a) à Instituição

Documento assinado digitalmente
 **PAULO CESAR CORREIA GOMES**
Data: 23/04/2024 21:55:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. PAULO CESAR CORREIA GOMES, UFAL

Examinador(a) Interno(a)

Documento assinado digitalmente
 **WAYNE SANTOS DE ASSIS**
Data: 22/04/2024 17:02:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. WAYNE SANTOS DE ASSIS, UFAL

Presidente

THAUANY ALVES PASTOR

Mestranda

Documento assinado digitalmente
 **THAUANY ALVES PASTOR**
Data: 23/04/2024 22:12:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

A Deus por todo o sustento e amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus a minha gratidão, por toda a força, sustento, persistência, coragem, sabedoria e por sempre me tirar da zona de conforto e me fazer alcançar todos os meus sonhos. À minha mãe do céu, Nossa Senhora, por interceder sempre por mim e me guiar nas minhas decisões de modo assertivo e por prover tudo que eu precisei durante essa jornada.

Aos meus pais, que me deram o dom da vida e sem ele nada disso seria possível e ao meu irmão e cunhada por todo orgulho e confiança durante a minha estrada. À minha mãe, em especial, que sempre lutou pelos meus sonhos e fez prover quando muitas vezes não tínhamos nada.

Aos meus parentes, por todo orgulho, incentivo e ajuda. Em especial a minha avó que graças a Deus estará comigo comemorando mais uma etapa na minha vida.

Ao meu orientador, Wayne Santos de Assis, por toda excelência como profissional e por ser grande espelho e exemplo como professor e orientador. Obrigada por toda paciência, pela disponibilidade e por lutar comigo pela finalização desse mestrado.

Agradeço também a meu grupo de pesquisa, em especial aos professores Paulo César Correia Gomes, Karoline Alves Melo Moraes, Wayne Santos de Assis e Cassia Vanessa Albuquerque de Melo por toda a orientação, pela partilha de conhecimento e auxílio durante todas as atividades, e pela disponibilidade nos momentos de dúvidas e questionamentos. Também de modo especial gostaria de agradecer a todos os alunos da pesquisa, em especial, ao doutorando Clovis Veloso de Santana e ao engenheiro Everton Luiz da Silva Mendes, por toda troca de conhecimento, aprendizado e apoio durante essa jornada.

Aos técnicos de laboratório por toda a disponibilidade durante os ensaios, por me orientar, acalmar e ajudar a realizar dentro do meu planejamento todas as minhas atividades.

Agradeço muito a Deus as amigas que construí ao longo desse mestrado, em especial, aos meus amigos do PPGE e PPGMAT que acompanharam toda a minha caminhada, compartilharam conhecimento, ajudaram e foram apoios em dias nublados. Também gostaria de lembrar dos meus professores de graduação, que mesmo eu deixando de ser aluna, continuaram se preocupando comigo e me ajudando em todas as dúvidas que tive.

Aos amigos de vida, todos vocês foram instrumento de Deus na minha vida, em especial, ao Rafael Alves por toda ajuda e apoio.

Agradeço à CAPES pela bolsa de estudo concedida, que permitiu que eu me dedicasse exclusivamente a esse mestrado em tempo integral.

RESUMO

O Nordeste é a terceira região de maior geração de resíduos de construção e demolição no país, de acordo com a ABRELPE (2021). Com o aumento da urbanização, há uma tendência de crescimento na geração de resíduos, o que levou a Organização das Nações Unidas a destacar os resíduos sólidos como um dos principais problemas atuais. Portanto, encontrar uma destinação adequada para esses resíduos fortalece a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento de cidades sustentáveis. Nesse contexto, surge uma oportunidade sustentável de destinação para os RCD's, como a produção de novos materiais construtivos, por exemplo, blocos reciclados, visto que os blocos possuem potencial de redução em até 30% dos custos da obra, conforme Paes (2010). Esta pesquisa avalia a viabilidade técnica de utilizar agregados reciclados de demolição mistos na produção de blocos, buscando reinseri-los na cadeia da construção civil e gerar novos materiais sustentáveis. Para tanto, o estudo foi realizado pelo grupo de pesquisa da Universidade Federal de Alagoas, utilizando os resíduos fornecidos pela empresa Braskem. Os agregados reciclados foram coletados, beneficiados, passaram por um processo de remoção de impurezas e por procedimentos de caracterização. Após essas etapas, foi adotado o planejamento experimental unifatorial, com a granulometria como fator, utilizando as seguintes combinações de agregados: 100% natural, miúdo reciclado e graúdo natural e miúdo natural e graúdo reciclado, no intuito de determinar a influência dessas combinações na resistência à compressão axial dos blocos. Para o estudo de dosagem, definiu-se a composição ótima, por meio do esqueleto granular, além de ser realizada a técnica de reometria compressiva para determinação da umidade ótima. Na etapa de produção dos blocos, foi realizado um novo estudo de dosagem, com o objetivo de determinar a umidade ótima para os blocos. Os resultados indicaram que os blocos produzidos com areia reciclada e brita natural foram os únicos que apresentaram resistência característica para blocos estruturais. Além disso, os testes estatísticos comprovaram, a um nível de significância de 5%, que os blocos com areia reciclada e brita natural apresentaram diferenças significativas em sua resistência média quando comparados aos demais conjuntos de blocos (naturais e combinação com areia natural e brita reciclada). Portanto, é possível produzir blocos reciclados que atendem a NBR 12118 (2013) para fins estruturais.

Palavras-chave: Agregado reciclado misto; Blocos de concreto; Planejamento Experimental.

ABSTRACT

The Northeast is the third largest region in Brazil in terms of construction and demolition waste generation, according to ABRELPE (2021). With increasing urbanization, there is a growing trend in waste generation, which has led the United Nations to highlight solid waste as one of the main current problems. Therefore, finding an adequate disposal for these wastes strengthens environmental sustainability and the development of sustainable cities. In this context, a sustainable opportunity for disposal of Construction and Demolition Wastes (CDW) arises, such as the production of new construction materials, for example, recycled blocks, since blocks have the potential to reduce construction costs by up to 30%, as per Paes (2010). This research evaluates the technical feasibility of using mixed recycled demolition aggregates in block production, aiming to reintegrate them into the construction chain and generate new sustainable materials. For this purpose, the study was conducted by the research group of the Federal University of Alagoas, using the waste provided by the company Braskem. The recycled aggregates were collected, processed, underwent an impurity removal process and characterization procedures. After these steps, a unifactorial experimental design was adopted, with granulometry as a factor, using the following aggregate combinations: 100% natural, recycled fine and natural coarse and natural fine and recycled coarse, in order to determine the influence of these combinations on the axial compressive strength of the blocks. For the dosage study, the optimum composition was defined, by means of the granular skeleton, in addition to the compressive rheometry technique being performed to determine the optimum moisture content. In the block production stage, a new dosage study was carried out, with the objective of determining the optimum moisture content for the blocks. The results indicated that the blocks produced with recycled sand and natural crushed stone were the only ones that presented characteristic strength for structural blocks. In addition, statistical tests proved, at a significance level of 5%, that blocks with recycled sand and natural crushed stone presented significant differences in their average strength when compared to the other sets of blocks (natural and combination with natural sand and recycled crushed stone). Therefore, it is possible to produce recycled blocks that meet NBR 12118 (2013) for structural purposes.

Keywords: Mixed recycled aggregate; Concrete blocks; Experimental Design.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivo Geral	18
1.1.1 Objetivos específicos	18
1.2 Justificativa	19
1.3 Estrutura da Dissertação	21
2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	23
2.1 Agregados reciclados.....	26
2.2 Características dos agregados provenientes do RCD	30
2.3 Concreto com agregado reciclado.....	33
3 BLOCOS DE CONCRETO	35
3.1 Processo de produção de blocos	36
3.2 Métodos de dosagem	38
3.2.1 Método de dosagem de Besser Company	39
3.2.2 Método ABCP	40
3.2.3 Método IPT/EPUSP.....	40
3.2.4 Método sugerido por Columbia	41
3.2.5 Método de Frasson Júnior.....	41
3.2.6 Método de dosagem proposto por Fernandes	42
3.4 Determinação da umidade ótima	43
3.4.1. Método de compactação utilizando a técnica de reometria compressiva para determinação da umidade ótima	46
4 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	49
4.1 Análise Estatística.....	52
5 MATERIAIS E MÉTODOS	55
5.1 Planejamento experimental	59
5.2 Coleta e seleção dos materiais	67
5.3 Britagem secundária dos agregados reciclados	70
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
6.1.1 Composição granulométrica	75
6.1.2 Material Pulverulento	79
6.1.3. Massa específica e Absorção de água.....	82

6.1.3	Massa Unitária	85
6.2	Esqueleto granular	85
6.3	Estudo de dosagem utilizando o fator granulometria	91
6.4	Reometria Compressiva	94
6.5	Caracterização dos blocos.....	99
6.6	Resistência à compressão	104
6.7	Análise Estatística.....	115
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	122
7.1	Sugestões para trabalhos futuros	124
	REFERÊNCIAS	125
	APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO PRIMÁRIO (ARP)	133
	Composição granulométrica	133

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-1 - Percentual de coleta de RCD para as regiões do Brasil.....	15
Figura 1-2 - Contribuição para geração de RSU em Alagoas	15
Figura 1-3 - Percentual de resíduos de construção civil por classe em Alagoas	16
Figura 1-4 Estimativa de geração de RCC no Estado de Alagoas	17
Figura 1-5 - 17 Objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil	20
Figura 2-1 - Classificação dos resíduos sólidos	25
Figura 2-2 - Beneficiamento e aproveitamento dos RCC.....	26
Figura 2-3 - Fluxograma de operações para obter agregado reciclado.....	27
Figura 2-4 - Propriedades dos agregados	30
Figura 2-5 - Características dos concretos reciclados	34
Figura 3-1 - Classificação dos blocos.....	35
Figura 3-2 - Bloco vazado de concreto simples	36
Figura 3-3 - Traço x Resistência à compressão	45
Figura 3-4 - Reometria compressiva	46
Figura 3-5 - Dispositivos para técnica de reometria compressiva.....	48
Figura 4-1 - Terminologia experimental	49
Figura 4-2 - Esboço dos procedimentos para o planejamento e análise dos resultados	51
Figura 4-3 - Esboço dos procedimentos para o planejamento e análise dos resultados	51
Figura 4-4 - Princípios do planejamento de experimentos	52
Figura 5-1 - Fluxograma do programa experimental.....	55
Figura 5-2 - Fluxograma da primeira etapa da metodologia da pesquisa.....	56
Figura 5-3 - Fluxograma da segunda etapa da metodologia da pesquisa	57
Figura 5-4 - Fluxograma do ensaio de massa unitária.....	58
Figura 5-5 - Fluxograma da terceira etapa da metodologia da pesquisa	59
Figura 5-6 - Planejamento experimental	60

Figura 5-7 - Molde bipartido e cilindro vazado: esquema de montagem das peças.....	61
Figura 5-8 - Procedimento das misturas	63
Figura 5-9 - Ponto de pelota	63
Figura 5-10 - Máquina universal de ensaios Shimadzu.....	64
Figura 5-11 - Fluxograma da quarta etapa da metodologia da pesquisa	65
Figura 5-12 - Vibro prensa manual	66
Figura 5-13 - Fluxograma da última etapa da metodologia da pesquisa	67
Figura 5-14 - Visão aérea da região de origem dos resíduos.....	68
Figura 5-15 - Descarregamento do RCD na UFAL.....	68
Figura 5-16 - Composição das impurezas do resíduo coletado	69
Figura 5-17 - Separação dos agregados	70
Figura 5-18 - Modelo de funcionamento do britador de mandíbulas	71
Figura 5-19 - Processo de britagem secundária: (a) britador de mandíbulas; (b) abertura e (c) placas	72
Figura 5-20 - Pilhas de amostragem	73
Figura 5-21 - Separação dos agregados reciclados.....	74
Figura 5-22 – Quarteamento do material.....	74
Figura 6-1 - Distribuição granulométrica do AMR e AMN	76
Figura 6-2 - Comparação entre as distribuições granulométricas	77
Figura 6-3 - Curva granulométricas do AGR e AGN.....	78
Figura 6-4 - Comparação entre as distribuições granulométricas	79
Figura 6-5 - Comparativo das composições <i>versus</i> massa unitária: (a) agregado natural; (b) AMR e AGN; (c) AMN e AGR	88
Figura 6-6 - Comparativo das composições <i>versus</i> índice de vazios; (a) agregado natural; (b) AMR e AGN; (c) AMN e AGR	90
Figura 6-7 - Faixas granulométricas da literatura (Composição 75%AMN e 25% AGN): (a) Pfeifferberger (1985) e (b) Fernandes (2023).....	91

Figura 6-8 - Faixas granulométricas da literatura (Composição 75%AMR e 25% AGN): (a) Pfeiffenberger (1985) e (b) Fernandes (2023).....	92
Figura 6-9 - Faixas granulométricas da literatura (Composição 75%AMN e 25% AGR): (a) Pfeiffenberger (1985) e (b) Fernandes (2023).....	93
Figura 6-10 - Gráfico de barras com as médias da resistência à compressão corrigida de cada grupo amostral.....	96
Figura 6-11 - Análise estatística do conjunto de dados: (a)agregado miúdo e graúdo natural; (b) agregado miúdo reciclado e graúdo natural e (c) agregado miúdo natural e graúdo reciclado	97
Figura 6-12 - Resistência à compressão cada teor de umidade	98
Figura 6-13 -Teor ótimo para a relação c/a 1:6	99
Figura 6-14 - Aparência dos blocos de concreto com agregados: (a) naturais (NAT); (b) miúdo reciclado e graúdo natural (AMR); (c) miúdo natural e graúdo reciclado (AGR)	100
Figura 6-15 - Aparência dos blocos de concreto com tonalidades diferentes utilizando agregado: (a) naturais (NAT); (b) miúdo reciclado e graúdo natural (AMR); (c) miúdo natural e graúdo reciclado (AGR)	101
Figura 6-16 - Macroestrutura dos blocos de concreto com agregados: (a) naturais (NAT); (b) miúdo reciclado e graúdo natural (AMR); (c) miúdo natural e graúdo reciclado (AGR)	102
Figura 6-17 - Comparação entre as resistências à compressão médias dos corpos de prova (técnica de reometria compressiva) e dos blocos	107
Figura 6-18 - Metodologia de compactação dos blocos: (a) Vibro prensa antes da compactação; (b) operador iniciando o processo de compactação; (c) energia de compactação aplicada ...	108
Figura 6-19 - Surgimento de fissuras (AN): (a) 6 toneladas; (b) 9 toneladas; (c) 12 toneladas; (d) 15 toneladas	109
Figura 6-20 - Surgimento de fissuras (AMR+AGN): (a) 7 toneladas; (b) 13 toneladas; (c) 16 toneladas; (d) 25 toneladas	110
Figura 6-21 - Surgimento de fissuras (AMN+AGR): (a) 3 toneladas; (b) 9 toneladas; (c) 13 toneladas; (d) 16 toneladas.	111
Figura 6-22 - Características de rupturas de cada conjunto de bloco (a) AN; b) AMR+AGN; (c) AMN+AGR.	113

Figura 6-23 - Comparativo entre resistência à compressão média e massa específica seca média	115
Figura 6-24 - Boxplot dos agregados presente nos blocos com tempo de cura de 21 dias	115
Figura 6-25 - Gráfico de papel de probabilidade: (a) AN; (b) AMR+AGN; (c) AMN+AGR	117
Figura 6-26 - Gráfico de intervalos de confiança para o desvio padrão	118
Figura 6-27 - Gráfico de efeitos	119
Figura 6-28 - Ajuste dos resíduos: (a) valores ajustados versus resíduos; (b) ordem de coleta versus resíduos.....	120
Figura 6-29 - Diferença entre as médias da resistência à compressão dos níveis	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1 - Interação entre os níveis do fator	60
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Normas técnicas referentes ao RCD.....	25
Tabela 2.2 - Características físicas dos agregados de Gomes (2021).....	29
Tabela 2.3 – Principais vantagens e desvantagens do uso de agregados reciclados no concreto seco e convencional.....	33
Tabela 3.1 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retratação ...	38
Tabela 3.2 - Fatores associados às metodologias de dosagem para blocos.....	39
Tabela 3.3 - Proporção de cimento e agregado pilotos para a resistência almejada.....	40
Tabela 3.4 - Autores que embasaram a dosagem de blocos nas metodologias citadas	43
Tabela 5.1 - Quantitativo de materiais utilizados para produzir cada corpo de provas.....	62
Tabela 5.2 - Quantitativo de materiais utilizados para o produzir 2 blocos	66
Tabela 5.3 - Dados referentes aos caminhões enviados para UFAL	69
Tabela 5.4 - Distribuição granulométrica das amostras	73
Tabela 6.1 - Comparação do módulo de finura com os métodos de dosagem	76
Tabela 6.2 - Teores de materiais pulverulento (AMR e AMN)	80
Tabela 6.3 - Comparação entre os percentuais de materiais pulverulentos.....	80
Tabela 6.4 - Teores de materiais pulverulentos (AGR e AGN)	81
Tabela 6.5 - Comparação entre percentuais de materiais pulverulentos da literatura	82
Tabela 6.6 - Massa específica e absorção de água (AMR e AMN).....	83
Tabela 6.7 - Massa específica e absorção de água	83
Tabela 6.8 - Comparação entre os percentuais de absorção de água dos agregados da literatura	84
Tabela 6.9 - Comparação das massas unitárias	85
Tabela 6.10 - Determinação da composição ótima.....	86
Tabela 6.11 - Comparativo de composições.....	87
Tabela 6.12 - Apresentação dos dados de resistência à compressão	94
Tabela 6.13 - Medidas descritivas de resistência à compressão.....	95

Tabela 6.14 - Apresentação das resistências à compressão corrigidas	95
Tabela 6.15 - Dimensões dos blocos	102
Tabela 6.16 - Dimensão média dos blocos	104
Tabela 6.17 - Resistência à compressão dos blocos	105
Tabela 6.18 - Resistência à compressão média dos blocos	105
Tabela 6.19 - Valores das resistências à compressão axial dos blocos	116
Tabela 6.20 - Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)	116
Tabela 6.21 - Resultados da análise de variância (ANOVA)	119
Tabela 6.22 - Teste de Tukey	121

1 INTRODUÇÃO

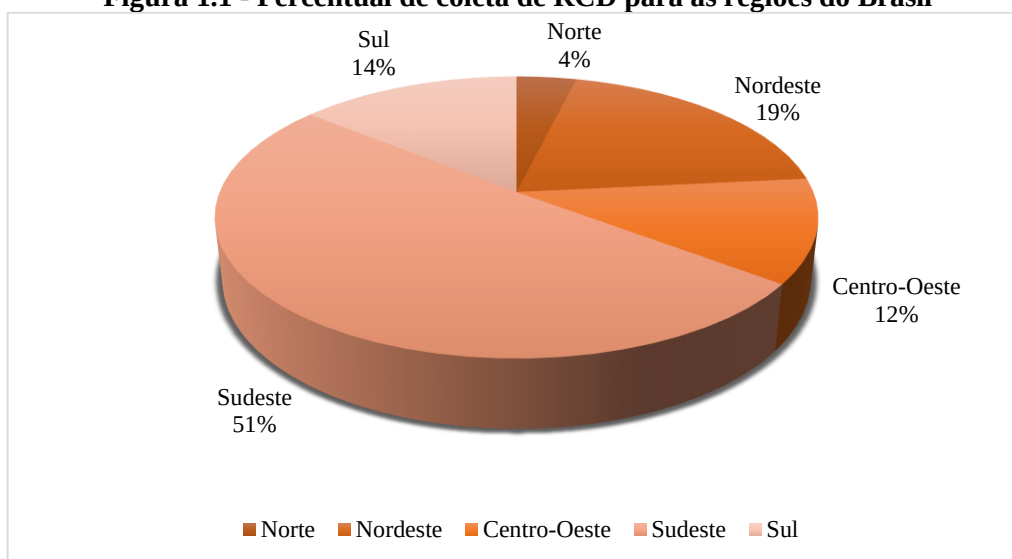
O crescimento e o desenvolvimento do setor da construção civil estão relacionados com o aumento demográfico. De acordo com o IBGE, a análise dos dados demográficos de 2010 e de 2022 revela um incremento populacional de 6,5%. Esse acréscimo, por sua vez, desempenha um papel crucial no estímulo ao consumo de materiais e na expansão de obras civis.

À medida que se aumenta o consumo de materiais do setor civil, a geração de resíduos provenientes de atividades de construção e demolição também se eleva. Além disso, o crescimento populacional, como já foi citado, também possui sua contribuição nesse aumento, principalmente em escala global. Portanto, é importante que os projetos relacionados a esse setor busquem estratégias de gerenciamento dos resíduos de construção e demolição (RCD) (Meireles; Rassi; Nunes, 2022).

Em países europeus, por exemplo, é comum a aplicação de técnicas de Análise de Fluxo de Material (AFM), que fornece uma quantificação precisa do fluxo de material e a criação de um inventário para a análise e descarte adequado desses resíduos, incluindo seu tratamento. Essa abordagem tornou-se essencial para mitigar os impactos ambientais e promover práticas mais sustentáveis na indústria da construção (Meireles; Rassi; Nunes, 2022).

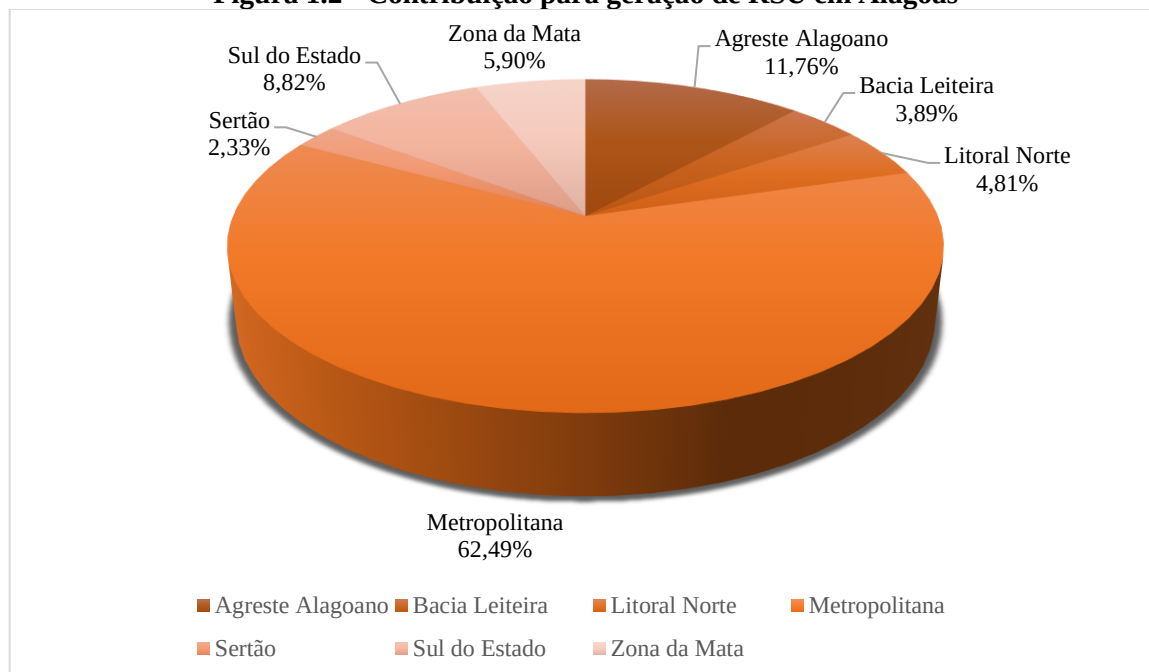
A Associação de Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) divulgou dados que revelam um quantitativo de resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados no Brasil, em 2022, totalizando cerca de 77,076 milhões de toneladas. Em 2021, foram registradas 76,5 milhões de toneladas, permitindo concluir que houve um aumento na coleta desses resíduos no período. A tendência observada não se manifesta de maneira uniforme em todas as regiões do país. A região Nordeste, por exemplo, se destacou como a região que menos coletou RSU.

Neste contexto, conforme indicado pela ABREMA (2023), o Nordeste se destaca como a segunda região com maior produção de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), registrando 8.855.701 toneladas em 2022, sendo este o dado mais recente disponível. A porcentagem de coleta na região é ilustrada na Figura 1.1.

Figura 1.1 - Percentual de coleta de RCD para as regiões do Brasil

Fonte: Adaptado ABREMA (2024).

Conforme o Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) de 2015, dado mais recente, Alagoas gerava cerca de 2.022,08 toneladas de RSU diariamente. A Figura 1.2 apresenta o percentual de geração de RSU estimados no estado de Alagoas.

Figura 1.2 - Contribuição para geração de RSU em Alagoas

Fonte: Adaptado de PERS (2015).

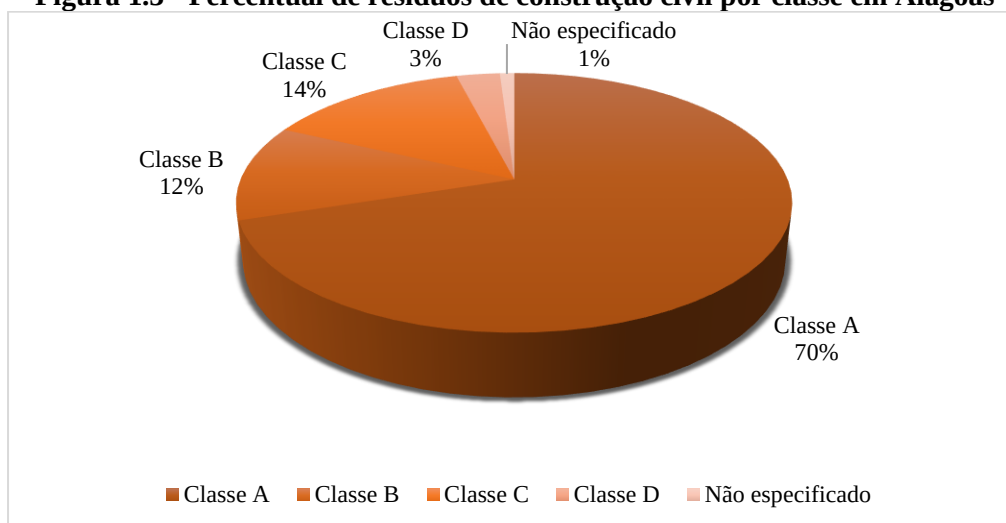
A região que possui maior geração de RSU é a metropolitana, com um percentual de 62,49%, em seguida está a região Agreste com 11,76%.

A classificação dos RSU na construção civil assume papel fundamental para uma gestão ambiental adequada e eficiente. Essa categorização divide os RSU em quatro classes distintas, cada uma com características e destinações específicas. Assim, esses resíduos podem ser de

classe A, que corresponde aos resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados (construção, demolição, reformas, reparos, terraplanagem, obras de infraestrutura, processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas); classe B, caracterizados por resíduos recicláveis para outras destinações (plástico, papel, papelão, metal, vidro, madeira, embalagem de tinta imobiliária e gesso); classe C, com ausência em sua composição de tecnologia ou aplicações econômicas viáveis; ou classe D, que contém resíduos perigosos oriundos dos processos construtivos, como, por exemplo, de clínicas radiológicas, como tintas, solventes, óleos, telhas, materiais com amianto, entre outros (ABRECON, 2017).

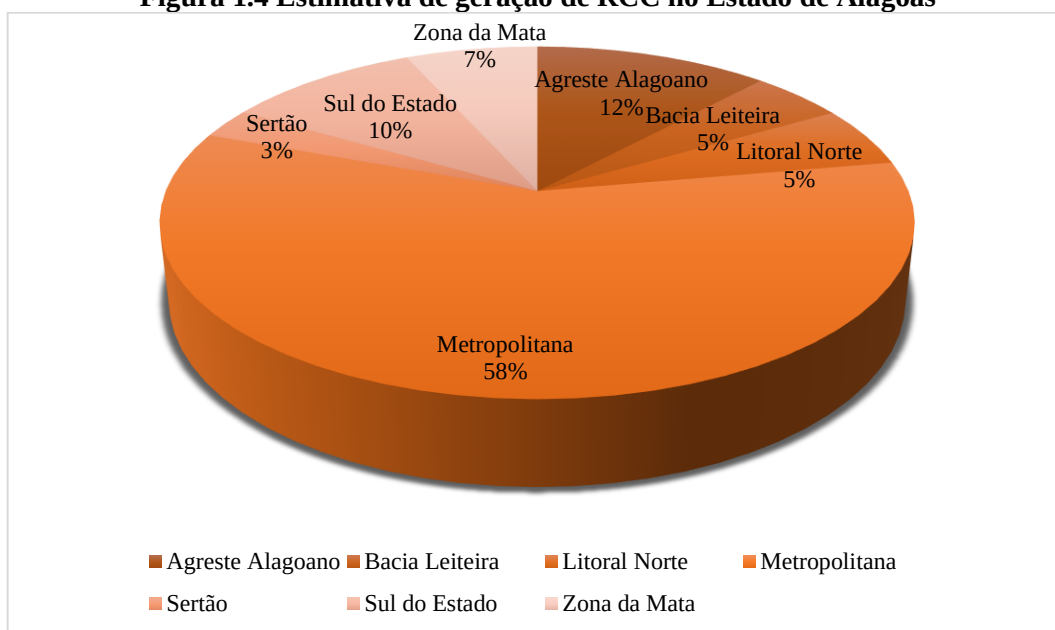
Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), em seu último relatório atualizado em 2020, a maior parcela de resíduos de construção civil (RCC) são de classe A, com um percentual de 70%, correspondente a quase 2 milhões de toneladas, conforme Figura 1.3. Estes resíduos são de origem de construção, reformas, reparos e demolições de obras de construção, incluindo os de escavação e preparação de terrenos de obras civis.

Figura 1.3 - Percentual de resíduos de construção civil por classe em Alagoas



Fonte: Adaptado SINIR (2020).

A Figura 1.4 apresenta a estimativa de geração de resíduos de construção civil, que incorporam os resíduos de demolição, das sete regiões definidas para a gestão de RCC em Alagoas.

Figura 1.4 Estimativa de geração de RCC no Estado de Alagoas

Fonte: PERS (2015).

A geração de RCD ocorre em escala global, demandando medidas inovadoras para uma gestão ambiental responsável. Devido à diversidade na composição dos resíduos, influenciada por variáveis como origem geográfica, tipo de edificação e especificações do projeto, há um impulso na busca por desenvolvimento de novas tecnologias e materiais para a sua destinação, visto que o descarte inadequado resulta em acúmulo significativo e desperdício do potencial dos resíduos. Nesse contexto, a utilização de RCD como agregados reciclados surge como uma alternativa de substituição dos agregados naturais e geração de novos materiais. Essa abordagem apresenta relevância social, especialmente no que se refere à redução do custo, o que torna o material mais acessível (Dias; Ramos; Florêncio, 2021).

A utilização dos resíduos de demolição como agregados apresenta uma relevância significativa devido aos benefícios tanto na indústria da construção civil quanto no âmbito ambiental. A reintegração desses resíduos na cadeia construtiva promove avanços tecnológicos ao possibilitar a utilização de agregados reciclados na produção de novos materiais, como os blocos de concreto reciclado, por exemplo. Nessa perspectiva, os blocos reciclados entram no mercado como um novo nicho, visto que estes possuem como vantagem a redução dos custos. Tal redução decorre da simplificação das fôrmas e armações, o que acarreta na economia na mão de obra e nos materiais, visto que o valor de mercado dos agregados reciclados é inferior ao dos naturais.

Estudos laboratoriais sobre o concreto seco composto por agregados reciclados são menos frequentes que os estudos com concretos plásticos. Isso se deve à complexa

interdependência entre as características do concreto e o equipamento de prensagem utilizado. Diante disso, diversos métodos alternativos foram propostos: compactação manual (Frasson Júnior *et al.*, 2008), padronização da energia de compactação por soquete (Felipe, 2010; Oliveira, 2004) e uso de prensa convencional de laboratório (Marchioni, 2012). Este último método visou avaliar o comportamento da mistura no estado fresco e a influência das formulações e características dos materiais durante a prensagem. Estudos dessa natureza são relevantes para o desenvolvimento de concretos secos com agregados reciclados mais eficientes e sustentáveis.

Portanto, a motivação para este estudo surgiu devido a busca da empresa parceira em encontrar uma alternativa sustentável para o tratamento dos resíduos de demolição relacionados a sua problemática, a fim de atender às exigências de gerenciamento de resíduos. Nesse contexto, foi iniciado o projeto denominado *Viabilidade de Aproveitamento dos Rejeitos de Demolição*, ao qual este trabalho encontra-se vinculado. Ainda, o estudo apresentado nesta dissertação foi desenvolvido no Laboratório de Estruturas e de Materiais (LEMA), situado no Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), e está associado às ações do grupo de pesquisa Materiais Ecoeficientes para Construção Civil (MECOEFICON) da UFAL, composto por professores pesquisadores e estudantes de graduação e pós-graduação.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a viabilidade técnica do uso de agregados oriundos de resíduos de demolição mistos em substituição dos agregados naturais na produção de blocos reciclados.

1.1.1 Objetivos específicos

- 1) Destinar de modo adequado os resíduos de demolição, de modo a atribuir uma nova finalidade, utilizando-o como agregado;
- 2) Realizar o estudo da composição ótima dos agregados para os blocos produzidos nesta pesquisa;
- 3) Avaliar os métodos de dosagem para produção de blocos e compatibilizá-los com o uso do agregado reciclado;
- 4) Analisar a possível existência de uma tendência entre as resistências à compressão dos corpos de prova, obtidos na técnica de reometria compressiva, e os blocos reciclados desta pesquisa;
- 5) Identificar a umidade ótima para os blocos reciclados desta pesquisa;

- 6) Determinar, a partir das resistências à compressão obtidas, o tipo de bloco (estrutural ou vedação) que será produzido;
- 7) Estudar a influência da granulometria na resistência à compressão dos blocos reciclados produzidos.

1.2 Justificativa

Conforme a Organização das Nações Unidas - ONU (2022), houve um crescimento na urbanização em escala global. A previsão é que até 2050, esse índice atinja 68%. Nessa perspectiva, surge uma preocupação relacionada ao aumento demográfico e à produção de resíduos sólidos. Além disso, a ONU (2022) destaca que os resíduos sólidos emergem como uma das questões mais problemáticas da atualidade, uma vez que a produção anual mundial ultrapassa dois bilhões de toneladas, onde a maioria desses resíduos é descartado clandestinamente em locais públicos, margens de rios, terrenos não utilizados, lagoas e encostas.

Em 2020, o Brasil implementou um novo marco legal para o saneamento básico. Por meio da Lei nº 14.026, foi conferida à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) a responsabilidade de estabelecer diretrizes para o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Sob essa lei, foram definidos prazos para a implementação da destinação adequada de resíduos, variando de acordo com o tamanho das localidades. As regiões metropolitanas, por exemplo, tiveram um prazo mais curto, estipulado para o ano de 2021, enquanto os municípios com menos de 50 mil habitantes receberam um prazo estendido, até 2024 (Paulino *et. al.*, 2022).

Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) têm como propósito promover ações que visam a erradicação da pobreza, a preservação do meio ambiente e do clima, além de assegurar a paz e a prosperidade em todo o mundo. Nesse contexto, a Agenda 2030 estabelece um conjunto de 17 objetivos estreitamente entrelaçados, conforme Figura 1.5.

Figura 1.5 - 17 Objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil



Fonte: ONU (2023).

Dentro desse aspecto, este trabalho engloba os ODS 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11 e 12.

De acordo com a Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC), no ano de 2021 o consumo de materiais por atividades foi maior para construção de edifícios, que se relaciona diretamente com três ODS, sendo elas: Saúde e bem-estar (ODS 3), uma vez que o descarte inadequado de RCD pode impactar a saúde pública; Cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11) devido a sua abordagem em tornar cidades mais inclusivas, seguras e sustentáveis, o que engloba a gestão de RCD, a fim de evitar impactos negativos na saúde pública e no ambiente urbano; Consumo e produção responsáveis (ODS 12), pois enfatiza a importância do consumo e produção sustentável, com objetivo de destinar de modo adequado os RCD's para que sejam evitadas a disseminação de vetores e a degradação do meio ambiente.

Assim, empenhar-se na busca por uma destinação apropriada para os resíduos resultantes de demolições não apenas fortalece a causa da sustentabilidade ambiental, mas também fomenta o desenvolvimento de cidades sustentáveis. Esse compromisso resulta na produção de materiais com custos econômicos reduzidos, tornando-os mais acessíveis à população e, ao mesmo tempo, contribui para a proteção da saúde e do bem-estar das comunidades urbanas, em total consonância com os objetivos estabelecidos pelos ODS da ONU.

Atualmente, observa-se um notável avanço no campo das tecnologias e pesquisas dedicadas à substituição, tanto parcial quanto integral, dos RCD. No entanto, devido à heterogeneidade do material e às particularidades associadas à sua composição, ainda é necessário buscar compreender o comportamento desses resíduos na produção de concretos.

Nesse cenário, a prática de reciclagem dos RCD surge como uma alternativa que promove a sustentabilidade em várias frentes, proporcionando também viabilidade econômica, além de desempenhar um papel fundamental na inovação de novos materiais.

Com isso, reutilizar RCD não apenas previne a disposição inadequada desses materiais, mas também reduz a necessidade de extrair matérias-primas da natureza para a produção de insumos. Isso, por sua vez, possibilita a criação de novos materiais construtivos, como pavimentos, blocos, concreto e argamassa, contribuindo assim para a preservação ambiental e o desenvolvimento de tecnologias ecoeficientes (Rodrigues, 2015).

Os blocos de concreto são produzidos a partir de uma mistura de cimento, agregados e água. Esses blocos possuem diversas aplicações, desde suportar cargas estruturais sem a necessidade de vigas e pilares (blocos estruturais), ou empregados em alvenaria de vedação (blocos de vedação). Uma das principais vantagens desses blocos é agilidade no processo de construção de paredes, devido ao seu tamanho quando comparado aos tijolos convencionais. Além disso, utilizar blocos de concreto pode resultar em uma economia considerável, chegando a até 30% no custo total da obra, quando comparado com a utilização de concreto convencional (Paes, 2010).

O uso de agregados reciclados para produção de blocos de concreto é um tema discutido por diversos autores como: Sousa (2001), Carneiro (2005), Patto (2006), Buttler (2007), Paula (2010), Matar e Dalati (2011), Soutsos, Tang e Milard (2011), Castro (2012), Lintz *et al.* (2012), Borges (2012), Sabai *et al.* (2013), Celestino (2013), Rodrigues (2015), Oliveira (2021), Gomes (2022). No entanto, é importante destacar que existem poucos estudos que tenham produzido blocos estruturais utilizando agregados reciclados sem a incorporação de aditivos ou adições em suas misturas.

Diante disso, a produção de blocos estruturais sem a utilização de aditivos e adições possui vantagens significativas sob uma perspectiva técnica, ambiental e econômica. Esta abordagem possibilita a obtenção de resistência à compressão e outras propriedades mecânicas de forma sustentável, uma vez que prescinde da extração e processamento de matérias-primas para fabricação desses aditivos e adições. Ademais, esta prática otimiza os custos, visto que anula as despesas de referente a tais produtos durante a produção.

1.3 Estrutura da Dissertação

O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução acerca dos dados que constituem o panorama dos RCD, além de apresentar formas de destinação desses resíduos. Compõe ainda este capítulo os objetivos geral e específicos e a justificativa da relevância desta pesquisa.

O segundo capítulo conceitua e explora os resíduos de demolição, o qual apresenta dados, classifica e aborda as principais normas brasileiras. Neste mesmo capítulo são abordadas formas de reciclagem do RCD, e apresenta as faixas recomendadas por autores e normas referentes aos agregados reciclados. Além disso, também são abordadas a utilização de agregados reciclados aplicados a concretos.

O capítulo três aprofunda o estudo iniciado no capítulo anterior sobre agregados reciclados e sua aplicação na produção de concreto, envolvendo esses conceitos na produção de blocos. Para tanto, são apresentadas as classificações dos blocos, seu processo de produção, metodologia de dosagem e as recomendações normativas.

O quarto capítulo discorre o planejamento de experimentos, uma etapa importante para uma análise de dados confiável. Após o aprofundamento no estudo do planejamento experimental, o capítulo descreve os processos de análise experimental, iniciando pela verificação dos pressupostos básicos da inferência estatística, tais como testes de normalidade e homocedasticidade dos dados, e os demais testes utilizados nesta pesquisa.

O quinto capítulo contém os materiais e métodos utilizados na produção de blocos de concreto. A metodologia é dividida em cinco etapas, sendo elas: beneficiamento e caracterização dos materiais, estudo de dosagem através da curva granulométrica, planejamento experimental e utilização da técnica de reometria compressiva, produção dos blocos e análises estatísticas.

O capítulo seis apresenta a caracterização dos materiais e sua comparação com a literatura, assim como todos os resultados desde a composição ótima até as análises estatísticas dos blocos.

Por fim, o sétimo capítulo apresenta as conclusões desta pesquisa e sugestões de trabalhos futuros.

2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Globalmente, as indústrias da construção representam aproximadamente 40% do consumo de recursos naturais e energia, resultando em uma significativa geração de resíduos. Esses resíduos podem ser classificados de acordo com a origem em: resíduos urbanos (domésticos), resíduos industriais (provenientes de demandas industriais), resíduos agrícolas (resultantes da exploração agrícola), resíduos hospitalares (produzidos por centros de saúde e hospitais) e resíduos de construção e demolição (originados em obras de construção, reforma, demolição e ampliação) (Ding *et al.*, 2020).

Os resíduos de construção e demolição (RCDs) são compostos heterogêneos, englobando diversos tipos de materiais, tais como plásticos, isolantes, papel, materiais betuminosos, madeiras, metais, concretos, argamassas, blocos, tijolos, telhas, solos, gesso, entre outros. A maior proporção dos RCDs no cenário mundial é proveniente de atividades de demolição, variando entre 50% e 80%. No Brasil, a maior parcela está relacionada a obras de construção (mais de 50%), justificada pelo número expressivo de construções informais e perdas físicas (Ângulo, 2005).

Em 2021, a geração de RCDs apresentou um crescimento de 2,9% em comparação com o cenário anterior, totalizando mais de 48 milhões de toneladas coletadas pelos municípios, correspondendo a aproximadamente 227 kg por habitante/ano. Destaca-se que a região Nordeste do Brasil representa o segundo maior percentual, com 9.481.605 toneladas anuais (ABRELPE, 2022).

Silva *et al.* (2020), cita Islam *et al.* (2019), que comentam que a reutilização do RCD não representa apenas uma inovação no cenário da pesquisa, mas também oferece oportunidades inovadoras para empreendedores, ao combinar vantagens ambientais e econômicas. Ao concentrar-se em produtos como blocos, tijolos, concreto, cobogó, *pavers* e pisos de ladrilho hidráulico, a reutilização dos resíduos de concreto e tijolo têm o potencial de agregar um valor econômico estimado, até o ano de 2019, em 45 milhões de dólares, quando comparados aos materiais naturais. Isso pode ser exemplificado pela usina de reciclagem de Passo Fundo (RS), onde Brum *et al.* (2021) relataram que a análise de viabilidade econômica apresentou bons resultados, tendo como *payback* um período de 5 a 7 anos.

Nessa perspectiva, a prática da reciclagem de resíduos contribui significativamente para a redução do consumo de energia, emissão de CO₂ e uso de recursos naturais e, principalmente, evita sua disposição em aterros clandestinos, promovendo um ciclo mais sustentável na gestão de resíduos (Silva *et al.*, 2020).

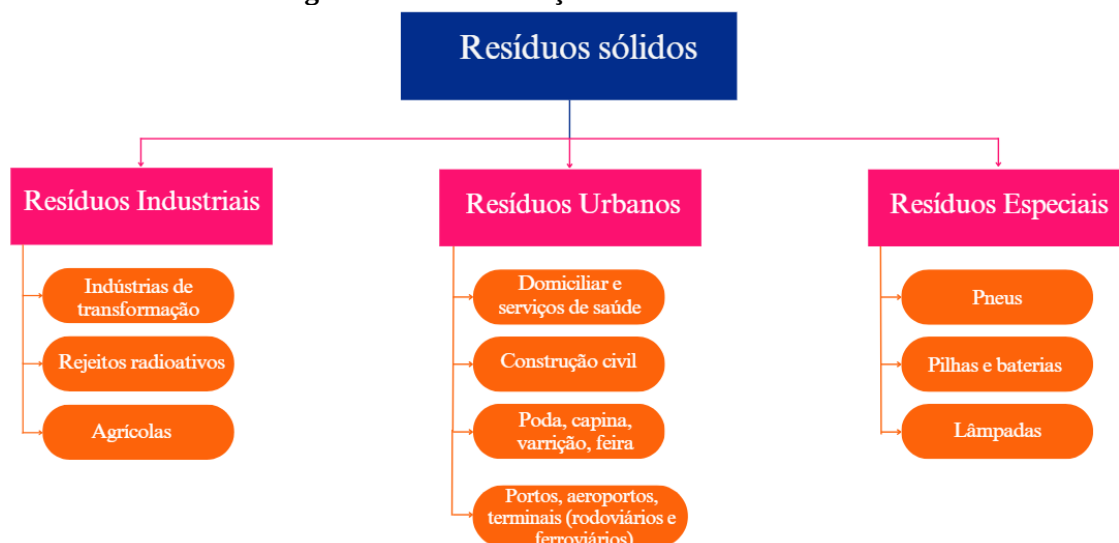
Os RCDs representam um grande desafio na busca pela sustentabilidade mundial, pois ao longo dos anos há uma tendência em aumentar a urbanização e, conseqüentemente, a geração desses resíduos. Seu descarte ocorre em aterros, o que gera um grande desperdício no seu valor tecnológico e um aumento na poluição ambiental. A utilização desses resíduos, como forma de agregados, buscando substituir o agregado natural na produção de novos concretos demonstra ser uma alternativa eficiente para proporcionar uma diminuição no custo habitacional e em diversas aplicações na construção civil (Dias *et al.*, 2021).

A Resolução 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), obriga os municípios brasileiros a reduzir, reutilizar e reciclar os RCDs, em casos em que seja indispensável a geração do resíduo, além disso, nela não é permissível sua disposição em aterros de RSU, onde estejam localizados em encostas, corpos de água, áreas protegidas, lotes vagos e “bota fora”. Para isso, é necessário diferenciar esses resíduos em classes.

A decisão de como aproveitar um resíduo pode ser tomada com base em suas características distintas, o que permite que esses materiais sejam manipulados e tratados de diversas maneiras. Isso inclui a avaliação da densidade aparente, níveis de umidade, composição qualitativa e análise química do material (Sousa, Campos e Oliveira, 2016).

De acordo com a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos (ABRECON), os resíduos sólidos podem ser classificados em: classe A, que corresponde aos resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados (construção, demolição, reformas, reparos, terraplenagem, obras de infraestrutura, processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas); classe B, onde são resíduos recicláveis para outras destinações (plástico, papel, papelão, metal, vidro, madeira, embalagem de tinta imobiliária e gesso); classe C, composta por resíduos que não possuem tecnologia ou aplicações econômicas viáveis (isopor e lã de vidro) ; classe D, que contém os resíduos perigosos devido aos processos construtivos (tintas, solventes, óleos, telhas, materiais com amianto, entre outros) (ABRECON, 2020).

De modo simplificado, na Figura 2.1 tem-se o esquema de classificação dos resíduos sólidos.

Figura 2.1 - Classificação dos resíduos sólidos

Fonte: Adaptado de Cabral (2007).

A partir da classificação dos resíduos é possível identificar os processos ou atividades que os originaram e, com isso, identificar os constituintes e caracterizá-los. A ABNT NBR 10.004 (2004) classifica os resíduos em perigosos (Classe I) e não perigosos (Classe II). Além disso, a classe II é dividida em II, IIA e IIB, onde a primeira é composta pelos resíduos não perigosos (resíduos alimentares, sucatas de metais ferrosos e não ferrosos, papel, papelão, plástico, borracha entre outros), a segunda por resíduos não inertes (propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água) e a terceira por resíduos inertes (qualquer resíduo cujas amostras não apresentem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água).

Para contribuir com o incentivo a um crescente desenvolvimento na reutilização e reciclagem dos RCDs, foram elaboradas normas técnicas, que constam na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Normas técnicas referentes ao RCD

Normas	Ano	Título
NBR 15112	2004	Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação
NBR 15113	2004	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação
NBR 15114	2004	Resíduos sólidos da construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação
NBR 15115	2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos
NBR 15116	2021	Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaio

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

É importante destacar que a NBR 15116 (2021) trouxe como principal diferencial, quando comparada à anterior (NBR 15116, 2004), a utilização dos agregados reciclados para fins estruturais, visto que anteriormente só era permitida a sua utilização para pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural.

O concreto é composto por água, cimento e agregados, podendo ou não apresentar adições ou aditivos em casos especiais. Portanto, a substituição do agregado natural pelo reciclado é uma solução economicamente sustentável, que apresenta bom desempenho em suas propriedades físicas e mecânicas (Santos *et al.*, 2020).

2.1 Agregados reciclados

A NBR 15116 (2021) define agregado reciclado como material granular gerado pelo beneficiamento de resíduos de construção presentes na classe A na Resolução 307/2002 do CONAMA. Estes podem ser compostos por materiais cimentícios diversos - podendo incluir cerâmica vermelha com teor reduzido -, resíduos de concreto ou misturas de materiais cimentícios e cerâmicos, correspondendo, respectivamente, ao agregado reciclado cimentício, agregado reciclado de concreto e agregado reciclado misto.

O ciclo de vida dos materiais de construção civil é apresentado na Figura 2.2, começando com a fase inicial de demolição, na qual todo o material é recolhido para ser reintegrado ao ciclo da construção civil. Para isto, é fundamental que esses materiais passem por processos de beneficiamento, a fim de adequar os resíduos e transformá-los em novos materiais, como, por exemplo, agregados. Por meio desses processos, eles são empregados na produção de eco materiais (Silva, 2016).

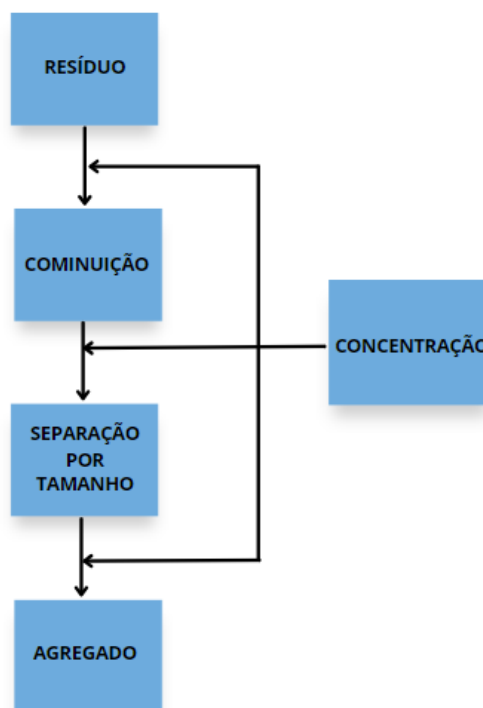
Figura 2.2 - Beneficiamento e aproveitamento dos RCC



Fonte: Saint-gobain, *apud*, Silva (2016).

O processo de beneficiamento dos resíduos de demolição ocorre desde a coleta e transporte do material, até a separação, britagem e peneiramento. A Figura 2.3 apresenta o ciclo de vida do beneficiamento do resíduo, até a sua transformação em agregado reciclado.

Figura 2.3 - Fluxograma de operações para obter agregado reciclado



Fonte: Adaptado de Amorim (2016).

Na cominuição do RCC ocorre a redução do tamanho dos resíduos por meio de trituração, moagem ou quebra mecânica. Isto demanda o uso de equipamentos, como britadores, tais como o de mandíbulas, rolo, moinho de martelos, impacto, giratório e de cone (Silva, 2023). Após este processo, realiza-se a separação dos resíduos por tamanho, os quais serão transformados em agregados. Esses agregados são classificados, de acordo com o tamanho dos seus grãos, em agregado reciclado miúdo ou agregado reciclado graúdo.

Diante disso, os grãos que passam na peneira de abertura de malha com 75 mm e ficam retidos na malha de 4,75 mm são classificados como agregado graúdo. Já os finos que passam a peneira de abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na de malha 150 μ m são classificados como agregado miúdo (Albuquerque *et al.*, 2019).

Existem muitos estudos que investigam a substituição, parcial ou total, dos agregados naturais por agregados reciclados. A utilização desses agregados obtidos por meio do beneficiamento de resíduos de demolição emerge como uma alternativa viável, especialmente para redução do consumo de materiais não-renováveis. Esta abordagem não apenas contribui

para a otimização dos custos, mas também para a redução das emissões de CO₂ associadas à produção de materiais de demolição (Rivetti *et al.*, 2024).

Segundo Rivetti *et al.* (2024), ao incorporar o agregado reciclado na produção de concreto, observa-se alterações em suas características físicas. É perceptível que a superfície apresente uma textura mais irregular e uma porosidade aumentada, resultando em uma redução da densidade do material. Além disso, são observadas microfissuras devido à fragilidade dos agregados reciclados dentro da matriz do concreto.

Existem estudos que concluem pela viabilidade da substituição do agregado natural pelo reciclado, como o trabalho de Marques *et al.* (2023), que conduziu uma análise comparativa entre diversos agregados não convencionais para concreto. Esse estudo destacou como uma das vantagens da substituição do agregado de RCD no concreto a redução dos impactos ambientais e dos custos, especialmente quando a substituição alcança até 15%. Portanto, os agregados reciclados, de acordo com Oliveira (2023), demandam uma investigação detalhada, pois podem apresentar características distintas dependendo de sua produção, localização geográfica e origem.

Para substituir total ou parcialmente o agregado natural pelo reciclado na produção de concreto, é importante que sejam atendidos os limites que constam na NBR 15116 (2021), onde para a absorção de água dos Agregados Reciclado de Concreto (ARCO) deve ser inferior a 7% e, para os Agregados Reciclado Cimentícios (ARCI) e Agregado Reciclado Misto (ARM), deve ser inferior a 12%. O teor de pulverulento deve ser inferior a 12% para os concretos protegidos de desgaste superficial, enquanto deve ser inferior a 10% para os concretos submetidos ao desgaste superficial. Por fim, para os limites de teor de cerâmica vermelha ou branca não polida, a norma sugere um limite de 0% para o ARCO, inferior a 10% para o ARCI e inferior a 40% para o ARM.

Conforme os estudos de Gomes (2021), os agregados reciclados possuem considerável variabilidade de acordo com cada região, visto que o processo de beneficiamento e homogeneização do material resulta em materiais com características físicas diferentes. A Tabela 2.2 apresenta as características físicas obtidas pelo autor.

Tabela 2.2 - Características físicas dos agregados de Gomes (2021)

Parâmetros	Norma	Areia reciclada	Brita convencional	Brita reciclada
Massa específica	ABNT NBR 16916 (2021); ABNT NBR 16917 (2021)	2,59 g/cm ³	2,89 g/cm ³	2,31 g/cm ³
Massa unitária	ABNT NBR 16972 (2021)	1,44 g/cm ³	1,57 g/cm ³	1,20 g/cm ³
Dimensão máxima característica	ABNT NBR 17054 (2022)	2,36 mm	19 mm	19 mm
Módulo de finura	ABNT NBR 17054 (2022)	2,06	6,94	6,79
Teor de material pulverulento	ABNT NBR 16973 (2021)	0,9%	0,2%	1,2%

Fonte: Gomes (2021).

Segundo Frotté (2017), o ARM é responsável por reduzir a trabalhabilidade, assim como a massa específica seca e saturada, além de diminuir o módulo de elasticidade. Devido a isso, ele apresenta uma alta porosidade, o que resulta em maior absorção de água e índice de vazios elevado.

O menor volume de vazios desses agregados é determinado, principalmente, pelo empacotamento das partículas em sua estrutura granular sólida, o que favorece o processo de compactação e resistência das estruturas produzidas com esses agregados. Assim, o processo de compactação tem o objetivo de reorganizar, deformar e quebrar as partículas. Desta forma, o maior empacotamento ocorre quando os vazios deixados pelos grãos maiores são preenchidos pelos grãos menores, até que o esqueleto contenha o menor índice de vazios possível. Portanto, a influência do empacotamento das partículas está relacionada principalmente à distribuição granulométrica, morfologia e porosidade dos agregados (Niza, 2021).

A teoria do empacotamento visa reduzir os vazios entre as partículas ao utilizar partículas de diversos tamanhos. Quando a metodologia de dosagem não está alinhada com a teoria do empacotamento, ocorre uma dispersão das partículas e, conseqüentemente, dos agregados. Isto resulta em concretos com desempenho inferior, levando muitas vezes ao aumento do consumo de cimento que, por sua vez, gera maior emissão de CO₂, o que impacta negativamente o meio ambiente (Machado, 2022).

Os RCDs apresentam características heterogêneas, pois em sua composição há diversos materiais utilizados na construção civil, o que reflete em uma considerável variabilidade em

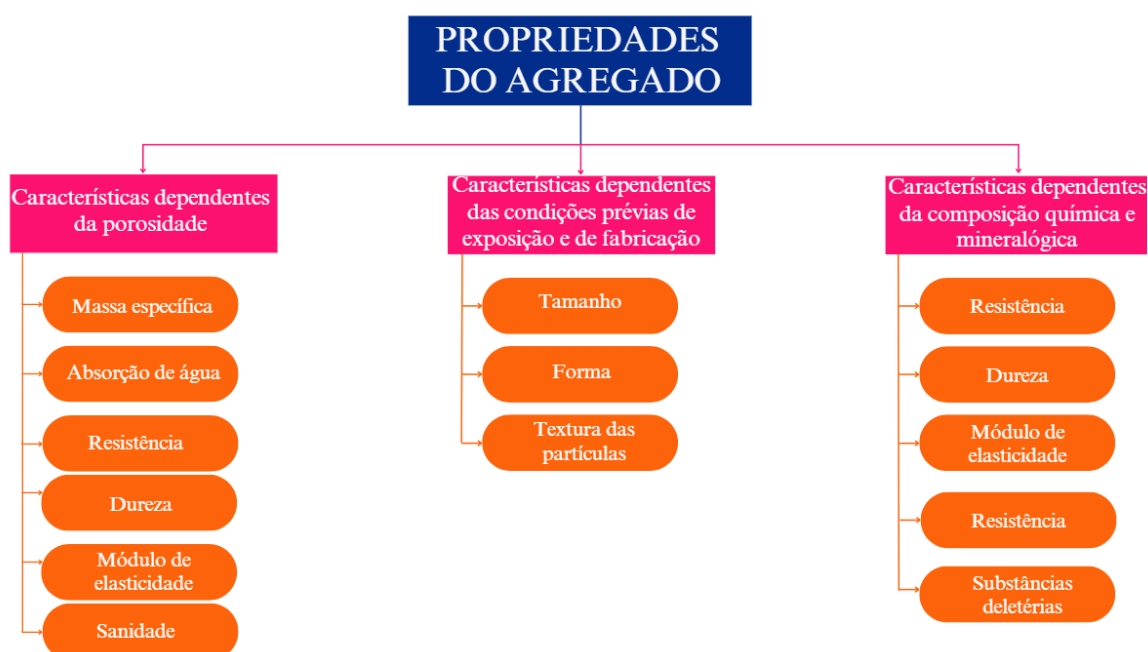
suas propriedades. Devido a variabilidade dos agregados reciclados, existem numerosos estudos acerca deles. Uma vertente de estudos é caracterizada pela análise da influência da substituição parcial dos agregados convencionais pelos reciclados. Para tanto, é fundamental investigar os efeitos da composição desses agregados sobre as propriedades do concreto, a fim de determinar uma composição ótima (Tenório, 2007).

Diante disso, é necessário aprofundar e buscar alternativas para preencher as lacunas presentes na NBR 15116 (2021) quanto ao emprego de agregados reciclados na construção civil. Isso corrobora com Silva (2023), visto que ele cita a necessidade de pesquisas mais aprofundadas para compreender as particularidades e limitações desses materiais, considerando sua heterogeneidade e as diferenças associadas aos métodos de beneficiamento.

2.2 Características dos agregados provenientes do RCD

Os agregados reciclados possuem propriedades que podem ser agrupadas de acordo com suas características. Estas características dependem da porosidade, das condições de exposição e fabricação e da composição química e mineralógica. Portanto, é importante conhecer as características presentes nos agregados de RCD, a fim de garantir um entendimento sobre estas características e influências na produção de concretos, conforme indicado na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Propriedades dos agregados



Fonte: Adaptado de Tenório (2007).

De acordo com Tenório (2007), os agregados reciclados originados por RCD possuem como propriedades:

- a) Composição: heterogênea e variável. No entanto, a variabilidade do agregado se difere da presente na composição do RCD, visto que frações cerâmicas retidas podem migrar de uma malha para outra a depender do equipamento;
- b) Absorção: a porosidade do agregado está relacionada à capacidade de absorção de água do agregado. Quanto mais poroso, maior a capacidade de absorção do agregado. Isto significa que o índice de vazios do agregado influencia na sua capacidade de absorção de água. Portanto, é importante avaliar esta propriedade com o objetivo de determinar a quantidade adequada de água a ser utilizada na produção de concreto;
- c) Massa específica: também se relaciona com a porosidade, no entanto, de modo inverso. Conforme há variação na porosidade também existe mudança na massa específica, onde para concretos constituídos com agregados reciclados com massa específica menor, há um volume maior de agregado quando comparado com os agregados naturais. Isto possui influência significativa no traço que, por fim, pode alterar as propriedades mecânicas do concreto;
- d) Resistência à compressão e módulo de elasticidade: ao comparar os agregados naturais com os reciclados, observa-se que diferenças significativas em relação à estrutura e resistência. Os agregados naturais apresentam uma estrutura mais compacta e resistente, o que resulta em uma porosidade da matriz e da zona de transição que possui influência mais significativa sobre a sua resistência. Por outro lado, os agregados reciclados tendem a possuir uma estrutura mais frágil, o que pode resultar em rupturas, especialmente nos concretos, iniciando-se nos próprios agregados (Silverio, 2019). Além disso, a heterogeneidade dos agregados reciclados interfere nos módulos de elasticidade dos concretos produzidos com esses agregados (Fonseca, 2002). Assim, os agregados reciclados possuem diversos fatores que influenciam sua resistência à compressão. Destacam-se a origem do material e o processo de beneficiamento, visto que agregados provenientes de materiais de alta qualidade e submetidos a um beneficiamento adequado tendem a apresentar melhor resistência. Outro fator relevante é a composição química e mineralógica, uma vez que a presença de impurezas pode reduzir a resistência do material. A granulometria também desempenha um papel importante, já que a distribuição dos grãos pode afetar a trabalhabilidade do concreto. Além disso, a porosidade é um aspecto importante a ser investigado, pois os agregados com alta porosidade tendem a apresentar menor resistência à compressão e podem contribuir para a deterioração do concreto ao longo do tempo.
- e) Resistência à abrasão: indica a qualidade do agregado a ser utilizado no concreto, logo, como é um ensaio utilizado no agregado graúdo, há uma representação da resistência à

fragmentação devido ao atrito ou choque dos grãos. Consequentemente, têm-se que os agregados reciclados possuem uma menor resistência aos impactos e desgaste quando comparados aos agregados de referência.

f) Granulometria, teor de finos e materiais pulverulentos: a composição do resíduo de origem é responsável por determinar a granulometria do resíduo, além do equipamento utilizado e seu beneficiamento. Para o material pulverulento os agregados reciclados apresentam um teor mais significativo quando comparado ao de referência. Os finos são responsáveis por preencher os vazios dos agregados graúdos e consequentemente há uma menor necessidade da adição do cimento a mistura. No entanto, esse teor de finos deve ser ótimo, pois eles também proporcionam um aumento na absorção e consequentemente no consumo de água.

g) Forma, textura superficial dos grãos e aderência: os agregados reciclados geralmente apresentam superfície mais irregular e uma textura mais rugosa quando comparados aos agregados naturais, os quais tendem a possuir uma forma mais arredondada. Essa diferença ocorre devido à composição da amostra de resíduos e ao equipamento utilizado durante o beneficiamento. A partir disso, conclui-se que os agregados com formas mais angulares tendem a influenciar na redução da resistência à compressão do concreto, devido ao surgimento de microfissuras.

h) Atividade pozolânica: Essa atividade decorre da reação do material silicoso ou sílico-aluminoso que, ao ser moído e estar na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio e forma um componente com propriedades cimentícias, responsável pelo aumento da resistência do concreto (Lea, 1938 *apud* Motta, 2005).

Para a utilização de agregados reciclados provenientes de RCD, é essencial a condução de misturas experimentais, que se dividem em duas categorias: mistura com agregados naturais e misturas com materiais reciclados. Neste contexto, a dosagem desempenha um papel importante, pois deve garantir a trabalhabilidade adequada da mistura, a resistência admissível e um custo economicamente viável (Leite, 2001).

O emprego de agregados reciclados em substituição aos naturais afetará as propriedades do concreto produzido, seja ele convencional ou seco. Nesse contexto, a Tabela 2.3 apresenta as vantagens e desvantagens do uso dos agregados reciclados nestes dois tipos de concreto.

Tabela 2.3 – Principais vantagens e desvantagens do uso de agregados reciclados no concreto seco e convencional

Tipo de concreto	Vantagem	Referências	Desvantagem	Referências
Concreto seco	Menor teor de água, contribuindo com a redução da retração	Neville (2011); Mehta e Monteiro (2014)	Maior consumo de cimento e exige um controle rigoroso da granulometria dos agregados reciclados	Mehta e Monteiro (2014); Silva <i>et al.</i> (2015)
Concreto plástico	Menor consumo de cimento e na menor sensibilidade da granulometria dos agregados	Neville (2011); Mehta e Monteiro (2014); Silva <i>et al.</i> (2015)	Maior consumo de água, contribuindo com o aumento da retração	Neville (2011); Mehta e Monteiro (2014)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Silva (2019) recomenda que os agregados graúdos utilizados na produção de blocos tenham dimensão máxima de 6,3 mm. Além disso, se o formato deste agregado for arredondado ou lamelar pode ocorrer influência positiva na trabalhabilidade do concreto.

2.3 Concreto com agregado reciclado

A determinação das propriedades do concreto reciclado se embasa na verificação da resistência à compressão, onde para este tipo de concreto geralmente são alcançados resultados inferiores aos que contém agregado natural, isso ocorre devido a maior porosidade da matriz e da zona de transição (Silverio, 2019).

O concreto é composto por agregados, aglomerantes, água e, dependendo da aplicação, aditivos e adições minerais. Após a produção da mistura, é essencial que o concreto exiba plasticidade e coesão suficientes para garantir sua trabalhabilidade. Sua resistência está diretamente relacionada à reação química de hidratação do cimento, que forma uma ligação com os agregados. Esta é importante para conferir ao concreto as propriedades mecânicas necessárias para sua aplicação (Paes, 2010).

Segundo Leite (2001), os concretos produzidos com agregado reciclado demandam cuidados especiais devido ao teor de partículas lamelares presente nas amostras de agregados. Essas partículas são responsáveis por reduzir a trabalhabilidade, a resistência à compressão e à tração, além de aumentar a permeabilidade. Assim, o concreto produzido com esse tipo de agregado, igualmente aos demais concretos, deve originar misturas experimentais para dosar as proporções de seus constituintes. Esse processo visa garantir condições adequadas de trabalhabilidade, baixa porosidade, resistência e otimização de custos.

De acordo com Taube (2019), para um estudo adequado sobre a substituição de resíduos em agregados para uso em concretos é importante que sejam verificadas suas características, onde as mais importantes estão apresentadas na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Características dos concretos reciclados



Fonte: Adaptado de Taube (2019).

O concreto utilizado na produção de blocos é conhecido por sua consistência seca, o que demanda a implementação de ações preventivas devido essa consistência ser parecida com a da terra úmida. Em contrapartida, o concreto convencional, que possui uma consistência plástica, o seco ou umidificado preenche menos os vazios deixados pelos agregados. Além disso, devido à menor trabalhabilidade do concreto seco em comparação com o concreto plástico, há uma maior quantidade de ar incorporado (ar preso), o que pode influenciar na redução da resistência à compressão e na durabilidade dos blocos (Tango *apud* Lima, 2009).

Devido a essa diferença na consistência entre esses dois tipos de concretos, a resistência dos blocos não depende exclusivamente da relação água/cimento, mas também da energia de compactação. Essa energia, determinada pela vibro prensa, máquina destinada à produção de blocos de concreto, é responsável por garantir a qualidade e uniformidade dos blocos. Assim, a energia de compactação ótima garante a qualidade final dos blocos, pois se ajusta às características do concreto e às propriedades dos agregados (Silva, 2007).

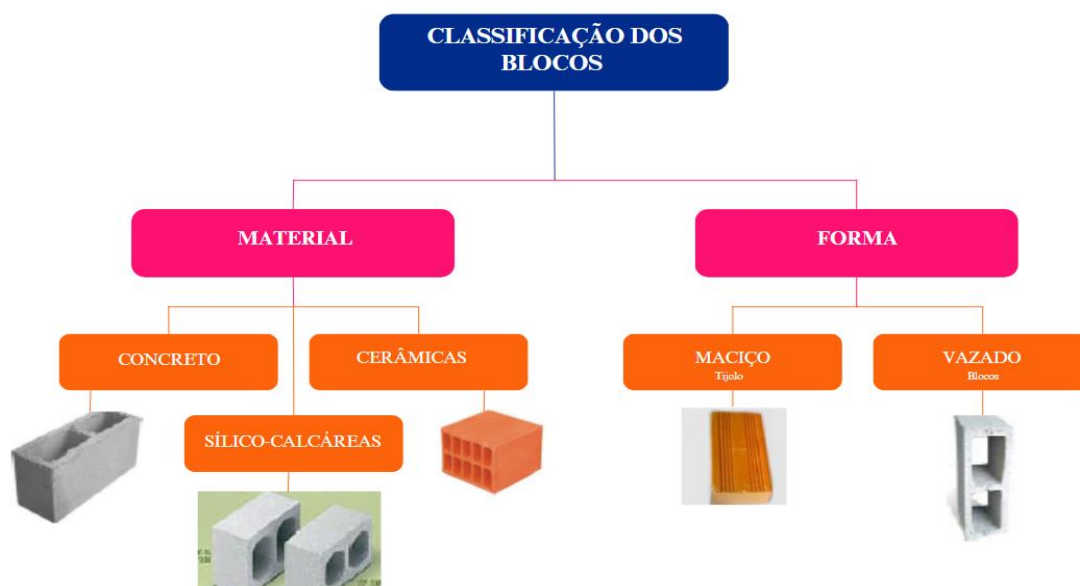
3 BLOCOS DE CONCRETO

Os blocos de concreto surgiram em meados do século XIX, na Europa, logo após o surgimento do cimento *Portland*. Com o avanço dessa tecnologia, foram produzidas grandes unidades de concreto (armazéns, hospitais, entre outros), o que impulsionou os estudos sobre a fabricação de blocos. Inicialmente, esses blocos eram maciços, pesados e de difícil manuseio. No entanto, à medida que pesquisas e testes foram realizados, surgiram os blocos vazados nos Estados Unidos, em 1980. Este tipo de bloco apresenta como vantagem leveza e resistência mecânica satisfatória (Silva, 2011).

De acordo com a NBR 16868.1 (2020), um bloco é caracterizado como um elemento que pode apresentar aberturas, perfurações ou ser maciço, e que possui uma altura igual ou superior a 1,15 cm na estrutura de alvenaria. Por outro lado, um prisma é um corpo de prova criado pela sobreposição de blocos ou tijolos que são unidos por argamassa. Esses prismas podem ser classificados como cheios ou ocos. Os prismas cheios são compostos por blocos que foram preenchidos com grauteamento e podem conter aberturas ou furos. Por outro lado, o que diferencia os prismas ocos é a ausência desse preenchimento com grauteamento.

De acordo com Silva (2011), os blocos podem ser classificados quanto à forma e o material. Em relação à sua forma, eles podem ser maciços ou vazados, já em relação ao material eles podem ser de concreto, cerâmicos, ou sílico-calcáreo, conforme indicado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Classificação dos blocos

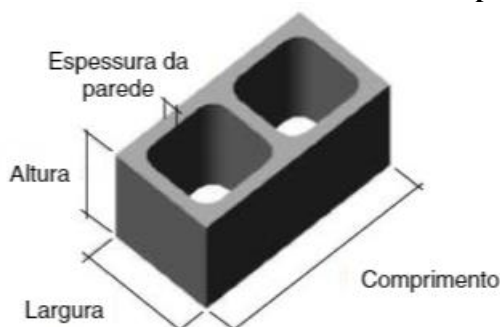


Fonte: Adaptado de Izquierdo (2011).

Segundo Rodrigues (2015), os blocos de concreto apresentam função estrutural quando são capazes de suportar o seu peso próprio e as cargas advindas. Quando isso não ocorre, podem

ter função de vedação, para fins de separação e/ou fechamento de ambientes. A Figura 3.2 apresenta um bloco vazado de concreto simples para execução de alvenaria com ou sem função estrutural.

Figura 3.2 - Bloco vazado de concreto simples



Fonte: NBR 6136 (2016).

A NBR 6136 (2016) traz como requisito para blocos que estes devem ser produzidos de modo que seja assegurada a obtenção de um concreto homogêneo e compacto. Além disso, esses blocos devem apresentar as arestas vivas, sem trincas, fraturas ou qualquer outro defeito que possa trazer prejuízos à sua resistência, durabilidade ou assentamento, vedando-se a realização de reparos ou qualquer medida que oculte estes defeitos.

3.1 Processo de produção de blocos

A produção de blocos de concreto é caracterizada pelo uso de “concretos secos”, que têm uma consistência seca e levemente umedecida. No caso de blocos de concreto reciclado, os agregados utilizados são provenientes de resíduos, o que exige maior teor de água na mistura, uma vez que esse tipo de material possui maior capacidade de absorção em comparação com os agregados naturais (Izquierdo, 2011).

De acordo com Fonseca (2002), a Lei de Abrams (*Slump test*) é desconsiderada para o concreto seco, pois ela determina a quantidade de água a ser utilizada no concreto para satisfazer a condição de consistência (fluidez do concreto). Portanto, este método não fornece valores de abatimento igual a zero, visto que, como já citado, o concreto seco é uma mistura seca e levemente umedecida, o que significa que não apresenta abatimento. Portanto, para lidar com essa situação é necessário recorrer ao auxílio de máquinas especiais para inserir a mistura nas formas de maneira adequada.

De acordo com Albuquerque (2019) e Salvador Filho (2007), o processo de produção de blocos se inicia com o recebimento dos materiais (cimento, agregados e aditivos). Em seguida é realizado um estudo de dosagem com o objetivo de determinar o traço adequado, geralmente variando de 1:6 a 1:14 (cimento/agregado), onde são realizados vários testes

contendo proporções diferentes entre cimento, agregados e água até que se tenha uma mistura que atenda às necessidades de comportamento para moldagem dos blocos. Em seguida, são produzidas as misturas, com pesagem prévia dos materiais, podendo a produção de misturas ser realizada de modo manual ou em um misturador planetário.

Finalizada a produção das misturas, estas serão depositadas em uma prensa hidráulica ou prensa manual. Esta máquina desempenha um papel relevante na produção dos blocos, visto que ela molda enquanto compacta. Durante o processo de operação da vibro prensa, é importante haver cuidado com a energia de compactação, pois ela é uma das variáveis que podem afetar a resistências à compressão do bloco. Além disso, o tempo de vibração deve ser ajustado de modo a otimizar a compactação. Após esta etapa, o bloco é retirado com muito cuidado, a fim de evitar quebras ou fissuras, e é colocado em um suporte indeformável para que o material fique no local de cura (Albuquerque *et al.*, 2019 e Salvador Filho, 2007).

A cura dos blocos tem a função de garantir, por tempo determinado, condições de umidade, temperatura e pressão para a reação de hidratação do cimento. Por conta da importância desta etapa, é necessária uma escolha assertiva em qual processo será utilizado, sendo comumente empregado o processo a vapor, que possui duração de até 24h. A cura natural em alguns casos pode ser utilizada, principalmente quando não há elevadas exigências no desempenho do bloco. Nesse processo, é importante que o bloco esteja sempre úmido e protegido do vento e da exposição direta ao sol (principalmente na primeira semana), no intuito de evitar a retração por evaporação excessiva da água (Albuquerque *et al.*, 2019 e Salvador Filho, 2007).

Finalizado o tempo de cura, é realizada a verificação da resistência à compressão, para tanto é importante retirar uma amostra de cada lote produzido com idade de 28 dias, para que após a determinação da resistência final sejam classificados quanto ao seu uso (alvenaria de vedação ou alvenaria estrutural). Para realizar os procedimentos de resistência à compressão, absorção de água ou outras características específicas devem ser seguidos os procedimentos que constam na NBR 12118 (2013). Já para determinar os fins desses blocos deve-se consultar a NBR 6136 (2016), que informa os requisitos mínimos para classificação quanto ao uso (Albuquerque, 2019 e Salvador Filho, 2007).

Segundo a NBR 6136 (2016), os blocos vazados são elementos que contêm uma área líquida igual ou inferior a 75% da área bruta e podem ser classificados de acordo com sua função. A Tabela 3.1 apresenta os intervalos de resistência à compressão axial e absorção para um período de 28 dias para blocos de concreto.

Tabela 3.1 - Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial (MPa)	Absorção para agregado normal (%)		Retração (%)
			Individual	Média	
Com função estrutural	A	$f_{bk} \geq 8,0$	$\leq 9,0$	$\leq 8,0$	$\leq 0,065$
	B	$4,0 \leq f_{bk} < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 9,0$	
Com ou sem função estrutural	C	$f_{bk} \geq 3,0$	$\leq 11,0$	$\leq 10,0$	

Fonte: NBR 6136 (2016).

3.2 Métodos de dosagem

A qualidade do bloco a ser produzido possui relação com sua compacidade e energia de compactação no momento da prensagem. Para que a compacidade seja garantida, é necessário verificar a composição granulométrica, pois a mesma, quando é adequada, eleva a resistência à compressão, reduz a absorção de água e evita a retração por secagem, cujo benefício está relacionado com a diminuição do surgimento de fissuras (Rodrigues, 2015).

Para Frasson Júnior (2000), a primeira etapa para definição da dosagem de concretos secos é a determinação de uma composição ideal, isto ocorre com base na produção de misturas com um quantitativo o mais baixo possível de vazios, a fim de alcançar as maiores massas unitárias. A seguir, é importante determinar a proporção de agregados que minimize o número de vazios, garantindo que a mistura seja mais compacta, devido a sua relação direta com a resistência à compressão. Além disso, é importante determinar a umidade ótima da mistura, visto que ela é responsável pelas maiores resistências, considerando cada teor de cimento. No entanto, isto deve ser realizado com cautela, a fim de evitar excessos que podem provocar problemas na desforma. A determinação da composição de finos é fundamental, pois ela garante a redução do número de vazios. Em contrapartida, quando a proporção de finos é excessiva há um aumento no custo devido à necessidade de adicionar mais cimento, o que pode gerar um aumento na retração por secagem (Rodrigues, 2015).

Para a determinação da dosagem de concreto seco não existe uma metodologia consagrada. Todavia, de acordo com Frasson Júnior. (2000), as metodologias de dosagem mais utilizadas para fabricação de blocos de concreto são embasadas em um menor índice de vazios,

ajuste do módulo de finura e em adaptações dos métodos anteriores. A Tabela 3.2 apresenta os métodos, assim como seus principais fatores analisados.

Tabela 3.2 - Fatores associados às metodologias de dosagem para blocos

Método de Dosagem	Desenvolvido por	Ano	Principais Fatores Estudados	Tipo de concreto	Fonte
Besser Company	Pfeiffenberger (1985)	1993	Granulometria, teor de umidade, relação cimento/agregado	Concreto natural	Frasson Júnior. (2000)
ABCP	Ferreira Júnior.	1995	Proporção de agregados e massa unitária	Concreto natural	Frasson Júnior. (2000)
IPT/EPUSP	Tango	1994	Teor de umidade e relação cimento/agregado	Concreto natural	Frasson Júnior. (2000)
Columbia	Wilk (1948) e Menzel (1934)	1969	Granulometria e relação cimento/agregado	Concreto natural	Frasson Júnior. (2000)
Frasson Júnior	-	2000	Massa específica	Concreto natural e reciclado	Frasson Júnior. (2000)
Fernandes	-	2012	Granulometria, massa unitária e teor de umidade	Concreto natural e reciclado	Fernandes (2023)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

3.2.1 Método de dosagem de Besser Company

Desenvolvida por Lucas E. Pfeiffenberger em 1985 e posteriormente adaptada pela fábrica de vibro prensas Besser Company, baseia-se na modificação das proporções de areia e pedrisco, uma vez que esses agregados são amplamente utilizados na produção de blocos de concreto estrutural. A essência dessa abordagem envolve ajustes nas proporções dos agregados, resultando em um módulo de finura das misturas com variação de 3,6 a 3,75. A proporção estabelecida para o agregado miúdo (areia) e o agregado graúdo (pedrisco) é de 60% e 40%, respectivamente. Para aplicar este método, é fundamental que a areia apresente um módulo de finura entre 3,0 e 3,5, enquanto o do pedrisco deve estar na faixa de 5,0 e 5,75 (Frasson Júnior, 2000).

A umidade da mistura deve estar situada na faixa de 6% a 7,5%, sendo seu percentual determinado em função das características dos agregados. A proporção de cimento e agregado varia de acordo com a resistência pretendida. Na Tabela 3.3 encontram-se as proporções cimento/agregado correspondentes a cada meta de resistência à compressão desejada (Rodrigues, 2015).

Tabela 3.3 - Proporção de cimento e agregado pilotos para a resistência almejada

	Resistência à compressão (MPa)			
	4,5	6,0	8,0	9,0
Relação cimento/agregado (massa)	1:9 a 1:12	1:8 a 1:10	1:7 a 1:9	1:6 a 1:8

Fonte: Frasson Júnior (2000).

Apesar de sua simplicidade, este método requer a disponibilidade de agregados com granulometrias precisas, o que, muitas vezes, torna o processo inviável devido às incertezas associadas ao processo de fabricação. Estas incertezas podem ocorrer das variações entre fornecedores ou, até mesmo, dentro do mesmo fornecedor. Além disso, vale ressaltar que, para este método, os finos do cimento não são considerados, o que acrescenta ainda mais incertezas relacionadas à influência desses finos ao desempenho mecânico e na compacidade das misturas (Silva, 2018).

3.2.2 Método ABCP

Este método é embasado na busca por minimizar o índice de vazios, utilizando diversas combinações granulométricas. A partir disso, procede-se à pesagem do material seco, com volume conhecido, até alcançar o peso máximo. Esse processo assemelha-se ao realizado no ensaio de caracterização de massa unitária solta, em que o maior peso está associado ao menor volume de vazios (Rodrigues, 2015).

Uma limitação significativa desse método é a omissão do teor de finos presente nos agregados e no cimento, o que pode resultar em uma mistura sem coesão, podendo gerar patologias nos blocos, tais como trincas. A proporção recomendável para a quantidade de cimento corresponde a 1:6 a 1:15 (Rodrigues, 2015).

3.2.3 Método IPT/EPUSP

Esse método representa uma adaptação da metodologia proposta por Tango (1994), originalmente desenvolvida pelo IPT/EPUSP especificamente ajustada para a produção blocos de concreto em máquina vibro prensa. Apesar de ser criterioso, o procedimento desconsidera a energia compactação aplicada, um fator de relevância significativa no que diz respeito à resistência do material (Rodrigues, 2015).

O procedimento de dosagem inicia-se com um ajuste dos agregados, que pode ser determinado utilizando as curvas granulométricas ou pelo ensaio de massa unitária. Em seguida, é determinada a resistência média de dosagem, a qual é obtida somando-se a resistência característica requerida em um determinado tempo pelo desvio padrão da produção.

Subsequentemente, são definidos pelo menos três traços de concreto, correspondendo, respectivamente, aos traços rico, médio e pobre (Paes, 2010).

Esse processo é concebido de modo a garantir que a resistência média desejada permaneça dentro da faixa de variação das resistências obtidas com os traços avaliados. Por fim, realiza-se a determinação das proporções de argamassa e da umidade ótima do traço médio, seguida pela produção das misturas experimentais (Paes, 2010).

3.2.4 Método sugerido por Columbia

Este método preocupa-se com as propriedades do agregado e o teor de finos da mistura. Nesse contexto, a metodologia recomenda a utilização exclusiva dos agregados que passam pela peneira 9,5 mm, com uma retenção de 20% a 30% na peneira 4,8 mm (Rodrigues, 2015). Essa abordagem tem o intuito de garantir uma granulometria adequada para o concreto, no intuito de minimizar os vazios na matriz e promover uma compactação adequada.

A mistura deve conter um teor de finos que varia entre 12% e 15% passando pela peneira 0,3 mm. É importante frisar que esse percentual engloba não apenas as areias, mas também o cimento (Rodrigues, 2015). Essa inclusão de finos contribui significativamente para a coesão da mistura e para a resistência do concreto.

A proporção de materiais utilizados na mistura corresponde a uma faixa de 1:6 a 1:11 (Rodrigues, 2015). A escolha da proporção adequada é um aspecto crítico para o desempenho e à qualidade do concreto. Desta forma, é necessário que sejam produzidas misturas com diversos traços e que os mesmos sejam testados, com o objetivo de admitir o que melhor se adequa à problemática.

3.2.5 Método de Frasson Júnior.

De acordo com Frasson Júnior (2000), este método consiste em utilizar a massa específica como fator preponderante da resposta a ser determinada. Para isso, são moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões nominais (diâmetro x altura) de 5 cm x 10 cm, mantendo uma proporção de cimento e agregado de 1:9. Esta abordagem utiliza a densidade como um fator relevante, uma vez que a compactação adequada é fundamental para a resistência e qualidade do concreto.

À luz das informações descritas, pode-se inferir que os agregados graúdos desempenham um papel significativo neste processo. Eles são introduzidos gradativamente com uma proporção inicial de 10% e com incrementos de 10% a cada nova mistura, até atingir 50% (Frasson Júnior, 2000).

A partir da determinação da resistência à compressão, por meio do traço ideal, são realizadas duas misturas com um traço pobre (1:13 a 1:15). Este passo tem o objetivo de identificar o estado de coesão crítica do concreto, onde a redução na quantidade cimento em relação aos agregados pode afetar a coesão da mistura. Depois de determinada a coesão, é realizada a análise da influência do consumo de cimento, através do uso de dois traços (1:7 e 1:11). A umidade ótima para todos os casos varia de 5,5% a 8% (Frasson Júnior, 2000).

Segundo Rodrigues (2015), este método apresenta a vantagem de conduzir ensaios em escala reduzida, utilizando corpos de prova de dimensões inferiores às reais. Com a determinação da resistência desejada através desses corpos de prova em escala reduzida é possível realizar os ensaios em escala real nos próprios blocos. Essa estratégia é importante, pois permite economizar recursos devido à redução no consumo de materiais e contribui em analisar as tendências e comportamentos do concreto de modo mais ágil, antes de comprometer a produção em escala real.

3.2.6 Método de dosagem proposto por Fernandes

Conforme destacado pelo autor do método, a dosagem de concreto seco apresenta um desafio em termos de segurança, visto que a compactação do material é influenciada pela vibro prensa utilizada. Portanto, os procedimentos de dosagem devem ser realizados na localização da produção dos blocos de concreto.

O procedimento experimental consiste em construir inicialmente a curva de umidade, onde a proporção de materiais é mantida fixa e a única variável a ser avaliada é o teor de umidade. A partir dessa curva, blocos com diferentes teores de umidade são produzidos para determinar suas resistências à compressão. Essa abordagem permite correlacionar a umidade da mistura à resistência desejada (Fernandes, 2023).

Segundo Fernandes (2023), após a determinação da curva de umidade é possível definir a curva de consumo, uma vez que se tem posse da curva granulométrica. Essa curva de consumo é responsável por determinar a quantidade de cimento necessária para o alcance da resistência. Com base nisso, são estabelecidas proporções ideais entre cimento e agregado, resultando em diferentes níveis de resistência. Assim, são moldados os blocos e comparadas as resistências encontradas com as obtidas pela curva. Através dessa abordagem é possível dosar o concreto seco de modo eficiente e adaptável às particularidades da vibro prensa disponível.

A Tabela 3.4 apresenta alguns dos autores que utilizaram as metodologias de dosagem citadas para a produção de blocos.

Tabela 3.4 - Autores que embasaram a dosagem de blocos nas metodologias citadas

Autores	Título	Ano	Metodologia	Tipo de agregado
Paes	Estudos de parâmetros que influenciam na resistência à compressão de concretos utilizados na confecção de blocos estruturais	2010	Frasson Júnior.	Areia natural, pó de pedra e pedrisco
Silva	Validação do método de determinação da umidade ótima para fabricação de blocos utilizando agregado reciclado	2011	Frasson Júnior.	Areia natural, agregado miúdo reciclado e pedrisco
Rodrigues	Blocos de concreto produzidos com agregado reciclados mistos: avaliação das propriedades físicas, mecânicas e térmicas	2015	Fernandes	Agregado reciclado
Gomes <i>et. al.</i>	Obtenção de blocos de concreto com utilização de resíduos reciclados da própria fabricação dos blocos	2017	Fernandes e Besser Company	Agregado reciclado

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

3.4 Determinação da umidade ótima

Considerando que a presença de água em misturas de concreto seco tem o potencial de aumentar a mobilidade da mistura, reduzir o atrito entre as partículas e proporcionar um aumento na resistência, Niza (2021) conduziu experimentos variando os teores de umidade em misturas de concreto seco. O objetivo era alcançar uma maior densidade aparente e reduzir a exsudação após a compactação. Os ensaios resultaram na elaboração de gráficos correlacionando o teor de água (%) com a densidade aparente (g/cm^3), revelando que os agregados miúdos reciclados desempenham um papel importante na otimização da qualidade dos agregados. Durante o processo de quebra, esses agregados promovem o acúmulo de partículas finas, aumentando o volume da argamassa de concreto seco, o que resulta na densificação da estrutura e, consequentemente, no aumento da resistência à compressão.

Segundo Fernandes (2015), a umidade do concreto seco possui particularidades extremamente diferentes do concreto plástico. Sua nomenclatura sugere que a adição de água é inferior à dos concretos convencionais, implicando que a desforma deve ocorrer imediatamente. A quantidade de água adicionada à mistura depende dos agregados e do consumo de cimento, podendo também estar relacionada à utilização de aditivos e maquinário.

Além disso, a presença de finos nos blocos reciclados exerce influência significativa sobre o teor de umidade da mistura, uma vez que esses finos aumentam a absorção de água do concreto. Como resultado, é necessário um percentual mais elevado de umidade para assegurar adequada trabalhabilidade do concreto. Esta condição pode, por conseguinte, aumentar a dificuldade no processo de compactação dos blocos, levando à produção de blocos com menor densidade (Mehta e Monteiro, 2014).

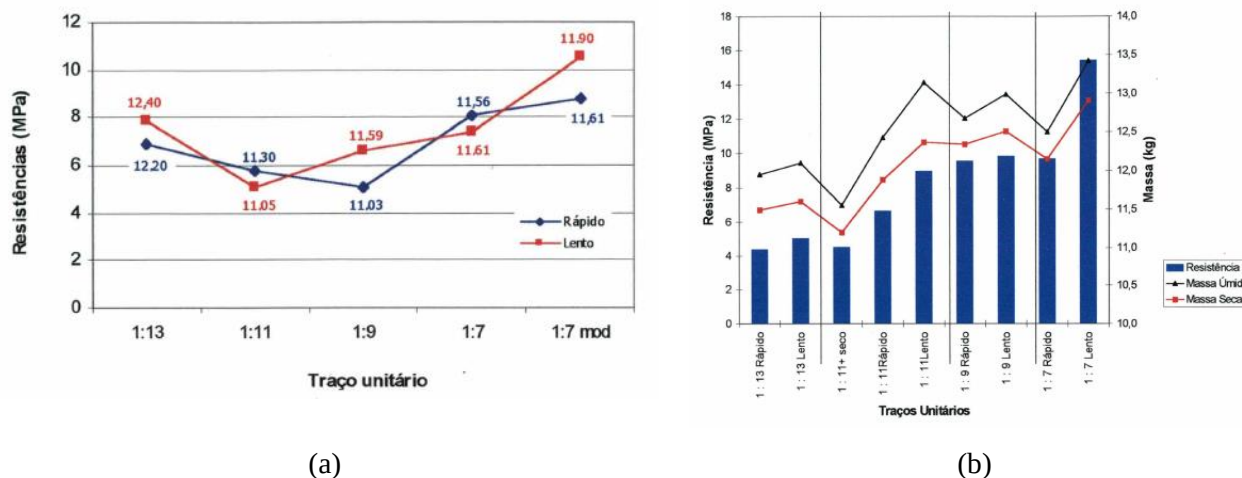
O método de Frasson Júnior (2000), que foi adaptado para a determinação da umidade ótima apresenta uma metodologia empírica, com isso, para diminuir essa variabilidade é necessário construir gráficos de umidade *versus* densidade, com o objetivo de determinar o intervalo ótimo na curva de compactação. Por meio desse estudo, pode-se utilizar a Equação 1 para a determinação da umidade.

$$\text{Umidade} = \frac{\text{Massa de água}}{\text{Massa da mistura seca (agregados + cimento)}} * 100 \quad (1)$$

Nesse contexto, a umidade do concreto seco, diferentemente do concreto plástico, contribui para o aumento da resistência à compressão. Isso ocorre porque a água presente na mistura atua como lubrificante, reduzindo o atrito entre os grãos e auxiliando na expulsão dos vazios, o que resulta em uma maior compacidade. No entanto, o quantitativo de água deve ser dosado de modo que não interfira durante a etapa de desmoldagem (Pirola, 2011).

De acordo com Frasson Júnior (2000), as pesquisas realizadas em uma fábrica no Rio Grande do Sul revelam uma relação entre a resistência (à compressão) e a correção de umidade dos blocos. Na Figura 3.3, tem-se os gráficos com os resultados obtidos em seu estudo, tanto para o caso em que houve o controle de umidade quanto para o caso em que não houve controle de umidade.

Figura 3.3 - Traço x Resistência à compressão



Fonte: Frasson Júnior (2000).

A Figura 3.3a apresenta os resultados de resistência à compressão *versus* proporção de cimento/agregado para as duas séries de corpos de prova, nas quais houve variação do tempo de vibro compressão (lento e rápido). Com isso, observa-se uma inconsistência nos resultados, uma vez que o traço mais rico, por exemplo 1:7, apresentou resistência à compressão inferior ao traço mais pobre (1:13).

Por outro lado, a Figura 3.3b demonstrou uma conformidade entre as resistências à compressão e a proporção de materiais (cimento/agregado), já que os traços mais ricos apresentaram resistência superior aos mais pobres. Esse fenômeno provavelmente decorreu do controle da umidade no dia da moldagem dos blocos, ao contrário do que foi observado na Figura 3.3a. Isso destaca a relevância do controle de umidade para produção de blocos de concreto.

Souza (2001), ao substituir o agregado natural por agregado reciclado misto para a produção de blocos de vedação, obteve uma umidade ótima de 5% a 9% para uma relação cimento/agregado de 1:10 em massa. Com base nisso, foram produzidos corpos de provas cilíndricos com substituição de 30% a 50% do agregado natural pelo reciclado, mantendo a mesma proporção de cimento/agregado. O concreto seco resultante apresentou uma resistência média de 2,6 MPa para blocos vazados (10 cm x 19 cm x 39 cm).

Por sua vez, Albuquerque (2005), ao usar sua vibro prensa para uma proporção de 1:11 (cimento/agregado), alcançou uma resistência à compressão média de 2,3 MPa para blocos vazados (14 cm x 19 cm x 39 cm).

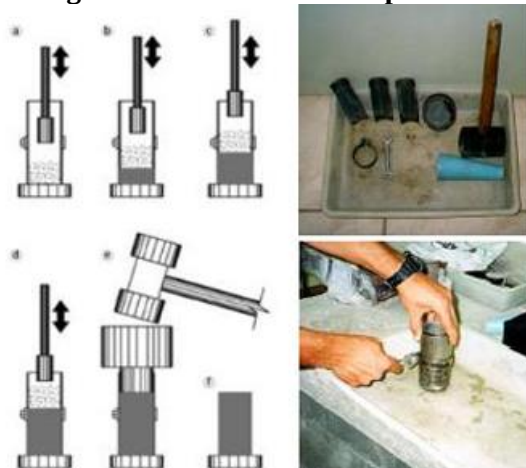
Lintz *et al.* (2012), em sua pesquisa, encontraram uma resistência à compressão média de 4 MPa a 6 MPa para corpos de prova cilíndricos com substituição de 30% a 50% do agregado convencional pelo reciclado, mantendo uma relação 1:10 (cimento/agregado).

Silva *et al.* (2015), realizou uma pesquisa sobre os concretos secos produzidos com agregados de RCD separados por densidade. Uma das conclusões do estudo foi que, para os concretos secos produzidos com agregado natural e areia reciclada, a umidade ótima para máxima compacidade foi de 7%.

3.4.1. Método de compactação utilizando a técnica de reometria compressiva para determinação da umidade ótima

Este método foi empregado por Frasson Júnior *et al.* (2010), os quais utilizaram moldes cilíndricos tripartidos com dimensões de 5 cm x 13 cm para a produção de corpos de prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm. O concreto produzido nessa metodologia preenche o molde e é compactado por meio de um soquete manual. Nesse procedimento, o material é dividido em quatro camadas de mesma altura, sendo aplicados 20 golpes para cada camada. O objetivo é moldar corpos de prova com altura de 10,3 cm a 10,5 cm. A desforma é realizada por meio de um martelo de borracha que aplica uma carga a uma altura de 10 cm. A Figura 3.4 ilustra a sequência de moldagem dos corpos de prova submetidos à compactação.

Figura 3.4 - Reometria compressiva



Fonte: Frasson Júnior (2010).

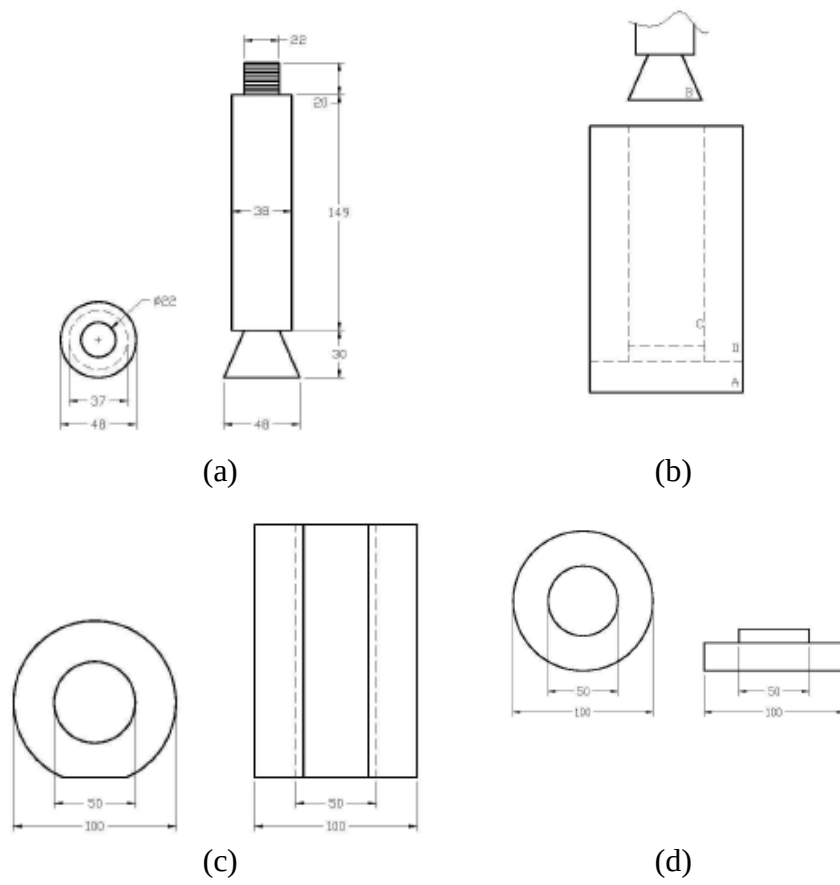
Como pode ser observado na Figura 3.4, este método determina a umidade ótima da mistura de forma empírica, uma vez que a coesão é avaliada pela carga que comprime os corpos de prova. Além disso, a energia aplicada não foi padronizada, o que dificulta a reprodução de energia de prensagem obtida pelas vibro prensas, tornando difícil estabelecer uma relação direta entre o desempenho do concreto seco com a energia de compactação (Niza, 2021).

Paes (2010) avaliou a influência do teor de umidade na resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Os resultados obtidos comprovaram que esse parâmetro possui significância sobre a resistência, pois houve variação na resistência à compressão conforme alterava-se a umidade da mistura de concreto. Da mesma forma, ocorreu variação na proporção de cimento na mistura, onde uma diminuição na proporção de cimento resultou uma redução nos resultados de resistência à compressão. Portanto, os parâmetros de densidade, umidade e teor de cimento devem ser dosados de modo eficiente para garantir a qualidade de blocos de concreto estruturais.

De acordo com Silva (2012), diversos autores relatam que a umidade ótima de misturas para produção de blocos de concreto não tem seu foco principal na maximização da resistência à compressão, mas na facilidade de desmoldagem do bloco durante o processo. É importante destacar que, ao contrário do que ocorre com solos, a umidade ótima é obtida de modo diferente, uma vez que a densidade é o fator determinante.

Marchioni (2012), desenvolveu uma técnica para caracterização do concreto seco e o utilizou em seu estudo a técnica de reometria compressiva. O desenvolvimento deste ensaio foi uma adaptação das metodologias anteriores, com dispositivos e metodologias específicas. Para tanto, foi utilizada uma base de apoio ao molde (Figura 3.5d) um molde bipartido para o corpo de prova (Figura 3.5b), um cilindro para manter o molde fixo (Figura 3.5c) e um pistão para aplicação da força de compactação (Figura 3.5a).

Figura 3.5 - Dispositivos para técnica de reometria compressiva



Fonte: Marchioni (2012).

4 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Desenvolvido R. A. Fisher na Inglaterra durante a década de 1920, o planejamento experimental encontrou inicialmente sua principal aplicação em pesquisas agrícolas. No entanto, a partir de 1950 houve um grande crescimento na sua utilização, expandindo-se para estudos tecnológicos. Atualmente, o planejamento de experimentos desempenha um papel de grande relevância na geração de novos produtos (Lima Filho, 2010).

Para que um processo tenha validade é fundamental adquirir evidências registradas de modo que garanta a origem de um novo produto conforme as especificações e características normativas e pré-determinadas. É neste aspecto que o planejamento de experimentos atende estas condições, pois ele documenta tudo que ocorre nas etapas previstas, de modo a comparar o nível de qualidade encontrado com o esperado (Lima Filho, 2010).

De acordo com Ribeiro e Caten (2011), o objetivo central do plano experimental, para o cenário em foco, visa encontrar um ajuste ótimo para os parâmetros do sistema, a fim de maximizar o desempenho estrutural, minimizar os custos e reduzir a sensibilidade aos fatores não controláveis. Diante disso, Figura 4.1 apresenta a terminologia experimental.

Figura 4.1 - Terminologia experimental



Fonte: Adaptado de Ribeiro e Caten (2011).

De acordo com Button (2012), o delineamento experimental é composto por vários ensaios regidos por recomendações normativas, científicas e estatísticas, no intuito de determinar a influência das variáveis nos resultados.

O planejamento experimental visa atingir dois objetivos principais. O primeiro consiste em determinar as variáveis que possuem o maior potencial de influência nos resultados, proporcionando uma compreensão aprofundada dos fatores-chave que impactam o experimento. O segundo objetivo é atribuir valores às variáveis identificadas, buscando otimizar e minimizar a variabilidade dos resultados, contribuindo para uma análise mais precisa e eficiente (Button, 2012).

Os benefícios decorrentes desse enfoque metodológico são significativos. Em primeiro lugar, o planejamento experimental permite reduzir a quantidade de ensaios necessários sem comprometer a interpretação dos resultados, resultando em economia de recursos e tempo. Além disso, a abordagem possibilita a separação dos efeitos das variáveis por meio de seu estudo simultâneo, fornecendo *insights* valiosos sobre as interações entre os fatores estudados. A análise experimental também contribui para o aumento da confiabilidade dos resultados, permitindo uma tomada de decisão mais segura (Button, 2012).

A flexibilidade do processo permite a realização da pesquisa em etapas, promovendo um caráter iterativo com a adição de novos ensaios conforme necessário. A capacidade de selecionar as variáveis de influência com um quantitativo baixo de ensaios é particularmente vantajosa, enquanto a representação do processo por meio de formulações matemáticas facilita a modelagem e a compreensão do fenômeno estudado. Por fim, a análise experimental proporciona a elaboração de conclusões embasadas não apenas em resultados quantitativos, mas também qualitativos, enriquecendo a interpretação dos dados obtidos (Button, 2012).

Na Figura 4.2 tem-se um esboço da organização dos procedimentos necessários para uma efetiva análise experimental e dos seus resultados, onde é importante a determinação do problema e o seu aprofundamento no conteúdo a ser trabalhado, para que a partir disso, sejam determinadas as variáveis aleatórias e as variáveis de resposta mais pertinentes ao caso. A seguir, é realizado um delineamento do experimento com base nas normas e recomendações vigentes, a fim de se executar os experimentos com o mínimo de incertezas, pois esses resultados encontrados pelo meio experimental são analisados até concluir se os objetivos pré-determinados foram alcançados.

Figura 4.2 - Esboço dos procedimentos para o planejamento e análise dos resultados



Fonte: Adaptado de Montgomery (2009).

Segundo Tenório (2007), para realizar um planejamento estatístico é necessário existir um auxílio das ferramentas estatísticas para uma precisão maior dos resultados, visto que é por meio destas que se verifica as interações entre as variáveis de entrada e o quanto os efeitos são importantes. A partir disso, é realizado um ajuste com o intuito de se obter uma otimização do desempenho experimental. A Figura 4.3 apresenta um esboço da circularidade do método científico para um planejamento experimental.

Figura 4.3 - Esboço dos procedimentos para o planejamento e análise dos resultados



Fonte: Adaptado de Assis (2022).

Em um experimento de caracterização, o principal interesse é determinar os fatores que afetam as respostas de saída. Para o aprofundamento da análise é importante que sejam investigadas as regiões dos fatores mais significativos que conduzem à resposta ótima, que pode resultar na determinação de um custo mínimo (Montgomery e Runger, 2009).

Para analisar o potencial dos fatores envolvidos no cenário, é mister que seja determinada uma estratégia por meio de algum tipo de experimento fatorial, onde ocorre a variação dos fatores de forma conjunta. Nesse contexto, é possível realizar experimentos com organização e planejamento, na perspectiva de determinar os subconjuntos das variáveis que possuem uma maior influência nos resultados relacionados ao processo (Schafer, 2007).

De acordo com Memória (2004), em qualquer planejamento experimental deve existir repetições, para que se possa estimar o erro experimental. A Figura 4.4 apresenta os princípios do planejamento experimental.

Figura 4.4 - Princípios do planejamento de experimentos



Fonte: Adaptado de Memória (2004).

4.1 Análise Estatística

Montgomery (2008) descreve as etapas fundamentais para a elaboração de um planejamento experimental, iniciando-se com o embasamento teórico referente ao problema em estudo. Nesta fase, é importante definir os objetivos a serem alcançados, pois os resultados almejados dependem diretamente dessa definição. Em seguida, procede-se à seleção dos fatores e níveis, sendo os fatores (variáveis independentes) controlados ao longo do experimento, e os níveis (variações nos valores de cada fator) submetidos à avaliação.

A etapa posterior é caracterizada pela seleção da variável de resposta, que pode ser denominada de variável dependente do experimento. Em posse disso, é possível elaborar uma matriz experimental, a qual vai combinar os fatores em diferentes níveis de modo aleatório ou não aleatório. Com esse planejamento organizado, é possível prosseguir para a realização do experimento, onde é importante que ocorra um monitoramento de modo adequado, de modo a evitar erros neste estágio, que podem comprometer a validade experimental (Montgomery, 2008).

No processo de análise experimental, é importante que os conjuntos de dados sejam avaliados estatisticamente. Para tanto, é necessário que exista uma investigação sobre a influência do fator a ser avaliado no produto final. Nesse sentido, para as características deste problema, são conduzidos testes de hipóteses, cujo objetivo é realizar inferências estatísticas sobre uma população através de uma amostra, a um determinado nível de significância. Para isso, é necessário realizar testes prévios no intuito de investigar se os dados são paramétricos ou não paramétricos. Com base nessa avaliação, pode-se determinar o tipo de teste que será utilizado (Nascimento *et al.*, 2015).

De acordo com Nascimento *et al.* (2015), o teste de normalidade dos dados amostrais (Shapiro-Wilk, Anderson-Darling e Komorogov-Smirnov) é uma premissa frequentemente usual para determinar o teste estatístico a ser empregado na análise dos dados. Por meio dele, verifica-se a possibilidade de os dados de uma amostra seguirem uma distribuição normal. Quando isso é confirmado, são empregados testes estatísticos paramétricos. Caso contrário, deve-se recorrer a métodos estatísticos alternativos. Além disso, é importante realizar um teste de aderência do modelo para alcançar conclusões precisas e representativas do conjunto de dados. Este teste tem o objetivo de verificar se o modelo estatístico escolhido se ajusta aos dados observados, garantindo assim, a confiabilidade das conclusões.

Ao avaliar os dados, é possível determinar o tipo de teste apropriado a ser empregado. O teste paramétrico é comumente utilizado quando os dados seguem uma distribuição específica, utilizando-se, na maioria dos casos, a normal gaussiana. Nele são realizadas suposições sobre os parâmetros populacionais, como média e desvio padrão. Nesses casos, usa-se com frequência os testes *t-Student*, análise de variância (ANOVA), regressão linear, entre outros. Por outro lado, os testes não paramétricos são utilizados para realizar inferências sobre uma população sem fazer suposições sobre o modelo de distribuição. Os testes não paramétricos mais usuais são os de Mann-Whitney, Wilcoxon, Kruskal-Wallis e Qui-Quadrado (Contador e Senne, 2016).

A ANOVA é um teste estatístico que utilizado para determinar a significância de fatores e suas interações em um experimento. Portanto, a ANOVA visa investigar se existem diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos grupos compostos pelos diferentes níveis dos fatores em estudo. Para tanto, é necessário que suposições básicas sejam atendidas (teste de normalidade, teste de homogeneidade das variâncias, independência estatística e dos dados e aditividade dos efeitos). Essas suposições são fundamentais para validar a análise (Ribeiro e Caten, 2000).

Diante disso, a partir das informações fornecidas pela ANOVA, que determina as diferenças globais entre grupos, o teste de Tukey identifica quais grupos possuem diferenças significativas entre suas médias. Portanto, o teste de Tukey é uma ferramenta estatística que tem o objetivo de comparar médias de diferentes conjuntos de dados. Nesse contexto, quando o valor-p é inferior ao nível de significância (α), pré-definido, admite-se que existem diferenças significativas entre as médias analisadas (Silva, 2023).

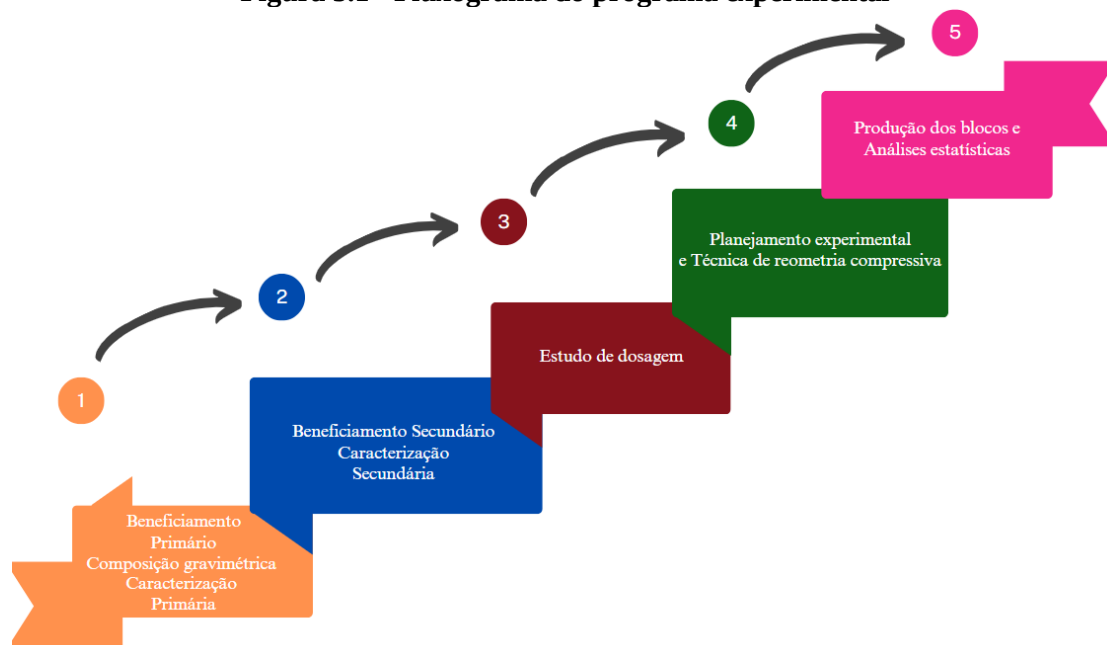
Borges (2012) realizou uma análise estatística de seus dados utilizando a ANOVA, por meio do programa computacional *Statistica* para identificar a existência ou não de significância da relação cimento/agregado, idade de rompimento e teor de substituição, bem como suas interações, na resistência de blocos. Assim, foi investigado se a combinação desses parâmetros poderia influenciar de maneira significativa a resistência dos blocos. Foi observado que uma relação cimento/agregado rica não resulta necessariamente em maiores resistências. Os efeitos dos fatores foram significativos individualmente na resistência. Além disso, a interação entre a proporção de cimento/agregado e a idade também trouxe um efeito significativo.

Silva (2023) realizou a ANOVA considerando como fatores o percentual de substituição do agregado reciclado, a dimensão dos agregados e a interação entre eles, no intuito de determinar se há efeitos estatisticamente significativos na resistência à compressão do concreto reciclado, considerando um nível de significância de 5%. Diante disso, foram encontradas influências significativas entre os fatores sobre a variável de resposta, além haver interações significativa entre eles.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desta pesquisa é de natureza quantitativa, onde previamente foi realizada uma revisão bibliográfica acerca das pesquisas e temáticas envolvidas como: manuais, normas, dissertações, teses, periódicos nacionais e internacionais. O programa de investigação experimental desta pesquisa é constituído de cinco etapas, conforme a Figura 5.1.

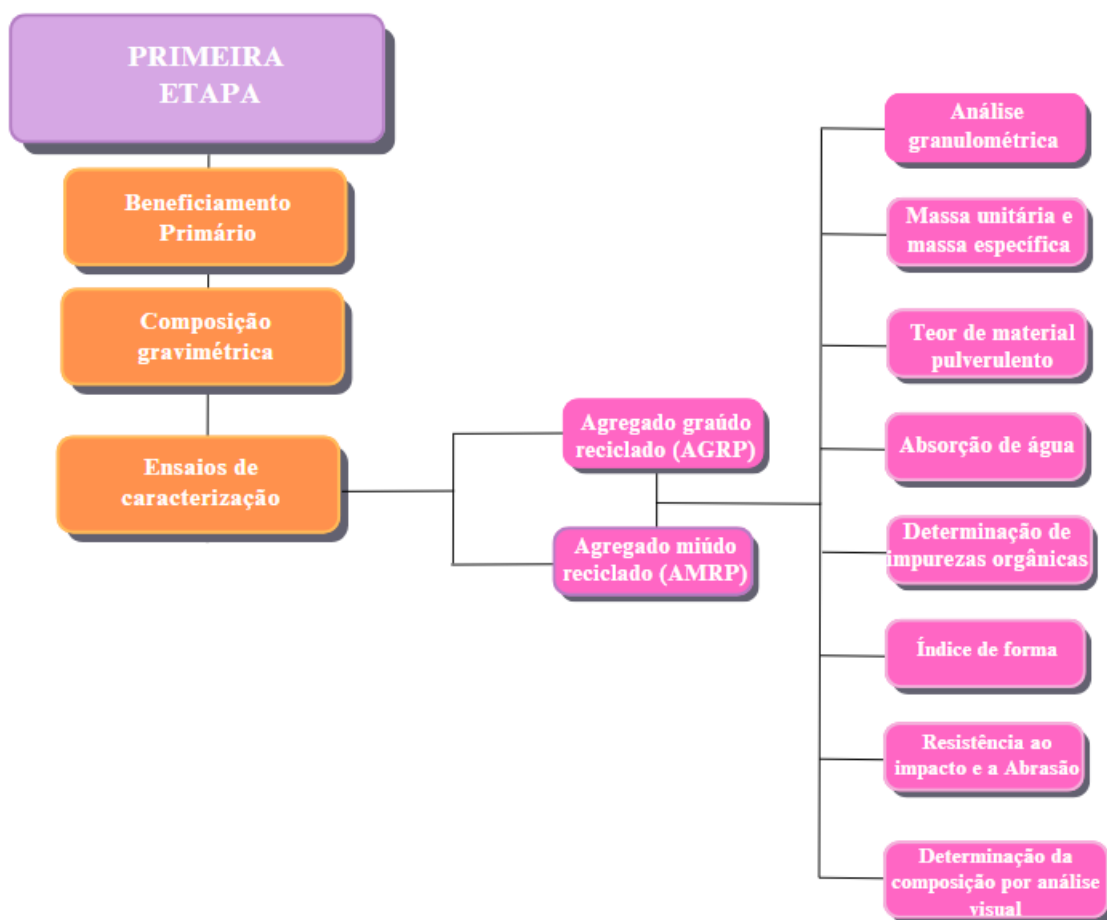
Figura 5.1 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A primeira etapa desta pesquisa corresponde ao beneficiamento do RCD coletado na Região Metropolitana de Maceió – AL, iniciado no canteiro da Braskem e que teve continuidade na UFAL. Além disso, previamente ao ensaio de caracterização, foi realizado um processo de composição gravimétrica. Após realizar o estudo gravimétrico, o material foi encaminhado para o LEMA, onde foram realizados os ensaios de caracterização, com o intuito de conhecer as propriedades físicas e mecânicas conforme apresentado na Figura 5.2.

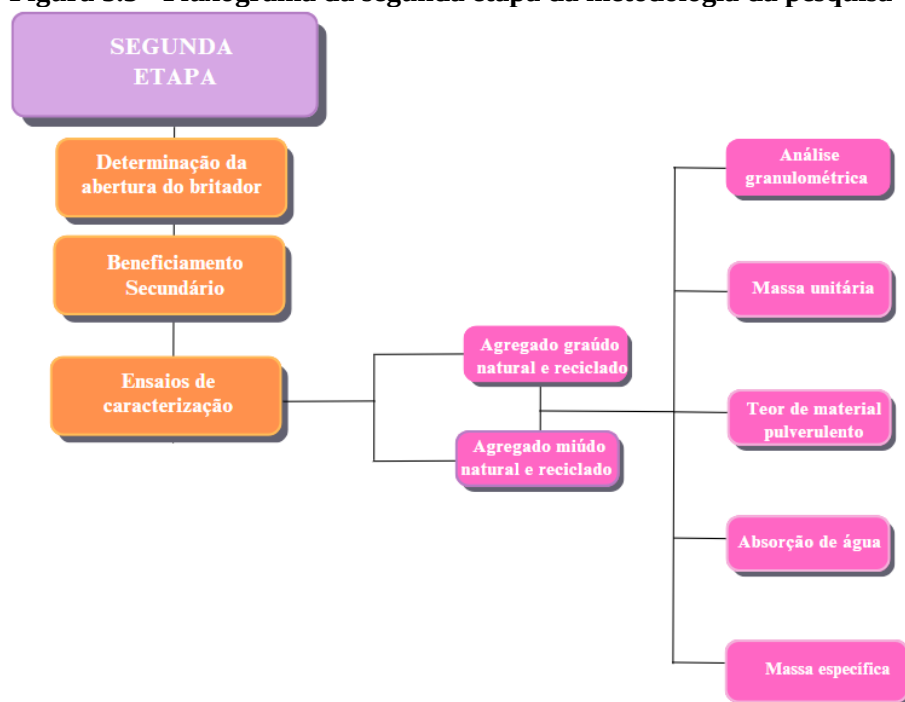
Figura 5.2 - Fluxograma da primeira etapa da metodologia da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Em seguida, foi realizada a segunda etapa da pesquisa, que corresponde a um ajuste da curva granulométrica para a produção dos blocos. Por meio dessa etapa, os agregados graúdos obtidos na etapa anterior passaram por um novo beneficiamento, ensejando uma nova caracterização do material. Além disso, nesta etapa os agregados naturais miúdo e graúdo também passaram pela etapa de caracterização, conforme a Figura 5.3.

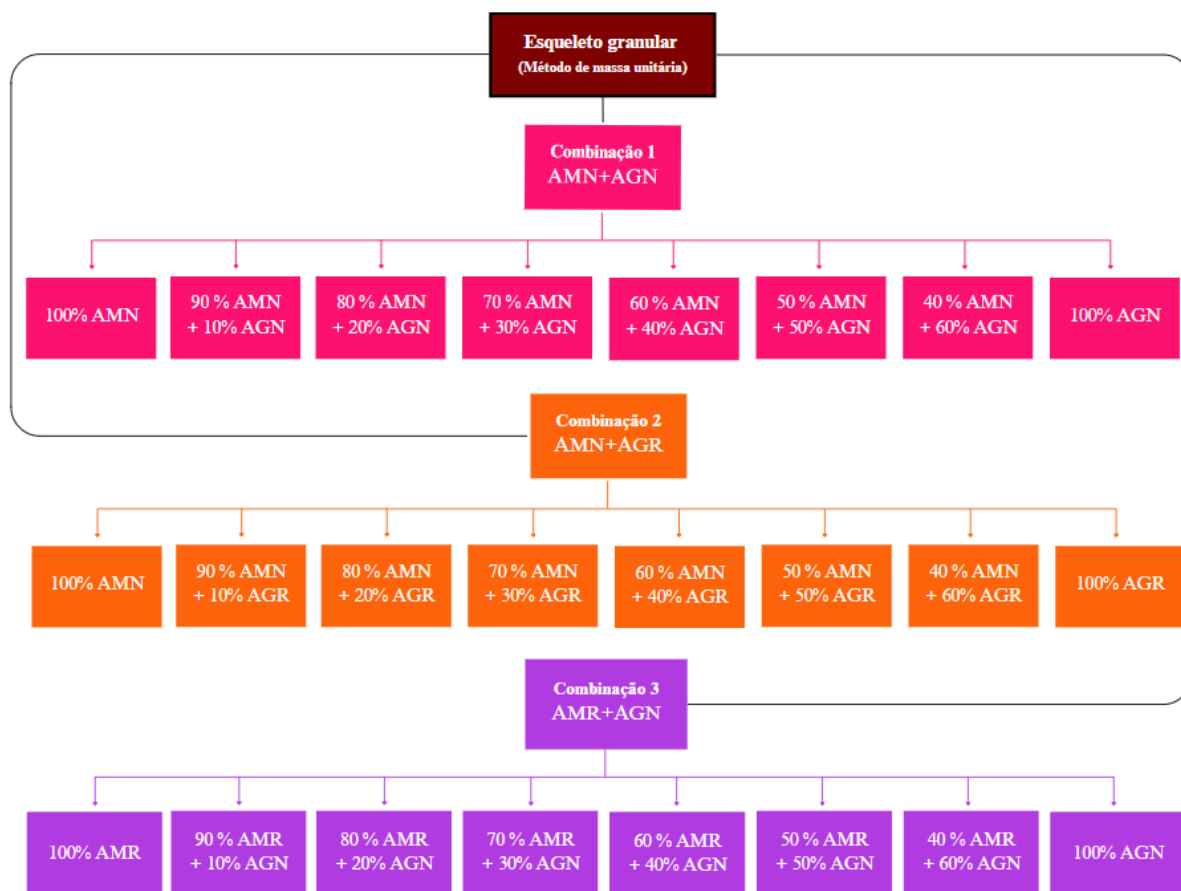
Figura 5.3 - Fluxograma da segunda etapa da metodologia da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Antes do estudo de dosagem, foi conduzida uma análise para determinar a composição ideal entre agregado graúdo e miúdo, visando otimizar a estrutura granular. Essa fase é muito relevante, visto que as partículas finas do agregado têm influência na movimentação desse esqueleto. Portanto, a ausência dessas partículas dificulta a movimentação dos materiais mais grossos e, conseqüentemente, aumenta os vazios, conforme descrito por Melo (2019). Com base nos dados de massa unitária e índice de vazios para as diversas combinações de agregados agregado miúdo reciclado (AMR) e agregado graúdo natural (AGN), agregado miúdo natural (AMN) e agregado graúdo reciclado (AGR), AMN e AGN, foram elaborados gráficos com o intuito de estabelecer um percentual fixo para a composição dos blocos. A Figura 5.4 apresenta o fluxograma de realização deste ensaio.

Figura 5.4 - Fluxograma do ensaio de massa unitária



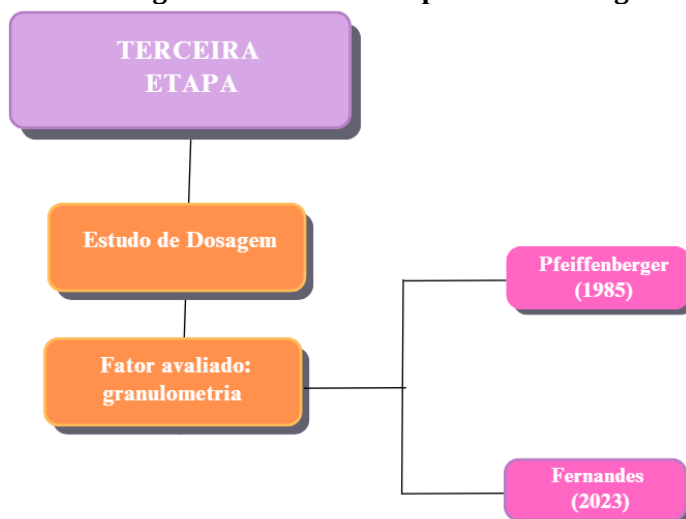
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O método utilizado para este ensaio foi uma adaptação do método C da NBR 16972 (2021). Nesta metodologia, cada um terço do material foi submetido a uma vibração por 5 segundos, em conformidade com o processo empregado na produção de blocos. Esse procedimento foi repetido duas vezes e, na terceira camada (3/3), o molde foi completamente preenchido. As composições avaliadas foram: 100% AMR, 90% AMR/10% AGN, 80% AMR/20% AGN, 75% AMR/ 25% AGR, 70%AMR/30% AGN, 60% AMR, 40% AGN, 50% AMR/50% AGN, 40% AMNR/ 60% AGN, 100% AGN. O mesmo procedimento foi seguido para todas as combinações mencionadas anteriormente.

Após a etapa de caracterização e determinação da composição ideal, foi necessário realizar um estudo de dosagem. De acordo com a Tabela 3.1, os principais fatores estudados por cada método de dosagem foram detalhados, sendo que Columbia (1969), Pfeiffenberger (1985) e Fernandes (2023) tiveram como foco a granulometria. Nesse contexto, foi comparada a curva granulométrica obtida experimentalmente com as curvas de referência de Pfeiffenberger (1985) e Fernandes (2023), com o objetivo de identificar qual metodologia melhor se adequa ao perfil granulométrico do material em estudo. Para isso, foram realizadas comparações entre

as combinações, considerando que a curva granulométrica ótima seria determinada pelo estudo do esqueleto granular. A terceira etapa da metodologia é ilustrada na Figura 5.5, correspondendo ao procedimento de análise pelo ajuste da curva granulométrica.

Figura 5.5 - Fluxograma da terceira etapa da metodologia da pesquisa



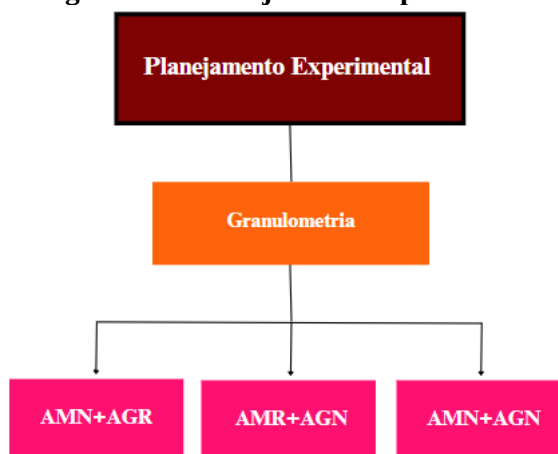
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A seguir, será descrito o planejamento experimental, apresentando-se o fator e os níveis que serão analisados a partir da definição do problema. Diante disso, verificou-se que o tipo de planejamento que satisfaz a esta pesquisa é o unifatorial, detalhado a seguir.

5.1 Planejamento experimental

Na quarta etapa foi desenvolvido um planejamento para análise dos blocos. A variável de resposta a ser estudada foi a resistência à compressão. Com isso, os blocos produzidos com agregados reciclados tiveram como variável dependente a resistência à compressão, e como variável independente a granulometria (fator). Através disso, foram aplicados testes de normalidade e homocedasticidade sobre os dados amostrais.

Com o objetivo de aprimorar a comparação entre os materiais reciclados, foram realizadas misturas com diferentes combinações de agregados. Estas incluíram: AMN+AGN, AMR+AGN, AMN+AGR. Este procedimento visou analisar tanto os parâmetros quantitativos quanto os qualitativos, com o intuito de identificar os possíveis prejuízos associados ao uso de agregados reciclados e suas combinações. Diante disso, a Figura 5.6 apresenta o esquema do planejamento experimental, onde será avaliado o fator granulometria e seus níveis. É importante destacar que os demais parâmetros associados a pesquisa como, por exemplo, proporção de agregados (miúdo e gráudo) e relação cimento/agregado foram admitidos como constantes, de modo a satisfazer o planejamento experimental desta pesquisa.

Figura 5.6 - Planejamento experimental

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Pelo Quadro 5.1 tem-se a interação entre os níveis e o número de réplicas para cada ensaio, as quais foram definidas de acordo com a NBR 6136 (2016).

Quadro 5.1 - Interação entre os níveis do fator

AMN+AGR	AMR+AGN	AMN+AGN
6 Réplicas	6 Réplicas	6 Réplicas

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para determinação dos teores de umidade, foi empregada a técnica de reometria compressiva, devido à sua semelhança com as condições de moldagem em uma vibro prensa. Em ambos os casos, a análise da resistência à compressão e o estudo de dosagem são equivalentes. A partir disso, foi possível avaliar diferentes composições de concreto seco por meio da compactação desses corpos de prova. Esse procedimento representa uma adaptação do método utilizado por Marchioni (2012) e Nakano *et al.* (2014).

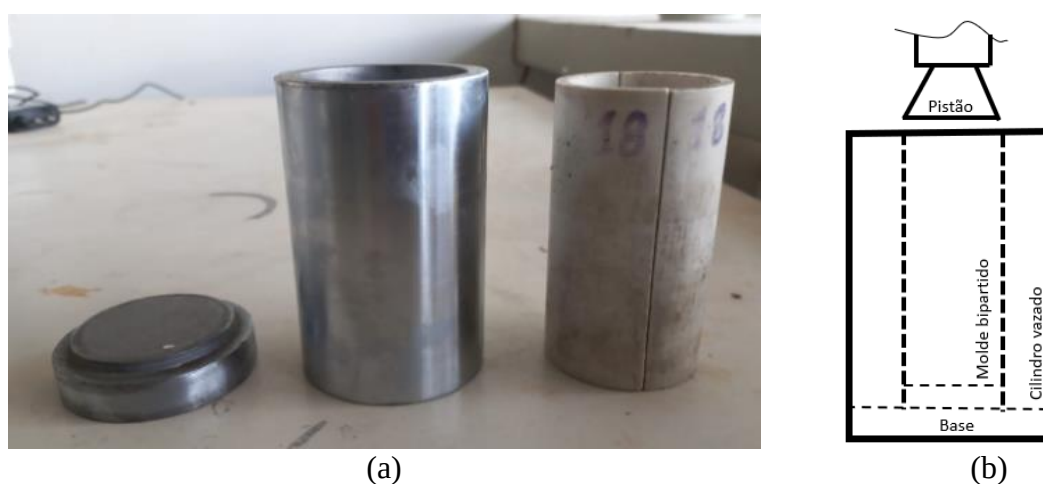
A umidade ótima foi determinada pela técnica de reometria, utilizando uma proporção de cimento/agregado igual a 1:6, com o intuito de avaliar as variações de resistência com o aumento do teor de umidade. Dessa forma, foi possível determinar o teor de umidade ótimo da mistura. De acordo com Marchioni (2012), esse teor é responsável por aumentar a coesão e melhora a aderência do concreto na parede do molde.

É importante destacar que a proporção de cimento/agregado 1:6 admitida para esta pesquisa foi determinada com o propósito de atingir uma resistência à compressão característica mínima de 3 MPa para o conjunto de blocos em cada composição de agregados, em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela NBR 6136 (2016), a qual classifica os blocos de acordo com seu uso (estrutural ou vedação) e requer essa resistência. Dessa forma, considerando que a vibro prensa utilizada é de operação manual e que a energia de compactação não é controlada (diferentemente do que ocorreu durante o emprego da técnica de reometria

compressiva), optou-se por empregar uma composição rica em cimento com o intuito de garantir o alcance dos objetivos estipulados neste estudo.

Na aplicação da técnica, foram utilizados corpos de prova cilíndricos, baseado em uma adaptação do estudo de Marchioni (2012). Para isso, foram empregados corpos de prova padronizados com uma base circular de apoio para molde, enquanto os moldes cilíndricos bipartidos são de PVC para moldagem dos corpos de prova, com diâmetro e altura iguais a 5 cm no seu estado fresco. A Figura 5.7 apresenta o cilindro vazado e o molde na qual a mistura será despejada, juntamente com o esquema de montagem das peças.

Figura 5.7 - Molde bipartido e cilindro vazado: esquema de montagem das peças



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A estrutura metálica foi empregada para suportar a solicitação de compactação durante a moldagem dos corpos de prova. Nesse sentido, inicialmente foi aplicado desmoldante na superfície interna e externa dos moldes bipartidos, facilitando a desmoldagem de cada corpo de prova. Em seguida, os moldes bipartidos foram encaixados na estrutura suporte.

No procedimento de mistura, os agregados foram pré-saturados utilizando 80% de sua absorção, conforme fundamentado no estudo de Silva (2020). Esse estudo sugere que o concreto que utiliza água de pré-molhagem apresenta melhores resultados, auxiliando na redução da porosidade e no preenchimento dos poros do agregado reciclado. Portanto, é recomendado o uso de 80% da água de absorção desses agregados para a pré-molhagem, uma vez que o percentual restante é absorvido lentamente, sem interferir no consumo de água da mistura de concreto. É importante ressaltar que, para as misturas contendo agregado natural, a pré-saturação não é necessária, pois o quantitativo necessário possui baixa significância.

Outra pesquisa relevante sobre a capacidade de absorção de água dos agregados reciclados foi conduzida por Tenório (2007). O autor relata que a saturação dos agregados

reciclados pode ocorrer em minutos. Por isso, muitas pesquisas, como a de Leite (2001), recomendam um tempo de 10 minutos para uma absorção mais completa do agregado. Após esse período, o processo de absorção ocorre de forma mais lenta. Portanto, o tempo de pré-molhagem do agregado foi embasado nesses estudos.

Os teores de umidade avaliados foram quatro: 6%, 8%, 10% e 12%, com base nos estudos de Silva (2011), Marchioni (2012) e Silva *et al.* (2015). A partir disso, foi realizado o cálculo do quantitativo de materiais, partindo do pressuposto de que um bloco de concreto tem densidade de aproximadamente 2000 kg/m³. Portanto, um corpo de prova de dimensões 5 cm x 5 cm tem uma massa aproximada de 210 g. Assim, foram produzidos cinco corpos de prova, seguindo o quantitativo de materiais apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Quantitativo de materiais utilizados para produzir cada corpo de provas

Granulometria	Teor de água	Consumo de agregados (g)		Água de pré-molhagem (g)	Consumo de água (g)	Consumo de cimento (g)
		Agregado graúdo	Agregado miúdo			
Agregado miúdo natural (AMN) e agregado graúdo natural (AGR)	6%	42,45	127,36	-	11,89	28,30
	8%	41,67	125,00	-	15,56	27,78
	10%	40,91	122,73	-	19,09	27,27
	12%.	40,18	120,54	-	22,50	26,79
Agregado miúdo reciclado (AMR) e agregado graúdo natural (AGN)	6%	42,45	127,36	8,85	11,89	28,30
	8%	41,67	125,00	8,68	15,56	27,78
	10%	40,91	122,73	8,53	19,09	27,27
	12%.	40,18	120,54	8,37	22,50	26,79
Agregado miúdo natural (AMN) e agregado graúdo reciclado (AGR)	6%	42,45	127,36	4,25	11,89	28,30
	8%	41,67	125,00	4,17	15,56	27,78
	10%	40,91	122,73	4,10	19,09	27,27
	12%.	40,18	120,54	4,02	22,50	26,79

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O procedimento de mistura se inicia com ou sem a pré-saturação dos agregados, onde durante o primeiro minuto a água é inserida gradativamente e, ao mesmo tempo, os materiais são homogeneizados manualmente. A partir do segundo minuto, todo o material permanece em repouso durante nove minutos, com objetivo de permitir que a água seja absorvida por todos os agregados uniformemente. Em seguida, foi adicionado o cimento, o qual é homogeneizado manualmente antes de iniciar uma nova molhagem com a água de consumo. Por fim, são cronometrados 3 minutos, nos quais, no primeiro minuto, a água de consumo é adicionada gradativamente enquanto a mistura é homogeneizada, e do início do segundo minuto até o final do terceiro minuto, toda a mistura é homogeneizada manualmente. A Figura 5.8 apresenta o procedimento da mistura, que foi realizado em uma cuba de argamassadeira de 5 litros e uma colher de aço.

Figura 5.8 - Procedimento das misturas



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A relação água/cimento de cada mistura foi avaliada pelo “ponto de pelota” (Tango, 1994), que, de acordo com Silva (2018), é muito utilizado nas operadoras de vibro prensa para o ajuste de umidade. A definição desse método está associada à consistência em que é possível moldar uma pelota de concreto nas mãos sem que a pelota se esboroe ou suje as mãos, caso contrário, significa há falta de água ou excesso de água, respectivamente. A Figura 5.9 apresenta a obtenção do ponto de pelota em uma das misturas.

Figura 5.9 - Ponto de pelota



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Em seguida, foram moldados os corpos de prova com as diferentes granulometrias e teores de umidade, sendo posteriormente submetidos a uma vibração de cinco segundos. Após isso, foi aplicada uma carga de 3 toneladas-força (aproximadamente 30 kN) com o objetivo de compactar o material, através da máquina universal de ensaios Shimadzu, que tem capacidade de 100 kN (Figura 5.10).

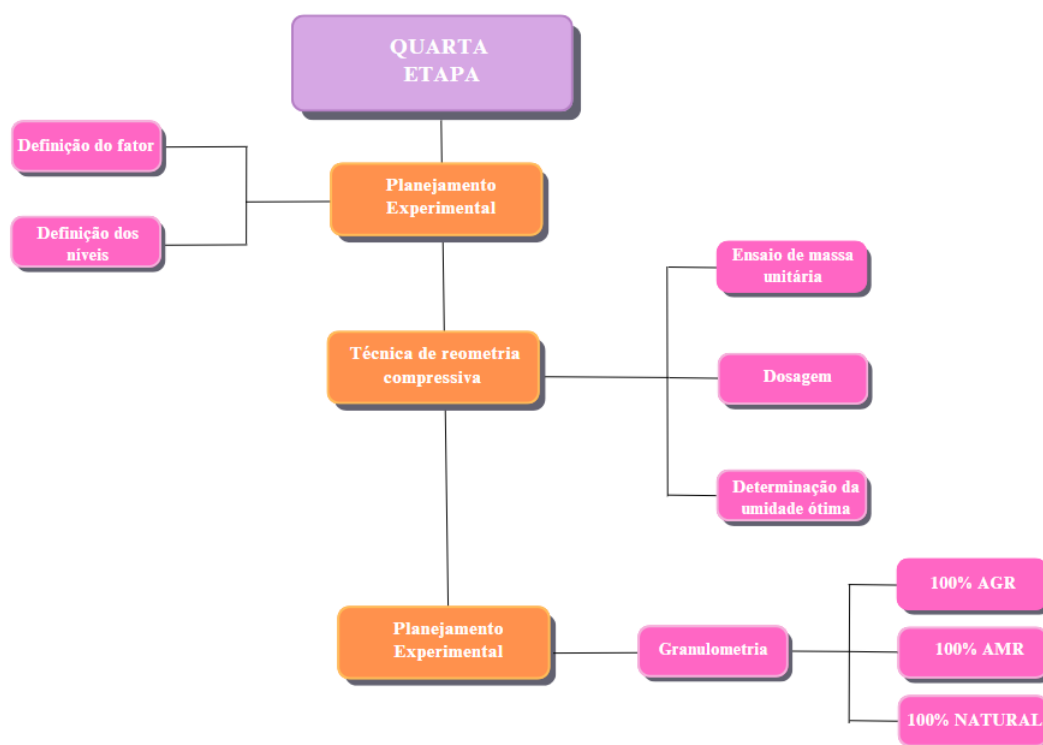
Figura 5.10 - Máquina universal de ensaios Shimadzu



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para a retirada dos corpos de prova, foi utilizado um equipamento de extração do molde bipartido. Após a extração, os corpos de prova foram levados a uma câmara de cura e desmoldados após 24 horas, lá permanecendo por 21 dias. Durante os dias de cura, estes corpos de prova foram umidificados diariamente para evitar a perda excessiva de água. Após o vigésimo primeiro dia estes foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão conforme a NBR 5739 (2018). A Figura 5.11 apresenta o fluxograma da quarta etapa desta pesquisa.

Figura 5.11 - Fluxograma da quarta etapa da metodologia da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

No intuito de viabilizar a utilização do agregado reciclado para produção de blocos, foi utilizada a mesma metodologia da etapa anterior para produção de blocos com medidas nominais de 14 cm x 19 cm x 39 cm.

Na quinta etapa, foram realizados ajustes na dosagem da relação água/cimento, conforme recomendação de Silva (2018). Esses ajustes são essenciais, visto que a relação entre a água e o cimento deve ser determinada de acordo com o maquinário empregado e as condições locais na moldagem dos blocos. Para tanto, foi conduzido um estudo de dosagem, utilizando como referência o percentual ótimo encontrado na técnica de reometria compressiva.

Como resultado desse estudo, os teores ótimos de umidades utilizados para a moldagem dos blocos foram assim definidos: 6% para misturas com agregado miúdo natural e graúdo reciclado, 7% para misturas contendo apenas agregados naturais e 10% para misturas contendo agregado miúdo reciclado e graúdo natural. Esses valores foram determinados com o objetivo de garantir a qualidade e a resistência adequada do concreto seco durante a produção dos blocos.

A Tabela 5.2 apresenta o quantitativo de materiais utilizado na produção dos blocos, fornecendo informações essenciais para o controle e a padronização dos materiais utilizados durante o processo.

Tabela 5.2 - Quantitativo de materiais utilizados para o produzir 2 blocos

Granulometria	Teor de água	Consumo de agregados (kg)		Água de pré-molhagem (kg)	Consumo de água (kg)	Consumo de cimento (kg)
		Agregado graúdo	Agregado miúdo			
Agregado miúdo natural e agregado graúdo reciclado	6%.	4,85	14,56	0,49	1,36	3,23
Agregado miúdo natural e agregado graúdo natural	7%	4,68	14,03	-	1,53	3,12
Agregado miúdo reciclado e agregado graúdo natural	10%	4,68	14,03	0,97	2,18	3,12

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A moldagem dos blocos de concreto ocorreu no LEMA, utilizando uma vibro prensa manual. A mistura dos materiais, incluindo agregados, cimento e água, foi realizada na betoneira de eixo vertical com capacidade de 120 litros, seguindo o mesmo procedimento ilustrado na Figura 5.6. Posteriormente, o ponto de pelota no concreto seco foi verificado e, em seguida, o material foi transportado até a máquina por meio de um carrinho de mão. Na máquina, os blocos foram enformados, vibrados e prensados. A Figura 5.12 apresenta a vibro prensa utilizada durante o processo de fabricação dos blocos.

Figura 5.12 - Vibro prensa manual



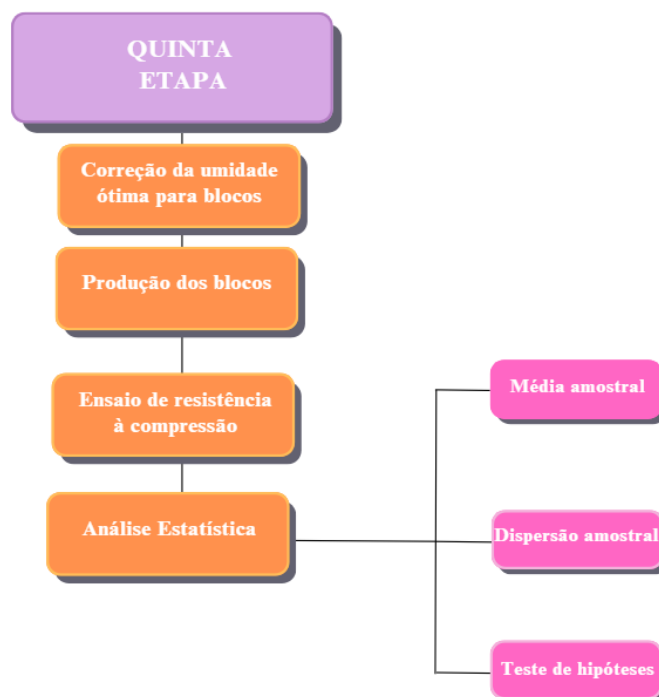
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Após a moldagem, os blocos foram identificados e dispostos no LEMA para o processo de cura por aspersão de água e, após 21 dias, foram submetidos ao ensaio de resistência a

compressão, na máquina universal de ensaios Amsler com capacidade de 490 kN, seguindo os requisitos da NBR 12118 (2013).

A metodologia para o capeamento foi embasada em Ferreira e Carvalho (2019), que utilizou duas chapas de neopreme, nas regiões inferior e superior do bloco de concreto para o seu nivelamento. A Figura 5.13 apresenta as etapas realizadas para produção dos blocos.

Figura 5.13 - Fluxograma da última etapa da metodologia da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

5.2 Coleta e seleção dos materiais

Os resíduos do presente estudo foram provenientes de obras de demolição localizadas no município de Maceió – AL. Na Figura 5.14, é apresentada a visão geral das regiões de coleta. As áreas A1, A2 e A3 correspondem às regiões com edificações demolidas nas quais foram recolhidos os RCD que foram utilizados nesta pesquisa, enquanto D1, D2, e D3 correspondem a setores que serão objeto de demolição posterior.

Figura 5.14 - Visão aérea da região de origem dos resíduos



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Todo o resíduo coletado foi beneficiado pela Braskem, no seu canteiro, em seguida, esse material foi recebido e foi realizado o processo de triagem para separação das impurezas, conforme Figura 5.15.

Figura 5.15 - Descarregamento do RCD na UFAL



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

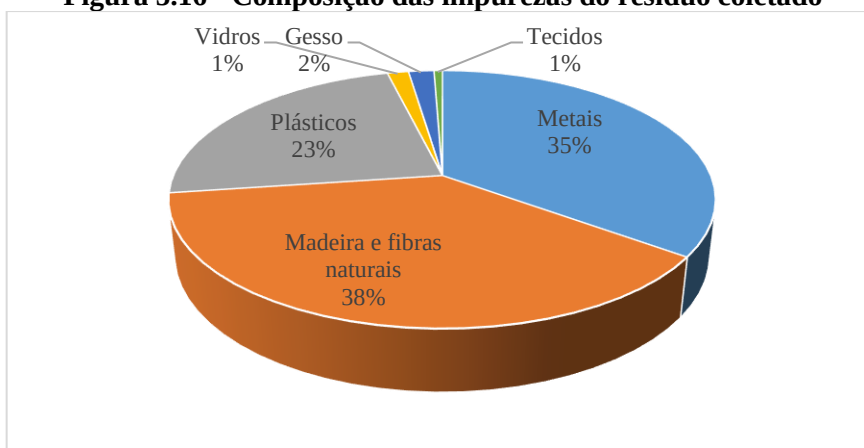
O RCD disponibilizado para a presente pesquisa foi entregue à UFAL por dois caminhões, nomeados de caminhões 1 e 2. Posterior ao recebimento do material foi realizado um estudo gravimétrico com o objetivo de identificar e quantificar a presença de resíduos que não correspondem aos classificados na Classe A conforme estabelecido pela Resolução 307 do CONAMA. A Tabela 5.3 apresenta os dados de massa e volume transportadas pelos caminhões.

Tabela 5.3 - Dados referentes aos caminhões enviados para UFAL

Identificação	Massa (kg)	Volume (m³)
Caminhão 1	15.220	11,029
Caminhão 2	15.740	11,406

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A análise gravimétrica das impurezas presentes na amostra foi realizada de acordo com a NBR 10.007 (2004), por meio da qual foi encontrada uma massa total de impurezas de 33,5 kg, que corresponde a 0,11% da massa total dos dois caminhões (30960 kg). A Figura 5.16 apresenta o percentual de cada tipo de impureza, no qual o maior percentual está concentrado em madeira e fibra.

Figura 5.16 - Composição das impurezas do resíduo coletado

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Consequentemente, 99,89% de todo o material enviado pode ser considerado como agregado reciclado. Esse estágio é fundamental para avaliar se o resíduo em estudo possui potencial para gerar novos materiais no âmbito da construção civil.

A partir da análise citada, concluiu-se que as impurezas contidas no material eram insignificantes, com isso, foi realizada a separação, por meio do peneiramento, no intuito de separar as frações miúdas e graúdas. Para tanto, foi desenvolvido um estudo estatístico para determinação do tempo ideal de peneiramento, tendo-se como resultado um tempo de 30 segundos. A Figura 5.17 apresenta a separação das frações através da peneira com abertura de 4,75 mm.

Figura 5.17 - Separação dos agregados



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

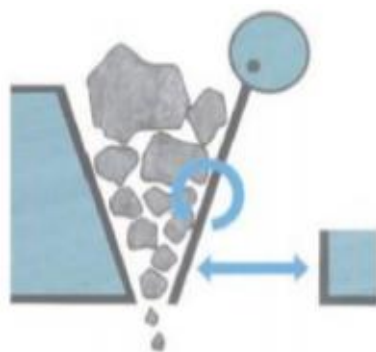
Após o processo de separação, todo o material foi caracterizado, com informações referentes a esta ação disponíveis no Apêndice A. Posteriormente, todo o agregado graúdo caracterizado foi submetido a uma nova britagem, conforme explicado a seguir.

5.3 Britagem secundária dos agregados reciclados

Todos os procedimentos de britagem dos agregados ocorreram utilizando um britador de mandíbulas, bastante utilizado em britagens primárias (Tenório, 2007), que tem como objetivo fragmentar o material através da força de compressão, ou esmagamento aplicado por uma ou duas mandíbulas (superfícies). Além disso, a apresentação desta etapa pode ser identificada pela Figura 5.3.

A Figura 5.18 ilustra o funcionamento deste britador, no qual o processo inicia-se com a alimentação do material a ser britado na região superior do equipamento. Durante a alimentação, o motor promove o movimento de abertura e fechamento das mandíbulas, ocasionando a compressão ou esmagamento gradativo do material devido à pressão exercida. Esse processo resulta na redução das dimensões das partículas.

Figura 5.18 - Modelo de funcionamento do britador de mandíbulas



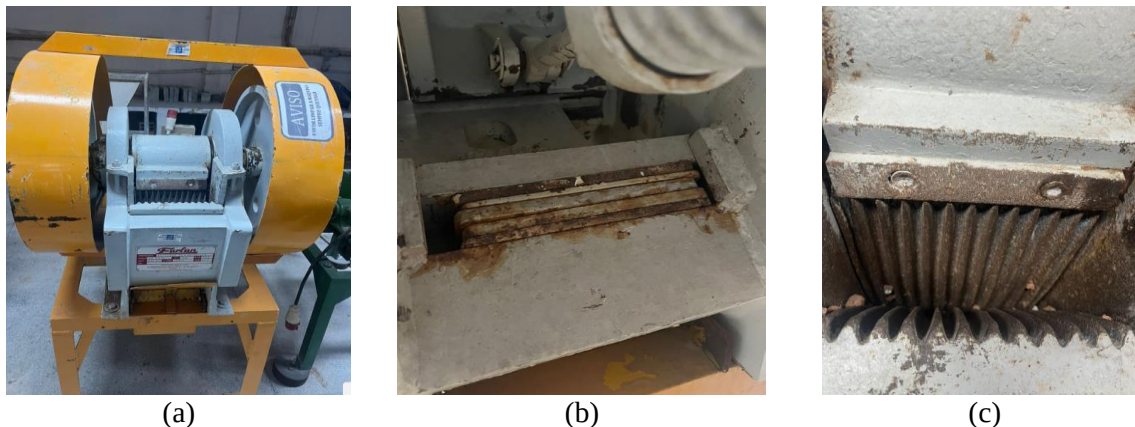
Fonte: Thyssenkrupp (2006).

A escolha deste britador foi estrategicamente planejada com o propósito de aprimorar as características das curvas granulométricas. Isso se torna fundamental, uma vez que uma parcela da metodologia de dosagem exige uma análise comparativa entre as curvas granulométricas dos agregados em questão e as referências formuladas pela literatura. Além disso, o módulo de finura obtido será avaliado se está em conformidade com os intervalos da literatura.

Preliminarmente aos ensaios de caracterização secundária, foi realizado um segundo beneficiamento, no intuito de obter um material com uma composição mais adequada, ou seja, que tenha em sua composição um percentual maior de materiais que proporcione aos blocos a resistência esperada. A metodologia foi adotada devido a análise realizada nas frações do material, conforme consta no Apêndice A. No planejamento desta ação, foi admitido que o material passante na peneira 4,75 mm seria denominado agregado miúdo secundário, o material retido na peneira 4,75 mm e passante na peneira de 25 mm seria denominado de agregado graúdo secundário e o material retido na peneira 25 mm seria reservado para uma nova britagem.

A Figura 5.19a corresponde ao britador de mandíbulas utilizado no processo de britagem. Este equipamento possui regulagem de abertura, que é determinada pela colocação de placas de aço (Figura 5.19b), onde conforme se aumenta o número de placas, menor é a abertura das mandíbulas (Figura 5.19c). A tomada de decisão acerca da abertura ideal para o processo de britagem tem papel fundamental na adequação da curva granulométrica, justificando a necessidade de realizar uma análise prévia em uma amostra menor.

Figura 5.19 - Processo de britagem secundária: (a) britador de mandíbulas; (b) abertura e (c) placas



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para determinação da abertura ideal do britador, foi realizada uma análise granulométrica da amostra. A etapa inicial consistiu em britar uma amostra do material com um ajuste de abertura de mandíbulas, utilizando duas placas de aço com espessura de 2,5 cm (Figura 5.19b).

Com base na análise granulométrica apresentada na Tabela 5.4, observa-se uma maior proporção de material gráudo em comparação ao material miúdo. Cerca de 66,67% do material ficou retido entre as peneiras de 12,5 mm e 4,75 mm, enquanto 33,33% passaram pela peneira 4,75 mm, classificando-se como agregado miúdo na amostra. Essa distribuição sugere uma escassez de agregado miúdo na composição, o que aponta para a necessidade de realizar uma nova britagem do material. Isso é justificado pelo fato de que não é recomendado o uso de agregados com dimensão de 12,5 mm na produção de blocos. Esses agregados maiores podem afetar negativamente a trabalhabilidade, a uniformidade e a resistência dos blocos.

Após a nova trituração do material anteriormente moído, constatou-se que o percentual de agregado miúdo permaneceu inalterado. Diante disso, foi necessário incrementar o número de placas para atingir uma medida de 3,3 cm, visando obter uma proporção maior de material miúdo, conforme a Tabela 5.4. Com isso, houve um aumento para 43,8% no percentual de finos. Isso resultou em uma redução percentual de material retido na peneira de 12,5 mm (1,66%). Portanto, essa configuração de abertura foi adotada para evitar uma nova etapa de trituração secundária do material.

Tabela 5.4 - Distribuição granulométrica das amostras

Britador com 2 placas (2,5 cm) (britagem inicial)		Britador com 2 placas (2,5 cm) (britagem secundária)		Britagem com placas com espessura total de 3,3 cm (nova britagem inicial)	
Peneiras (mm)	Percentual Retido (%)	Peneiras (mm)	Percentual Retido (%)	Peneiras (mm)	Percentual Retido (%)
12,5	11,11	12,5	0,0	12,5	1,66
9,5	16,67	9,5	20,0	9,5	27,27
4,75	38,89	4,75	46,67	4,75	27,27
Fundo	33,33	Fundo	33,33	Fundo	43,80

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Após a definição da abertura do britador de mandíbulas, foi realizada a britagem de uma quantidade significativa do material, que gerou 2 m³ de material britado. Esse material foi dividido em duas amostras grandes, onde uma delas foi homogeneizada pelo método Chevron (Chaves, 2012) e separadas em amostras menores para os ensaios de caracterização. Parte das amostras obtidas estão apresentadas na Figura 5.20.

Figura 5.20 - Pilhas de amostragem

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para o novo processo de caracterização, foram analisados os estudos de dosagem para blocos de concreto, ensaios de granulometria e massa unitária, com o objetivo de verificar a possibilidade de utilização do material sem alteração de sua composição. Portanto, previamente à etapa citada, o material foi separado em agregado graúdo e miúdo, de acordo com a Figura 5.21, mantendo o processo de peneiramento realizado antes da primeira caracterização.

Figura 5.21 - Separação dos agregados reciclados



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para a redução das amostras e homogeneização, foi realizado o quarteamento conforme a NBR 16915 (2021), através do quarteador tipo Jones, conforme Figura 5.22.

Figura 5.22 – Quarteamento do material



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir desse capítulo, os agregados reciclados resultantes do segundo beneficiamento e agregados naturais serão nomeados respectivamente de AGR, AMR, AGN, AMN. Além disso, todos os resultados da primeira etapa desta pesquisa constam no apêndice A.

Caracterização dos agregados

6.1.1 Composição granulométrica

Os ensaios de determinação da composição granulométrica dos agregados reciclados e naturais foram realizados de acordo com NBR 17054 (2022). As Tabelas com as composições granulométricas do AMR e AMN encontram-se no apêndice A. Esta etapa está apresentada na Figura 5.3.

De acordo com Fernandes (2023), a dimensão máxima característica equivale a abertura da peneira cujo percentual retido acumulado seja de até 5%. Com isso, a dimensão máxima do AMR e do AMN foi de 4,75 mm.

O módulo de finura é uma grandeza que indica em qual peneira, da série normal, a média ou maioria dos grãos estão retidos. Portanto, o módulo de finura encontrado para o AMR e AMN correspondem respectivamente a 2,8 e 2,41. Isso indica que as areias possuem diferenças significativas, visto que a maioria dos grãos do AMR está retida na malha da terceira peneira de série normal, a peneira de 0,6 mm, enquanto o AMN apresenta maior composição retida na malha da segunda peneira de série normal, a peneira de 0,3 mm. Além disso, foi observado que o módulo de finura dos agregados miúdos reciclados foi superior ao dos naturais, também relatado por Rodrigues (2015).

Ao comparar o módulo de finura dos agregados desta pesquisa com os da literatura, tem-se a Tabela 6.1, que apresenta os intervalos de referência das metodologias de dosagem.

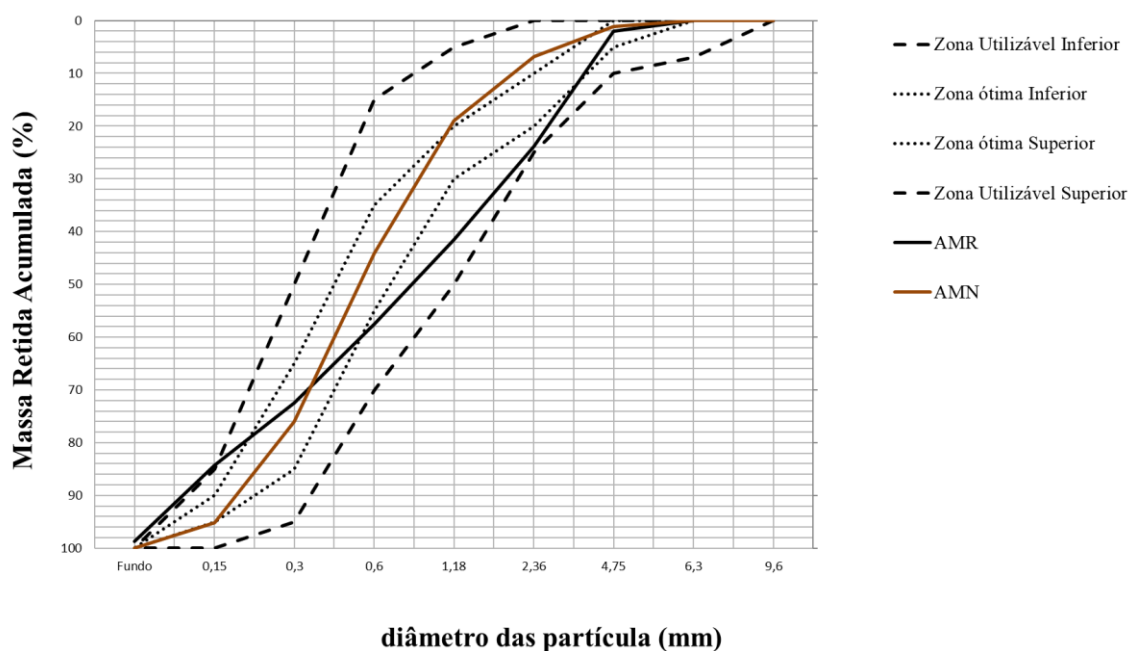
Tabela 6.1 - Comparação do módulo de finura com os métodos de dosagem

Autores	Ano	Módulo de finura
Pastor - AMN	2024	2,41
Pastor -AMR	2024	2,80
Columbia	1969	2,3 a 3,1
Pfeifenberger	1993	3,60 a 3,75
Frasson Júnior	2000	2,20 a 2,80

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Pela Tabela 6.1 verifica-se que o parâmetro correspondente ao módulo de finura do agregado miúdo (AMN e AMR) se enquadrou nas faixas da metodologia de dosagem estabelecida pelos autores Columbia (1969) e Frasson Júnior (2000).

Ao analisar as zonas granulométricas, tem-se que o módulo de finura calculado do AMN corresponde ao intervalo superior da zona ótima e no inferior da zona utilizável, já o AMR apresenta uma composição bastante heterogênea e se configura na transição da curva entre as zonas recomendadas pela NBR 7211 (2022).

Figura 6.1 - Distribuição granulométrica do AMR e AMN

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

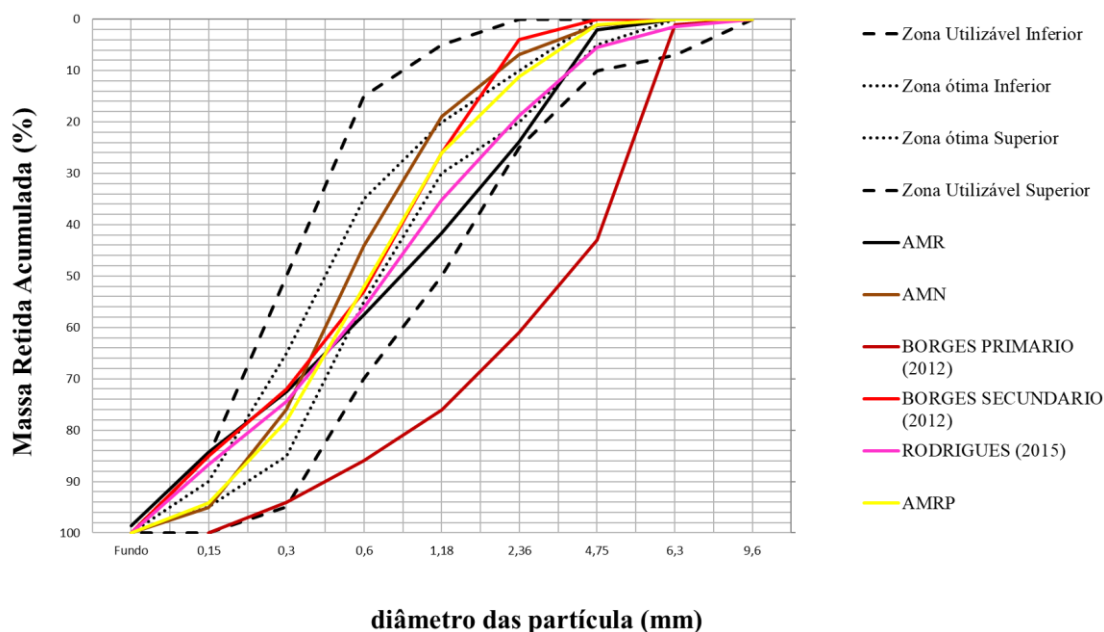
A curva granulométrica do AMN apresenta, de acordo com a Figura 6.1, uma composição mais fina quando comparada ao AMR. Isso pode influenciar na coesão da mistura, visto que Frasson Júnior (2000) recomenda uma porcentagem mínima de finos passante na

peneira de 0,3 mm para que a mistura adquira coesão suficiente. Nesse contexto, o uso de uma areia mais fina combinada com o agregado graúdo reciclado pode proporcionar blocos com resistências maiores, quando comparamos com as outras combinações de materiais.

Comparando o módulo de finura deste material com o de Rodrigues (2015), que corresponde a 2,77, com o de Borges (2012), que obteve 3,6, e com o do agregado miúdo reciclado primário (AMRP) com 2,63, tem-se que este material apresenta um resultado mais alto que o AMRP e o de Rodrigues (2015), sendo inferior apenas quando comparamos com o material primário de Borges (2012). Isso indica que esse material apresenta uma composição mais grossa, quando comparado com os resultados dos autores citados e ao material antes do seu segundo beneficiamento.

Segundo Borges (2012), o módulo de finura do seu agregado reciclado miúdo no estado final correspondeu a 2,40, com isso, este apresenta um valor inferior ao obtido nesta pesquisa. Logo, o AMR apresenta uma composição com dimensões maiores. Isso também pode ser visualizado na Figura 6.2, onde a curva de Borges (2012) do segundo beneficiamento está mais à esquerda quando comparada à do AMR.

Figura 6.2 - Comparação entre as distribuições granulométricas

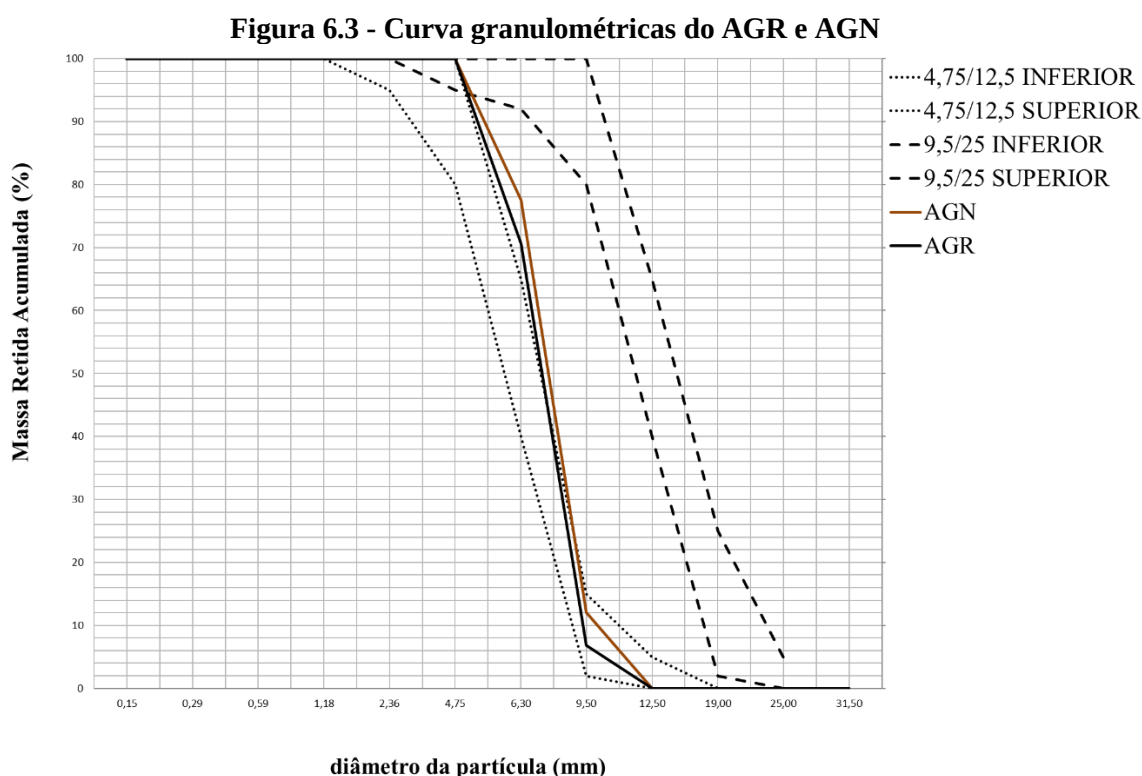


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Comparando o resultado do AMR com a literatura, percebe-se este material é o que está mais à direita do gráfico, com exceção do material primário de Borges (2012). Isso está relacionado com o módulo de finura, pois o AMR apresenta valor mais alto quando comparado aos demais autores.

De modo análogo ao AMR, após o quarteamento foram separadas duas amostras de AGR e AGN para o ensaio de granulometria, suas composições constam no anexo A.

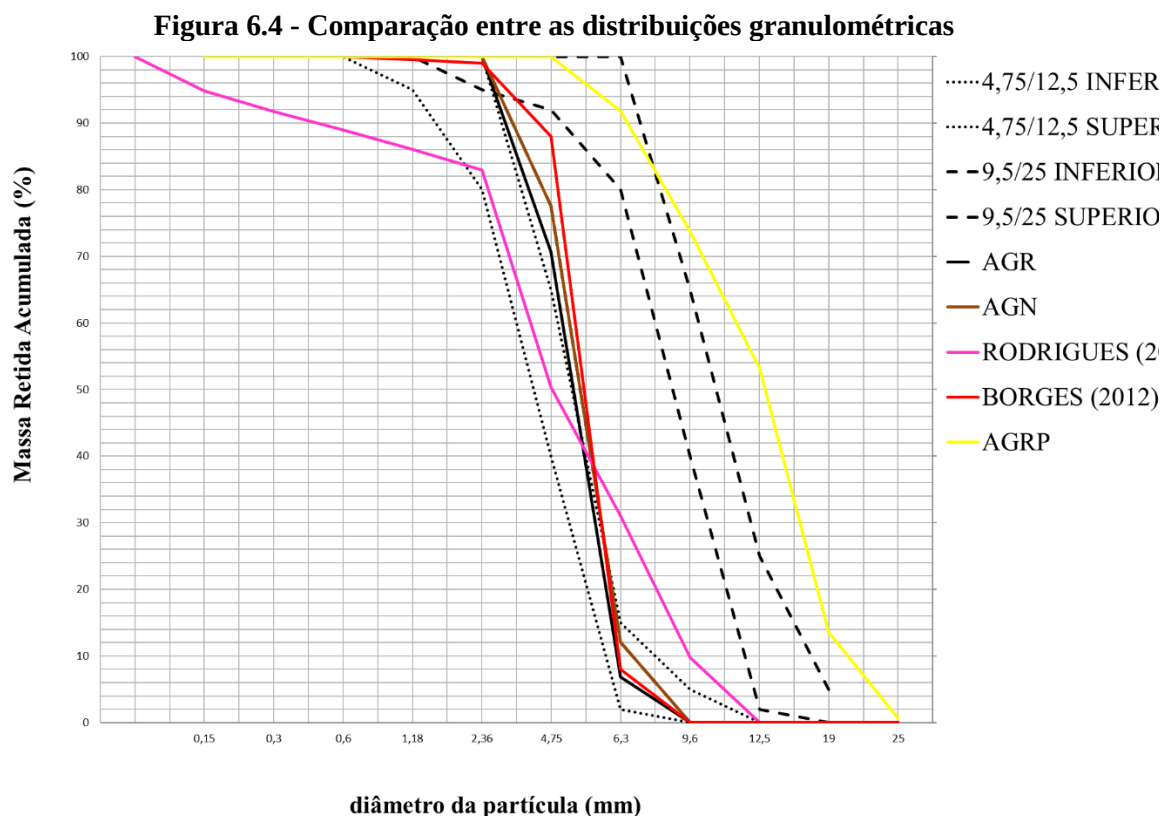
A Figura 6.3 apresenta a curva granulométrica do AGR, onde este encontra-se parcialmente dentro da zona 4,75/12,5 e a partir de um diâmetro de aproximadamente 6,3 mm transita para a zona inferior 9,25/25. Além disso, o AGN tem uma maior composição na zona de transição entre a 4,75/12 e 9,25/25. É importante ressaltar que a curva granulométrica dos agregados graúdos naturais estão mais à direita do gráfico, indicando que o material apresenta uma maior composição de grãos com diâmetros maiores, quando comparado ao AGR.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Outro ponto a ser destacado é que o diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado nesta pesquisa foi inferior aos recomendados pelas metodologias de dosagem, no entanto, se assemelha ao máximo sugerido por ABCP (1990).

O módulo de finura calculado do AGR e do AGN correspondem, respectivamente, a 6 e 6,12. A Figura 6.4 apresenta a comparação entre as curvas encontradas com Rodrigues (2015) e Borges (2012).



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Pela Figura 6.4 percebe-se que a nova britagem foi responsável por aumentar o teor de material fino, com isso, a curva que estava inicialmente à direita do gráfico e com sua parcela na zona 9,25/25, se deslocou para a esquerda se enquadrando totalmente na zona 4,75/12,5.

6.1.2 Material Pulverulento

Este ensaio foi realizado conforme a NBR 16973 (2021), a fim de determinar o teor de materiais pulverulentos dos agregados reciclados e naturais. Conforme a recomendação normativa, a diferença obtida nas duas determinações com relação à média foi inferior à 1%. Diante disso, os resultados de teor de materiais pulverulentos do AMR e AMN são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Teores de materiais pulverulento (AMR e AMN)

Material	Amostras	Teor de materiais pulverulentos (%)	Limite para AMR (%) – NBR 15116 (2021) Limite para AMN (%) – NBR 7211 (2022)
AMR	1	11,73	< 12 (não submetido ao desgaste superficial) < 10 (submetido ao desgaste superficial)
	2	11,80	
	Valor médio	11,77	
AMN	1	2,76	≤ 5 (submetido ao desgaste superficial) ≤ 3 (não submetido ao desgaste superficial)
	2	2,60	
	Valor médio	2,68	

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Considerando os limites normativos, o AMR só pode ser utilizado em situação que esteja protegido do desgaste superficial, no entanto, o AMN pode ser utilizado para os dois casos, de acordo com as condições normativas.

É importante ressaltar que o teor de finos, principalmente em elementos como blocos, é muito importante para redução do índice de vazios e melhor compactação do elemento, visto que, quanto menor o índice de vazios de um agregado, melhor o empacotamento entre os grãos. Isto tem como consequência a redução do consumo de cimento do concreto.

A Tabela 6.3 apresenta o comparativo entre o teor de materiais pulverulentos do AMRP, AMR.

Tabela 6.3 - Comparação entre os percentuais de materiais pulverulentos

Autores	Teor de materiais pulverulentos (%)
AMRP	18,50
AMR	11,77

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ao comparar os valores da Tabela 6.3, observa-se uma redução no teor de finos do agregado miúdo desta pesquisa. Isso se deve ao fato de que o AMR, resultante da britagem do AGRP, apresentou um teor de pulverulento inferior ao AMRP. Isto reflete positivamente a esta pesquisa, pois a quantidade de finos é responsável em aumentar o consumo de água.

De modo semelhante, os resultados de teor de materiais pulverulentos do AGR e AGN são apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Teores de materiais pulverulentos (AGR e AGN)

Material	Amostras	Teor de materiais pulverulentos (%)	Limite para AGR (%) – NBR 15116 (2021) Limite para AGR (%) – NBR 7211 (2022)
AGR	1	3,0	< 12 (não submetido desgaste superficial) < 10 (submetido desgaste superficial)
	2	2,0	
	Valor médio	3,102	
AGN	1	3,0	≤ 1
	2	3,5	
	Valor médio	3,25	

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Observou-se que a diferença dos teores de materiais pulverulentos nas duas amostras não ultrapassou os 0,5% em relação ao valor médio recomendado pela norma. Além disso, o AGR está dentro do intervalo recomendado pela NBR 15116 (2021), no entanto, o AGN está acima da recomendação normativa.

De modo análogo ao AMR, o AGR apresentou uma redução de material pulverulento após o AGRP ser britado e utilizado como agregado nesta pesquisa. Portanto, a nova britagem do material resultou em agregados com um menor percentual de finos. Logo, a determinação da escolha do britador é muito importante para os resultados da caracterização dos agregados reciclados, principalmente para produção de blocos estruturais de qualidade.

A Tabela 6.5 apresenta um comparativo do teor de materiais pulverulentos de agregados usados na produção de blocos reciclados.

Tabela 6.5 - Comparação entre percentuais de materiais pulverulentos da literatura

Autores	Agregado natural (%)		Agregado Reciclado (%)	
	Miúdo	Graúdo	Miúdo	Graúdo
Sousa (2001)	2,40	6,72	-	14,23
Carneiro (2005)	1,88	-	-	6,00
Paula (2010)	0,08	-	10,09	-
Castro (2012)	5,70	0,81	-	6,30
Rodrigues (2015)	9,39	5,86	17,93	14,90
Siqueira (2022)	2,94	-	20,0	-
Pastor (2024)	2,68	3,25	11,77	3,10

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Paula (2010) e Carneiro (2005) foram os únicos autores presentes na Tabela 6.5 que apresentaram, para os agregados naturais, teor de finos inferior ao desta pesquisa. Paula (2010) apresentou em sua composição de agregados miúdos reciclados um percentual de material pulverulento inferior ao desta pesquisa, no entanto o AGR foi o que apresentou o menor teor de finos. Isto significa que o material desta pesquisa está inserido na faixa encontrada na literatura.

6.1.3. Massa específica e Absorção de água

De acordo com Rodrigues (2015), a massa específica dos agregados está interligada aos parâmetros de resistência à compressão dos blocos, uma vez que ela possui relação direta com a massa específica do bloco. Buttler (2007) relata que a durabilidade e a qualidade da secagem do bloco reciclado possuem influência da absorção de água do agregado, uma vez que ela interfere no consumo de materiais do concreto seco. Diante disso, a Tabela 6.6 apresenta os resultados de massa específica e absorção do AMR e do AMN.

Tabela 6.6 - Massa específica e absorção de água (AMR e AMN)

	Amostras	Massa específica aparente do agregado seco (g/cm³)	Massa específica aparente do agregado saturado superfície seca (g/cm³)	Absorção (%)
AMR	1	2,09	2,23	8,89
	2	2,05	2,26	8,79
	3	2,08	2,24	7,39
	Valor médio	2,07	2,25	8,36
AMN	1	2,52	2,53	0,50
	2	2,50	2,51	0,70
	Valor médio	2,51	2,52	0,60

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A NBR 15116 (2021) recomenda que a absorção de água do AMR deve ser inferior a 12%, logo o resultado está dentro das recomendações normativas. Além disso, foi encontrada uma maior massa específica para o AMN, o que já era esperado, visto que o agregado reciclado apresenta um alto percentual de finos que são responsáveis por aumentar a absorção de água e reduzir a massa específica.

A Tabela 6.7 apresenta os resultados de massa específica e absorção de água dos agregados.

Tabela 6.7 - Massa específica e absorção de água

Material	Massa média específica aparente do agregado seco (g/cm³)	Massa específica aparente do agregado saturado superfície seca (g/cm³)	Absorção (%)
AGR	1,96	2,19	10,73
AGN	2,64	2,66	1,0

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Conforme a NBR 15116 (2021), a absorção de água do AGR deve ser inferior a 12%, com isso, o resultado atende à recomendação normativa. Ao comparar a absorção dos agregados, é perceptível que o AGR apresentou quase dez vezes o valor da absorção do AGN. Isto já era esperado, visto que os agregados reciclados possuem uma variedade de materiais,

como por exemplo, resíduos de componentes cimentícios. Outro fator que interfere na absorção é a porosidade e o alto teor de finos do material.

A Tabela 6.8 apresenta o comparativo da absorção de água obtida nesta pesquisa com a da literatura para produção de blocos.

Tabela 6.8 - Comparação entre os percentuais de absorção de água dos agregados da literatura

Autores	Agregado natural (%)		Agregado reciclado (%)	
	Miúdo	Graúdo	Miúdo	Graúdo
Sousa (2001)	5,9	2,5	-	13,2
Patto (2006)	-	0,96	-	8,9
Matar e Dalati (2011)	-	-	6,0	5,0
Soutsos, Tang e Millard (2011)	2,5	0,65	18	17,5
Castro (2012)	-	-	13,8	-
Sabai et al. (2013)	-	1,8		8,4
Rodrigues (2015)	0,16	1,31	6,02	8,01
Pastor (2024)	0,6	1,0	8,36	10,73

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os agregados naturais utilizados nessa pesquisa apresentaram uma menor absorção quando em comparação à literatura, com exceção do AGN de Rodrigues (2015) e do AMN de Soutsos, Tang e Millard (2011). Para os agregados reciclados, o mesmo ocorreu de modo análogo, com exceção do AMR de Matar e Dalati (2011) e Rodrigues (2015). No que tange ao AGR, a absorção foi inferior no estudo de Patto (2006), Matar e Dalati (2011), Sabai *et al.* (2013) e Rodrigues (2015).

De acordo com Fernandes (2013), a absorção de água está relacionada com a capacidade do agregado reter água e, conseqüentemente, influenciar na porosidade do bloco. Portanto, os resultados de absorção encontrados para estes agregados representam uma perspectiva positiva no seu uso para a produção de blocos.

Outro fato interessante a ser analisado, disposto na Tabela 6.5, é que esta pesquisa apresentou um teor de pulverulento inferior ao de Rodrigues (2015), no entanto, segundo a Tabela 6.8, os agregados obtiveram um maior teor de absorção, produzindo uma relação inversamente proporcional, ou seja, o material desta pesquisa, mesmo contendo uma quantidade menor de materiais pulverulentos e de módulo de finura, dispôs de um percentual de absorção

maior, o que pode estar relacionado com a sua porosidade e composição residual. Para justificar essa ideia, Rodrigues (2015) apresenta como referência Soutsos, Tang e Millard (2011), que obtiveram um percentual alto de absorção (18%), no entanto, o teor de materiais pulverulentos não interferiu no percentual de absorção.

6.1.3 Massa Unitária

Este ensaio foi realizado conforme as recomendações da NBR 16972 (2021). No AGR, foi obtido um valor médio de 1,23 g/cm³ para a massa unitária no estado solto e 1,25 g/cm³ para o estado compactado, no qual a diferença entre os dois métodos não se mostrou significativa. A Tabela 6.9 apresenta os resultados de massa unitária do AGR e do AMR no estado solto e a faixa de referência da literatura.

Tabela 6.9 - Comparação das massas unitárias

Material	Massa Unitária média (g/cm³)	Material	Massa Unitária média (g/cm³)	Fonte
AGN	1,66	AMN	1,84	Pastor (2024)
AGR	1,23	AMR	1,38	Pastor (2024)
AGR	1,02-1,29	AMR	1,21-1,43	Carneiro e Cordeiro (2013); Huda <i>et al.</i> (2014); Bravo <i>et al.</i> (2015)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Foi encontrada uma massa unitária média do AGR e do AMR dentro do intervalo de referência. Além disso, os agregados naturais, como já era esperado, apresentaram maior massa unitária.

6.2 Esqueleto granular

Foi realizada a determinação da composição ótima do esqueleto granular (Figura 5.4) conforme a NBR 16972 (2021), no intuito de proporcionar um melhor empacotamento do material. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Determinação da composição ótima

Composição	Massa unitária (g/cm ³)	Índice de vazios (%)	Composição	Massa unitária (g/cm ³)	Índice de vazios (%)
AGREGADO MIÚDO E GRAÚDO NATURAL					
AMN	1,84	36,14	AGN	1,66	59,20
90% AMN + 10% AGN	1,90	32,58	80% AMN + 20% AGN	1,95	30,04
70% AMN + 30% AGN	2,00	27,66	60% AMN + 40% AGN	2,00	28,07
50% AMN + 50% AGN	1,99	29,52	40% AMN + 60% AGN	1,98	30,92
AGREGADO MIÚDO RECICLADO E GRAÚDO NATURAL					
AMR	1,59	31,07	AGN	1,66	59,20
80% AMR + 20% AGN	1,72	27,76	90% AMR + 10% AGN	1,65	29,79
60% AMR + 40% AGN	1,77	29,82	70% AMR + 30% AGN	1,72	30,51
40% AMR + 60% AGN	1,72	40,65	50% AMR + 50% AGN	1,76	33,77
AGREGADO MIÚDO NATURAL E GRAÚDO RECICLADO					
AMN	1,84	36,14	AGR	1,32	63,94
90% AMN + 10% AGR	1,82	36,20	80% AMN + 20% AGR	1,84	32,76
70% AMN + 30% AGR	1,83	31,66	60% AMN + 40% AGR	1,82	30,11
50% AMN + 50% AGR	1,76	33,17	40% AMN + 60% AGR	1,69	36,67

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

De acordo com Matos Filho e Nienov (2020), o estudo do empacotamento é responsável por determinar a combinação ótima dos agregados, e com isso minimizar o teor de vazios, esse processo ocorre através das granulometrias, onde os vazios deixados pelos agregados são preenchidos de modo que a fração granulométrica seja da maior para a menor. Portanto, para a combinação de agregados naturais o melhor empacotamento ocorreu na proporção 60% de AMN e 40% AGN. Isso também se manteve para o agregado miúdo reciclado e graúdo natural. Por outro lado, o empacotamento dos agregados miúdo natural e graúdo reciclado resultou em um menor índice de vazios para a proporção de 80% AMN e 20% AGR.

Diante disso, foi realizado um novo estudo da composição ótima para a proporção de 75% de agregado miúdo e 25% de agregado graúdo. A Tabela 6.11 apresenta o comparativo das melhores proporções encontradas com os resultados dessa nova proporção.

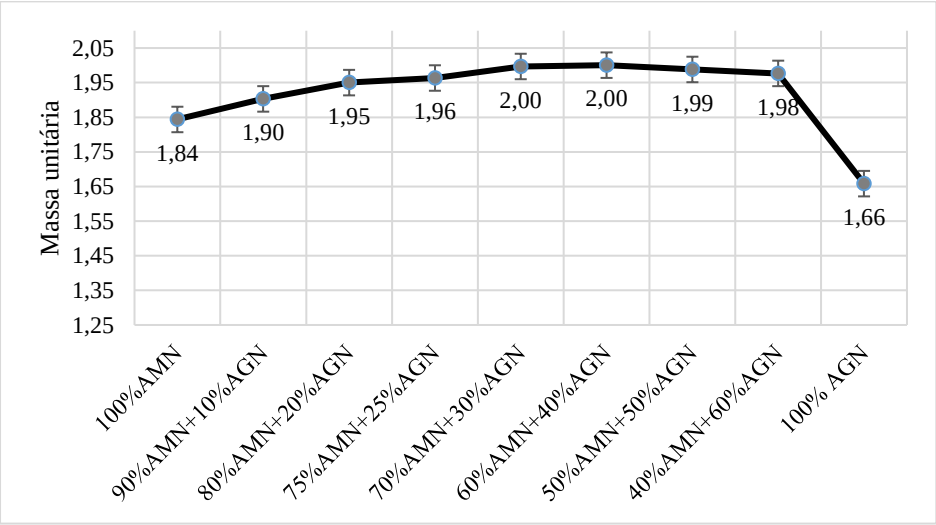
Tabela 6.11 - Comparativo de composições

Composição	Massa Unitária (g/cm³)			Índice de vazios (%)		
	60%/40%	75%/25%	80%/20%	60%/40%	75%/25%	80%/20%
AMN+AGN	2,00	1,96	1,95	28,07	29,49	30,04
AMR+AGN	1,77	1,71	1,72	28,20	30,70%	30,60
AMN+AGR	1,82	1,84	1,84	29,82	29,60	27,76

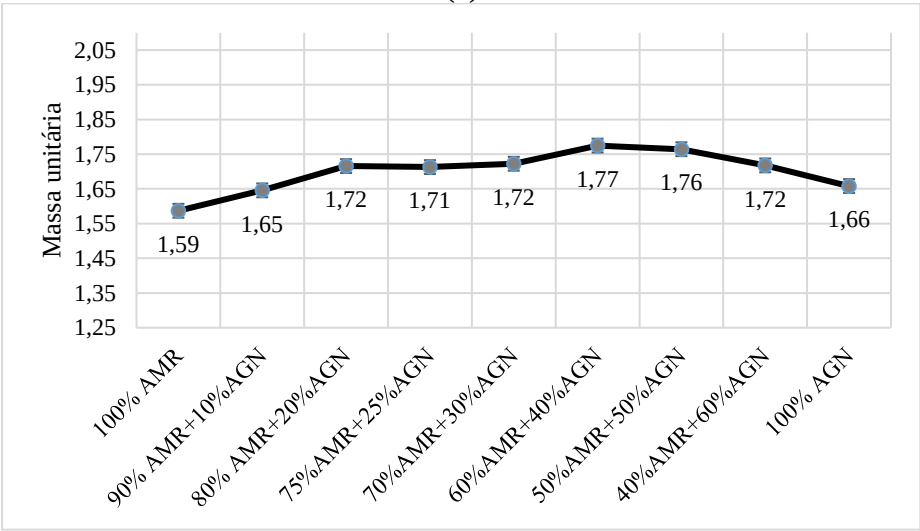
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

No concreto seco, os vazios da estrutura granular dos agregados não são totalmente preenchidos pela pasta, devido a sua quantidade inferior quando comparada ao concreto plástico. Com isso, tem-se como resultado uma mistura porosa, com microfissuras e propriedades mecânicas reduzidas. Dessa maneira, para encontrar a melhor composição que se adeque a todas as combinações foi utilizada a 75%/25%, visto que essa proporção satisfaz a todas as composições, com diferenças percentuais insignificantes. A Figura 6.5 apresenta o gráfico de massa unitária para cada composição.

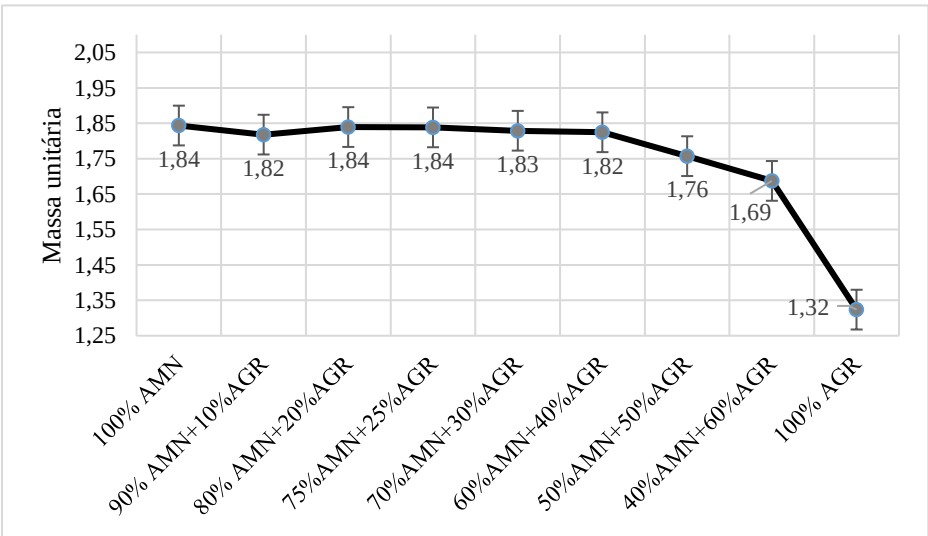
Figura 6.5 - Comparativo das composições *versus* massa unitária: (a) agregado natural; (b) AMR e AGN; (c) AMN e AGR



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

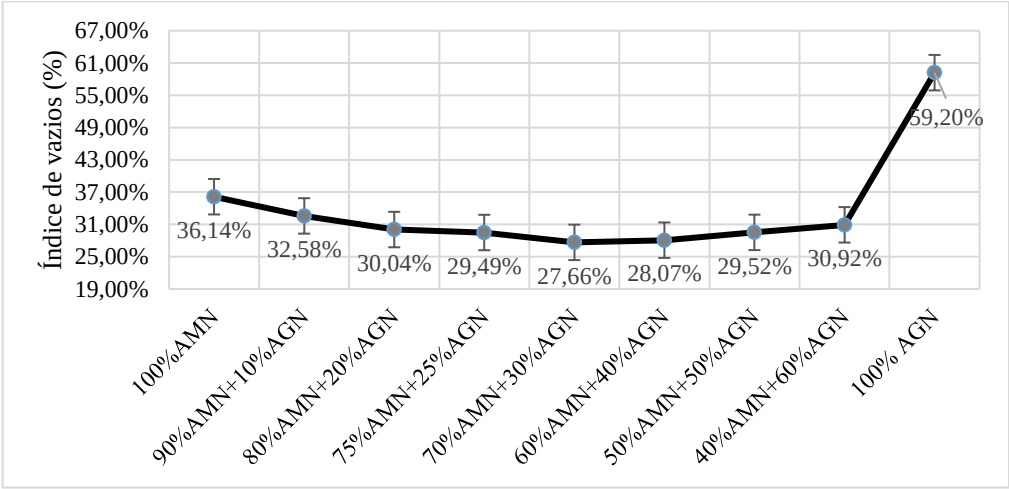
A Figura 6.4a apresenta as massas unitárias das composições referente aos agregados naturais. Com isso, pode-se visualizar que, ao analisar uma composição com 60% de agregado graúdo e 40% miúdo até um acréscimo de material miúdo e redução de graúdo que corresponda a 75% AMN e 25%AGN, não há diferenças significativas no empacotamento do material. Isso também pode ser verificado pela Figura 6.5a, onde a diferenças dos índices de vazios são inferiores a 1%.

Pela Figura 6.4b, tem-se as massas unitárias das composições da areia reciclada com a brita natural. Logo, verifica-se que a composição que resultou em uma maior massa unitária corresponde a proporção de 60% AMR e 40% AGR. O mesmo se verifica pela Figura 6.5b.

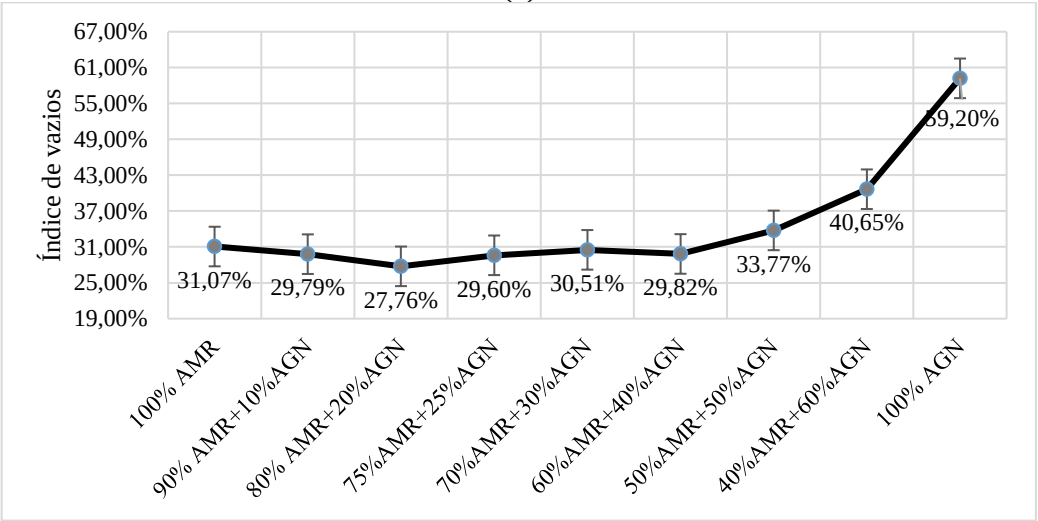
A Figura 6.4c apresenta as massas unitárias das composições com areia natural e brita reciclada. Todavia, os resultados obtidos de massa unitária não apresentaram diferença significativa, ou seja, o percentual variou menos de 1% entre as composições até que o índice de agregado graúdo reciclado seja igual ao do agregado natural (50% AMN e 50% AGR). A partir disso, houve uma queda considerável na massa unitária, resultando em composições com percentual de vazios mais elevado, conforme Figura 6.5c.

Ao comparar os índices de vazios de cada composição (Figura 6.5), tem-se que os agregados naturais apresentaram um melhor empacotamento e, conseqüentemente, um menor índice de vazios quando comparado às demais composições. Além disso, as combinações de agregado miúdo natural e graúdo reciclado resultaram nos maiores índices de vazios, o que indica que o empacotamento dessas composições provavelmente resultará em blocos mais frágeis, porosos e com micro defeitos.

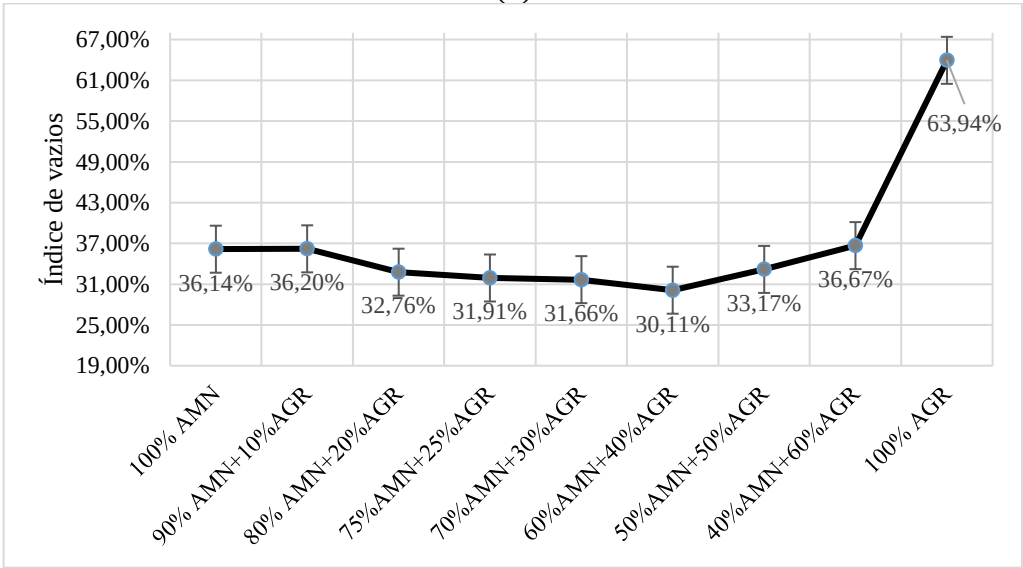
Figura 6.6 - Comparativo das composições versus índice de vazios; (a) agregado natural; (b) AMR e AGN; (c) AMN e AGR



(a)



(b)



(c)

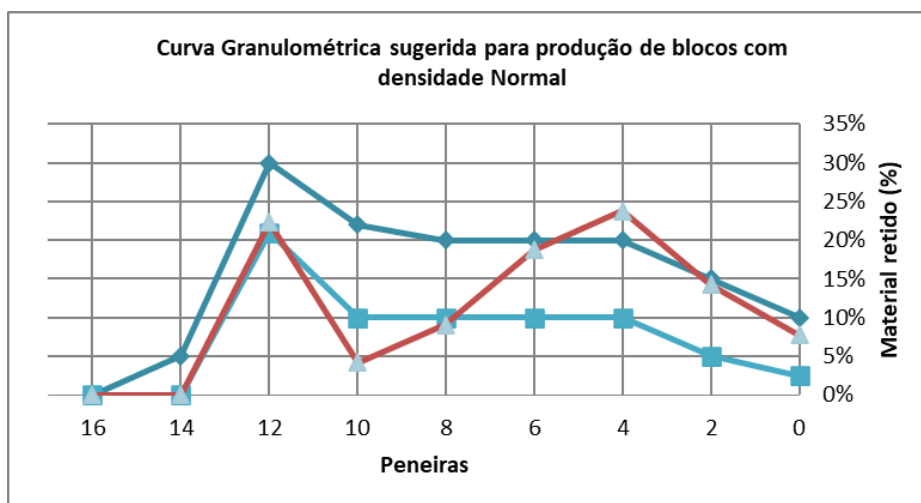
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Dessa forma, com base nos resultados obtidos, foi possível realizar o estudo de dosagem para a aplicação da técnica de reometria compressiva. Essa abordagem é importante, pois permite prever como o empacotamento dos agregados pode influenciar a resistência à compressão dos blocos.

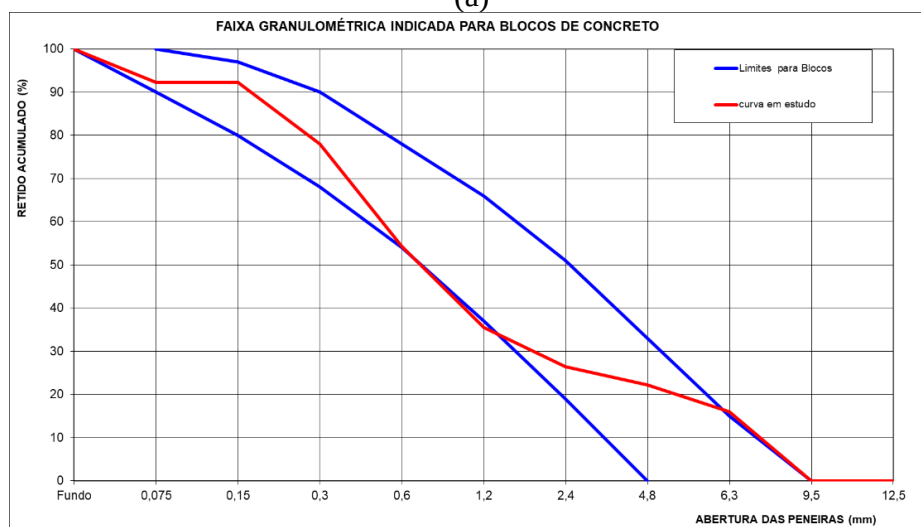
6.3 Estudo de dosagem utilizando o fator granulometria

Esse estudo foi conduzido conforme apresentado na Figura 5.5 e os resultados obtidos correspondem às curvas da composição dos agregados naturais, que são apresentadas na Figura 6.7. Para tanto, foram utilizados os métodos de Pfeiffenberger (1985) e Fernandes (2023), respectivamente. É importante ressaltar que as peneiras são numeradas de modo que os valores iguais a 16, 14, 12, 10, 8, 6, 4, 2, 0 correspondem, respectivamente, a abertura de malha da peneira de 12,5 mm, 9,6 mm, 4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm e fundo.

Figura 6.7 - Faixas granulométricas da literatura (Composição 75%AMN e 25% AGN): (a) Pfeiffenberger (1985) e (b) Fernandes (2023)



(a)



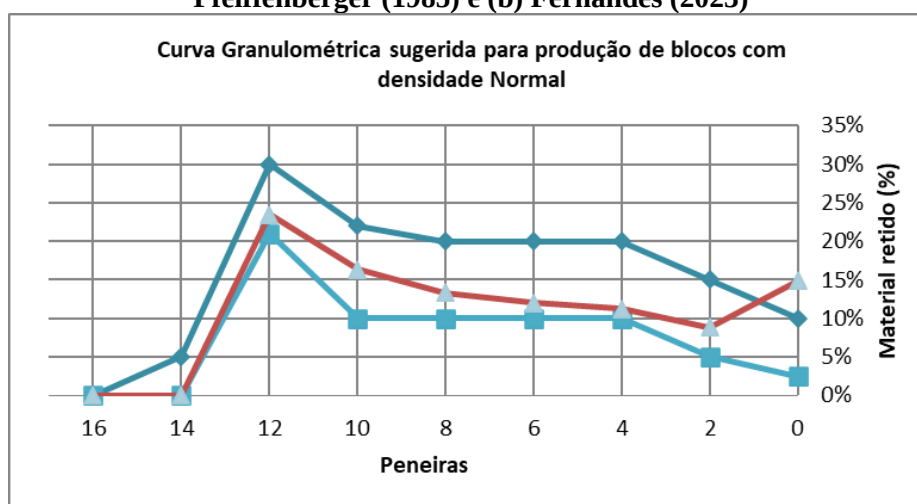
(b)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

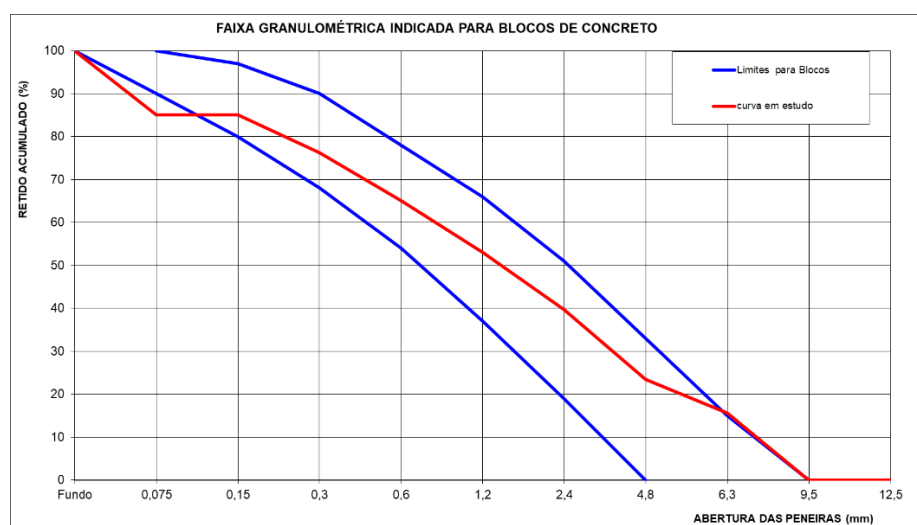
Ao comparar as metodologias de dosagem que utilizam como fator a curva granulométrica, percebe-se que o agregado natural se adequou melhor aos limites estabelecidos por Fernandes (2023). Isso pode ser verificado por meio da Figura 6.7a, visto que a curva granulométrica se enquadrou dentro dos limites até atingir uma granulometria de 4,8 mm, em seguida o material se afasta totalmente dos limites recomendados até um diâmetro máximo de 1,2 mm, onde o mesmo ocorre quando o diâmetro máximo chega a 0,6 mm até atingir 0,15 mm. Já na Figura 6.7b, a curva granulométrica se enquadrou dentro de todos os limites estabelecidos, conforme representado pela faixa delimitada pelas linhas azuis, indicando sua adequação para a aplicação na produção de blocos.

A Figura 6.8 apresenta a curva granulométrica do agregado miúdo reciclado e gráúdo natural nas faixas estabelecidas por Pfeiffenberger (1985) e Fernandes (2023), respectivamente.

Figura 6.8 - Faixas granulométricas da literatura (Composição 75%AMR e 25% AGN): (a) Pfeiffenberger (1985) e (b) Fernandes (2023)



(a)



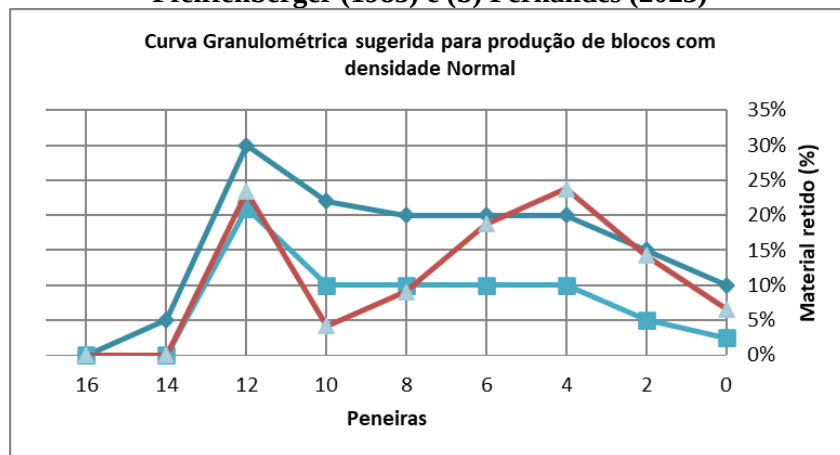
(b)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

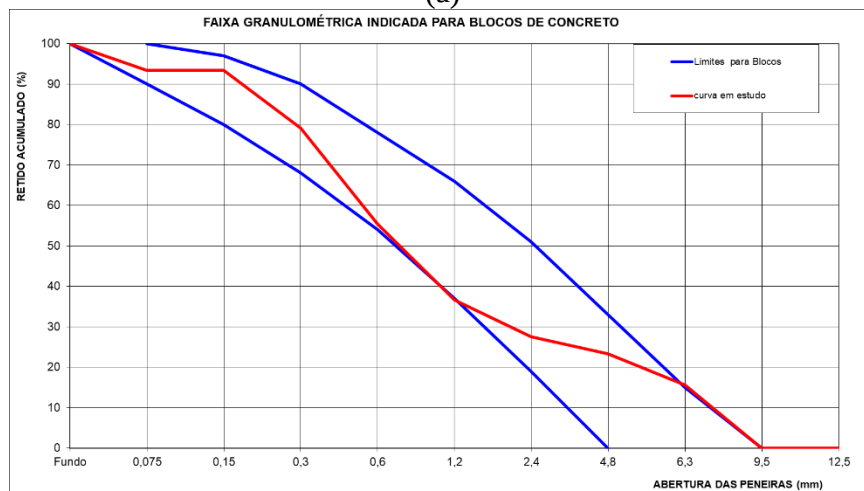
As curvas granulométricas do agregado miúdo reciclado e gráúdo natural se enquadraram nas faixas dos dois autores, conforme Figura 6.8a e 6.8b. Isso indica que essa composição de material apresenta um melhor empacotamento, visto que apresenta o menor teor de vazios entre os materiais reciclados.

De modo análogo à composição com agregado natural, a composição de AMN e AGR apresentou curva granulométrica fora da faixa sugerida por Pfeiffenberger (1985) para a produção de blocos com densidade normal (Figura 6.9a). Em contrapartida, a curva se enquadrou na faixa de Fernandes (2023), conforme Figura 6.9b. Isto indica que a areia natural é responsável por não enquadrar a curva na faixa recomendada pelo autor para produção de blocos, o que possivelmente pode ocorrer devido a mesma apresentar uma granulometria mais fina do que a areia reciclada, levando em conta que o gráfico indica um déficit de material entre as peneiras de abertura 2,4 mm e 1,2 mm, como também, um excesso de material com diâmetros de 0,6 mm e 0,15 mm.

Figura 6.9 - Faixas granulométricas da literatura (Composição 75%AMN e 25% AGR): (a) Pfeiffenberger (1985) e (b) Fernandes (2023)



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A partir desses resultados, foi adotado como metodologia de dosagem Fernandes (2023).

6.4 Reometria Compressiva

De acordo com Niza (2021), essa técnica consiste em uma adaptação das metodologias anteriores, como a proposta por Frasson (2000), na qual a compressão da amostra de concreto seco é realizada por meio de um pistão com altura predefinida. Além disso, é empregado um mesmo valor de massa para todos os moldes, proporcionando a uniformidade nos procedimentos experimentais. A Figura 5.11 ilustra as ações associadas a esta etapa.

Assim, foram obtidas as curvas de resistência à compressão para cada teor de umidade com proporção cimento/agregado de 1:6. É importante ressaltar que os ensaios para determinação da resistência à compressão foram realizados após 21 dias para todos os corpos de prova, conforme a NBR 5739 (2018). Pela Tabela 6.12 é possível visualizar os resultados das referidas resistências à compressão, em MPa, encontrados para cada corpo de prova.

Tabela 6.12 - Apresentação dos dados de resistência à compressão

Agregados	Umidade (%)			
	6%	8%	10%	12%
AMN+AGN	5,37; 6,16; 6,06; 6,76; 5,93; 4,57	8,91; 6,85; 6,84; 7,97; 6,38; 8,12	7,97; 7,91; 9,0; 7,58; 8,06; 7,88	7,74; 7,46; 6,44; 7,68; 7,30; 5,94
AMR+AGN	5,77; 5,46; 6,08; 5,35; 5,72; 5,40	5,89; 5,79; 6,48; 6,77; 6,54; 5,36	7,97; 7,92; 9,09; 8,06; 7,58; 7,86	6,26; 7,39; 8,26; 6,02; 7,74; 6,79
AMN+AGR	5,01; 6,14; 4,14; 5,97; 6,73; 5,97	6,63; 7,19; 6,77; 7,64; 6,96; 4,44	6,50; 7,11; 6,43; 6,14; 6,55; 6,50	5,89; 5,43; 4,48; 6,04; 7,05; 6,14

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para cada teor de umidade foram moldados 6 corpos de prova, onde cada corpo de prova obteve uma resistência à compressão axial apresentada na Tabela 6.14. Por meio desta, é possível visualizar que o teor de umidade de 10% foi o que apresentou os maiores valores unitários de resistência à compressão. Essa análise superficial provavelmente indica que o valor médio para uma umidade de 10% será o maior para cada composição de agregados (AMN+AGN, AMR+AGN, AMN+AGN).

A Tabela 6.13 apresenta as medidas descritivas de resistência à compressão.

Tabela 6.13 - Medidas descritivas de resistência à compressão

Misturas	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	CV*	Desvio-padrão	1° Quartil	3° Quartil
AMN_AGN-6%	4,57	6,16	5,81	6,00	0,13	0,75	5,51	6,76
AMN_AGN-8%	6,38	8,91	7,51	7,41	0,13	0,97	6,84	8,91
AMN_AGN-10%	7,58	9,00	7,88	7,94	0,02	0,18	7,87	9,00
AMN_AGN-12%	5,94	7,74	7,09	7,38	0,10	0,73	6,66	7,74
AMR_AGN-6%	5,35	6,08	5,68	5,59	0,05	0,28	5,42	6,08
AMR_AGN-8%	5,36	6,77	6,14	6,19	0,09	0,54	5,82	6,77
AMR_AGN-10%	7,58	9,09	7,88	7,95	0,02	0,18	7,88	9,09
AMR_AGN-12%	6,02	8,26	7,08	7,09	0,12	0,87	6,39	8,26
AMN_AGR-6%	4,14	6,73	5,66	5,97	0,16	0,93	5,25	6,73
AMN_AGR-8%	4,44	7,64	6,60	6,87	0,17	1,12	6,67	7,74
AMN_AGR-10%	6,14	7,11	6,54	6,50	0,05	0,35	6,45	7,11
AMN_AGR-12%	4,48	7,05	5,76	5,74	0,15	0,87	5,40	7,05

*Coeficiente de Variação

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ao analisar a Tabela 6.13, as combinações que apresentaram a melhor resistência à compressão média foram as compostas por agregado miúdo natural e gráudo natural com percentual de umidade de 10% e o agregado miúdo reciclado e gráudo natural com o mesmo teor de umidade (10%), registrando um valor de 7,88 MPa. Vale salientar que os valores baixos de coeficiente de variação (CV) indicam que os valores de resistência não apresentam grande dispersão em relação às respectivas médias.

De acordo com a NBR 5739 (2018), para corpos de prova com uma relação h/d inferior a 1,94 deve-se utilizar um fator de correção para determinação da resistência corrigida. A Tabela 6.14 apresenta as resistências à compressão média corrigidas com o fator de 0,86.

Tabela 6.14 - Apresentação das resistências à compressão corrigidas

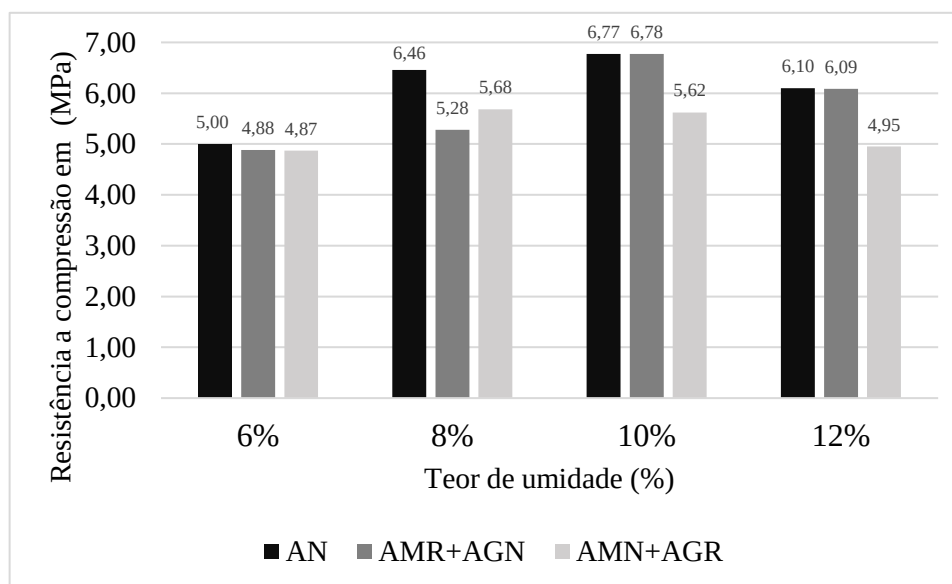
Agregados	Umidade (%)			
	6%	8%	10%	12%
AMN+AGN	5,00 MPa	6,46 MPa	6,77 MPa	6,10 MPa
AMR+AGN	4,88 MPa	5,28 MPa	6,78 MPa	6,09 MPa
AMN+AGR	4,87 MPa	5,68 MPa	5,62 MPa	4,95 MPa

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ao analisar a Tabela 6.14, observa-se que os resultados de resistência à compressão para um mesmo teor de umidade foram semelhantes para as combinações de agregados. No intuito de visualizar de forma gráfica as resistências à compressão média corrigidas, foi elaborado o

gráfico de barras apresentado na Figura 6.10, categorizando para cada composição as resistências encontradas para cada teor de umidade.

Figura 6.10 - Gráfico de barras com as médias da resistência à compressão corrigida de cada grupo amostral



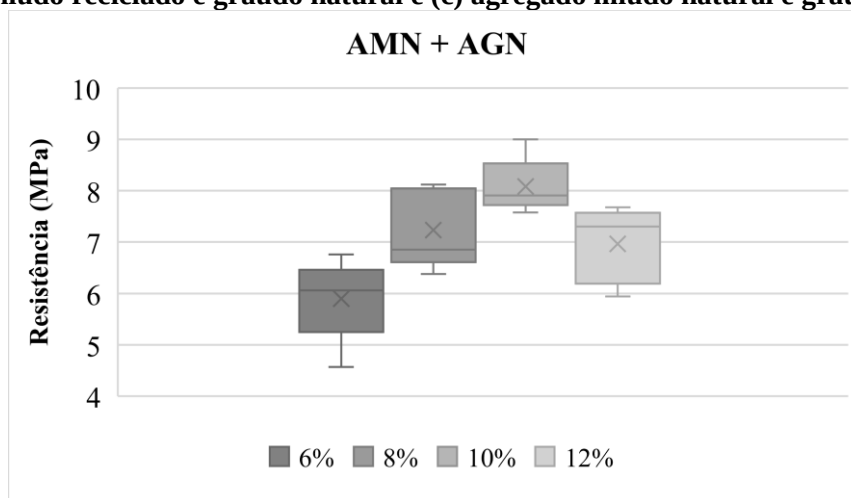
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os corpos de prova compostos com agregados natural, conforme Figura 6.10, foram os que apresentaram a maior resistência à compressão média corrigida para as umidades de 6%, 8% e 12%. Entretanto, para um teor de umidade de 10%, a maior resistência encontrada foi para o AMR e AGN.

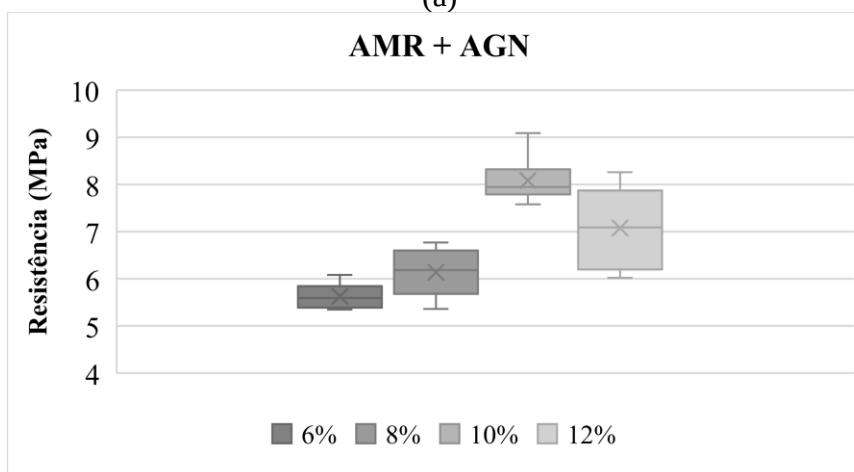
Após a análise da resistência à compressão média corrigida, foi construído o *box-plot* (gráfico de caixa) dos dados. Segundo Capela e Capela (2011), esse gráfico representa a distribuição do conjunto de dados em parâmetros descritivos. Em virtude disso, foram plotados os gráficos apresentados na Figura 6.10.

Inicialmente, ao observar os gráficos, percebeu-se que estes não apresentaram *outliers*, o que significa que provavelmente os dados seguem uma tendência geral de distribuição. Diante disso, todos os dados foram utilizados na análise. Além disso, foi observado que, para o agregado natural, à medida que há um aumento no teor de umidade, a resistência à compressão aumenta até atingir uma umidade de 10%, em seguida existe uma redução na resistência. O mesmo comportamento ocorre para o agregado miúdo reciclado e graúdo natural, no entanto, esse acréscimo de resistência se apresenta de modo mais significativo. Em contrapartida, no agregado miúdo natural e graúdo reciclado o aumento de resistência ocorre até atingir uma umidade de 8%.

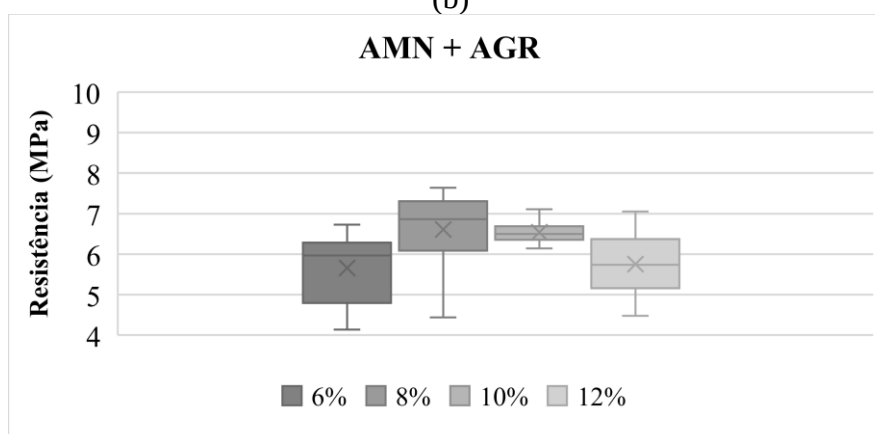
Figura 6.11 - Análise estatística do conjunto de dados: (a) agregado miúdo e gráúdo natural; (b) agregado miúdo reciclado e gráúdo natural e (c) agregado miúdo natural e gráúdo reciclado



(a)



(b)



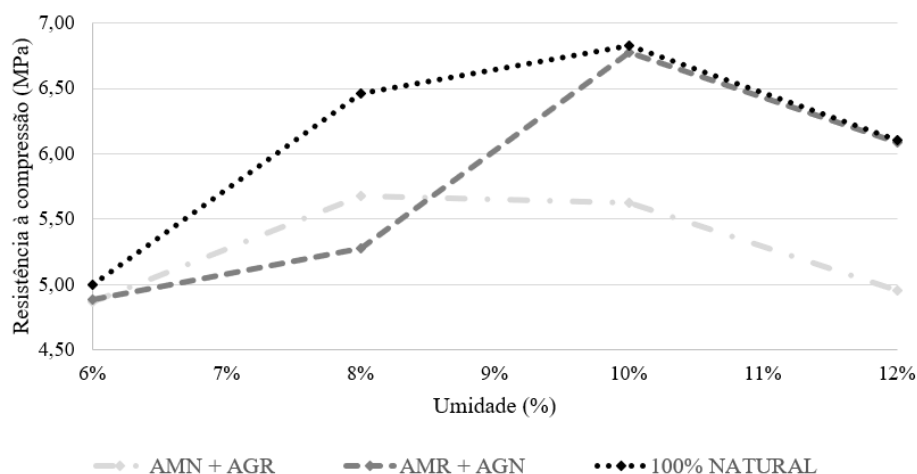
(c)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para uma análise melhor da tendência de redução da resistência à compressão axial com o aumento do teor de umidade, foi construído um gráfico de linhas (Figura 6.12). Os resultados evidenciaram que para houve um crescimento nas resistências à compressão dos corpos de prova com AMN + AGN e AMR + AGN até atingir um percentual de umidade de 10%, no

entanto, para o AMN+AGR a resistência aumentou a medida que a umidade se elevou até atingir 8%, o que difere dos dois grupos de agregados.

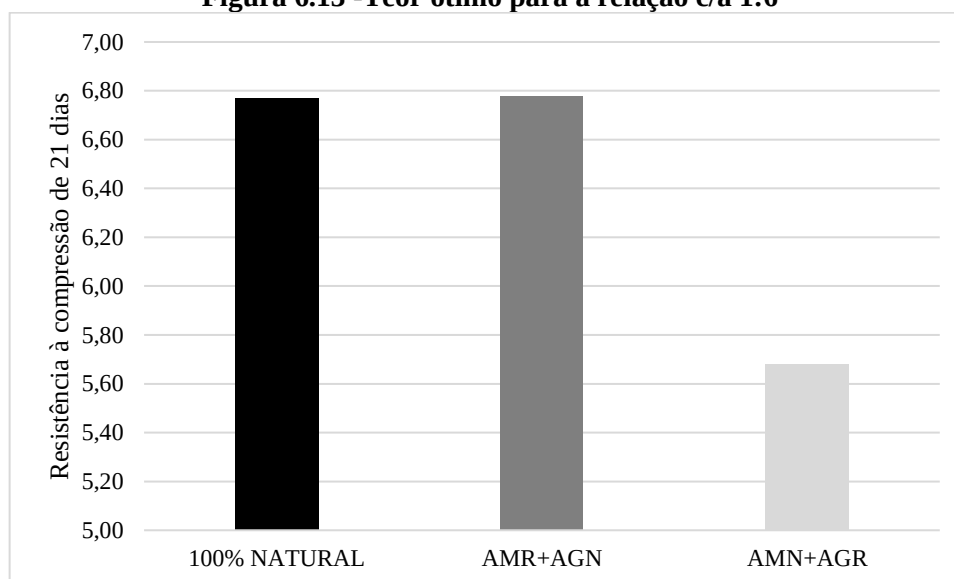
**Figura 6.12 - Resistência à compressão cada teor de umidade
TRAÇO 1:6**



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para uma relação cimento/agregado correspondente a 1:6, o agregado natural foi o que apresentou a maior resistência, com um teor ótimo de 10%. Já a composição de agregado miúdo reciclado e gráúdo natural apresentou um pico de resistência após ultrapassar 8% de teor de umidade, atingindo uma resistência próxima ao material reciclado a uma umidade ótima de 10%. O agregado miúdo natural e gráúdo reciclado apresentou sua umidade ótima em 8%, correspondendo a uma resistência à compressão baixa quando comparado aos demais, no entanto, ambos alcançaram resistência à compressão correspondente ao mínimo exigido para blocos estruturais.

A Figura 6.13 apresenta o comparativo de resistências à compressão encontradas para cada composição. Por meio dela, verifica-se que a combinação de agregado miúdo reciclado e gráúdo natural para um teor de umidade ótima (10%) obteve um valor de resistência próximo da mistura de referência (100% Natural).

Figura 6.13 -Teor ótimo para a relação c/a 1:6

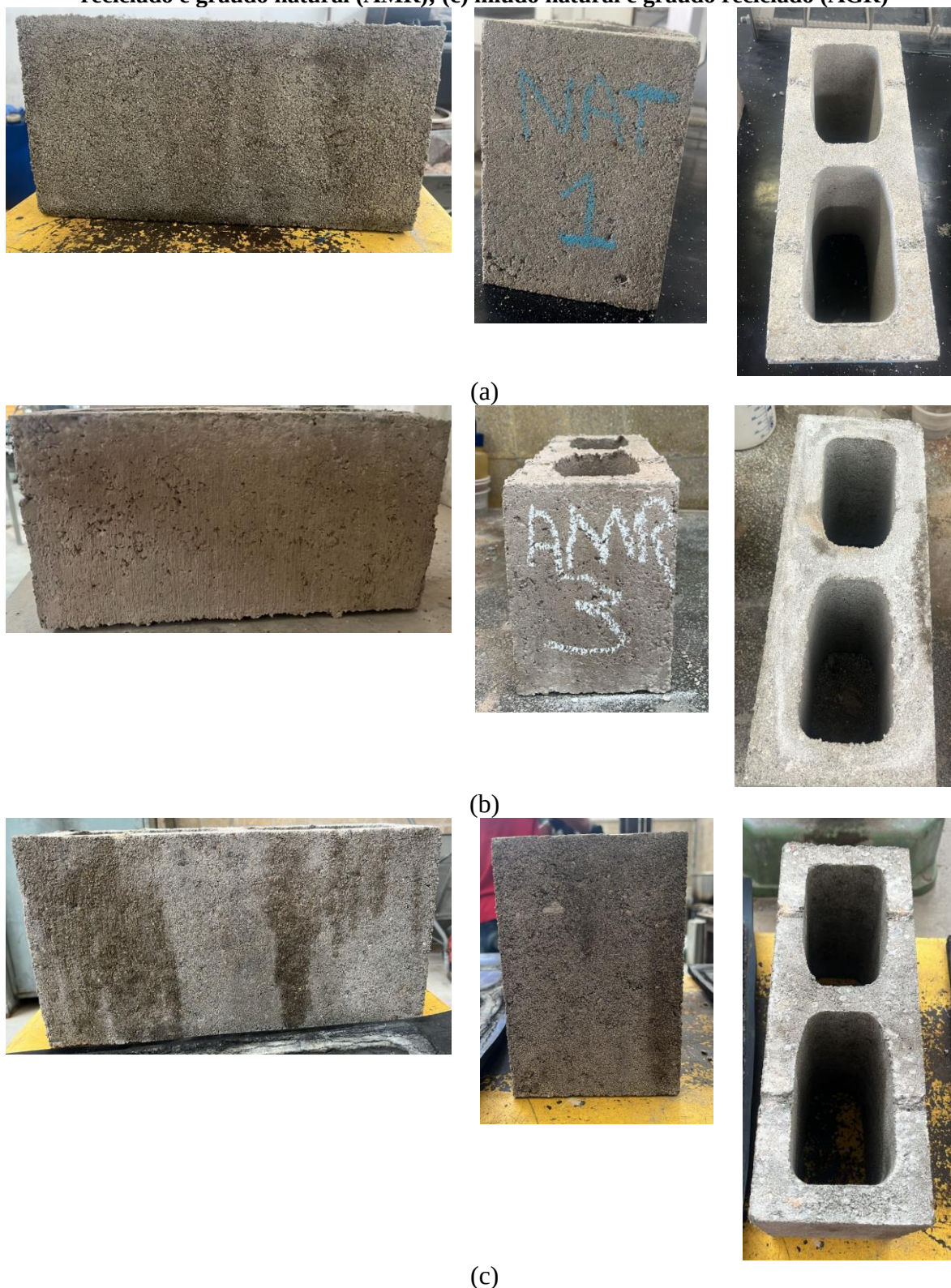
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

De acordo com Frasson Júnior (2000), existe uma relação equivalente entre corpos de prova cilíndricos e blocos de concreto. A seguir, serão apresentados os resultados referentes à produção dos blocos.

6.5 Caracterização dos blocos

Esta atividade encontra-se inserida na etapa ilustrada na Figura 5.13. Todos os seis blocos de cada combinação de material, previamente, foram caracterizados visualmente e foi verificado que estes apresentaram arestas vivas e possuíam diferenças significativas em sua coloração, conforme indicado na Figura 6.14.

Figura 6.14 - Aparência dos blocos de concreto com agregados: (a) naturais (NAT); (b) miúdo reciclado e gráúdo natural (AMR); (c) miúdo natural e gráúdo reciclado (AGR)



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A umidade ótima para cada combinação de agregados (NAT, AMR e AGR) foram diferentes, visto que quanto mais poroso o material, mais porosa era a aparência do bloco e,

consequentemente, seria necessária mais água para alcançar o ponto de pelota. Diante disso, Rodrigues (2015) e Castro (2012) reforçaram que o bloco apresenta características mais porosa conforme aumenta-se o percentual de material reciclado na mistura. Ou seja, para uma composição de 70% de agregado miúdo e 30% de agregado graúdo, espera-se que a composição que apresenta o maior teor de umidade seja a que contém o agregado miúdo, visto que ele representa 70% dos agregados.

Diante disso, ao dosar a mistura para produção de blocos, obteve-se uma umidade ótima de 10% para o agregado miúdo reciclado e graúdo natural. Esse percentual ótimo foi o mais alto determinado para as composições, visto que a mistura de agregados naturais apresentou um teor ótimo correspondente a 7% e a mistura de agregado miúdo natural e graúdo reciclado, 6%.

Outro aspecto analisado refere-se as características das superfícies das amostras, evidenciando alterações de tonalidade. Durante a análise das áreas com tonalidades mais escuras, constatou-se que isto possivelmente resultou da presença de desmoldante aplicação na máquina, o qual escorreu para a madeira. Consequentemente, o material absorveu o desmoldante, originando manchas localizadas nas regiões superficiais dos blocos. A Figura 6.15 apresenta uma amostra de cada grupo de agregados com tons superficiais diferentes.

Figura 6.15 - Aparência dos blocos de concreto com tonalidades diferentes utilizando agregado: (a) naturais (NAT); (b) miúdo reciclado e graúdo natural (AMR); (c) miúdo natural e graúdo reciclado (AGR)



(a)



(b)



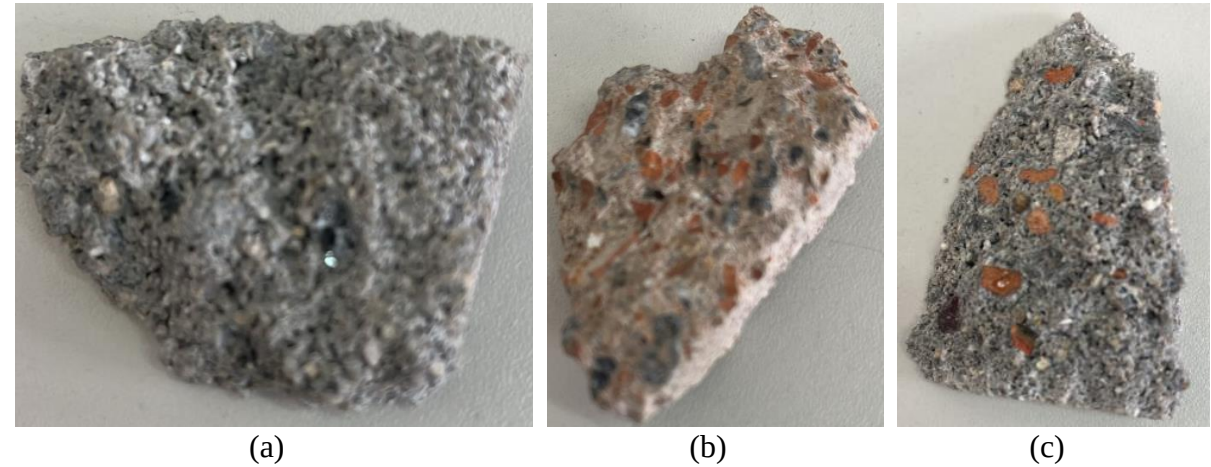
(c)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Em relação à macroestrutura (Figura 6.16) após o rompimento dos blocos, foram retiradas amostras de cada material para uma visualização superficial, tornando-se perceptível que os blocos que continham o agregado miúdo natural apresentavam uma estrutura mais porosa. Entretanto, os que apresentaram como agregado miúdo o material reciclado, visualmente tinham uma superfície mais homogênea e com uma porosidade menor. Essa

redução de porosidade pode ser explicada ao comparar as características granulométricas dos agregados graúdos, visto que a areia reciclada apresentou uma composição mais grossa, o que provavelmente resultou em um melhor preenchimento dos vazios.

Figura 6.16 - Macroestrutura dos blocos de concreto com agregados: (a) naturais (NAT); (b) miúdo reciclado e graúdo natural (AMR); (c) miúdo natural e graúdo reciclado (AGR)



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

As dimensões individuais dos blocos estudados nesta pesquisa encontram-se na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 - Dimensões dos blocos

Composição	Amostra	Largura (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura equivalente mínima (e_{eq}) (mm/m)	Área bruta (A_b)(mm ²)	Espessura mínima da parede longitudinal (e_1) (mm)
AMN+AGN	1	141	202	391	464	55158	28
	2	141	202	391	464	55044	31
	3	141	201	391	464	55107	30
	4	142	202	392	464	55408	30
	5	142	205	393	462	55765	31
	6	143	205	394	461	56391	31
AMR+AGN	1	140	201	390	463	54570	30
	2	140	200	391	463	54768	30
	3	142	200	394	460	55689	30
	4	143	199	394	459	86201	31
	5	140	204	391	463	54831	30
	6	141	204	390	463	54998	29
AMN+AGR	1	140	207	391	459	54869	30
	2	140	207	392	458	54665	29
	3	140	209	391	459	54593	29
	4	140	208	391	459	54859	31
	5	141	200	392	458	55230	30
	6	141	201	391	459	61525	30

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A NBR 6136 (2016) determina que as dimensões de blocos com largura de 140 mm, altura de 190 mm e comprimento de 390 mm, deve variar apenas ± 2 mm para largura e ± 3 mm para altura e comprimento. Apenas 1 bloco da composição AMN e AGN e AMR e AGN não satisfaz a recomendação de largura. Já para a altura, nenhum bloco se enquadrou, o que provavelmente ocorreu devido a vibro prensa utilizada ser manual, uma vez que a energia de compactação é responsável por proporcionar a redução desta altura do bloco, onde conforme Rodrigues (2015) a determinação da altura está associada à compactação do bloco no momento da moldagem.

A composição com AMN e AGN apresentou um bloco com comprimento fora da tolerância normativa. Já o AMR e AGN conteve dois blocos fora do intervalo recomendado. No entanto, o AMN e AGR satisfaz a recomendação normativa.

A NBR 6136 (2016) recomenda que as espessuras superiores tenham pelo menos 25 mm para blocos de classe A e B e 18 mm para os de classe C, podendo estar abaixo da recomendação mínima em até 1 mm. Nesse contexto, todas as espessuras encontradas foram superiores ao valor mínimo, portanto atendem às recomendações normativas. Apesar da espessura de cada bloco ser superior à mínima normativa, isso não possui grande significância, visto que não é algo que compromete a qualidade do bloco. Segundo Rodrigues (2015), isso apenas tem potencial de influenciar a quantidade de argamassa utilizada na moldagem das paredes.

A espessura equivalente mínima é uma razão entre a soma das espessuras de todas as paredes transversais do bloco e o comprimento nominal do bloco, de acordo com a NBR 6136 (2016). Diante disso, a norma recomenda que estas espessuras sejam iguais ou maiores que 188 mm/m (Classe A e B) e 135 mm/m (Classe C). Portanto, todos os conjuntos de blocos atenderam a essa recomendação normativa.

A Tabela 6.16 corresponde aos valores médios das dimensões dos blocos de cada composição. Por meio dela, foi possível perceber que os coeficientes de variação de cada composição foram baixos. Isso indica que houve uma regularidade a respeito das dimensões dos elementos, mesmo utilizando agregado reciclado, visto que este possui uma composição muito heterogênea e pode interferir na forma dos blocos.

Tabela 6.16 - Dimensão média dos blocos

Composição	Parâmetros	Largura (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Paredes	
					Transversal	Longitudinal
AMN+AGN	Média	142	203	392	30	30
	Máximo	141	205	394	31	31
	Mínimo	143	201	391	28	25
	Desvio Padrão	0,94	1,61	1,14	1,12	2,31
	Coeficiente de variação (%)	0,66	0,79	0,29	3,70	7,85
AMR+AGN	Média	141	201	392	30	30
	Máximo	143	199	394	31	30
	Mínimo	140	204	390	29	29
	Desvio Padrão	1,01	2,26	1,78	0,77	0,38
	Coeficiente de variação (%)	0,72	1,12	0,46	2,56	1,27
AMN+AGR	Média	140	205	391	30	30
	Máximo	141	209	392	31	31
	Mínimo	140	200	391	29	30
	Desvio Padrão	0,57	3,67	0,48	0,53	0,34
	Coeficiente de variação (%)	0,41	1,79	0,12	1,76	1,15

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

6.6 Resistência à compressão

A Tabela 6.17 apresenta os valores individuais do ensaio de resistência à compressão para cada combinação de agregados, onde a maior resistência à compressão média encontrada correspondeu a combinação que contém agregado miúdo reciclado e agregado graúdo natural.

Tabela 6.17 - Resistência à compressão dos blocos

Composição	Amostra	Massa (g)	Área (mm ²)	Carga (N)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão média (MPa)
AMN+AGN	1	12490	55158	35124,51	1,72	2,10
	2	12820	55044	115718,47	2,10	
	3	11950	55107	75511,21	1,37	
	4	12480	55408	92182,51	1,66	
	5	13480	55765	169164,71	3,03	
	6	13670	56391	152983,74	2,71	
AMR+AGN	1	13350	54570	282431,52	5,18	4,75
	2	13550	54768	247617,91	4,52	
	3	13670	55689	245166,25	4,40	
	4	13520	56201	235849,93	4,20	
	5	13730	54831	269682,88	4,92	
	6	13850	54998	289296,18	5,26	
AMN+AGR	1	13110	54869	152003,08	2,77	2,40
	2	12880	54665	186326,35	3,41	
	3	12430	54593	131409,11	2,41	
	4	12680	54859	135331,77	2,47	
	5	12070	55230	160829,06	2,91	
	6	11720	55010	135331,77	2,46	

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A Tabela 6.18 apresenta indicadores descritivos dos valores de resistência à compressão dos blocos de concreto.

Tabela 6.18 - Resistência à compressão média dos blocos

Composição	Amostra	Massa (g)	Área (mm ²)	Carga (N)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência Característica do bloco (MPa)
AMN+AGN	Média	12815	55479	116781	2,10	1,31
	Máximo	13670	56391	169165	2,71	
	Mínimo	11950	55044	75511	1,37	
	Desvio Padrão	654,12	549,40	36967,84	0,65	
	Coeficiente de variação (%)	5,10	0,94	31,66	30,92	
AMR+AGN	Média	13612	55176	261674	4,75	4,08
	Máximo	13850	56201	235850	4,20	
	Mínimo	13350	54570	289296	5,26	
	Desvio Padrão	176,00	632,17	21885,90	0,44	
	Coeficiente de variação (%)	1,29	1,15	8,36	9,18	
AMN+AGR	Média	12482	54871	150205	2,74	2,40
	Máximo	13110	55230	186326	3,41	
	Mínimo	11720	54593	131409	2,41	
	Desvio Padrão	518,67	231,38	21055,01	0,38	
	Coeficiente de variação (%)	4,16	0,42	14,02	14,06	

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Por meio dos resultados, expressa nas dimensões dos blocos, conforme apresentado na Tabela 6.16, foi perceptível que, para os conjuntos com AMR e AGN e AMN e AGR não houve variações significativas nos resultados dos conjuntos de blocos, indicando baixo desvio padrão amostral. No entanto, o conjunto de blocos compostos por agregados naturais apresentaram uma dispersão considerável nos resultados de resistência à compressão.

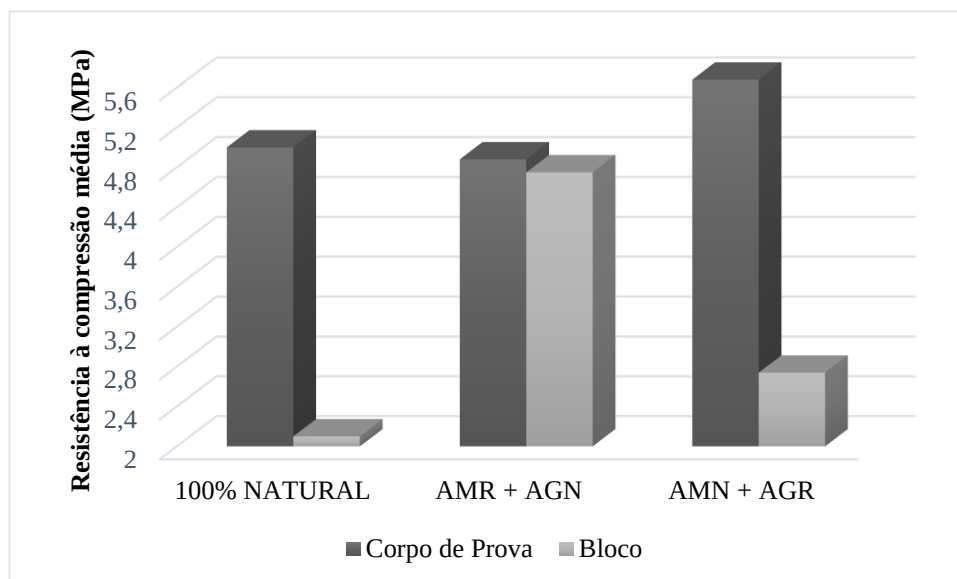
Ao comparar as resistências à compressão características médias de cada grupo, os blocos que continham apenas agregados naturais apresentaram a menor resistência, já a composição com areia reciclada e brita natural obteve a maior resistência característica. Por meio disso, é possível concluir que as características da areia natural em comparação a reciclada foi o fator responsável por essa redução de resistência, uma vez que pela análise granulométrica a areia reciclada apresentava uma composição mais grossa quando comparada à natural, e isso pode ter influenciado positivamente na resistência.

Deve ser comentado que, durante o processo de mistura na betoneira, observou-se que as misturas que continham o agregado miúdo reciclado apresentavam uma composição mais homogênea, o que provavelmente ocorreu devido a porosidade do material, uma vez que o cimento pode ter penetrado mais nesses poros e isso interferiu nas propriedades reológicas do material durante o processo de mistura, uma vez que, de acordo com Castro e Pandolfelli (2009), os materiais que contêm partículas diferentes formas e tamanhos, ou seja, mais heterogêneos, apresentam um melhor empacotamento quando em contato com a água.

Outro aspecto a ser analisado foi a resistência à compressão característica do bloco com agregado miúdo natural e graúdo reciclado, que obteve uma resistência superior ao de referência (AMN e AGN). Isso significa que, mesmo a brita sendo o principal agregado que confere resistência ao concreto, a brita reciclada obteve uma resistência melhor do que a esperada, visto que pelo estudo de dosagem realizado na reometria compressiva, esta foi a composição que apresentou a menor resistência à compressão.

A Figura 6.17 apresenta o gráfico comparativo entre os resultados de resistência à compressão obtidos nos corpos de prova (técnica de reometria compressiva) e nos blocos para cada grupo.

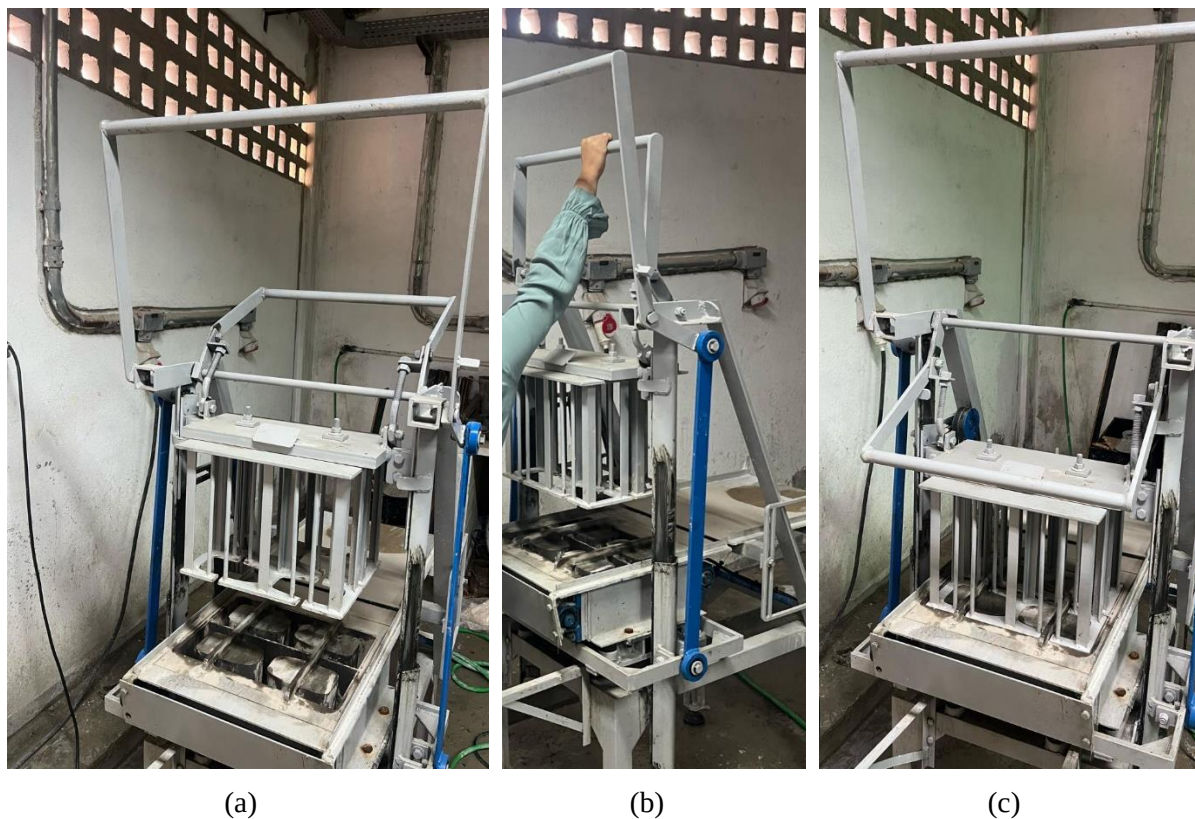
Figura 6.17 - Comparação entre as resistências à compressão médias dos corpos de prova (técnica de reometria compressiva) e dos blocos



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Através do gráfico na Figura 6.17 verifica-se que a única composição em que houve boa aderência entre os resultados obtidos nos ensaios de resistência dos corpos de prova e dos blocos foi a que continha o agregado miúdo reciclado e o gráudo natural. As diferenças significativas associadas ao comparativo das resistências à compressão médias presentes nas outras composições podem estar associadas a vibro prensa utilizada, uma vez que no procedimento de reometria compressiva foi aplicada uma carga fixa e controlada que provavelmente foi diferente da executada pela vibro prensa manual, uma vez que a compressão foi realizada por meio de golpes que a própria prensa aplicava conforme o operador soltava o equipamento e este caía em queda livre sobre a forma (Figura 6.18).

Figura 6.18 - Metodologia de compactação dos blocos: (a) Vibro prensa antes da compactação; (b) operador iniciando o processo de compactação; (c) energia de compactação aplicada



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

De acordo com a NBR 6136 (2016), o lote de blocos só pode ser classificado quando a resistência característica à compressão da amostra é de no mínimo 3MPa. Diante disso, apenas foi classificado o grupo composto por AMR e AGN com classificação B (estrutural), uma vez que sua resistência característica foi acima de 4,0 MPa e abaixo de 8,0 MPa.

Durante o ensaio de resistência à compressão dos blocos de concreto com agregado natural, foi observado que as faces com comprimento maior foram as regiões que, ao incremento de carga, apresentaram as fissuras (Figura 6.18a). Além disso, foi visível a presença de fissuras a partir de uma carga aplicada de 6 toneladas. A Figura 6.19 apresenta as fissuras geradas após a aplicação da carga.

Figura 6.19 - Surgimento de fissuras (AN): (a) 6 toneladas; (b) 9 toneladas; (c) 12 toneladas; (d) 15 toneladas



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para a composição com agregado miúdo reciclado e gráúdo natural, de modo análogo, as faces com maior comprimento foram as que apresentaram, inicialmente, o surgimento de fissuras, conforme Figura 6.20.

Figura 6.20 - Surgimento de fissuras (AMR+AGN): (a) 7 toneladas; (b) 13 toneladas; (c) 16 toneladas; (d) 25 toneladas



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

De acordo com a Figura 6.19a, até uma carga inferior à 7 toneladas o bloco não apresentou defeitos visíveis, no entanto, após atingir essa carga (Figura 6.19b), surgiram fissuras à medida que a carga era incrementada. Esse incremento de carga a uma velocidade de 0,05 MPa/seg, conforme a NBR 12118 (2013), alcançou um limite quando a carga aplicada atingiu 25 toneladas (Figura 6.19d), momento em que o bloco apresentou uma resistência superior ao citado anteriormente.

Por fim, o surgimento de fissuras foi avaliada na combinação AMN + AGR, apresentado na Figura 6.21.

Figura 6.21 - Surgimento de fissuras (AMN+AGR): (a) 3 toneladas; (b) 9 toneladas; (c) 13 toneladas; (d) 16 toneladas.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O surgimento de fissuras no bloco com a composição de agregados miúdo natural e graúdo reciclado ocorreu quando a carga aplicada atingiu 3 toneladas (Figura 6.21a), após isso, houve a propagação da fissura, sendo possível visualizar as fissuras na face lateral ao alcançar um incremento de carga correspondente a 6 toneladas (Figura 6.21b), Esses resultados indicam uma tendência semelhante à ruptura, independente dos diferentes tipos de agregado presente no bloco, uma vez que, em todos os casos, as faces maiores foram as primeiras a desenvolver fissuras. Ao aumentar a carga aplicada até atingir 13 toneladas no mesmo bloco, foi possível observar o surgimento de fissuras nas faces de menores dimensões do bloco (Figura 6.21c), culminando no rompimento do bloco (Figura 6.21d).

A Figura 6.22 apresenta as características de ruptura dos blocos para cada composição de material.

Figura 6.22 - Características de rupturas de cada conjunto de bloco (a) AN; b) AMR+AGN; (c) AMN+AGR.



(a)



(b)



(c)



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os blocos apresentaram ruptura predominantemente vertical, semelhante à verificada nos blocos de Rodrigues (2015), apresentando também deslocamento das paredes.

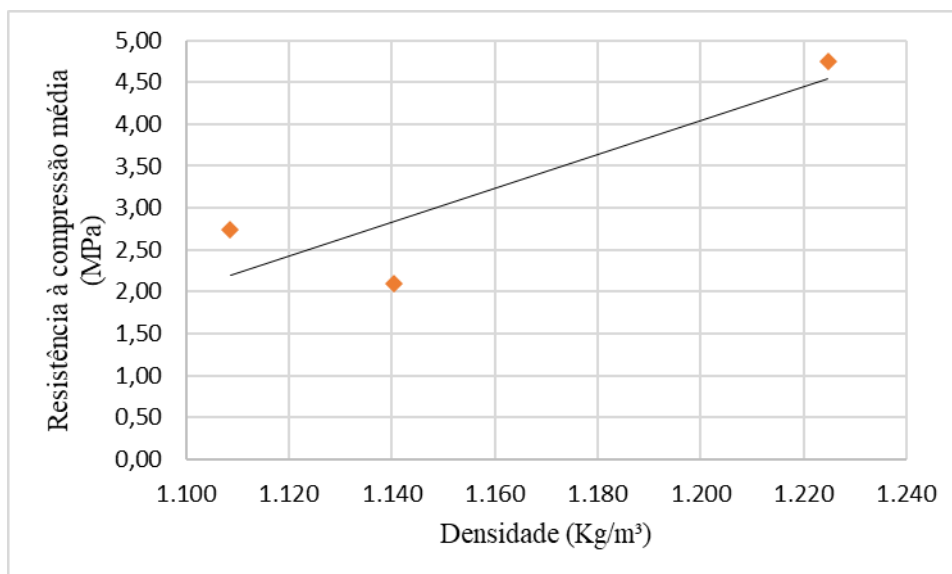
Os blocos com agregado natural (Figura 6.22a), apresentaram menor resistência à ruptura e fraturas maiores. Isso possivelmente ocorreu devido ao teor de finos, que apesar de ter proporcionado melhor acabamento ao bloco, foi responsável por reduzir a sua resistência à compressão, conforme observado durante a análise da curva granulométrica para as metodologias de dosagem.

A Figura 6.22b apresenta a ruptura dos blocos constituídos por agregado miúdo reciclado e gráúdo natural, o qual foi alcançada a maior resistência à compressão em comparação aos demais, desde o processo de surgimento de fissuras. A manifestação do deslocamento da parede e o surgimento de fissuras de forma visual indicam uma maior rigidez desses blocos. No entanto, os blocos com agregados miúdo natural e gráúdo reciclado apresentaram uma maior resistência à compressão quando comparado aos blocos com agregados naturais. Além disso, é importante destacar que estes (AMN+AGR) apresentaram ruptura vertical e deslocamento das paredes, no entanto, de forma menos acentuada do que os demais.

A ruptura vertical comumente encontrada durante o ensaio nos blocos indica que existe uma tendência de ruptura à flexão das paredes. Diante disso, como não foi observada nenhuma ruptura horizontal, isso indica que a fragilidade do bloco não está associada primariamente à pasta de concreto, o que indica que não há caminhos preferenciais à ruptura.

A Figura 6.23 apresenta a relação entre a resistência à compressão média e a massa específica média dos blocos de concreto, onde o grupo do AMN+AGR obteve a menor densidade ($1108,55 \text{ kg/m}^3$), o AMN+AGN atingiram uma densidade de $1140,30 \text{ kg/m}^3$ e o AMR+AGN, que alcançou a maior densidade ($1224,74 \text{ kg/m}^3$) e maior resistência à compressão.

Figura 6.23 - Comparativo entre resistência à compressão média e massa específica seca média



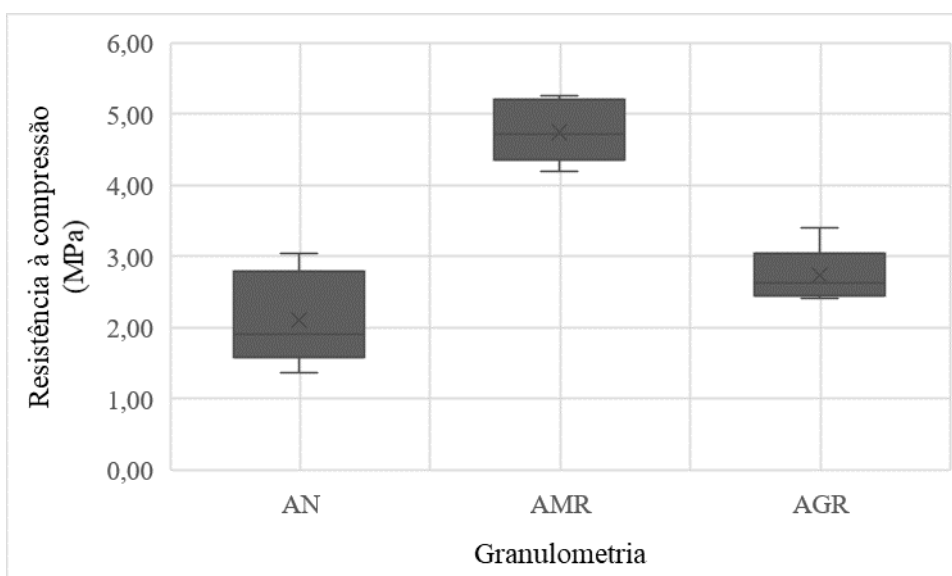
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Por meio do gráfico presente na Figura 6.23 percebe-se que existe uma relação proporcional entre densidade e resistência à compressão, visto que quanto maior a densidade do bloco, maior também foi a resistência à compressão média.

6.7 Análise Estatística

Para a análise estatística, inicialmente foram construídos gráficos de caixa (Figura 6.24) no intuito de verificar a presença de *outliers*. Pode-se observar que os gráficos produzidos não apresentaram *outliers*, significando que os não existem resultados discrepantes no contexto de cada amostra. Portanto, todos os dados foram incorporados à análise.

Figura 6.24 - Boxplot dos agregados presente nos blocos com tempo de cura de 21 dias



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ao analisar o gráfico presente na Figura 6.24, pode-se inferir que a resistência à compressão dos blocos de concreto confeccionados aumenta à medida que o agregado natural é substituído parcialmente pelo reciclado para uma composição fixa, sendo mais evidente essa influência sobre os blocos produzidos com agregado miúdo reciclado.

A Tabela 6.19 mostra os resultados experimentais de média e desvio padrão do ensaio de resistência à compressão axial, considerando uma proporção de cimento/agregado de 1:6, uma composição ótima de 75% de agregado miúdo e 25% de agregado graúdo e com as combinações de materiais, sendo eles: agregado miúdo e graúdo natural (teor de umidade ótima de 7%), agregado miúdo reciclado e graúdo natural (teor de umidade ótima de 10%) e agregado miúdo natural e graúdo reciclado (teor de umidade ótima de 6%).

Tabela 6.19 - Valores das resistências à compressão axial dos blocos

Resistência à compressão axial (MPa)								
Espécimes						Média	Desvio padrão	
Agregados	1	2	3	4	5	6		
AMN+AGN	1,72	2,10	1,37	1,66	3,03	2,71	2,10	0,65
AMR+AGN	5,18	4,52	4,40	4,20	4,92	5,26	4,75	0,44
AMN+AGR	2,77	3,41	2,41	2,47	2,91	2,46	2,74	0,38

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Foi aplicado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk sobre os resultados, por grupo, no intuito de verificar a hipótese de que cada amostra esteja normalmente distribuída, uma vez que o teste de hipóteses e os métodos de estimação são aplicados a partir de uma suposição de normalidade dos dados amostrais. Diante disso, o teste de normalidade aplicado à amostra proporcionou os resultados apresentados na Tabela 6.20 e na Figura 6.25.

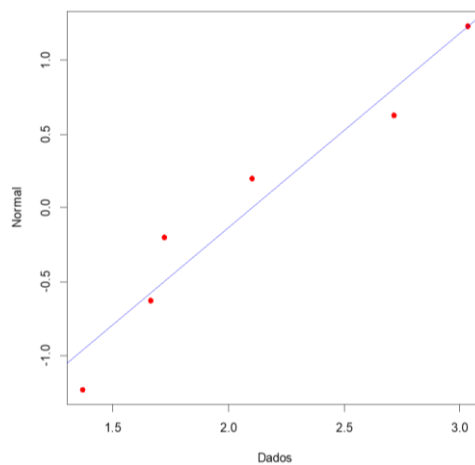
Tabela 6.20 - Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)

Resistência à compressão axial (MPa)								
Réplicas						Média	Valor-p (Shapiro-Wilk)	
Granulometria	1	2	3	4	5	6		
AMN+AGN	1,72	2,10	1,37	1,66	3,03	2,71	2,10	0,54
AMR+AGN	5,18	4,52	4,40	4,20	4,92	5,26	4,75	0,53
AMN+AGR	2,77	3,41	2,41	2,47	2,91	2,46	2,74	0,18

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

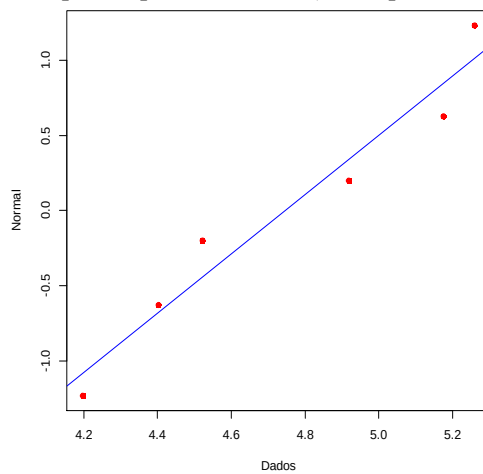
Figura 6.25 - Gráfico de papel de probabilidade: (a) AN; (b) AMR+AGN; (c) AMN+AGR

Papel de probabilidade (valor-p = 0,54)



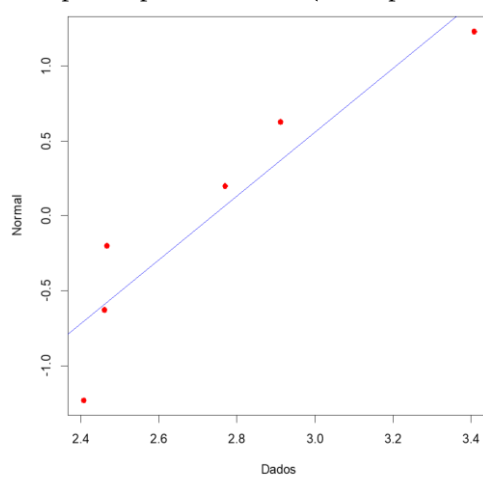
(a)

Papel de probabilidade (valor-p = 0,53)



(b)

Papel de probabilidade (valor-p = 0,18)

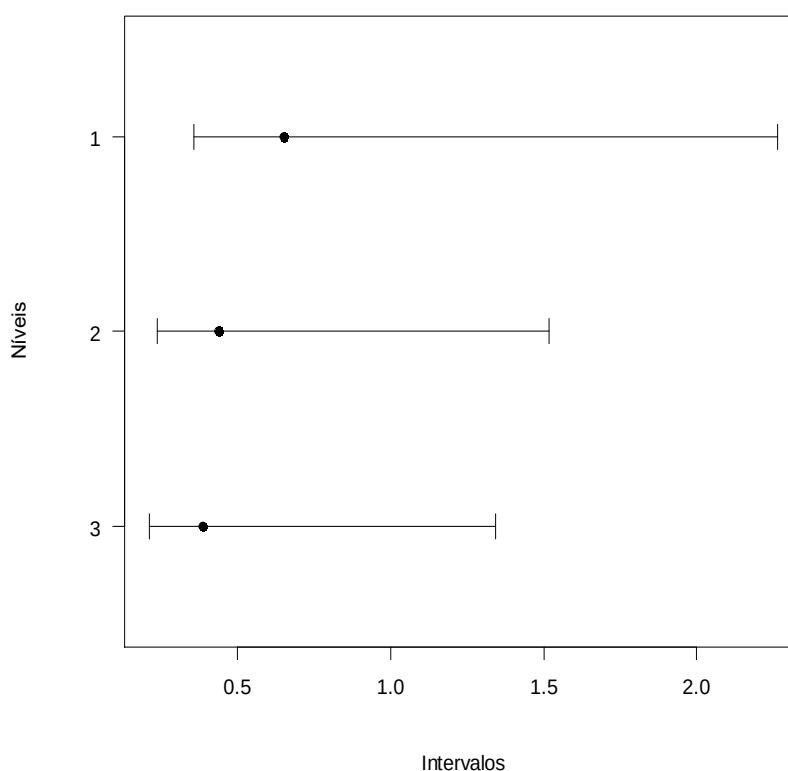


(c)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os resultados encontrados para o valor-p foram superiores ao nível de significância (α) de 5% (0,05). Logo, não existe evidência para rejeitar a hipótese que a amostra foi retirada de uma população normal. Em posse disso, foi realizado o teste de homocedasticidade de Bartlett, encontrando-se um valor-p igual a 0,49. A Figura 6.26 apresenta o gráfico de intervalos de confiança para o desvio padrão que tem o objetivo de apresentar a faixa de valores dentro da qual o desvio padrão populacional provavelmente se encontra, a um nível de significância.

Figura 6.26 - Gráfico de intervalos de confiança para o desvio padrão



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Portanto, uma vez que o valor encontrado foi superior ao nível de significância adotado (0,05), não existe evidência para rejeitar a hipótese de homocedasticidade dos tratamentos.

A partir disso, foi aplicada a Análise de variância (ANOVA), no intuito de verificar se existe diferenças significativas nas médias de resistência à compressão dos grupos (AMN+AGN, AMR+AGN, AMN+AGR). A Tabela 6.21 apresenta o fator analisado e os resultados da análise, onde o fator analisado (granulometria) apresenta 85,74% de influência sobre a variável de resposta (resistência à compressão).

Tabela 6.21 - Resultados da análise de variância (ANOVA)

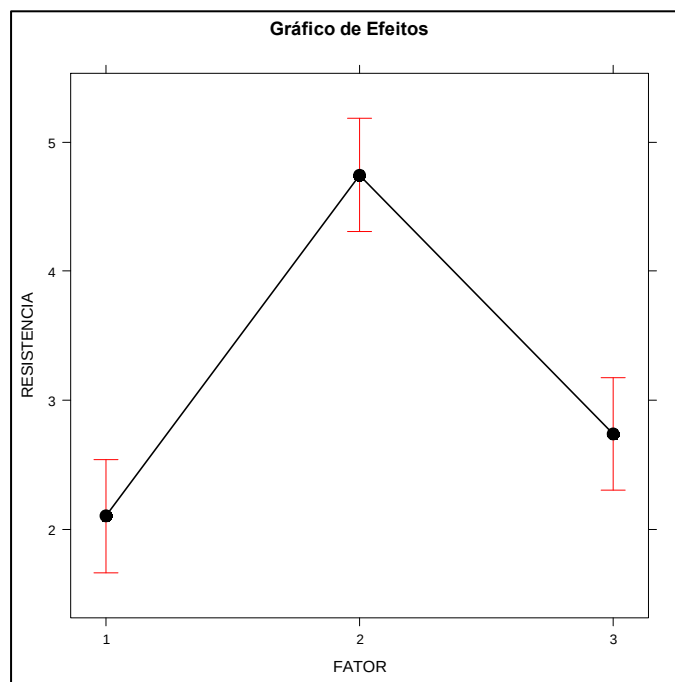
Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	Valor-p
Granulometria	22,8623	2	11,43	45,1104	0
Resíduos	3,8011	15	0,25		
Total	26,6634	17			

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Foi plotado o gráfico de efeito do fator na variável de resposta, conforme a Figura 6.27, onde 1, 2 e 3 corresponde respectivamente à AN, AMR+AGN, AMN+AGR.

Diante disso, verifica-se que a combinação de agregado natural foi a que obteve a menor resistência à compressão. No entanto, quando comparamos a substituição parcial dos agregados naturais pelo reciclado, percebe-se que a substituição da areia natural pela reciclada é a que proporciona a maior resistência aos blocos de concreto, no entanto ao substituir o agregado graúdo natural pelo reciclado, também é notório um aumento na resistência mesmo está não apresentando tanto significância quanto a citada anteriormente.

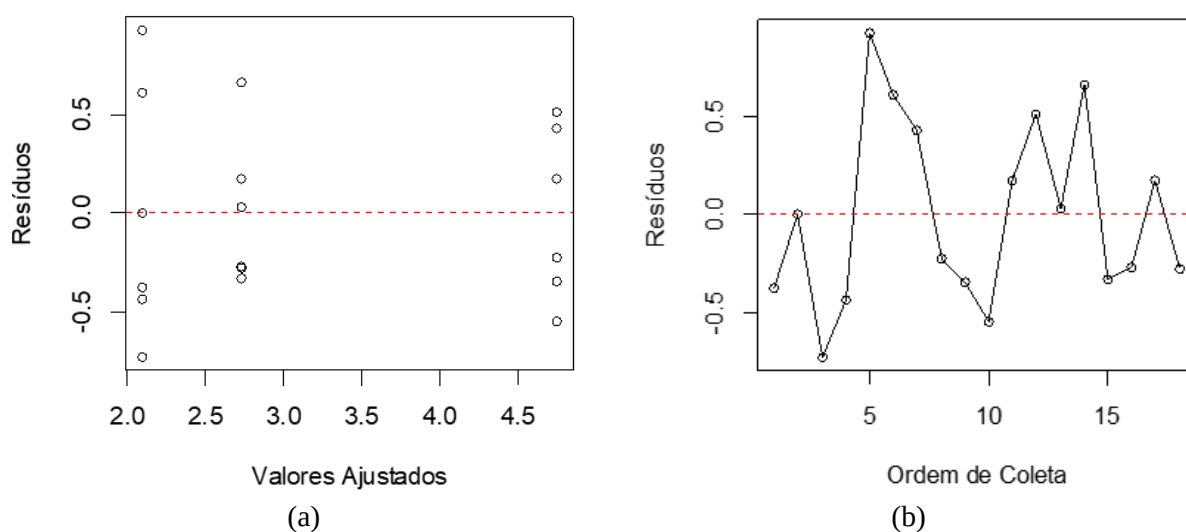
Figura 6.27 - Gráfico de efeitos



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

É importante que os resíduos apresentem variância constante, ou seja, homogeneidade entre as variâncias, sem presença de *outliers* e com maiores valores próximos à zero e sem padrão aparente (Figura 6.28a). Além disso, a distribuição dos resíduos deve ser aleatória e sem correlação, conforme é visualizado na Figura 6.28b.

Figura 6.28 - Ajuste dos resíduos: (a) valores ajustados versus resíduos; (b) ordem de coleta versus resíduos

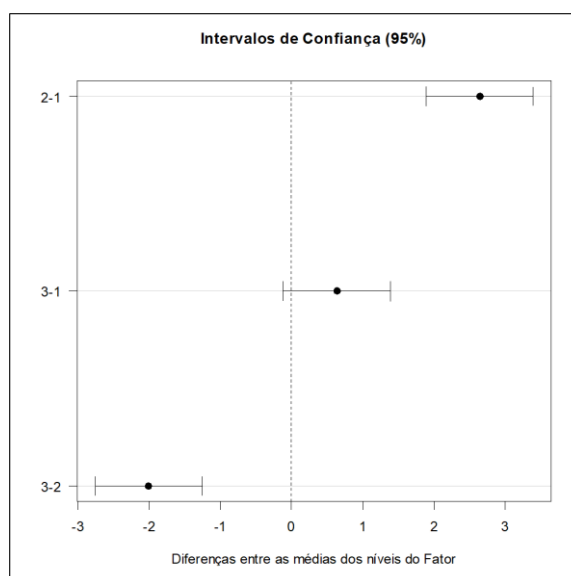


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Portanto, de acordo com a ANOVA, é possível concluir que existem indícios que pelo menos uma das médias dos tratamentos é diferente das demais. No intuito de descobrir onde está essa diferença, foi aplicado o teste de Tukey, que é um teste de comparação que permite determinar quais pares de médias tem diferenças significativas entre si. Para tanto, quando o valor-p é menor que o nível de significância, admite-se que existem diferenças significativas entre duas médias amostrais.

A Figura 6.29 apresenta a comparação entre as diferenças entre as médias de dois grupos de dados em relação a um único fator. Diante disso, como as caixas horizontais não se sobrepõem, logo isso sugere que as médias dos grupos são significativamente diferentes.

Figura 6.29 - Diferença entre as médias da resistência à compressão dos níveis



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A Tabela 6.22 que informa o valor-p de cada nível, onde 2-1 representa a comparação entre os blocos compostos com AMR+AGN (2) e AN (1), os níveis 3-1 compara os blocos AMN+AGR (3) e AN (1), e 3-2 que compara os blocos com AMN+AGR (3) e AMR+AGN (2).

Tabela 6.22 - Teste de Tukey

Níveis	Centro	Limite inferior	Limite superior	Valor-p
2-1	2,6445	1,8896	3,3994	$4,87 \cdot 10^{-7}$
3-1	0,6362	-0,1186	1,3912	0,106
3-2	-2,0082	-2,7631	-1,2533	$1,408 \cdot 10^{-5}$

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Portanto, pode-se afirmar que não existem diferenças significativas entre as médias das resistências à compressão axial dos conjuntos de blocos AMN+AGR (3) e AN (1). Entretanto, há diferença entre essas médias, considerando os blocos da composição AMR+AGN (2), em relação às demais composições. Esse resultado, em conjunto com o disposto no gráfico de efeitos (Figura 6.27) e dos dados da Tabela 6.20, permite afirmar que, considerando somente o fator granulometria, a composição AMN + AGN avaliada proporciona resistência à compressão axial média superior à das composições AN e AMN+AGR estudadas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo analisar a viabilidade técnica do uso de agregados reciclados de demolição em substituição dos naturais para produção de blocos com tempo de cura correspondente a 21 dias e determinar estatisticamente a influência da granulometria na resistência à compressão de blocos reciclados e sua classificação.

Ao avaliar a curva granulométrica dos agregados, percebeu-se que a areia natural apresentou uma composição mais fina, quando comparada à areia reciclada, e isso provavelmente influenciou na baixa resistência à compressão dos blocos de referência. Ao comparar isso com a recomendação de Frasson Júnior (2000), que afirma a necessidade de um percentual mínimo de finos passante na peneira de 0,3 mm para a coesão da mistura, isso não trouxe para essa pesquisa resultados com resistência maiores, visto que ao analisar as curvas de dosagem de Pfeiffenberger (1985) e Fernandes (2012), a curva granulométrica para um diâmetro máximo de 0,3 mm se enquadrou na recomendação normativa dos dois autores.

Outro ponto a ser discutido é que, devido ao agregado reciclado apresentar uma granulometria mais fina, isso proporcionou ao bloco um melhor acabamento superficial. Em relação à brita reciclada utilizada nesta pesquisa, percebeu-se que as propriedades granulométricas apresentaram semelhanças com a brita natural, além de também conter semelhante diâmetro máximo e módulo de finura.

O teor de materiais pulverulentos dos agregados miúdos reciclados foi superior ao dos agregados miúdos naturais, sendo cerca de 9% maior. Já para a fração graúda, o agregado natural apresentou o maior teor de finos, no entanto, essa diferença não foi significativa, correspondendo a 0,15%. Para a produção de blocos, o teor de finos possui grande relevância, visto que ele é responsável por uniformizar a superfície do bloco e preencher os vazios deixados pelos agregados.

A massa específica encontrada nesta pesquisa para os agregados reciclados foi semelhante aos naturais. No entanto, ao avaliar a massa seca e saturada, notou-se que os agregados reciclados apresentaram valores inferiores aos naturais. Isso significa que esse parâmetro pode influenciar na redução das massas específicas dos blocos produzidos. Em relação à absorção de água, os agregados reciclados apresentaram maior percentual que os naturais, sendo cerca de 7,76% para a areia e 9,73% para a brita.

Pela metodologia do estudo do esqueleto granular através da massa unitária, foi possível determinar a composição ótima para a produção dos blocos. Essa composição correspondeu a

proporção de 75% de agregado miúdo e 25% de agregado graúdo. Com base nisto, foi realizado o estudo granulométrico de dosagem utilizando as faixas de Pfeiffenberger (1985) e Fernandes (2012). Ao analisar o enquadramento das curvas obtidas com as faixas estabelecidas pelas metodologias de dosagem, verificou-se que, neste estudo, a abordagem de dosagem proposta por Fernandes (2023) foi a que se melhor ajustou a todas as composições de agregados.

Por meio do estudo de reometria compressiva foi determinada a umidade ótima para se alcançar a melhor resistência. Diante disso, para uma proporção cimento/agregado de 1:6, a um tempo de cura de 21 dias, a umidade ótima para os corpos de prova com agregados naturais e a areia reciclada e brita natural foi equivalente a 10%, já para o agregado miúdo natural e graúdo reciclado, correspondeu a 8%. Além disso, foi realizado um estudo estatístico descritivo, o que indicou que existe uma tendência de crescimento de resistência à compressão axial com o aumento do teor de umidade, até que esta atinja o valor ótimo. Esse estudo foi realizado no intuito de prever o comportamento dos blocos de concreto, visto que Frasson Júnior (2000) informa que existe uma relação equivalente entre corpos de prova cilíndricos e blocos de concreto.

Com relação aos blocos de concreto produzidos, foi verificado que, para todas as combinações de agregados, os blocos apresentaram aspecto uniforme e arestas vivas. Não foi utilizado nenhum aditivo ou adição, e a vibro prensa utilizada foi do tipo manual, o que impactou na compactação dos blocos e fez com que algumas dimensões, como por exemplo a altura, não atendessem às recomendações normativas pertinentes.

Houve um aumento na resistência à compressão dos blocos de concreto ao substituir o agregado miúdo natural pelo reciclado, sendo cerca de 126,19% maior que o bloco de referência. Isso provavelmente ocorreu devido a areia reciclada apresentar uma granulometria mais grossa e heterogênea, além de também ser mais porosa que a areia natural, o que pode ter ajudado no empacotamento do material e na penetração do cimento, visto que, ao analisar a macroestrutura de uma amostra de cada combinação de agregados, a que continha a areia reciclada apresentava uma superfície interna mais homogênea e preenchida, quando comparada às amostras de blocos com a areia natural.

A NBR 15116 (2021) limita o uso de agregados reciclados para a produção de elementos estruturais, no entanto, de acordo com esta pesquisa, para o requisito de resistência à compressão, a combinação de agregados que continha a areia reciclada e a brita natural pode ser empregada para a produção de blocos estruturais de classe B, enquanto os blocos das demais composições não foram classificados.

Para a análise estatística dos resultados foi utilizada a ANOVA, com o intuito verificar se existe diferenças significativas entre as médias de resistência à compressão axial dos níveis do fator granulometria. Por meio do gráfico de efeitos entende-se que, ao trocar a areia natural pela reciclada, a resistência à compressão tende a aumentar, e que o mesmo ocorre ao substituir o agregado graúdo natural pelo reciclado, no entanto, esse aumento não apresenta percentual tão significativo quando comparado com a substituição da areia. Isso pode estar associado ao percentual da composição de agregados, visto que a mistura apresenta um maior percentual de areia (75%) do que brita (25%), logo o agregado miúdo apresenta maior significância na resistência do bloco de concreto, neste estudo.

Pelo teste de Tukey, não existe diferenças significativas entre produzir blocos de concreto com agregado miúdo natural e graúdo reciclado ou agregados naturais. No entanto, há diferenças significativas ao produzir blocos com AMR+AGR em relação a qualquer outro nível citado (AN ou AMN+AGR). Diante disso, o conjunto de blocos compostos por agregado miúdo reciclado e graúdo natural foram os que apresentaram, estatisticamente, um melhor benefício de produção acerca da variável de resposta resistência à compressão.

Portanto, pelo estudo realizado, é possível obter blocos produzidos com o uso de agregado reciclado que atendam aos requisitos da NBR 12118 (2013) para aplicação para fins estruturais.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

A presente pesquisa, com o intuito de dar continuidade às investigações acerca da temática em questão, propõe as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Análise da viabilidade técnica da substituição total do agregado natural pelo reciclado para produção de blocos;
- Análise da viabilidade econômica da substituição total do agregado natural pelo reciclado para produção de blocos;
- Estudo da correlação entre as propriedades físicas e mecânicas dos blocos reciclados com a microestrutura do concreto utilizado.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. C. de; SANTOS, J.; RABUSKE, F. B.; ZAROOUR, E. C. dos S.; LEDUR, L. V.; FRANÇA, E. A. Blocos de concreto contendo agregados de resíduos de construção e demolição – RCD: Processo de produção. Profiscientia, n. 12, 2019. Cuiabá, MT.

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

ÂNGULO, S. C. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2022. ABRELPE. São Paulo, [s. n.]. Disponível em: <link>. Acesso em: 30 de março de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15112**. Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15113**. Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114**. Resíduos sólidos da construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115**. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868.1**. Alvenaria estrutural parte 1: projeto. Rio de Janeiro, 2020

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118**. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**. Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**. Agregados- Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**. Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16974**. Agregado graúdo – Ensaio de abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17053**. Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**. Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5564**. Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023**. ABREMA. São Paulo. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/>. Acesso em: 02 de março de 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. Pesquisa setorial Abrecon 2020. Disponível em: <https://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/documentacao_e_divulgacao/doc_biblioteca/bibli_servicos_produtos/BibliotecaDigital/BibDigitalLivros/TodosOsLivros/Pesquisa-setorial-ABRECON-2020.pdf>. Acesso em: 30 março de 2023.

ASSIS, W.S. Notas de Aulas – Inferência Estatística. Universidade Federal de Alagoas, 2022a.

BARDELLA, P.S; SARAGOSA, G.C; ZANIN, C.C; SILVA JÚNIOR, V.O; PAVÃO, C.M. Estudo experimental para produção de blocos de concreto utilizando agregados reciclados oriundos de blocos de concreto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 11., 2019, Londrina. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2019. Disponível em:

<<https://www.antaceventos.net.br/index.php/sibragec/sibragec2019/paper/view/447>>. Acesso em 17 de abril de 2023.

BRUM, E.M.; PANDOLFO, A.; BERTICELLI, R.; KALIL, R.M.L.; PASQUALI, P.B. Economic, social and environmental aspects of the sustainability of a construction waste recycling plant. *Gestão & Produção*, v.28, p. e5120, 2021.

BORGES, G. da F. Produção de blocos de concreto para vedação: Análise da viabilidade técnico-econômica da utilização de agregados reciclados. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

BUTTON, S.T. Metodologia para planejamento experimental e análise de resultado. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas, 2001.

CABRAL, A.E.B. Modelagem de propriedades mecânicas e 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.

CAPELA, M.V.; CAPELA, J.M.V. Elaboração de gráficos box-plot em planilhas de cálculo. In: Congresso de Matemática aplicada e computacional da região Sudeste – CMAC Sudeste, Araraquara, 2011.

CARNEIRO, F.P. Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e demolição na cidade do Recife. 2005. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

CASTRO, A.L. de; PANDOLFELLI, V.C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. Cerâmica, v.55, p.18-32, 2009.

CASTRO, R.A.F.R. de. Blocos para vedação a partir de resíduos de construção de gesso e de concreto. 2012. 191f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Resolução CONAMA nº 307, de 17 de julho de 2022. Disponível em:

<http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=305>. Acesso em: 15 de agosto de 2023.

CONTADOR, J.L.; SENNE, E.L.F. Testes não paramétricos para pequenas amostras de variáveis não categorizadas: um estudo. Gest. Prod., São Carlos, v.23, n.3, p.588-599, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0104-530X357-15>>. Acesso em: 02 de março de 2024.

CHAVES, A.P. Teoria e prática do tratamento de minério/britagem, peneiramento e moagem. São Paulo: Signus Editora, 2006.

DIAS, L.I.R.; RAMOS, E. das C.; FLORENCIO, O. Aproveitamento de resíduos da construção e demolição (RCD) na fabricação de blocos de concreto sem e com adição de óxido de grafeno. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 1, p. 5972-5989, 2021.

DING, Z.; WANG, Y.; ZOU, P.X.W. An agent based environmental impact assessment of building demolition waste management: Conventional versus green management. Journal of Cleaner Production, v. 133, p. 1136-1153, 2016.

FELIPE, A.S. Contribuição para a otimização de traços de concreto utilizados na produção de blocos estruturais. Ilha Solteira, 2010. 160 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

FERNANDES, I.D. Blocos e pavers produção e controle de qualidade. Edição 09. São Paulo: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda., 2023.

FERREIRA, R. C; CARVALHO, L.C. Estudo de verificação técnica do bloco de concreto para vedação confeccionados com agregados de resíduos de construção civil no município de Varginha MG. Varginha, 2019.

FRASSON JÚNIOR, A. Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FRASSON JÚNIOR, A.; OLIVEIRA, A.L.; PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R. Metodologia de dosagem para blocos de concreto empregados em alvenaria estrutural. Revista PRISMA, caderno técnico 10. Mandarin Ltda, 2008.

FROTTÉ, C.; NUBILA, C.; NAGALLI, A.; MAZER, W.; MACIOSKI, G.; OLIVEIRA, L. Estudos das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. Rio de Janeiro, RJ, 2017.

FONSECA, F.B. Desempenho estrutural de paredes de alvenaria de blocos de concreto de agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição. 2002. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

GOMES, H. Agregados reciclados em concretos para a mitigação de impactos da indústria da construção civil. Trabalho de conclusão de curso, Universidade, Cidade, 2021.

GOMES, P.C.C.; PEREIRA, F.A.; UCHÔA, S.B.B.; OLIVEIRA, F.C.de; ALMEIDA, L.H. Obtenção de blocos de concreto com utilização de resíduos reciclados da própria fabricação dos blocos. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.17, n.3, p.267-280, jul./set.2017. ISSN 1678-8621. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000300175>>. Acesso em 25 de abril de 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Consumo de materiais da construção. IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/busca.html?searchword=CONSUMO+DE+MATERIAIS+DA+CONSTRU%C3%87%C3%83O>>. Acesso em: 09 de abril de 2023.

IZQUIERDO, I.S. Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural. São Carlos, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

LEITE, M.N. Avaliação de 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.

LIMA FILHO, H.J.B.de. Tratamento dos resíduos de gesso da construção e da demolição-RCD para produção de gesso beta reciclado. Recife, 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, CTG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2010.

LINTZ, R.C.C.; JACINTHO, A.E.P.G.A.; PIMENTEL, L.L.; GACHET-BARBOSA, L.A. Study of the reuse of construction residues in concrete employed by blocks manufacture. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v.5, p.1-8, 2012.

MACHADO, L.C. Concretos com agregados reciclados de concreto: eficiência no uso do cimento. São Paulo, 2022. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil.

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

MARCHIONI, M.L. Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada. 2012. 111f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MARQUES, M.D.; SIMÕES, R.D.; JÚNIOR, S.S.B. Materiais construtivos sustentáveis: um comparativo entre o uso de diversos agregados não convencionais em concreto e argamassas para a construção civil. *Revista foco*, v.17, n.1, p.e4137-e4137, 2024.

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*, v. 118, p. 162-169, 2016.

MATAR, O.; DALATI, R.E. Strength of masonry blocks made with recycled concrete aggregates. *Physics Procedia*, v. 21, p. 180-186, 2011.

MATOS FILHO, A.L. de; NIENOV, F. A. Análise de uma mistura de agregados para utilização em concretos rodados em obra. *Conhecimento em Construção*, Joaçaba, v. 7, p. 7-24, 2020.

MELO, C.V.A. de. Avaliação e determinação de parâmetros para otimização de esqueleto granular em atendimento à autoadensabilidade de concretos. 2019. 246 f. Tese (Doutorado em Materiais) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Materiais, Maceió, 2019.

MEIRELES, J.R.; RASSI, K.C.A.; NUNES, W.C. Revisão da literatura sobre Reciclagem de Resíduos Sólidos da Construção Civil em parâmetro mundial. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Curso de Engenharia Civil, 2022.

MEMÓRIA, J.M.P. Breve história da estatística. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 111 p.

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

MONTGOMERY, D.C. Design and Analysis of Experiments. 8. ed. John Wiley & Sons, Inc., 2008. 725 p.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. Applied Statistics and Probability for Engineers. New York: John Wiley and Sons, 2009.

NAKANO, A. Y et al. Estudo da Viabilidade do Uso de Resíduos da Construção e Demolição na Fabricação de Peças Intertravadas de Concreto. 191 p. Monografia. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

NASCIMENTO, D. da C.; TIBANA, R.A.; MELO, G.F. de; PRESTES, J. Testes de normalidade em análises estatísticas: uma orientação para praticantes em ciência da saúde e atividade física. *Revista Mackenzie de Educação Física e Esporte*, v. 14, n.2, 2015.

NIZA, D.A. Concretos secos com agregados de RCD – a influência da otimização granulométrica e efeitos na compactação. São Paulo, 2021. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil.

OLIVEIRA, A.L. Contribuição a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação. Florianópolis, 2004. 296 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

OLIVEIRA, M.J. de. Estudo do concreto produzido com agregado reciclado misto. Pato Branco, 2023. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU-Habitat: população mundial será 68% urbana até 2050. Disponível em: \<<https://brasil.un.org/pt-br/188520-onu-habitat-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-ser%C3%A1-68-urbana-at%C3%A9-2050#:~:text=No%20ritmo%20atual%2C%20a%20estimativa,crescer%20para%2068%25%20at%C3%A9%202050>>. Acesso em: 07 de setembro de 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Gestão dos resíduos sólidos é chave para desenvolvimento sustentável da América Latina. Disponível em: \<<https://brasil.un.org/pt-br/175171-gest%C3%A3o-dos-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos-%C3%A9-chave-para-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel-da-am%C3%A9rica-latina/>>. Acesso em: 07 de agosto de 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Sobre o nosso trabalho para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil. Disponível em: \<<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 10 de julho de 2023.

ORIOI, M.A.; FURLAN, A.P.; TAVARES, A.L. de M.; PEREIRA FILHO, J. D. Estudo do uso de agregado reciclado misto (ARM) em misturas solo-agregado. In: 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Gramado, 2018. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.

PAES, F. da R. Estudos de parâmetros que influenciam na resistência à compressão de concretos utilizados na confecção de blocos estruturais. Maceió, 2010. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Alagoas, 2010.

PAULA, P.R.F. Utilização dos resíduos da construção civil na produção de blocos de argamassa sem função estrutural. 2010. 131 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2010.

PAULINO, R. S.; LAZARI, C. H.; MIRANDA, L. F. R.; VOGT, V. Atualização do cenário da reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 2008-2020. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 23, n. 3, p. 83-97, jul./set. 2023. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: \<<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000300677>>. Acesso em 17 de maio de 2023.

PATTO, A.L.B. Minimização de impactos ambientais com a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) como agregados na fabricação de concreto. Taubaté, 2006. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade de Taubaté, Taubaté, 2006.

PLANO ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO ESTADO DE ALAGOAS. FLORAM Engenharia e Meio Ambiente Ltda. PERS – Volume 1 (Técnico). Panorama de Resíduos Sólidos. Tomo II. Eunápolis, Bahia, 2015.

RESENDE, M.H. de S. Potencial de reciclagem dos resíduos de construção civil e demolição de Rio Verde – GO. Rio Verde, 2023. 28 p. Trabalho de conclusão de curso. Graduação em Engenharia Ambiental. Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2023.

RIBEIRO, J.L.D.; CATEN, C.S.T. Projeto de experimentos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Porto Alegre, RS, 2011.

RIVETTI, M.L.A.; ARAÚJO, A.G.; LIMA, P.R.L. Influência da argamassa aderida ao agregado reciclado sobre as propriedades do concreto contendo resíduos de demolição. Contribuciones a Las Ciencias Sociales, São José os Pinhais, v. 17, n. 1, p. 1432-1453, 2024.

- RODRIGUES, C.B. Blocos de concreto produzidos com agregados reciclados mistos: avaliação das propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Recife: UPE, Escola Politécnica, 2015. 141f. Dissertação de mestrado em construção civil - Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2015.
- SOUTSOS, M.N.; TANG, K.; MILLARD, S.G. Concrete Building blocks made with recycled demolition aggregate. *Construction and Building Materials*. V.25, n.2, p.726-735, 2011.
- SALVADOR FILHO, J.A.A. Blocos de concreto para alvenaria em construções industrializadas. P.246, 2007.
- SABAI, M.M.; COX, M.G.D.M.; MATO, R.R.; EGMOND, E.L.C.; LICHTENBERG, J.J.N. Concrete block production from construction and demolition waste in Tanzania. *Resources, Conservation & Recycling*. V.72, n11, p. 9-19, mar. 2013.
- SANTOS, F.S. dos; AZEREDO, P.H. de A.; VENEU, D.M.; Avaliação de concreto sustentável contendo teores de resíduos de agregados reciclados. *Braz. J. of Develop.*, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 45457-45471, jul. 2020. ISSN: 2525-8761.
- SILVA, A.R.S.; ABREU, G.C.C.L.; COSTA, G.B.O.; FORMIGA ANDRADE, F.L. Determinação da resistência à compressão de blocos compósitos de gesso com adição de resíduos da construção civil. 22º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2016, Natal, RN, Brasil.
- SILVA, A.R. da. Proposta de metodologia de dosagem para blocos de concreto. 2018. 98f.: il. Monografia (graduação) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Curso de Engenharia Civil, 2018.
- SILVA, H.H. de M. Validação do método de determinação da umidade ótima para a fabricação de blocos utilizando agregado reciclado. Maceió, 2011. Trabalho de Conclusão de curso, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.
- SILVA, A.R. da. Proposta de metodologia de dosagem para blocos de concreto. 2018. 98f.: il. 586p. Trabalho de Conclusão de curso – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2018.
- SILVA, M.P.da. Utilização de resíduos poliméricos na produção de bloco de concreto para piso intertravado em diferentes condições climáticas do semiárido brasileiro. Campina Grande, 2019. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Campina Grande, 2019.
- SILVA, R.B. da. Concretos secos produzidos com agregados reciclados de RCD por densidade. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v.15, n.4, p. 335-349, out./dez. 2015. Disponível em: \<<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212015000400054>>.
- SILVA, M.V. do P. Análise da variação da umidade sobre a resistência a compressão de misturas para blocos estruturais de concreto. Maceió, 2012. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Alagoas, 2012.
- SILVA, G.T. de M; RIBEIRO, C.C; RIBEIRO, S.E.C; OLIVEIRA, D.M; OLIVEIRA, W.S; ALMEIDA, M.L.B. Resíduos de construção e demolição em tecnologia de concreto: uma revisão. *Braz. J. of Develop.*, Curitiba, v.6, n.7, p.46883-46896, jul. 2020.
- SILVA, J.L.O. Análise de propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes dosagens de agregados reciclados de concreto. 2023. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Maceió, 2023.

SILVERIO, M.J. Desenvolvimento de blocos estruturais de concreto utilizando resíduos da construção civil, nas modulações M10 e M15. Ribeirão Preto, 2019. 210 f.: il. color. Dissertação (mestrado) – Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP, Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2019.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS. Relatório Estadual de Gestão de Resíduos Sólidos de Alagoas – AL. Disponível em: \<<https://relatorios.sinir.gov.br/relatorios/estadual/index.php?ibge=27&ano=2020>>. Acesso em: 02 de março de 2024.

SOUSA, C.A.F.; CAMPOS, J.C.B.; OLIVEIRA, B.M. Panorama do gerenciamento dos Resíduos Sólidos no Brasil e no Nordeste após a implementação do PNRS. ANAP Brasil, v. 9, n. 15, 2016.

SOUSA, J.G.G. de. Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto: aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado. 2001. 120 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

SILVERIO, M.J. Desenvolvimento de blocos estruturais de concreto utilizando resíduos da construção civil, nas modulações M10 e M15. Ribeirão Preto, 2019. 210 f. Dissertação de mestrado - Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP, Tecnologia Ambiental, Ribeirão Preto, 2019.

TANGO, C.E. Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais. In: International seminar on structural masonry for developing countries, 5., 1994, Florianópolis. Anais. Santa Catarina, 1994.

TAUBE, A. dos S. Caracterização de blocos estruturais de concreto com agregados reciclados. 2019. 84 f. Dissertação de mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2019.

TENÓRIO, J.J.L. Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais. Maceió, 2007. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

THYSSEMKRUPP, F.B. Backenbreche. Alemanha, 2006.

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO PRIMÁRIO (ARP)

O procedimento de amostragem foi realizado pelo método Chevron (Chaves, 2012), para garantir a homogeneidade do agregado miúdo reciclado primário (AMRP) e do agregado graúdo reciclado primário (AGRP), conforme Figura A.1.

Figura A.1 - Execução de pilhas na etapa de execução das amostras de AMRP (a) e AGRP (b)



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para homogeneização do ARP foi realizado um quarteamento, conforme a NBR 16915 (2021), utilizando o quarteador tipo Jones, a fim de obter as amostras necessárias para cada ensaio, conforme exposto na Figura A.2.

Figura A.2 - Quarteamento dos agregados reciclados primários



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

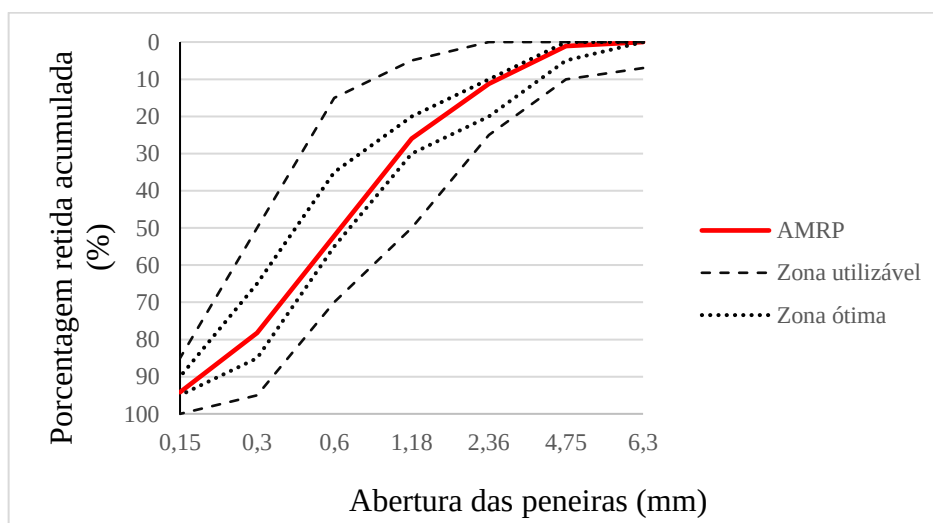
Composição granulométrica

A análise granulométrica do AMRP foi realizada de acordo com a NBR 17054 (2021), onde obteve-se uma dimensão máxima característica de 4,75 mm e módulo de finura de 2,63.

Em relação ao AMRP, o módulo de finura encontrado foi superior aos das pesquisas de Rodrigues (2015) que usou um agregado com módulo de finura igual a 2,77 e de Borges (2012), onde o seu agregado miúdo reciclado primário apresentou um módulo de finura alto, correspondente à 3,61. Vale frisar que todas essas referências comparadas utilizaram agregado reciclado com origem de demolição e um diâmetro máximo igual ao desta pesquisa.

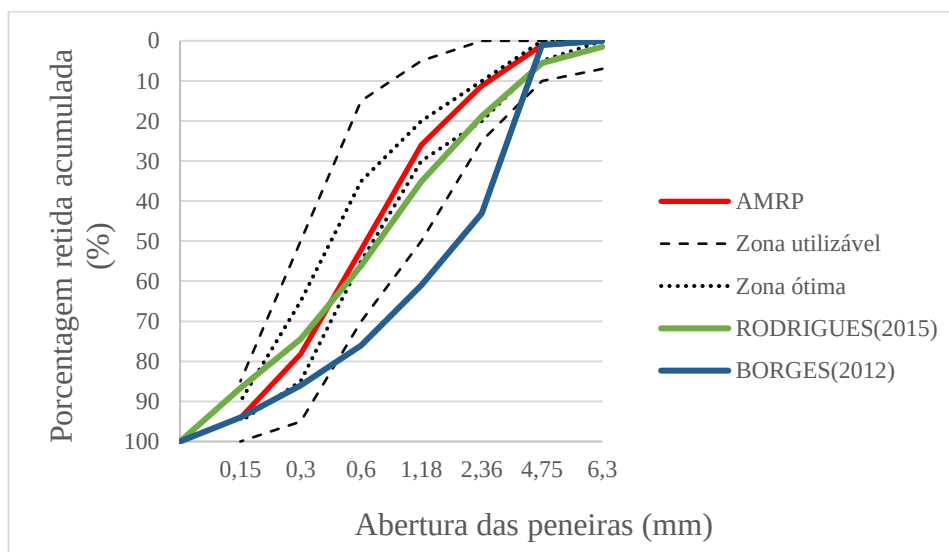
A Figura A.3 exibe o gráfico de porcentagem retida acumulada das amostras, utilizando quatro amostras para a obtenção dos resultados. A partir dessas análises, observa-se que a curva granulométrica se encontra dentro da zona ótima. Isso indica que o tamanho das partículas está ideal para a aplicação desejada. Essa condição possivelmente permite uma melhor compactação e resistência mecânica do concreto produzido com estes agregados.

Figura A.3 - Distribuição granulométrica acumulada média do AMRP



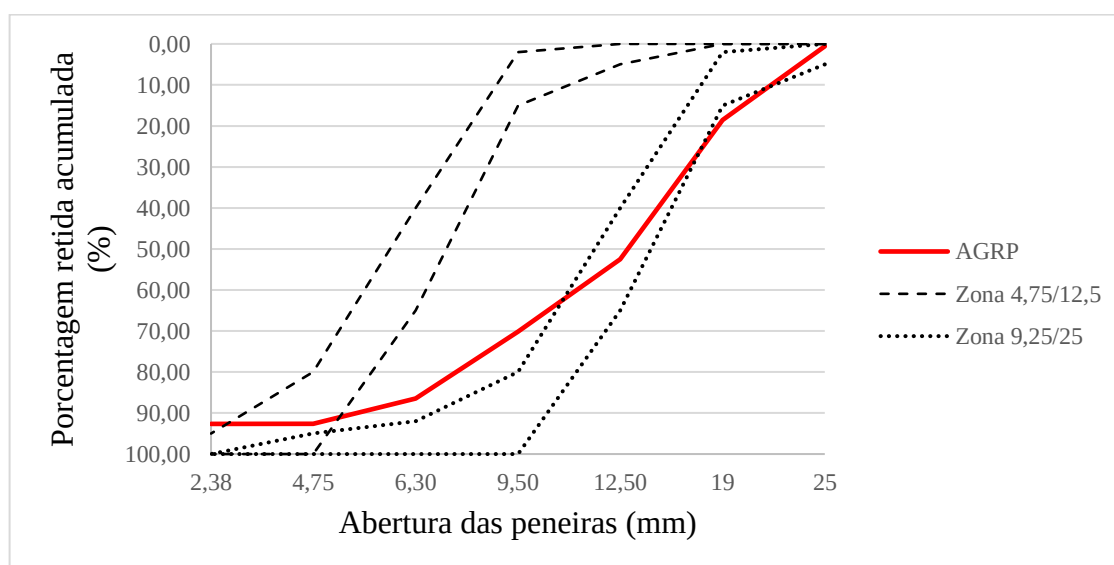
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A Figura A.4 apresenta as curvas granulométricas desta pesquisa e dos autores citados, onde é visualizado que a curva do AMRP está mais à esquerda quando comparamos com Rodrigues (2015) e Borges (2012). Isso significa que o módulo de finura apresenta um valor inferior aos autores mencionados. Outro ponto a ser observado, é que quanto mais à esquerda estiver a curva granulométrica, mais fina é a composição. Isso resulta em um acabamento melhor para o bloco, no entanto, isso também é responsável por diminuir a resistência para um consumo fixo de cimento, além de também contribuir com o aumento da absorção de água pelo agregado.

Figura A.4 – Comparação entre as curvas granulométricas

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

De modo análogo, a Figura A.5 apresenta a análise granulométrica do AGRP realizada de acordo com a NBR 7211 (2022), considerando duas amostras. Comparando-se o resultado obtido com as zonas granulométricas estabelecidas pela norma tem-se que o material não se enquadra perfeitamente em nenhuma zona, onde este até um diâmetro de 4,75 mm se enquadra na zona 4,75/12,5; a partir disso, quando a dimensão atinge aproximadamente 9,5 mm, o material se enquadra na zona de transição entre a 4,75/12,5 e 9,25/25, onde em seguida, conforme o diâmetro do material atinge 9,5 mm, ele se enquadra na zona 9,25/25. A dimensão máxima característica encontrada foi de 25 mm, com módulo de finura de 8,21.

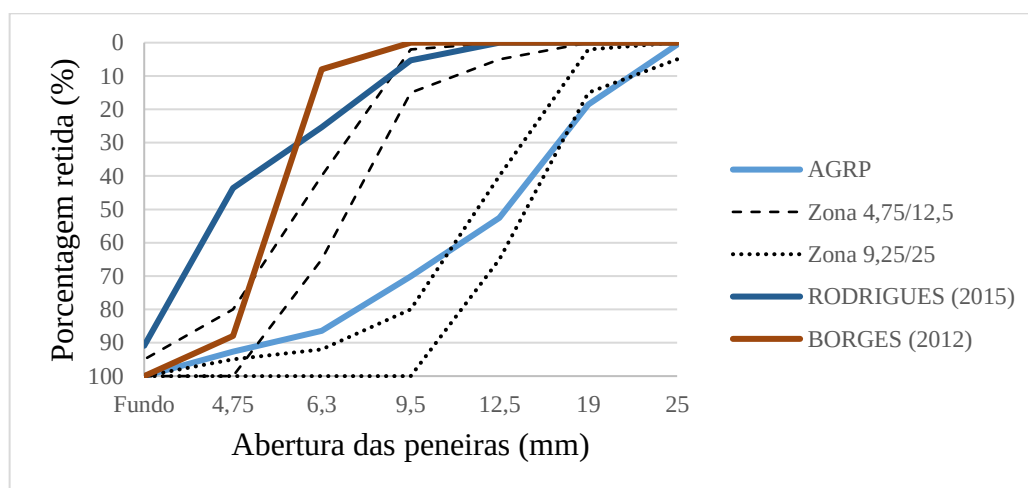
Figura A.5 - Distribuição granulométrica acumulada média do AGRP

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Em relação ao AGRP, o módulo de finura encontrado foi superior ao das pesquisas de Rodrigues (2015), que encontrou um módulo de finura igual a 5,05, e de Borges (2012), que obteve um resultado igual a 5,94. No entanto, é necessário ressaltar que estes autores tiveram diâmetro máximo inferior ao desta pesquisa, sendo estes iguais a 9,5 mm.

A Figura A.6 apresenta as curvas granulométrica desta pesquisa e dos autores citados. Nela podemos visualizar que os agregados graúdos reciclados de Rodrigues (2015) e Borges (2012) estão mais à esquerda no gráfico. Isso provavelmente ocorreu devido ao diâmetro máximo que os autores trabalharam terem sido menores que os desta pesquisa. Outro ponto a ser observado é que, devido a esses agregados apresentarem uma composição mais grossa quando comparamos com os autores citados, isso implica em blocos com acabamento inferior, no entanto, isso possivelmente indica que a resistência obtida será maior para um consumo fixo de cimento. Além disso, esse tipo de composição proporciona um percentual de absorção menor.

Figura A.6 - Comparação entre as curvas granulométricas



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Massa Unitária

Este ensaio foi realizado conforme as recomendações da NBR 16972 (2021). Acerca desse ensaio, foram adotados dois métodos, sendo eles o método A e o método C, no intuito de garantir uma amostra suficiente e proporcionando o cuidado necessário para evitar a segregação do material durante a manipulação.

Para a realizar o ensaio de massa unitária do ARP, foram empregados dois métodos normativos: o método A, que envolve a compactação do material durante o preenchimento do recipiente, e o método C, no qual o material é despejado solto no recipiente de ensaio. Com

isso, em cada método foram realizadas três determinações para calcular a massa unitária. A Tabela A.1 apresenta os resultados encontrados.

Tabela A.1 - Método A e C

Método A			Método C		
Determinações	Massa unitária (g/cm ³)		Determinações	Massa unitária (g/cm ³)	
	ARMP	ARGP		ARMP	ARGP
1	1,35	1,14	1	1,31	1,09
2	1,37	1,17	2	1,25	1,10
3	1,35	1,17	3	1,27	1,11
Valor médio	1,36	1,16	Valor médio	1,28	1,10
Desvio Padrão	0,01	0,01	Valor médio	0,03	0,01
Coeficiente de variação	0,01	0,01	Coeficiente de variação	0,02	0,01

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

De acordo com Silva (2023), devido à alta porosidade, os agregados reciclados têm uma massa unitária menor em comparação aos agregados naturais. Assim, a Tabela A.2 mostra os intervalos relativos à massa unitária para cada composição granulométrica de acordo com as referências.

Tabela A.2 – Massa unitária conforme a referência

Fração granulométrica	Massa Unitária (g/cm³)	Referência
AGR	1,02-1,29	Carneiro e Cordeiro (2013); Bravo <i>et. al.</i> (2015)
AMR	1,21-1,43	Carneiro e Cordeiro (2013); Huda <i>et. al.</i> (2014)
AN	1,54	Silva (2023)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Pela Tabela A.2 visualiza-se que as massas unitárias do AMRP e do AGRP estão nos intervalos estabelecidos pelas referências, para ambos os métodos.

Ao comparar com o agregado natural (AN) apresentado na Tabela A.2, este apresentou uma massa unitária um pouco mais baixa, o que é esperado tendo em vista a maior porosidade do material desta pesquisa. A Figura A.7 ilustra o ensaio citado.

Figura A.7 - Ensaio de massa unitária



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Material Pulverulento

Para determinação da quantidade de materiais pulverulentos para os AGRP e AMRP, foi realizado o ensaio previsto na NBR 16973 (2021), onde foram realizadas duas réplicas para cada agregado.

A Tabela A.3 apresenta os resultados para ambos os agregados, onde a diferença entre os valores encontrados não ultrapassou 1% para o AMRP e 0,5% para o AGRP.

Tabela A.3 – Ensaio de teor de material pulverulento

Agregado Miúdo Reciclado		Agregado Graúdo Reciclado	
Amostras	Massa (g)	Amostras	Massa (g)
Inicial 1	500	Inicial 1	3773,36
Inicial 2	500	Inicial 2	3768,48
Seco 1	404,97	Seco 1	3623,30
Seco 2	409,96	Seco 2	3599,61

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

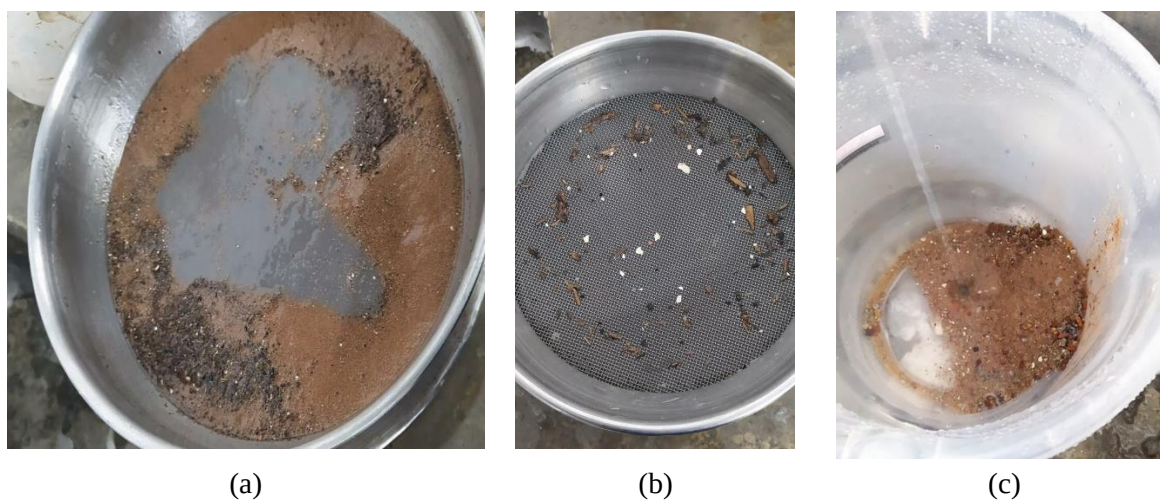
Para o AMRP, o teor de material pulverulento da amostra 1 corresponde a 19%, já o valor da amostra 2 encontrado foi de 18%. Esses resultados foram aceitáveis, visto que a tolerância de diferença entre as amostras é de até 1% em relação à média.

A NBR 15116 (2021), recomenda que os limites para agregado reciclado sejam menores que 12%, para o concreto protegido do desgaste superficial, e menor que 10% para o concreto submetido ao desgaste superficial. Logo, percebe-se que o AMRP apresenta teores de material pulverulento acima dos limites permitidos pela norma. Esse excesso em misturas cimentícios

pode gerar um aumento no consumo de água, visto que o material terá um percentual de absorção maior.

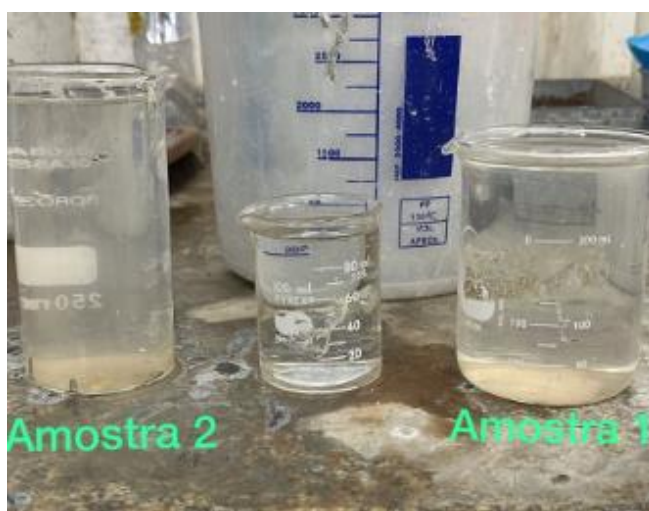
As Figuras A.8 e A.9 apresentam, respectivamente, a sequência de realização do ensaio e a comparação visual da água de lavagem das amostras com água da torneira. A partir disso, foi verificado que não houve grandes diferenças visuais entre as amostras e a referência.

Figura A.8- Ensaio de material pulverulento AMRP: (a) lavagem na peneira com abertura de 0,075 mm; (b) lavagem na peneira com abertura de 1,18 mm; (c) amostra no procedimento de lavagem



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura A.9 – Limpidez entre as amostras e a referência



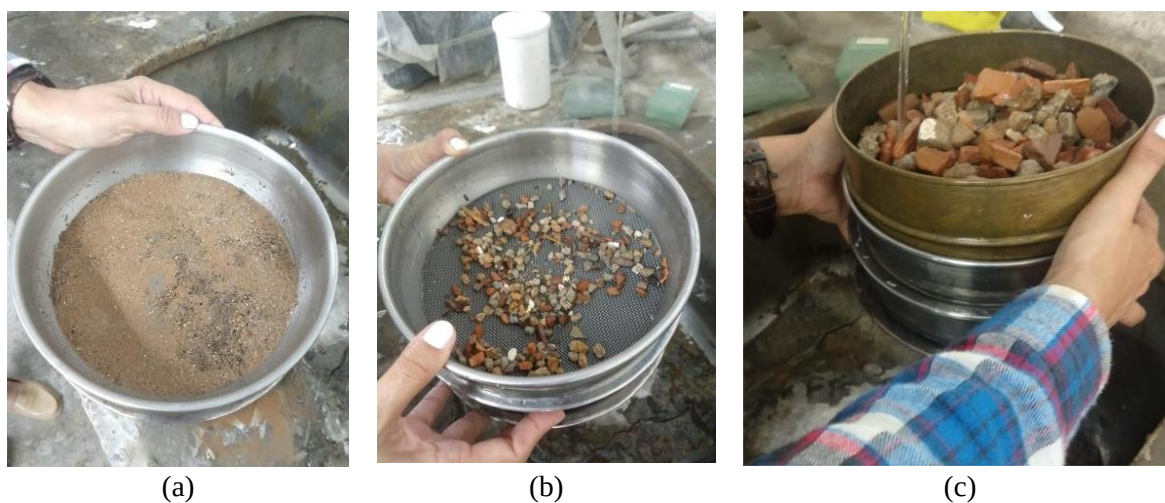
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O teor de materiais pulverulentos para o AGRP para as amostras foi de 4% (amostra 1) e 4,5% (amostra 2). Logo, esses resultados foram aceitáveis, visto que a diferença amostral deve ser de até 0,5% em relação à média.

De modo análogo, para os limites recomendados pela NBR 15116 (2021), o valor encontrado por meio das amostras está abaixo dos limites normativos. Logo, satisfaz a condição requerida pela norma.

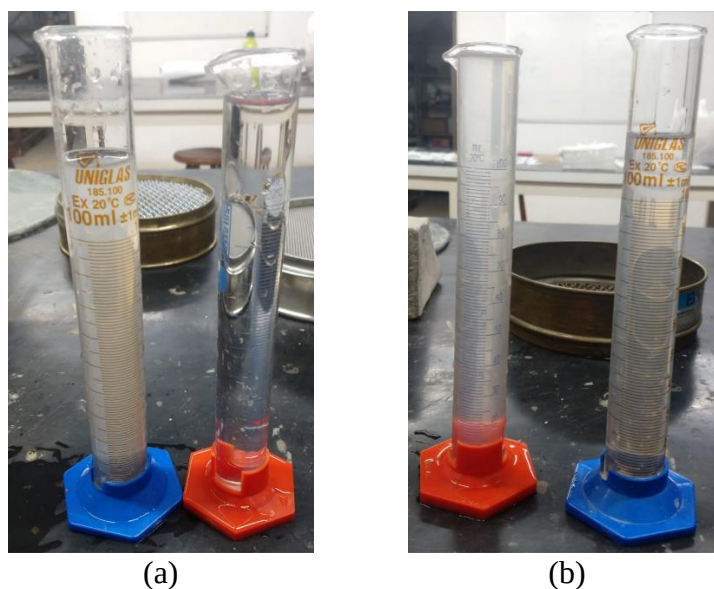
Pelas Figuras A.10 e A.11 tem-se a sequência de realização dos ensaios e a comparação visual entre a água antes e após a lavagem das amostras, respectivamente.

Figura A.10 - Ensaio de material pulverulento AGRP: (a) lavagem na peneira com abertura de 0,075 mm; (b) lavagem na peneira com abertura de 1,18 mm; (c) amostra no procedimento de lavagem



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura A.11 – Limpidez entre as amostras e a referência: (a) Amostra 1; (b) amostra 2



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Da Figura A.11, percebe-se a ausência de diferença visual significativa entre as amostras e a referência.

De acordo com Martinez *et. al.* (2016); Pan *et. al.* (2015) e Malta *et. al.* (2014) os resíduos mistos apresentam teores de material pulverulento mais elevados que os naturais, podendo estar na faixa de 6% a 25%. A partir disso, percebe-se que o AMRP se enquadrrou nessa faixa citada pelo autor, o qual provavelmente apresenta um percentual superior ao AGRP de mineiras com dimensão inferior a 0,075 mm.

Segundo Fernandes (2023), o excesso de material pulverulento pode influenciar na qualidade de blocos estruturais, visto que estes precisam alcançar uma resistência maior e para isso é necessário um maior consumo de cimento, o qual implica em uma quantidade de finos suficiente para facilitar o adensamento. Já para blocos de vedação, esse excesso de finos, até certo teor, não impacta na qualidade do elemento, visto que ao tempo que a resistência da pasta diminui, isso aumenta a resistência do concreto, que consequentemente proporciona uma facilidade na acomodação e no adensamento da mistura.

Massa específica e Absorção de água

A metodologia para determinação da massa específica foi conforme a NBR 16976 (2021) para o AMRP e NBR 16917 (2021) para o AGRP. A Tabela A.4 e A.5 apresentam as massas específicas do AMRP e AGRP respectivamente.

Tabela A.4 – Massa específica do AMRP

	Volume (cm³)	Densidade (Kg/m³)
L1	401	2487,56
L2	403	2463,05
L3	403	2463,05
Massa específica (g/cm ³)		2,47

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Diante disso, ao comparar o resultado desta pesquisa com o de Rodrigues (2015) percebe-se que a massa específica da areia reciclada utilizada pela autora foi superior, correspondendo a um valor de 2,64 g/cm³. Isso significa que o agregado miúdo reciclado desta autora apresenta característica mais densa e menos porosa.

Tabela A.5 – Massa específica e absorção do AGRP

Amostras	Massa saturada (g)	Massa submersa (g)	Densidade na condição seca (g/cm³)	Densidade na condição saturada superfície seca (g/cm³)	Absorção de água (%)
1	8538,3	4580	1,92	2,16	12,1
2	8722	4661	1,90	2,15	12,9
Média	2,47		1,91	2,15	12,5

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

De acordo com a NBR 15116 (2021), os limites de absorção de água para agregado reciclado misto correspondem a 12%. Em virtude disso, percebe-se que o AGRP apresenta um percentual de absorção um pouco maior que o limite normativo para aplicação em misturas cimentícias.

Ao comparar os resultados obtidos com o de Rodrigues (2015), é perceptível que a brita reciclada deste trabalho apresenta uma menor densidade, o que indica que o agregado é mais poroso. Essa porosidade tem influência sobre o quanto o agregado absorve água. Isso pode ser verificado pela determinação da absorção de água do agregado, onde a autora encontrou um percentual de 6,02% para sua areia reciclada e este trabalho apresentou quase o dobro de absorção pelo agregado. Isso provavelmente indica que a dosagem de água será maior para a mistura do concreto seco, pois o agregado absorverá mais água.

A Tabela A.6 apresenta exemplificação de faixas trazidas pela literatura referente a massa específica. A partir dela, verifica-se que o AMRP e o AGRP estão dentro das faixas da literatura.

Tabela A.6 – Dados relativos à massa específica dos agregados reciclados mistos

Fração granulométrica	Massa específica (g/cm³)	Referência
Agregado miúdo	2,06-2,64	Carneiro (2013)
Agregado graúdo	1,93-2,64	Huda <i>et. al.</i> (2014)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A Tabela A.7 apresenta a absorção média de água dos agregados usados para produção de blocos conforme a literatura.

Tabela A.7 – Absorção média de água dos agregados para produção de blocos

Agregado miúdo Reciclado (%)	Agregado Graúdo reciclado (%)	Referência
-	13,2	Sousa (2001)
-	8,9	Patto (2006)
8,4	8,4	Sabai <i>et. al.</i> (2013)
6	5	Matar e Dalati (2011)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

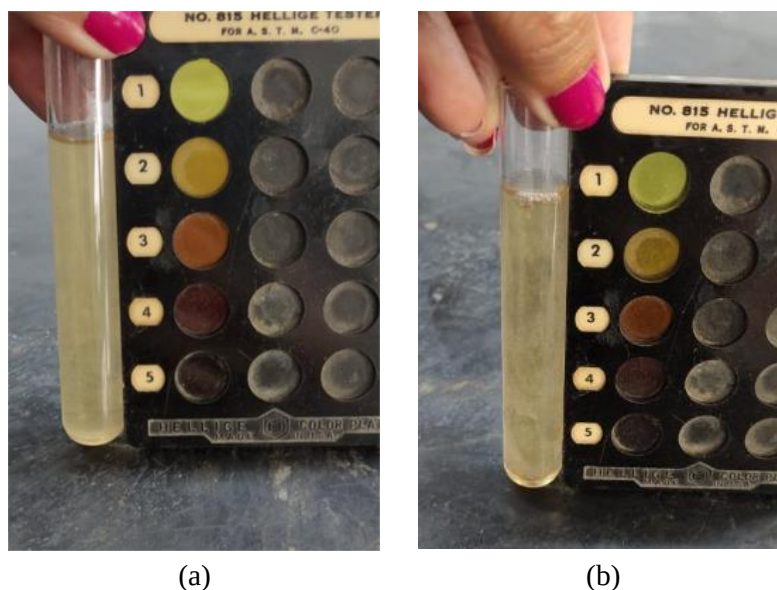
Diante disso, a absorção do AGRP encontrada (12,5%) foi inferior à indicada por Sousa (2001) (13,2%), conforme Tabela A.6, e superior à informada pelos demais autores citados. Além disso, o material de Sousa (2001) apresenta característica granulométrica mais fina, devido ao seu módulo de finura ser inferior (3,47) ao do AGRP. Isso ocorre porque quanto maior a presença de finos no material maior também será a absorção e o teor de água que será necessário adicionar a mistura.

Determinação de impurezas orgânicas do AMRP

De acordo com Fernandes (2023), as impurezas orgânicas são contaminantes que estão presentes no agregado, os quais podem ser gravetos, folhas, entre outros. Devido a ser um material orgânico, então ocorrerá o processo químico e físico de decomposição no material, provocando o surgimento de manchas na superfície e vazios.

Mediante a NBR 17053 (2022), foi verificado que o AMRP apresenta coloração clara, destacando sua proximidade com a coloração mais clara no calorímetro usado no ensaio, conforme a Figura A.12. Com isso, é possível concluir que a quantidade de material orgânica no material é desprezível.

Figura A.12 – Coloração do AMRP das amostras ensaiadas: (a) amostra 1; (b) amostra 2



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Segundo Fernandes (2023), para agregados utilizados em blocos, a preocupação com a existência de matéria orgânica é mínima, uma vez que os efeitos dessa contaminação são insignificantes quando comparados aos prejuízos que a umidade inadequada da mistura, curva granulométrica irregular e falta de compactação ou cura irregular, podem causar à resistência da peça.

Determinação do índice de forma e da classificação da forma dos grãos do AGRP

A determinação do índice de forma do AGRP seguiu as diretrizes da NBR 7809 (2019) mediante a uma adaptação e o anexo A da NBR 5564 (2021).

Devido a análise granulométrica da amostrar possuir material retido até a peneira de 19 mm, o ensaio consistiu na determinação do índice de forma de cinco frações granulométricas, sendo elas com diâmetros de 4,75 mm, 6,3 mm, 9,5 mm, 12,5 mm e 19 mm conforme a Figura A.13.

Figura A.13 – Ensaio de índice de forma do AGRP: (a) diâmetro de 4,75 mm; (b) diâmetro de 6,3 mm; (c) diâmetro de 9,5 mm; (d) diâmetro de 12,5 mm; (e) diâmetro de 19 mm



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A Tabela A.8 apresenta o número de grãos ensaiados e o índice de forma encontrada para cada uma das frações, assim como o índice de forma amostral. Os valores alcançados foram todos abaixo de 3, o que significa que atende o requisito de forma estabelecido pela NBR 7211 (2022).

Tabela A.8 – Índice de forma pelo método do paquímetro

Frações (mm)	Número de grãos	Índice de forma das frações	Índice de forma do AGRP
19	32	2,76	2,72
12,5	79	2,72	
9,5	33	2,72	
6,3	42	2,67	
4,75	14	2,80	

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Utilizando o paquímetro, foram determinadas as medidas das três dimensões do AGRP (largura, espessura e comprimento), conforme os critérios de classificação de forma dos grãos dos agregados graúdos utilizados na construção civil (cúbica, lamelar, alongada, alongada-lamelar) presente na NBR 5564 (2021). Essa determinação é de extrema importância para analisar a influência dos agregados nas propriedades de trabalhabilidade, resistência e durabilidade do concreto.

Com isso, a Tabela A.9 informa a distribuição dos grãos nos diferentes formatos, para cada fração ensaiada. A partir disso, foi encontrada uma proporção maior de grão cúbicos em todas as frações. Isso corresponde a um bom indicativo de forma, corroborando os resultados da Tabela A.8.

Tabela A.9 – Resumo do ensaio de índice de forma dos grãos pelo método do paquímetro

Frações (mm)	Forma dos grãos								Total
	Cúbica		Lamelar		Alongada		Alongada lamelar		
	N	%	N	%	N	%	N	%	
19	21	66	10	31	1	3	0	0	32
12,5	48	61	22	28	8	10	1	1	79
9,5	19	58	10	30	4	12	0	0	33
6,3	30	71	5	12	7	17	0	0	42
4,75	9	64	4	29	1	7	0	0	14
N = nº de grãos									

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Pela Figura A.14 é possível visualizar que mesmo obtido por meio do resultado citado uma proporção maior de grão cúbicos, as imagens apresentam uma existência de significativa de grão irregulares (lamelares e alongados).

Figura A.14 – Formato dos grãos dos AGRP: (a) diâmetro de 19 mm; (b) diâmetro de 12,5 mm; (c) diâmetro de 9,5 mm; (d) diâmetro de 6,3 mm; (e) diâmetro de 4,75 mm



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Ensaio de Resistencia ao impacto e à abrasão do AGRP

Este ensaio tem como objetivo determinar a perda por abrasão do AGRP, a fim de verificar se ele é adequado para o uso em concretos. Para tanto, foi utilizada a NBR 16974 (2022), a qual pede que o ensaio seja realizado com duas amostras de AGRP.

A massa da amostra, as esferas de aço e o número de rotações necessárias do tambor cilíndrico (Figura A.15) foram definidas de acordo com a graduação do material ensaiado. Com isso, foi admitida a graduação B, pois ela é a mais próxima da amostra de dimensão máxima.

Figura A.15 – Equipamento de Abrasão *Los Angeles*

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os parâmetros considerados no ensaio estão presentes na Tabela A.10.

Tabela A.10 – Parâmetros de ensaio de abrasão *Los Angeles*

Graduação	B
Total da massa inicial da amostra	500 g
Número de rotações do tambor	500
Quantidade de esferas de aço	11

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Previamente a introdução no tambor, a separação das classes granulométricas foi alcançada por meio do agitador de peneiras quadradas para a definição de massa retida nas peneiras de aberturas de 19 mm, 12, 5 mm, 9,5 mm, conforme a Figura A.16.

Figura A.16 – Etapa de separação das frações granulométricas para ensaio de abrasão

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

É importante ressaltar que foi realizado um segundo quarteamento, no intuito de obter 2500 g retidos nesses dois intervalos granulométricos, após a lavagem inicial e secagem em estufa. Esse procedimento foi necessário para garantir a quantidade exata exigido pela NBR 16974 (2022).

Conforme a Tabela A.11, o AGRP atingiu uma perda de massa por abrasão em média de 53% aproximadamente. Esse resultado é esperado, visto que o agregado reciclado normalmente, apresenta menor resistência ao desgaste.

Tabela A.11 – Dados do ensaio de abrasão *Los Angeles*

Massas obtidas	Amostra 1	Amostra 2
Massa da amostra seca nas frações de abertura de 12,5 mm e 9,5 mm	5000 g	5000 g
Massa da amostra lavada e retida na peneira de abertura de 1,7 mm	2398,6 g	2290,2 g
Perda de massa por abrasão	52%	54,2%
Média	53%	

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

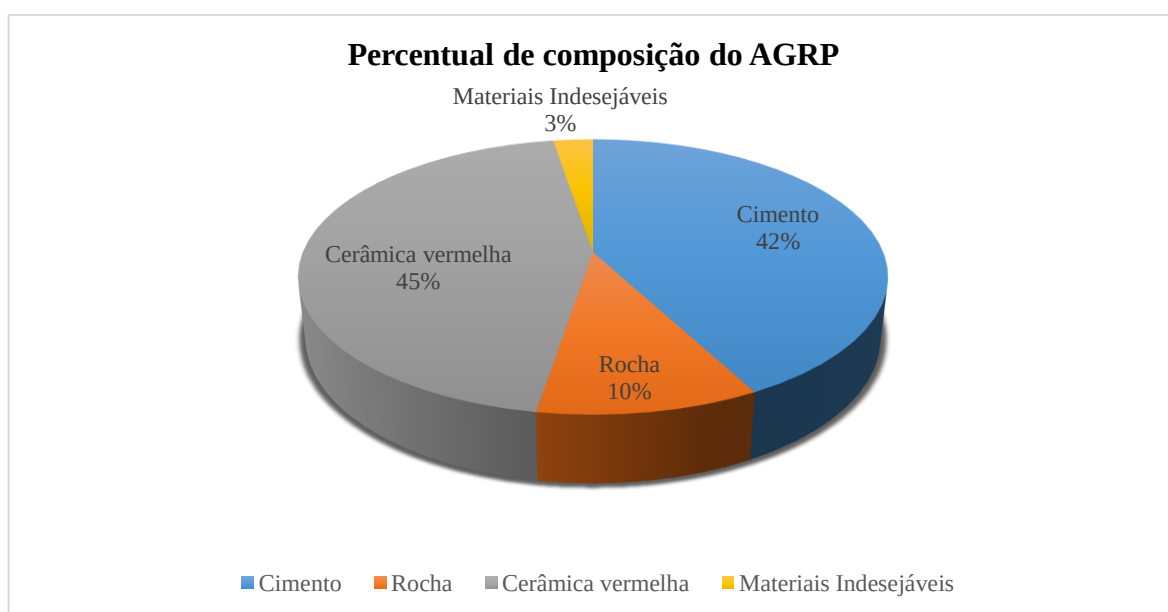
A NBR 7211 (2022) recomenda o índice de desgaste para os agregados naturais de até 50%, em massa, do material inicial, para uso em concreto armado. No entanto, o valor encontrado foi um pouco acima, o que já era esperado visto que o material reciclado apresenta uma menor resistência ao desgaste sofrido. Ao comparar ainda o resultado encontrado com o

de Orioli *et. al.* (2018) percebe-se que os resultados estão próximos, visto que o autor encontrou um desgaste de 51%.

Ensaio de determinação da composição do AGRP por análise visual

A NBR 15116 (2021) recomenda que seja realizada a determinação da composição do AGRP de resíduos de classe A da construção civil, com objetivo de avaliar a qualidade deste agregado, o qual o critério de identificação ocorre de modo visual, onde o resultado é apresentado na Figura A.17.

Figura A.17 – Composição do AGRP por análise visual



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

De acordo com a NBR 15116 (2021), o limite normativo para cerâmica vermelha é de 40% e de materiais indesejáveis é de 1%, portanto, o resultado encontrado do AGRP não satisfaz a condição normativa.

Composição granulométrica dos agregados

Tabela A.12 - Composições granulométrica das amostras do AMR

Peneiras (mm)	Massa retida da amostra 1 (g)	Massa retida da amostra 2 (g)	Amostra 1 (%)		Amostra 2 (%)		PRA (%)
			PRI	PRA	PRI	PRA	
4,75	12,1	8,3	4	4	2,8	2,8	3,4
2,36	73,5	56,8	24,5	28,5	19	21,8	25,1
1,18	55,0	51,3	18,3	46,9	17,1	38,9	42,9
0,6	45,3	50,5	15,1	61,9	16,9	55,8	58,9
0,3	41,7	47,8	13,9	75,8	16	71,8	73,8
0,15	32,6	38,1	10,9	86,7	12,7	84,5	85,6
Fundo	39,9	46,4	13,3	100	15,5	100	100
Total	300,1	299,2	100	-	100	-	-

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela A.13 - Composições granulométrica das amostras de AMN

Peneiras (mm)	Massa retida da amostra 1 (g)	Massa retida da amostra 2 (g)	Amostra 1 (%)		Amostra 2 (%)		PRA (%)
			PRI	PRA	PRI	PRA	
4,75	5,0	6,70	1,01	1,01	1,35	1,35	1,18
2,36	24,60	31,30	4,98	5,99	6,31	7,66	6,83
1,18	62,50	57,30	12,67	18,66	11,55	19,21	18,95
0,6	127,50	121,20	25,86	44,52	24,44	43,65	44,10
0,3	155,70	159,50	31,58	76,10	32,16	75,81	75,97
0,15	93,10	96,20	18,89	94,99	19,41	95,22	95,11
Fundo	24,70	23,70	5,01	100	4,78	100	100
Total	493,10	495,9	100	-	100	-	-

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela A.14 - Composições granulométrica das amostras de AGR

Peneiras (mm)	Massa retida da amostra 1 (g)	Massa retida da amostra 2 (g)	Amostra 1 (%)		Amostra 2 (%)		PRA (%)
			PRI	PRA	PRI	PRA	
12,5	15,1	17,9	2	1,4	2	1,8	1,8
9,5	62,3	63,8	6	7	6	8,2	8,2
6,3	586,2	587,8	59	60,1	59	67	67
4,75	271,7	269,4	27	84,7	27	93,9	93,9
Fundo	169,6	61	6	100	6	100	100
Total	1104,9	999,9	100	-	100	-	-

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela A.14 - Composições granulométrica das amostras de AGN

Peneiras (mm)	Massa retida da amostra 1 (g)	Massa retida da amostra 2 (g)	Amostra 1 (%)		Amostra 2 (%)		PRA (%)
			PRI	PRA	PRI	PRA	
12,5	0	0	0	0	0	0	0
9,5	70	35	7,07	7,07	3,52	3,52	5,29
6,3	575	480	58,08	65,15	48,24	51,76	58,46
4,75	220	245	22,22	87,37	24,62	76,38	81,88
Fundo	125	235	12,63	100	23,62	100	100
Total	990,0	995,0	100	-	100	-	-

Fonte: Elaborado pela autora (2024).