



Universidade Federal de Alagoas
Centro de Tecnologia
Coordenação do Curso de Engenharia Civil
Cidade Universitária – Campus A. C. Simões
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas



JUAN VICTORIO LIMA MONTENEGRO DA SILVA

***ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS E
RECICLADOS PARA A PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS***

Maceió-AL

2024

JUAN VICTORIO LIMA MONTENEGRO DA SILVA

***ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS E
RECICLADOS PARA A PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Karoline Alves de Melo Moraes

Coorientadora: Eng. Aline Raimunda dos Santos

Maceió-AL

2024

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

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale – CRB4 –661

- S586a Silva, Juan Victorio Lima Montenegro da.
Análise da composição de agregados naturais e reciclados para a produção de argamassas / Juan Victorio Lima Montenegro da Silva. - 2024.
97 f : il.
- Orientadora: Karoline Alves de Melo Moraes.
Coorientadora: Aline Raimunda dos Santos.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.
- Bibliografia: f. 93-97.
1. Composição granulométrica. 2. Agregados miúdos naturais. 3. Agregados miúdos reciclados. 4. Argamassa. I. Título.

CDU: 691-033.2

Folha de Aprovação

JUAN VICTORIO LIMA MONTENEGRO DA SILVA

Análise da Composição de Agregados Naturais e Reciclados Para a Produção de Argamassas

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em XX (dia) de XXXX (mês) de 2024.



Documento assinado digitalmente
KAROLINE ALVES DE MELO MORAES
Data: 03/04/2024 11:35:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientadora - Profa. Dra. Karoline Alves de Melo Moraes, UFAL

Coorientadora - Eng. Aline Raimunda dos Santos, FIC

Banca examinadora:



Documento assinado digitalmente
CASSIA VANESSA ALBUQUERQUE DE MELO
Data: 03/04/2024 11:51:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Cássia Vanessa Albuquerque de Melo, UFAL



Documento assinado digitalmente
JORGE LUIS OLIVEIRA SILVA
Data: 03/04/2024 12:20:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

M.Sc Jorge Luis Oliveira Silva, UFAL

Dedico este trabalho ao meu pai Victorio e à minha mãe Roseane, por todo o incentivo e encorajamento que me deram ao longo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso contou com a ajuda de diversas pessoas, dentre as quais agradeço:

À professora orientadora Karoline Melo, que me acompanhou durante todo o processo de definição e desenvolvimento deste trabalho, além de ter sido a minha tutora no Programa de Educação Tutorial - PET Engenharia Civil.

Ao Programa de Educação Tutorial - PET Engenharia Civil, por me proporcionar experiências enriquecedoras e colaborar com o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Aos membros do grupo de pesquisa, pela colaboração no processo de obtenção de dados.

Aos meus pais Victorio Montenegro e Roseane Lima, que vibram cada conquista minha como se fosse deles e viabilizaram a minha chegada até aqui. Ao meu irmão caçula Cauã que, do seu jeito, sempre me apoiou. Aos meus familiares, que sempre se mostraram dispostos a me apoiar em todas as fases da minha vida.

Aos meus amigos Emanuely, Luan, Marcela, Marília, Mylena, Nívea, Rebeca, Wellington (ordem alfabética) e a todos os amigos que fiz ao longo dessa jornada, por tornarem os dias mais leves e alegres.

RESUMO

SILVA, Juan Victorio Lima Montenegro da. **Análise granulométrica de agregados naturais e reciclados para a produção de argamassas**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

Devido ao maior consumo de materiais para atender à produção de argamassas e concretos para a construção civil, há a necessidade de uma maior obtenção de agregados miúdos para a formulação dessas misturas cimentícias. Com o entendimento da limitação da extração dos agregados naturais e sabendo-se que os resíduos de construção e demolição são materiais úteis para obtenção de agregados reciclados, é notório o maior interesse sobre o seu aproveitamento para a substituição total e/ou parcial dos agregados naturais em materiais cimentícios. O presente trabalho objetivou estudar composições de agregados miúdos naturais e reciclados para a formulação de argamassas. A metodologia do trabalho contempla a caracterização dos agregados miúdos e a análise de suas propriedades, além da realização de estudos de composições granulométricas entre dois tipos de agregados miúdos de origem natural e três provenientes do beneficiamento de resíduos de demolição. Os estudos das composições partiram das simulações das misturas de areias feitas no software Excel, no qual, tendo posse dos dados das curvas granulométricas dos cinco agregados, fez-se combinações entre agregados miúdos naturais e reciclados, de forma que a parcela de substituição do material de origem natural partisse de 10% a 90%. Com os resultados das composições de agregados obtidos numericamente, plotou-se as curvas granulométricas e observou-se as situações em que as curvas estavam situadas dentro do limite da zona ótima, definido pela NBR 7211. Destas curvas, escolheu-se duas combinações para cada tipo de composição, selecionando os casos em que há as maiores percentagens de material reciclado. Para estas combinações foram realizados ensaios de massa unitária, verificando-se, assim, o seu índice de vazios. Sabendo-se que um menor valor de índice de vazios dos agregados resulta em uma mistura de argamassa com maior resistência à compressão, utilizou-se esse critério para a definição das composições de agregados a serem utilizados para a produção de misturas. Desta forma, escolheu-se seis misturas de argamassa a serem trabalhadas e fixou-se o traço de 1 : 2 : 0,6 para todas as produções. As argamassas foram analisadas através dos ensaios de índice de consistência, massa específica no estado fresco, resistência à tração na flexão e resistência à compressão aos 28 dias. Os resultados se mantiveram dentro dos valores identificados na literatura e normatização. Para os ensaios de índice de consistência, obteve-se valores de 303 mm a 341,8 mm. Para os ensaios de massa específica no estado fresco obteve-se valores de 2192,36 kg/cm³ a 2258,14 kg/cm³. Para os ensaios de tração na flexão aos 28 dias obteve-se valores de 1,39 MPa a 1,8 MPa. Para os ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias, obteve-se valores de 19,13 MPa a 24,78 MPa. Por fim, dentre as composições estudadas, para a utilização em uma produção futura de concretos com fins estruturais, devido aos resultados dos ensaios das misturas nos estados fresco e endurecido, o presente trabalho recomenda a adoção da combinação AMNF (60%) + ARSM2 (40%).

Palavras-chave: composição granulométrica; agregados miúdos naturais; agregados miúdos reciclados; argamassas.

ABSTRACT

SILVA, Juan Victorio Lima Montenegro da. **Granulometric analysis of natural and recycled aggregates for the production of mortars**. 2024. Monograph (Graduation in Civil Engineering) – Federal University of Alagoas, Maceió.

Due to increased material consumption to meet the demand for mortar and concrete production in civil construction, there is a need for greater acquisition of fine aggregates for the formulation of these cementitious mixtures. Understanding the limitation of natural aggregate extraction and recognizing that construction and demolition waste are useful materials for obtaining recycled aggregates, there is a notable interest in their utilization to fully or partially replace natural aggregates in cementitious materials. This study aimed to investigate compositions of natural and recycled fine aggregates for mortar formulation. The methodology involved the characterization of fine aggregates and the analysis of their properties, as well as the study of particle size distributions among two types of natural fine aggregates and three derived from demolition waste beneficiation. Composition studies involved simulations of sand mixtures using Excel software, wherein, with data on the particle size distribution curves of the five aggregates, combinations of natural and recycled fine aggregates were made, with the replacement portion of natural material ranging from 10% to 90%. Using the results of the aggregate compositions obtained numerically, particle size distribution curves were plotted, and situations where the curves were within the optimal zone, as defined by NBR 7211, were observed. From these curves, two combinations were chosen for each type of composition, selecting cases with the highest percentages of recycled material. For these combinations, bulk density tests were performed to determine their void index. Recognizing that a lower void index of aggregates results in mortar mixtures with higher compressive strength, this criterion was used to define the compositions of aggregates to be used for mixture production. Consequently, six mortar mixtures were chosen for testing, with a fixed ratio of 1:2:0.6 for all productions. The mortars were analyzed through consistency index tests, fresh state density, flexural tensile strength, and compressive strength at 28 days. The results remained within the values identified in the literature and standards. For the consistency index tests, values ranging from 303 mm to 341.8 mm were obtained. For the fresh state specific mass tests, values ranging from 2192.36 kg/cm³ to 2258.14 kg/cm³ were obtained. For the 28-day flexural tensile strength tests, values ranging from 1.39 MPa to 1.8 MPa were obtained. For the 28-day axial compressive strength tests, values ranging from 19.13 MPa to 24.78 MPa were obtained. Finally, among the compositions studied, for future production of structural concrete, due to the results of the mixture tests in both fresh and hardened states, the combination AMNF (60%) + ARSM2 (40%) is recommended.

Key-words: particle size distribution; natural fine aggregates; recycled fine aggregates; mortars.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Absorção de água da cerâmica vermelha.....	24
Figura 2 - Absorção de água das partículas cimentícias.....	24
Figura 3 - Comparativo da densidade no estado fresco e o teor de ar incorporado vs teor de.....	26
substituição do agregado.....	26
Figura 4 - Composição gravimétrica do agregado miúdo reciclado.....	28
Figura 5 - Resistência à compressão axial versus relação a/c para o teor de 25%: a) idade de 3 dias; b) idade de 7 dias e c) idade de 28 dias.....	29
Figura 6- Resistência à compressão axial versus relação a/c para o teor de 50%: a) idade de 3 dias; b) idade de 7 dias e c) idade de 28 dias.....	30
Figura 7 - Processo de britagem: (a) britador de mandíbulas, (b) abertura e (c) placas.....	37
Figura 8 - Britador de mandíbulas do galpão.....	37
Figura 9 - Pré-molhagem dos agregados reciclados.....	42
Figura 10 - Distribuição granulométrica do ARPM.....	47
Figura 11 - Distribuição granulométrica do ARSM1.....	50
Figura 12 - Distribuição granulométrica do ARSM2.....	53
Figura 13 - Distribuição granulométrica do AMNF.....	56
Figura 14 - Distribuição granulométrica do AMNG.....	59
Figura 15- Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM1 com substituição de 40%.....	61
Figura 16- Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM1 com substituição de 50%.....	62
Figura 17- Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM1 com substituição de 60%.....	62
Figura 18- Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM1 com substituição de 70%.....	63
Figura 19 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARPM com substituição de 40%.....	63

Figura 20 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARPM com substituição de 50%.....	64
Figura 21 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARPM com substituição de 60%.....	64
Figura 22 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARPM com substituição de 70%.....	65
Figura 23 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM2 com substituição de 80%.....	65
Figura 24 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM2 com substituição de 90%.....	66
Figura 25 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM2 com substituição de 30%.....	67
Figura 26 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM2 com substituição de 40%.....	67
Figura 27- Curvas granulométricas composição AMNG e ARPM com substituição de 20%.....	68
Figura 28- Curvas granulométricas composição AMNG e ARPM com substituição de 30%.....	68
Figura 29- Curvas granulométricas composição AMNG e ARPM com substituição de 40%.....	69
Figura 30- Curvas granulométricas composição AMNG e ARPM com substituição de 50%.....	69
Figura 31- Curvas granulométricas composição AMNG e ARSM1 com substituição de 20%.....	70
Figura 32- Curvas granulométricas composição AMNG e ARSM1 com substituição de 30%.....	70
Figura 33- Curvas granulométricas composição AMNG e ARSM1 com substituição de 40%.....	71
Figura 34- Curvas granulométricas composição AMNG e ARSM1 com substituição de 50%.....	71
Figura 35- Curvas granulométricas composição AMNG e ARSM2 com	

substituição de 40%.....	72
Figura 36- Curvas granulométricas composição AMNG e ARSM2 com substituição de 50%.....	72
Figura 37- Curvas granulométricas composição AMNG e ARSM2 com substituição de 60%.....	73
Figura 38 - Composição x Coeficiente de Uniformidade (AMNF + ARSM1)	74
Figura 39 - Composição x Coeficiente de Uniformidade (AMNF + ARPM)..	74
Figura 40 - Composição x Coeficiente de Uniformidade (AMNF + ARSM2)	75
Figura 41 - Composição x Coeficiente de Uniformidade (AMNG + ARPM).	75
Figura 42 - Composição x Coeficiente de Uniformidade (AMNG + ARSM1)...	76
Figura 43- Composição x Coeficiente de Uniformidade (todas as composições).....	77
Figura 44- Índice de consistência x Composição (todas as composições)..	83
Figura 45- Argamassa submetida ao ensaio de Índice de Consistência.....	84
Figura 46- Massa específica x Composição (todas as composições).....	85
Figura 47- Resistência à tração na flexão média x Composição (todas as composições).....	87
Figura 48- Corpos de prova rompidos no ensaio de tração na flexão.....	88
Figura 49- Ensaio de resistência à compressão axial.....	90
Figura 50- Resistência à compressão média x Composição (todas as composições).....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência à tração na flexão e à compressão das AAMN e AAMR.....	26
Tabela 2 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	33
Tabela 3 - Relação entre as características das areias e consumo de cimento e água de.....	34
amassamento de argamassas.....	34
Tabela 4 - Análise granulométrica do ARPM.....	46
Tabela 5 - Massa unitária do ARPM no estado compactado (Método A)....	47
Tabela 6 - Massa unitária do ARPM no estado solto (Método C).....	48
Tabela 7 - Massa específica do agregado ARPM na condição seca.....	48
Tabela 8 - Análise granulométrica do ARSM1.....	49
Tabela 9 - Massa unitária do ARSM1 no estado solto (Método C).....	50
Tabela 10 - Massa unitária do ARSM1 no estado compactado (Método A)	51
Tabela 11 - Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e absorção de água do ARSM1.....	51
Tabela 12 - Análise granulométrica do ARSM2.....	52
Tabela 13 - Massa unitária do ARSM2 no estado compactado (Método A)	53
Tabela 14 - Massa unitária do ARSM2 no estado solto (Método C).....	54
Tabela 15 - Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e absorção de água do ARSM2.....	54
Tabela 16 - Análise granulométrica do AMNF.....	55
Tabela 17 - Massa unitária do AMNF no estado compactado (Método A)..	56
Tabela 18 - Massa unitária do AMNF no estado solto (Método C).....	57
Tabela 19 - Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e absorção de água do AMNF.....	57
Tabela 20 - Análise granulométrica do AMNG.....	58
Tabela 21 - Massa unitária do AMNG no estado compactado (Método A).	59
Tabela 22 - Massa unitária do AMNG no estado solto (Método C).....	60
Tabela 23 - Massa específica do agregado seco, massa específica do	

agregado saturado superfície seca e absorção de água do AMNG.....	60
Tabela 24 - Composições x Coeficientes de Uniformidade.....	73
Tabela 25 - Massas específicas, massas unitárias nos estados solto e compactado e índices de vazios das composições de agregados miúdos naturais e reciclados.....	81
Tabela 26 - Índices de Consistência das Composições de Argamassa.....	83
Tabela 27 - Massas Específicas das Composições de Argamassa.....	84
Tabela 28 - Resistência à Tração na Flexão Média aos 28 dias das Composições de Argamassa.....	86
Tabela 29 - Resistência à Compressão Axial Média aos 29 dias das Composições de Argamassa.....	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Agregados miúdos utilizados no estudo.....	36
Quadro 2 - Composições seleccionadas para os ensaios de massa unitária	79
Quadro 3 - Composições de agregados miúdos naturais e reciclados a serem utilizados nas produções de argamassas.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AMN	Agregado Miúdo Natural
AMNF	Agregado Miúdo Natural Fino
AMNG	Agregado Miúdo Natural Grosso
AR	Agregado Reciclado
ARM	Agregado Reciclado Misto
ARP	Agregado Reciclado Primário
ARPM	Agregado Reciclado Primário Miúdo
ARSM1	Agregado Reciclado Secundário Miúdo 1
ARSM2	Agregado Reciclado Secundário Miúdo 2
a/c	Relação Água Cimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
CU	Coefficiente de Uniformidade
LEMA	Laboratório de Engenharia de Materiais
RCC	Resíduos de Construção Civil
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Considerações iniciais.....	18
1.2 Objetivos.....	19
1.3 Justificativa.....	19
1.4 Delimitação do trabalho.....	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1 Resíduos de construção e demolição.....	21
2.2 Agregado miúdo.....	22
2.2.1 Agregado miúdo reciclado.....	22
2.3 Argamassas e concretos com agregados reciclados.....	25
2.5 Análise granulométrica.....	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1 Revisão bibliográfica.....	35
3.2 Materiais utilizados.....	35
3.3 Beneficiamento dos resíduos.....	36
3.4 Caracterização dos agregados miúdos.....	38
3.5 Análise das curvas granulométricas dos agregados miúdos.....	38
3.6 Massa unitária das composições de agregados miúdos naturais e reciclados.....	39
3.7 Massa específica das composições de agregados miúdos naturais e reciclados.....	40
3.8 Índice de vazios das composições de agregados miúdos naturais e reciclados.....	40
3.8 Definição das composições de agregados miúdos naturais e reciclados a serem utilizados para a produção de argamassas.....	41
3.9 Definição dos traços de argamassa.....	41
3.9.1 Produção das argamassas.....	42
3.9.1.1 Pré-molhagem da fração reciclada das composições de agregados	

miúdos.....	42
3.9.1.2 Procedimento de mistura.....	43
3.10 Ensaio no estado fresco.....	43
3.11 Ensaio no estado endurecido.....	44
3.12 Análise dos resultados.....	45
4. RESULTADOS.....	46
4.1 Caracterização dos agregados.....	46
4.1.1 ARPM - Agregado Reciclado Primário Miúdo.....	46
4.1.1.1 Granulometria.....	46
4.1.1.2 Massa Unitária.....	47
4.1.1.3 Massa específica.....	48
4.1.2 ARSM1 - Agregado Reciclado Secundário Miúdo 1.....	48
4.1.2.1 Granulometria.....	48
4.1.2.2 Massa Unitária.....	50
4.1.2.3 Massa específica.....	51
4.1.3 ARSM2 - Agregado Reciclado Secundário Miúdo 2.....	51
4.1.3.1 Granulometria.....	51
4.1.3.2 Massa Unitária.....	53
4.1.3.3 Massa específica.....	54
4.1.4 AMNF - Agregado Miúdo Natural Fino.....	54
4.1.4.1 Granulometria.....	54
4.1.4.2 Massa Unitária.....	56
4.1.4.3 Massa específica.....	57
4.1.5 AMNG - Agregado Miúdo Natural Grosso.....	57
4.1.5.1 Granulometria.....	57
4.1.5.2 Massa Unitária.....	59
4.1.5.3 Massa específica.....	60
4.2 Composição granulométrica.....	61
4.2.1 Adequação à NBR 7211 (2022).....	61

4.2.1.1 Composições AMNF + ARSM1.....	61
4.2.1.2 Composições AMNF + ARPLM.....	63
4.2.1.3 Composições AMNF + ARSM2.....	65
4.2.1.4 Composições AMNG + ARPM.....	67
4.2.1.5 Composições AMNG + ARSM1.....	69
4.2.1.6 Composições AMNG + ARSM2.....	71
4.2.2 Coeficiente de uniformidade.....	73
4.2.3 Definição das composições utilizadas.....	78
4.3 Massa específica, massa unitária e índice de vazios das composições de agregados miúdos naturais e reciclados.....	80
4.4 Definição das composições de agregados miúdos naturais e reciclados utilizadas para a produção de argamassas.....	82
4.5 Ensaio no estado fresco.....	82
4.6 Ensaio no estado endurecido.....	86
4.6.1 Resistência à tração na flexão aos 28 dias.....	86
4.6.2 Resistência à compressão axial aos 28 dias.....	88
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
5.1 Sugestões de trabalhos futuros.....	93
REFERÊNCIAS.....	95

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Sabe-se que a argamassa é amplamente utilizada na indústria da construção civil para diversas finalidades, como a união de elementos de blocos de alvenaria, assentamento de revestimentos, rejunte, impermeabilização, reparos e restaurações etc. De acordo com a norma NBR 13529 (ABNT, 2013), a argamassa é uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento. A proporção e a composição da mistura podem variar de acordo com a sua finalidade, resultando em argamassas com diferentes propriedades.

Acerca dos agregados miúdos, que são o esqueleto granular das argamassas, tem-se que suas propriedades interferem diretamente no produto final da mistura. Assim, faz-se necessário um rígido controle de qualidade para a sua utilização na construção civil, através da realização de ensaios normalizados que definem parâmetros de granulometria, dimensão máxima característica, massa unitária, coeficiente de inchamento etc. Desta forma, tendo a caracterização do material, pode-se avaliar se ele é adequado para a finalidade desejada, ou se será necessário a implantação de adições minerais e/ou aditivos químicos à mistura.

Além disso, tem-se que os agregados miúdos podem ser oriundos de diversas fontes, sendo eles de areias de origem natural, resultantes de leitos de rios e cavas, ou provenientes do beneficiamento de resíduos de construção e demolição (RCD), chamados de agregados reciclados. Para o caso dos agregados de origem natural, tem-se que, para a construção civil, costuma-se adotar os materiais mais abundantes da região, desde que se adequem à finalidade requerida, uma vez que o transporte dessa matéria prima impacta diretamente o custo da obra.

Um fato importante que se tem observado com relação aos agregados miúdos naturais é a escassez de material de boa qualidade, ou seja, que atenda aos requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2022) para uso em argamassas e concretos.

Por outro lado, sabe-se que a indústria da construção civil é uma das maiores produtoras de resíduos sólidos. Tem-se que construções e demolições são responsáveis por aproximadamente 50% do volume total de resíduos produzidos nos grandes centros urbanos (Salles *et al.*, 2021). Dessa forma, visando reduzir os impactos ambientais e os custos de produção de argamassas, bem como suprir a carência de matéria prima, uma alternativa interessante é a utilização dos agregados reciclados provenientes do beneficiamento destes resíduos.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal o estudo de diferentes composições entre agregados reciclados miúdos mistos, oriundos do beneficiamento de resíduos de demolição de edificações da cidade de Maceió-AL, e agregados miúdos de origem natural para a produção de argamassas que vão dar origem a concretos estruturais.

Como objetivo secundário, busca-se a definição de composições ideais entre agregados miúdos naturais e reciclados para a produção de argamassas e concretos.

1.3 Justificativa

Em 2021, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2021), os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) representaram, aproximadamente, 57% do peso total de todos os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU's) do país, totalizando cerca de 46,9 milhões de toneladas. Ou seja, em 2021 mais da metade dos resíduos sólidos urbanos foi decorrente da construção civil.

Devido ao maior consumo de materiais para atender a produção de argamassas para a construção civil, há a necessidade de uma maior obtenção de agregados miúdos para a formulação dessas misturas cimentícias. Com o entendimento da limitação da extração dos agregados naturais, e sabendo-se que os resíduos de construção e demolição são materiais úteis para obtenção de agregados reciclados, é notório o maior interesse sobre o seu

aproveitamento para a substituição total e/ou parcial dos agregados naturais em materiais cimentícios. De acordo com Angulo e Figueiredo (2011), praticamente todo o RCD é passível de ser reciclado, após a separação de materiais indesejáveis ao processo de reciclagem como madeira, plástico, aço e outros.

Deste modo, sabendo que a parcela Classe A dos RCD pode ser reutilizada como agregado para a construção civil, e tendo em vista a alta produção de resíduos dentro dessa indústria, fica evidente a necessidade do estudos desses materiais para o seu reaproveitamento como substituição parcial dos agregados naturais utilizados em misturas cimentícias.

O Campus A.C. Simões, da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), possui um laboratório destinado à pesquisa e desenvolvimento tecnológico de materiais de construção, o LEMA (Laboratório de Estruturas e Materiais). Atualmente, o laboratório possui parceria com uma empresa privada para a realização da reciclagem de RCD, oriundos de demolições de edificações das edificações das áreas desocupadas devido ao afundamento, decorrente da atividade extrativa excessiva de sal-gema, dos bairros Pinheiro, Mutange, Bebedouro e Bom Parto, em Maceió-AL, como agregados reciclados para a sua utilização em misturas de argamassas e concretos. Esse trabalho de conclusão de curso está inserido no projeto em questão.

Desta forma, com o presente trabalho é possível mostrar a viabilidade da utilização de agregados reciclados (AR) miúdos mistos como substituição parcial em misturas cimentícias, ampliando a possibilidade de uso dos resíduos de demolição na construção civil.

1.4 Delimitação do trabalho

Foram utilizados dois agregados miúdos naturais e três tipos de agregados reciclados miúdos mistos, provenientes do beneficiamento de resíduos de demolição. Não foram utilizados aditivos químicos e adições minerais nas misturas cimentícias do estudo. Os ensaios realizados para a caracterização dos agregados e para as misturas de argamassa seguiram os procedimentos descritos em normas brasileiras.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Resíduos de construção e demolição

A resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (Brasil, 2002) estabeleceu critérios, diretrizes e métodos de gerenciamento dos Resíduos de Construção Civil (RCC) no Brasil, como também definiu esses materiais como:

Resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (Brasil, 2002).

Além disso, a resolução 469 do CONAMA (Brasil, 2015) classificou os RCC em quatro classes de acordo com a sua composição e origem, sendo:

- Classe A: os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos, argamassa e concreto; de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto produzidas nos canteiros de obras;
- Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, mas sem as características necessárias para serem utilizados como agregado, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
- Classe C: resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;
- Classe D: resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados

oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Segundo Sipres (2019), existe outro tipo de classificação, que consiste na divisão do RCD em outros dois grupos classificados de acordo com sua coloração: cinza e vermelho. De acordo com Ângulo (2005), os resíduos de cor cinza contém produtos cimentícios, que são utilizados em calçadas, blocos de concreto e em mobiliários urbanos à base de cimento. Já o grupo de coloração avermelhada considera os materiais de construção de natureza cerâmica e podem ser empregados em atividades de pavimentação.

2.2 Agregado miúdo

De acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2022), define-se agregado miúdo como sendo grãos passantes pela peneira com abertura de malha 4,75 mm e retidos na peneira de malha 150 μm . Ademais, para Bauer (2008), pode-se classificar as areias por faixas granulométricas, sendo: areia grossa, aquela que compreende uma granulometria de 2,4 a 4,8 mm; areia média, de 0,6 a 2,4 mm e areia fina de 0,15 a 0,6 mm.

2.2.1 Agregado miúdo reciclado

Os agregados reciclados são obtidos a partir do tratamento de resíduos de construção, demolição ou até mesmo de outros setores industriais, que seriam, de outra forma, descartados em aterros sanitários. O processo de reciclagem de resíduos de construção e demolição envolve a seleção, triagem e trituração dos materiais coletados, para transformá-los em agregados com as características adequadas para o uso na construção civil (Chaves *et al.*, 2006). Os agregados reciclados podem ser utilizados em diversas aplicações, contribuindo para a sustentabilidade do setor da construção e reduzindo a demanda por agregados naturais, que são recursos não renováveis.

Visando a aplicação do RCD na indústria da Construção Civil, deve-se ter em mente a finalidade desejada para a realização do beneficiamento dos resíduos, visto que os agregados reciclados possuem propriedades diferentes.

Assim, deve-se buscar a compatibilidade do material com o produto desejado, através do estudo das suas características.

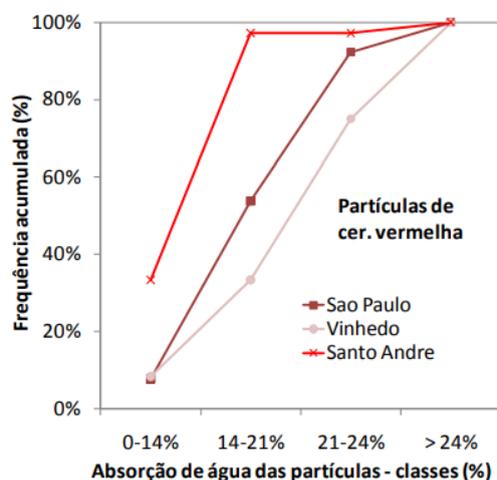
Ademais, tem-se que os resíduos gerados pela construção e demolição de edificações são específicos de cada obra e possuem diferenças relacionadas à fase da construção. Para a viabilidade técnica decorrente da utilização de agregados provenientes de RCD em argamassas e concretos, alguns estudos ainda precisam ser desenvolvidos, visto que esses agregados apresentam características singulares, tais como: composição, definida a partir da matéria prima do RCD (materiais cerâmicos, rochas naturais e artificiais, etc.); o processo de britagem, que define a granulometria do agregado reciclado, assim como o seu teor de finos; elevada porosidade e absorção; forma lamelar e textura mais áspera; e massa específica, que em média apresenta valores 14% e 9% menores, nas condições seca e saturado superfície seca, respectivamente, quando comparados aos agregados convencionais (Gómez-Sóberon, 2002).

Em função disso, para a produção de materiais cimentícios utilizando o agregado reciclado (AR), faz-se necessária a definição de procedimentos específicos, visto que a elevada porosidade do AR interfere diretamente na quantidade de água necessária nas misturas, influenciando, assim, as suas propriedades nos estados fresco e endurecido (Malta; Silva; Gonçalves, 2013). Nesse sentido, visando a viabilização da aplicação do agregado reciclado na produção de misturas cimentícias, pesquisadores utilizam o procedimento da compensação, parcial ou integral, da taxa de absorção de água dos agregados reciclados. Malta *et al.* (2013) constataram que estudos, tais como os elaborados por Leite (2001), Vieira (2003) e Brito e Evangelista (2010), compensam metade da água de absorção dos agregados reciclados. Além disso, pesquisadores como Carrijo (2005) e Ângulo (2005), fazem a compensação de até 70% da água de absorção.

Alguns estudos, como os conduzidos por Ângulo e Figueiredo (2011), apontam que a taxa de absorção de água dos agregados reciclados é diretamente influenciada pela composição dos resíduos utilizados em sua fabricação. Nesse sentido, a absorção de água da cerâmica vermelha é elevada, podendo chegar a 24% (Figura 1). Para o caso das partículas cimentícias, pode-se alcançar teores de absorção de até 15% (Figura 2).

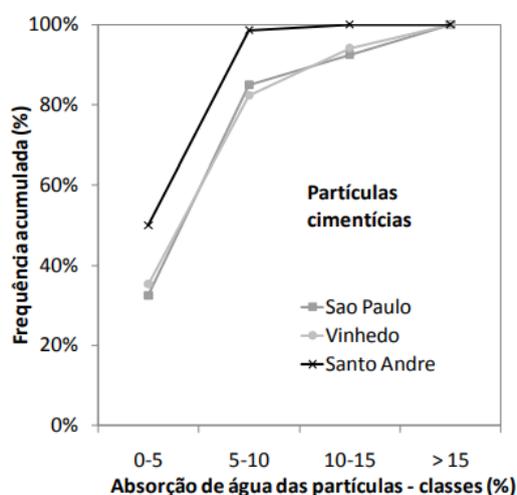
Conseqüentemente, a porosidade do agregado de RCD é mais fortemente influenciada pela quantidade de cerâmica vermelha presente no material (Angulo; Figueiredo, 2011).

Figura 1 - Absorção de água da cerâmica vermelha



Fonte: Angulo e Figueiredo (2011)

Figura 2 - Absorção de água das partículas cimentícias



Fonte: Angulo e Figueiredo (2011)

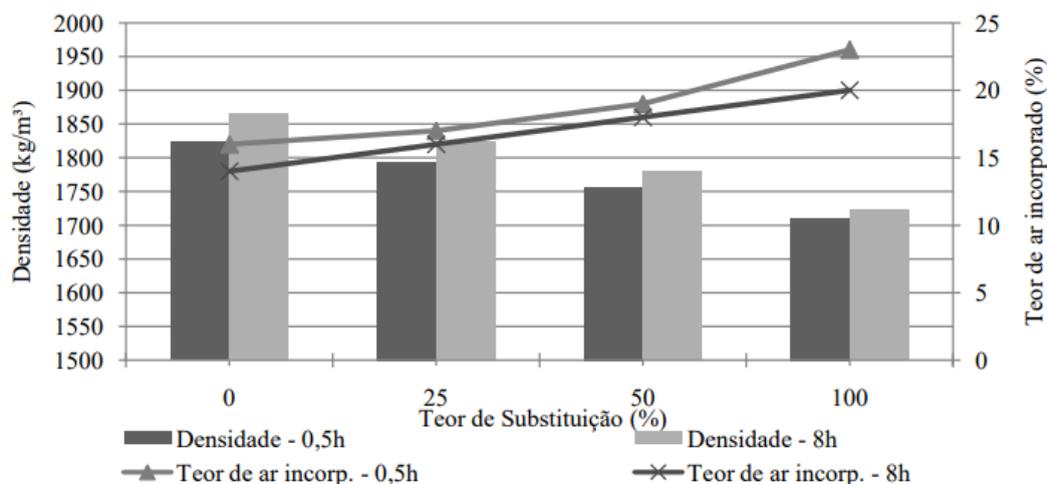
Por fim, tem-se que a caracterização como meio de controle de qualidade de dos agregados reciclados, com foco nas propriedades relevantes ao desempenho deles, eleva a confiabilidade na utilização de agregados provenientes de RCD, viabilizando o seu mercado (Ângulo, 2005). Para isso, Ulsen (2011) aborda algumas propriedades fundamentais na caracterização desses materiais, sendo elas: a distribuição granulométrica das partículas; a

morfologia das partículas; a composição química; o teor de pasta de cimento; as propriedades microestruturais; a massa específica aparente e a porosidade.

2.3 Argamassas e concretos com agregados reciclados

Tem-se diversos estudos acerca de produções de argamassas e concretos com agregados reciclados, provenientes de RCD, como o realizado por Santana (2020), que estudou 4 (quatro) diferentes composições de argamassas de revestimento: uma argamassa com agregado miúdo natural (areia lavada de leito de rio) e outras três argamassas com teores de substituição em massa de 25%, 50% e 100% de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado. O autor estudou a influência das composições das misturas tanto no estado fresco através dos ensaios: massa específica; índice de consistência e penetração de cone, como no estado endurecido, através dos ensaios: densidade no estado endurecido; resistência à tração na flexão e à compressão; absorção de água por capilaridade e módulo de elasticidade dinâmico. No estudo, por meio das avaliações realizadas, concluiu-se que as argamassas com agregados miúdos naturais (AMN) e agregados miúdos reciclados (AMR) apresentaram comportamento semelhante no estado fresco, para o índice de consistência e penetração de cone. No entanto, observou-se que as argamassas se diferenciaram quanto à massa específica, em que, com o aumento do teor do uso de agregados reciclados, ocorreu a redução da densidade e aumento do teor de ar incorporado das misturas, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Comparativo da densidade no estado fresco e o teor de ar incorporado vs teor de substituição do agregado



Fonte: Santana (2020)

Ademais, ainda no estudo de Santana (2020), observou-se a influência do aumento da substituição dos agregados naturais por reciclados, sobretudo nos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão. Para essas propriedades do estado endurecido, teve-se uma grande redução dos valores das resistências com o aumento do teor do material reciclado, como exposto na Tabela 1.

Tabela 1 - Resistência à tração na flexão e à compressão das AAMN e AAMR

ARGAMASSA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)
AAMN	2,05	6,81
AAMR25%	1,92	5,84
AAMR50%	1,67	5,11
AAMR100%	1,21	3,61

Fonte: Santana (2020) (Adaptado)

Onde:

AAMN - Argamassa com Agregado Miúdo Natural;
 AAMR25% - Argamassa com Agregado Reciclado Miúdo com substituição de 25%;

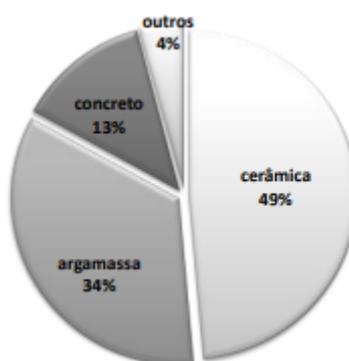
AARM50% - Argamassa com Agregado Reciclado Miúdo com substituição de 50%;
AARM100% - Argamassa com Agregado Reciclado Miúdo com substituição de 100%.

Corroborando com o que foi exposto por Santana (2020), Ulsen (2011) também atestou que devido ao maior consumo de água nas argamassas com AR, as massas específicas e as propriedades mecânicas no estado endurecido são significativamente menores quando comparadas às argamassas com areias naturais. As resistências à compressão e à tração na flexão variam de acordo com a porosidade da mistura.

Acerca da relação água/cimento (a/c) nas misturas para argamassas, tem-se o estudo de Gonçalves, *et al.*, (2007), em que foi feita a avaliação do uso de agregados reciclados cerâmicos para a confecção de argamassas. Os autores verificaram que, para uma relação a/c de 0,5, a trabalhabilidade entre as argamassas com agregados reciclados e as argamassas com agregados naturais foi similar. Por outro lado, os autores observaram uma redução da trabalhabilidade das argamassas com agregado reciclado, para uma relação a/c de 0,4.

Tendo em vista a alta porosidade dos agregados reciclados, alguns estudos abordaram sobre o procedimento de pré-molhagem, além da alteração da relação água/cimento (a/c) visando contornar esses problemas. Nesse sentido, a pesquisa realizada por Malta *et al.* (2014) trabalhou com a pré-saturação do AR, em substituições de 25% e 50% do AN, visando melhorar as propriedades das argamassas produzidas nos estados fresco e endurecido. Neste estudo, utilizou-se o agregado miúdo reciclado com a composição gravimétrica destacada na Figura 4.

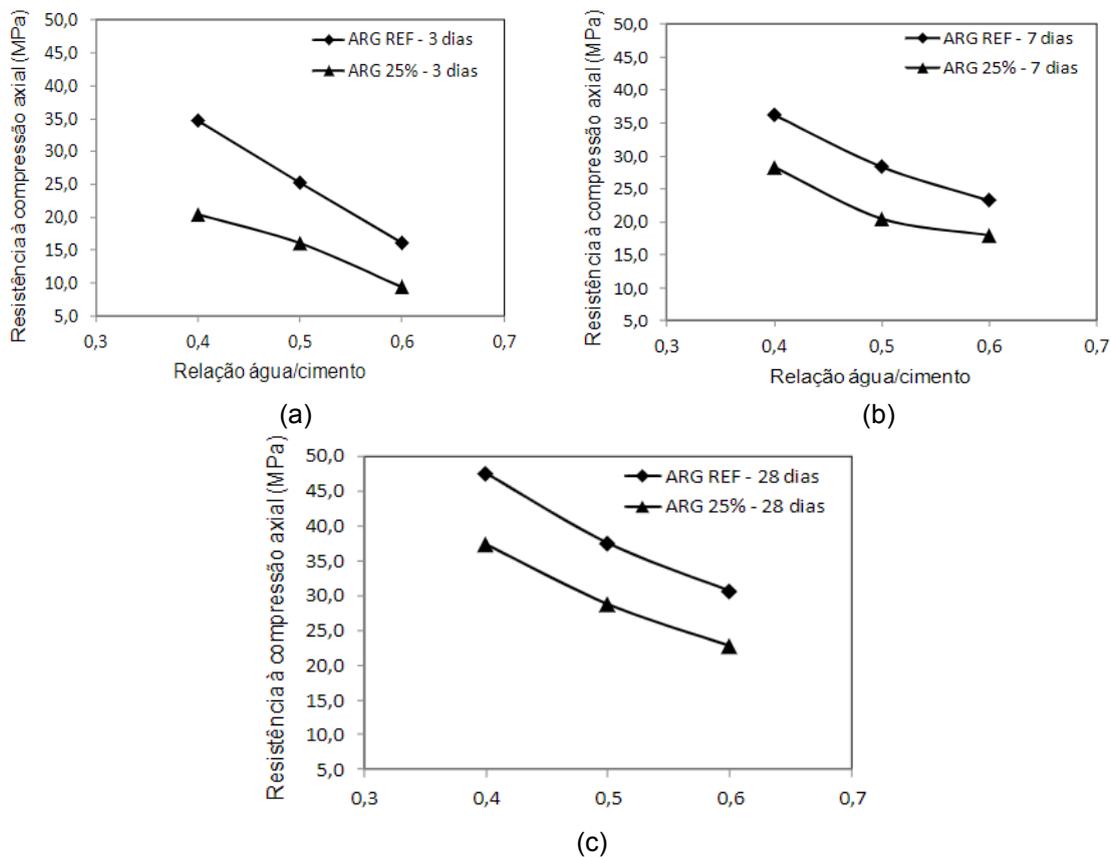
Figura 4 - Composição gravimétrica do agregado miúdo reciclado



Fonte: Malta *et al.* (2014)

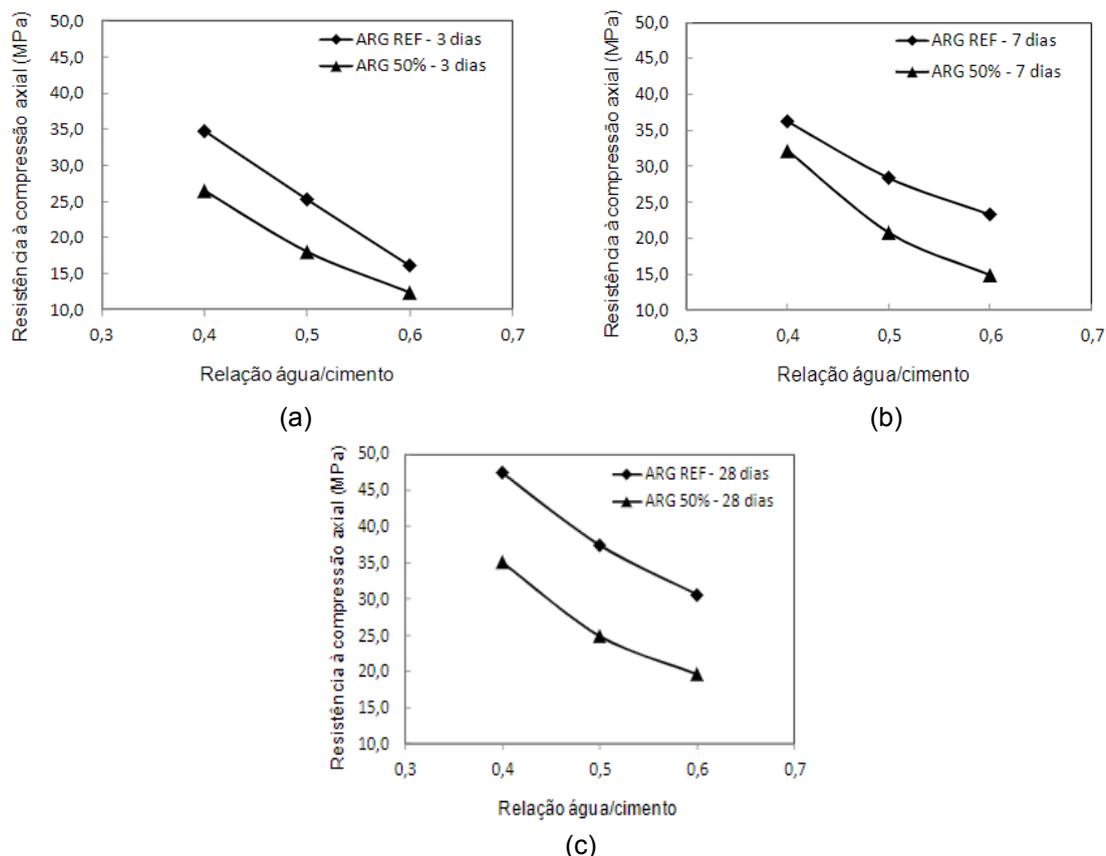
Após a realização dos ensaios, constatou-se que a pré-saturação influencia as propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido. A presença do agregado miúdo reciclado promoveu redução na resistência à compressão das argamassas em todas as idades, independentemente do tratamento dado ao agregado reciclado (pré saturação ou não), para ambos os teores de substituição. Verifica-se que a pré-saturação promove redução mais significativa na resistência à compressão das misturas, independentemente do teor, em todas as idades e para todas as relações a/c, como mostrado na Figura 5 e 6.

Figura 5 - Resistência à compressão axial versus relação a/c para o teor de 25%: a) idade de 3 dias; b) idade de 7 dias e c) idade de 28 dias



Fonte: Malta (2012)

Figura 6- Resistência à compressão axial versus relação a/c para o teor de 50%: a) idade de 3 dias; b) idade de 7 dias e c) idade de 28 dias



Fonte: Malta (2012)

Para o caso dos concretos com agregados reciclados, tem-se, na literatura, diversos estudos de substituição tanto dos agregados miúdos quanto dos agregados graúdos naturais pelos reciclados.

Com relação às propriedades do concreto no estado fresco, a introdução de AR ocasiona a redução de trabalhabilidade em comparação aos concretos de agregados convencionais, como o que ocorreu no estudo conduzido por Frotte *et al.* (2017), em que houve a realização de dosagens com substituições parciais de agregados miúdos naturais por agregados reciclados, obtendo-se a diminuição de trabalhabilidade da mistura ao se aumentar o percentual de substituição. Para a mistura de concreto que não utilizou o material reciclado, o abatimento obtido foi de 60 mm, enquanto com as substituições de 25% (C25%) e 50% (C50%), os valores de abatimento foram de 50 mm e 35 mm, respectivamente. A compensação de água que será absorvida pelo agregado reciclado pode ser adicionada na água de amassamento ou na pré-saturação

dos agregados reciclados para diminuir a perda de plasticidade em concretos frescos (Gerin; Sales; Nardin, 2019; Leite, 2001).

No que se diz respeito à massa específica do concreto no estado fresco, tem-se que as misturas que incorporam agregados reciclados possuem a tendência de apresentar uma redução nos valores proporcional ao teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados. Isto é devido aos valores de massa específica dos agregados reciclados, compostos por materiais bastante variáveis e grande presença de pulverulentos, serem menores em relação aos agregados convencionais (Rodrigues; Fucale, 2014; Cabral et al., 2007; Vieira; Dal Molin; Lima, 2004).

Com relação às propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido, Chen *et al.* (2003) desenvolveram um estudo de concretos com agregados reciclados de materiais cerâmicos e concretos, utilizando os AR em lotes separados de agregados graúdos reciclados, lavados e não lavados. A partir da realização dos ensaios de compressão axial e tração na flexão, teve-se que os espécimes produzidos com os agregados reciclados lavados obtiveram cerca de 90% das resistências do concreto produzido com agregados naturais. No entanto, as misturas que utilizaram agregados reciclados não lavados não atingiram 75% da resistência do concreto de referência.

2.5 Análise granulométrica

A granulometria do agregado miúdo influencia diretamente no desempenho da argamassa. Desta forma, tem-se que, no estado fresco, essa propriedade interfere na trabalhabilidade e no consumo de água e aglomerantes da mistura. Além disso, no estado endurecido, exerce influência na fissuração, rugosidade, permeabilidade e resistência mecânica (Angelim *et al.*, 2003).

A distribuição granulométrica dos agregados influencia diretamente na reologia do sistema, e conseqüentemente no desempenho da mistura. Distribuições granulométricas mais amplas viabilizam o preenchimento de vazios por partículas menores, aumentando a densidade de empacotamento e,

assim, diminuindo a quantidade de água necessária para o preenchimento dos vazios (Pileggi, 2001).

Além disso, constata-se que uma maior continuidade na distribuição granulométrica do agregado miúdo resulta em maiores resistências mecânicas, devido à melhoria no empacotamento da mistura, que pode ser demonstrado pelo aumento do valor da massa unitária. Carneiro (1999), ao estudar as resistências mecânicas das argamassas, apontou tanto a granulometria do agregado miúdo quanto a porosidade da argamassa como características que influenciam nesta propriedade. Corroborando com Carneiro (1999), Neville (1997), aponta que as principais propriedades afetadas pela granulometria dos agregados são: o volume relativo ocupado pelas partículas; a área superficial dos agregados; a trabalhabilidade da mistura e a tendência à segregação. O esqueleto granular que apresenta uma granulometria descontínua tende a resultar em uma maior segregação.

Deve-se buscar composições granulométricas de agregados que apresentam maior continuidade. Metha e Monteiro (2008) definem uma boa composição granulométrica como sendo aquela que proporciona melhor trabalhabilidade no estado fresco, assim como maiores resistências à tração na flexão e à compressão no estado endurecido para as misturas de argamassa e concreto.

Os métodos de determinação granulométrica de agregados miúdos para produção de argamassas e concretos são normalizados pelas NBR 17054 (ABNT, 2022) e pela NBR 7211 (ABNT, 2022), que determina os intervalos de classificação dos agregados miúdos, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 μm	15	35	55	70
300 μm	50	65	85	95
150 μm	85	90	95	100

NOTAS

- 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
- 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
- 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: ABNT (2022)

Além disso, para a avaliação de curvas de distribuição granulométricas de agregados miúdos utilizados em argamassas, na Mecânica dos solos, encontra-se o conceito de coeficiente de uniformidade (CU) de uma distribuição granulométrica. Este coeficiente é calculado a partir do quociente dos diâmetros das peneiras correspondentes a 60% e 10% de material passante nas peneiras. A mecânica dos solos considera que: para $CU < 5$ a areia é muito uniforme; para $5 < CU < 15$ a areia possui uniformidade média e para $CU > 15$ a areia é menos uniforme (Caputo, 1983).

Sabe-se que uma areia com granulometria muito uniforme, independentemente da forma dos grãos, pode prejudicar a trabalhabilidade da argamassa. Isso leva a um endurecimento subsequente, impedindo o deslizamento dos grãos de areia entre si, o que resulta em uma maior demanda de pasta. Portanto, é importante estudar uma uniformidade ideal na composição granulométrica da areia (Furnas, 1931).

Por fim, segundo Carneiro (1999), o coeficiente de uniformidade por si só não é adequado para determinar a granulometria de uma areia, já que duas areias com composições granulométricas distintas podem apresentar o mesmo CU. Na verdade, esse coeficiente é mais apropriado para ser utilizado como um parâmetro de análise da influência da areia nas propriedades das

argamassas quando é correlacionado a uma curva de distribuição granulométrica.

A fim de mostrar a influência da distribuição granulométrica, Carneiro (1999) fez uma análise baseada do trabalho de Tristão (1995), estudou a relação entre as características de sete areias, com as quais foram compostas argamassas mantendo-se constante a relação aglomerante : agregado (1 : 3) e a consistência padrão de 265 ± 15 mm, que está evidenciada na Tabela 3.

Tabela 3 - Relação entre as características das areias e consumo de cimento e água de amassamento de argamassas

ESPECIFICAÇÃO	TRAÇOS EM MASSA SECA (CIM : CAL : AREIA)	COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE DA AREIA	CONSUMO DE ÁGUA/MATERIAIS SECOS (MASSA)
BSI 2	1:0,644:6,878	2,8	0,24
BSI 1	1:0,644:7,384	2,9	0,206
ASTM	1:0,644:7,636	4	0,205
ABNT	1:0,644:7,026	4,2	0,22
IPT	1:0,644:8,349	7,68	0,182
DTU	1:0,644:8,484	12,2	0,176
FÜLLER	1:0,644:8,897	18,92	0,14

Fonte: (Tristão, 1995)

Carneiro (1999), observou que, de acordo com a Tabela 3 o aumento do CU está indicando melhor continuidade da distribuição granulométrica dos agregados miúdos e promovendo argamassas com menor consumo de aglomerante e redução no consumo de água.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados: os materiais utilizados no estudo; os procedimentos metodológicos para a caracterização dos agregados miúdos naturais e reciclados utilizados nas composições; os critérios utilizados para a seleção das misturas de agregados; os métodos para caracterização das composições de areias; os critérios para seleção das misturas utilizadas para a produção das argamassas; os métodos de caracterização das argamassas produzidas.

3.1 Revisão bibliográfica

O presente trabalho foi iniciado com uma revisão bibliográfica acerca das principais propriedades e procedimentos para a caracterização de agregados miúdos, assim como estudos de composições granulométricas visando a produção de argamassas, utilizando as palavras chave: agregado reciclado; agregado miúdo reciclado; agregado reciclado para argamassa; agregado reciclado para concreto; composição de agregados; resíduo de construção e demolição; RCD. As buscas para o estudo foram realizadas através de bibliotecas virtuais *Google Scholar*, *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e normas técnicas nacionais. Ademais, tem-se como enfoque pesquisas científicas publicadas por autores, internacionais e nacionais, que atuam na grande área de materiais de construção.

3.2 Materiais utilizados

Para o presente trabalho, foram utilizados o cimento portland de alta resistência inicial (CP V – ARI), por ser o cimento utilizado para as produções de concreto dentro do grupo de pesquisa, e cinco tipos de agregados miúdos, dois de origem natural e três reciclados. Os agregados naturais analisados, areias fina e média, foram adquiridos no mercado local. Os agregados reciclados mistos estudados são provenientes do beneficiamento de resíduos de demolição de edificações da cidade de Maceió (AL).

Os materiais citados com a nomenclatura adotada no presente trabalho estão destacados no Quadro 1.

Quadro 1 - Agregados miúdos utilizados no estudo

Agregados Miúdos	
Naturais	Reciclados
	ARPM
AMNF	ARSM1
AMNG	ARSM2

Fonte: Autor (2023)

Onde:

AMNF - Agregado Miúdo Natural Fino;

AMNG - Agregado Miúdo Natural Grosso;

ARPM - Agregado Reciclado Primário Misto;

ARSM1 - Agregado Reciclado Secundário Misto 1;

ARSM2 - Agregado Reciclado Secundário Misto 2.

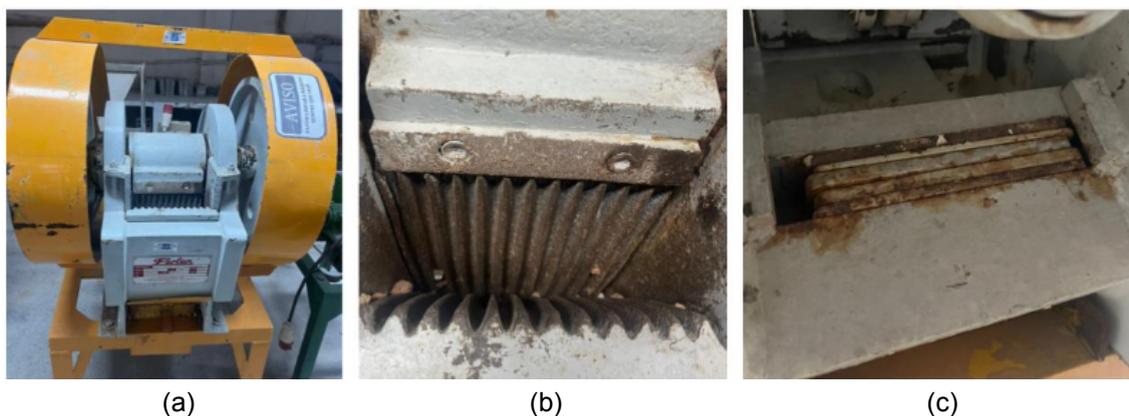
3.3 Beneficiamento dos resíduos

Inicialmente, o material obtido através da britagem primária realizada no canteiro da empresa parceira do projeto, passou por um processo de triagem para separação dos resíduos que não dão origem a agregados reciclados, como: madeira, metal, papel e plástico. O material resultante foi chamado de Agregado Reciclado Primário – ARP e prosseguiu para etapas de peneiramento de modo a separar as frações miúda - ARPM (abaixo de 4,75 mm) e graúda - ARPG (acima de 4,75 mm e abaixo de 25 mm).

Após a caracterização, percebeu-se que a fração miúda contém uma quantidade significativa de material argiloso, devido à sua coloração, demonstrando ser de baixa qualidade para algumas aplicações. Em função disso, realizou-se duas novas britagens com o ARGP. Os dois processos de britagem aconteceram em britadores de mandíbulas de diferentes portes.

Um dos britadores de mandíbulas está apresentado na Figura 7a. Esse britador possui regulagem de abertura, possibilitando adequação da curva granulométrica do material. A abertura é determinada pela colocação de placas de aço, conforme a Figura 7c. Quanto mais placas são colocadas, menor a abertura das mandíbulas, indicada na Figura 7b. O agregado reciclado obtido nesse processo está denominado por ARSM1.

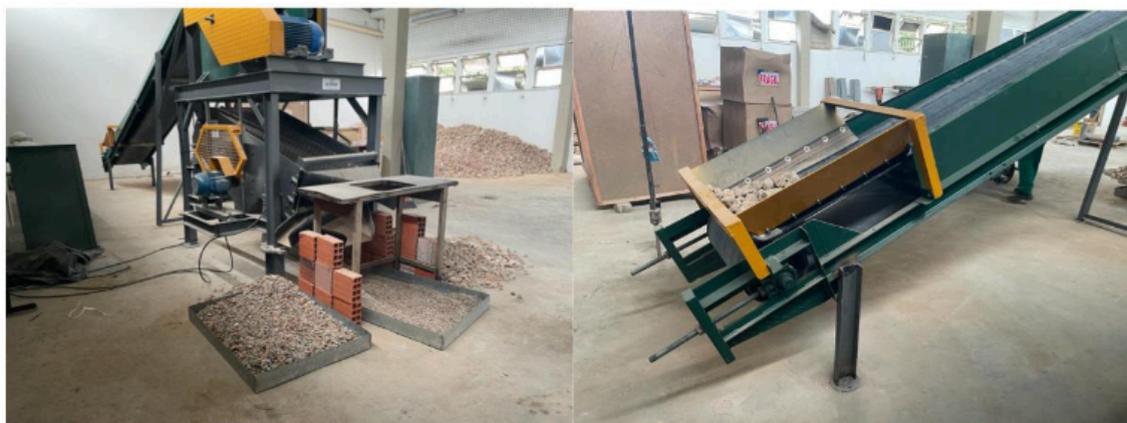
Figura 7 - Processo de britagem: (a) britador de mandíbulas, (b) abertura e (c) placas



Fonte: Relatório (2023a)

O segundo britador de mandíbulas usado está apresentado na Figura 8. Este equipamento é de grande porte e está acoplado a um agitador vibratório com três peneiras cujas aberturas são de 6 mm, 12 mm e 24 mm. O agregado gerado nesse equipamento é chamado de ARSM2.

Figura 8 - Britador de mandíbulas do galpão



Fonte: Relatório (2023b)

Dessa forma, estão sendo estudados três agregados reciclados, um proveniente de britagem primária e peneiramento e outros dois provenientes da britagem secundária realizada em dos dois diferentes britadores de mandíbulas. Foram verificadas particularidades na granulometria do material, em função do processo de britagem.

3.4 Caracterização dos agregados miúdos

Para a caracterização dos agregados miúdos naturais e reciclados, foi realizada a amostragem, seguindo os procedimentos descritos na norma NBR 16915 (ABNT, 2021), e os seguintes ensaios:

1 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. NBR 17054 (ABNT, 2022);

2 - Agregados - Determinação da massa unitária. NBR 16972 (ABNT, 2021);

3 - Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. NBR 16916 (ABNT, 2021);

3.5 Análise das curvas granulométricas dos agregados miúdos

Tendo posse dos resultados da composição granulométrica dos agregados miúdos, foram elaboradas as curvas granulométricas do material, para a realização da análise e determinação das melhores composições entre os agregados natural e reciclado, para a produção de argamassas.

Nessa etapa do trabalho, foi utilizado o *software* Excel para realizar combinações granulométricas com os dados obtidos através da caracterização das areias. Dessa forma, para isso, fez-se combinações entre agregados miúdos naturais e reciclados, de forma que a parcela de substituição do material de origem natural partisse de 10% a 90%. Esse procedimento foi aplicado para todos os materiais estudados (duas areias naturais e três recicladas), de modo que obteve-se seis tipos de combinações, contando com nove percentagens de substituições em cada, resultando assim em 54 diferentes simulações.

Tendo posse dos resultados das composições entre os agregados realizadas no software, plotou-se as curvas granulométricas das composições e verificou-se onde elas se encaixavam dentro dos limites das zonas utilizável e ótima definidas pela NBR 7211 (ABNT, 2022). Além disso, calculou-se os coeficientes de uniformidade (CU) e os módulos de finura (MF) para as 54 combinações.

A partir das curvas granulométricas encontradas, fez-se o estudo para a definição das composições para as quais seriam realizados ensaios de massa unitária. Para tal, observou-se as situações em que as curvas estavam situadas dentro do limite da zona ótima, definido pela NBR 7211 (ABNT, 2022), priorizando as que não tangenciam os limites dela. Em seguida, escolheu-se duas combinações para cada tipo de composição de agregados, totalizando doze (12) misturas, sendo priorizadas aquelas em que há as maiores percentagens de material reciclado.

3.6 Massa unitária das composições de agregados miúdos naturais e reciclados

Para a determinação da massa unitária das composições de agregados miúdos, tomou-se como base a NBR 16972 (ABNT, 2021). Esta Norma estabelece o método para determinação da massa unitária e do índice de vazios de agregados miúdos, em estado compactado ou solto.

Para o ensaio, obteve-se três determinações para o cálculo da massa unitária e índice de vazios no estado compactado (método A) e no estado solto (método C). Tendo-se que a massa unitária média nos estados compactado e solto das composições de agregados é a média dos resultados individuais, obtidos nas três determinações das suas respectivas misturas.

A NBR 16972 (ABNT, 2021) prescreve que a quantidade de agregado miúdo necessária para a realização dos ensaios de massa unitária deve ser equivalente a 150% do volume do recipiente cilíndrico utilizado no ensaio. O recipiente possui 5524,98 cm³. Dessa forma, para ter-se essa medida em massa, fez-se o preenchimento do recipiente com três misturas de areias. Em seguida, fez-se a pesagem dos materiais utilizados e multiplicou-se o resultado

obtido por 1,5. Para todas as três misturas utilizadas, a massa ficou inferior a 13 kg.

Assim, visando ter-se uma margem de segurança para a utilização da mesma massa do mesmo peso de materiais para todas as 12 (doze) misturas, adotou-se a utilização de 15 kg de agregado para a realização dos ensaios. A massa dos agregados miúdos naturais e reciclados utilizados foram proporcionais às suas respectivas percentagens nas composições (mostradas no Quadro 4).

3.7 Massa específica das composições de agregados miúdos naturais e reciclados

Tendo posse das massas específicas dos agregados miúdos naturais e reciclados utilizados no estudo, calculou-se as massas específicas equivalentes das composições, de acordo com a equação 2.

$$M_{em} = (M_{ea} \times \%A + M_{eb} \times \%B) / 100 \quad (2)$$

Onde:

M_{em} = Massa específica da composição;

M_{ea} = Massa específica do primeiro agregado utilizado na composição;

$\%A$ = Percentagem do primeiro agregado utilizado na composição;

M_{eb} = Massa específica do segundo agregado utilizado na composição;

$\%B$ = Percentagem do segundo agregado utilizado na composição.

3.8 Índice de vazios das composições de agregados miúdos naturais e reciclados

Tendo posse dos valores referentes às massas unitárias e específicas das composições de agregados miúdos, calculou-se o índice de vazios dessas misturas, de acordo com a equação (3).

$$\%V = ((M_{em} - M_u) / M_{em}) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

Mem = Massa específica da composição;

Mu = Massa unitária no estado compactado da composição.

3.8 Definição das composições de agregados miúdos naturais e reciclados a serem utilizados para a produção de argamassas

Sabendo-se que um menor valor de índice de vazios dos agregados resulta em uma mistura de argamassa com maior resistência à compressão, utilizou-se esse critério para a definição das composições de agregados a serem utilizados nas produções das misturas.

Com base nos índices de vazios das composições, comparou-se os valores referentes a cada par de composições, e escolheu-se os que possuem menor módulo para serem utilizados na produção das argamassas do estudo. Para os casos em que os índices de consistência das composições com diferentes porcentagem de substituição dos agregados miúdos naturais por reciclados foram iguais, selecionou-se as misturas com maiores partes do material artificial para serem utilizados na produção das argamassas do estudo.

3.9 Definição dos traços de argamassa

Definiu-se um traço em massa de 1 : 2 : 0,6 (cimento : agregado miúdo; relação água/cimento), por se tratar de um traço adotado em trabalhos desenvolvidos no LEMA, como o realizado por Ferro (2016), para ser utilizado em todas as produções de argamassas do estudo. Inicialmente, trabalhou-se com uma relação água/cimento de 0,5, no entanto a mistura ficou muito seca. Desse modo, optou-se por aumentar essa relação para 0,6, visando uma maior trabalhabilidade para a moldagem mais fácil sem segregação, reduzindo a possibilidade de falhas de preenchimento.

Como todas as misturas possuem o mesmo traço, é possível comparar os resultados obtidos nos estados fresco e endurecido de forma mais eficaz, identificando as principais influências das composições de agregados miúdos naturais e reciclados utilizados nas misturas.

3.9.1 Produção das argamassas

Produziu-se as argamassas para a realização dos ensaios de índice de consistência e massa específica, no estado fresco, assim como para a produção de 3 (três) corpos de prova prismáticos para a realização dos ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, no estado endurecido.

3.9.1.1 Pré-molhagem da fração reciclada das composições de agregados miúdos

Para a determinação da pré-molhagem das areias recicladas, adotou-se um valor de 80% da sua absorção de água, de acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2021). Fez-se a pré-molhagem dos agregados reciclados 10 (dez) minutos antes de misturar os materiais sólidos das composições. Para isso, adicionou-se toda a água de pré-molhagem ao recipiente que continha o material e fez-se a homogeneização.

Figura 9 - Pré-molhagem dos agregados reciclados



Fonte: Autor (2023)

3.9.1.2 Procedimento de mistura

Para o preparo da mistura, seguiu-se os procedimentos descritos na NBR 16541 (ABNT, 2016):

- Colocou-se todo o material seco na cuba do misturador;
- Acionou-se o misturador em velocidade baixa e colocou-se 75% da água nos primeiros 10s;
- Manteve-se a velocidade baixa até completar 30s;
- Alterou-se o modo de mistura para velocidade alta e misturou-se por mais 60s;
- Manteve-se a mistura em repouso por 90s, fazendo a raspagem da pá do misturador neste intervalo;
- Acionou-se o misturador em velocidade baixa e adicionou-se o restante da água em 10s;
- Manteve-se o misturador ligado por mais 50s.

3.10 Ensaios no estado fresco

Para o estado fresco das argamassas, foram realizados os ensaios: determinação do índice de consistência e determinação da massa específica.

Para a determinação dos índices de consistência das argamassas no estado fresco, seguiu-se os procedimentos descritos na NBR 13276 (ABNT, 2016).

Os Índices de Consistência foram definidos através da equação 4.

$$\text{Índice de consistência} = (d1 + d2 + d3)/3 \quad (4)$$

Onde,

d1 = diâmetro de espalhamento no ponto 1;

d2 = diâmetro de espalhamento no ponto 2;

d3 = diâmetro de espalhamento no ponto 3.

Para a determinação da massa específica no estado fresco, seguiu-se os procedimentos descritos na NBR 13278 (ABNT, 2005).

O valor da massa específica da mistura é definido a partir da equação 5.

$$d = (m_{rec+arg} - m_{rec})/V_{rec} \quad (5)$$

Onde,

d = Massa específica da mistura;

$m_{rec+arg}$ = Massa do recipiente + argamassa;

m_{rec} = Massa do recipiente;

V_{rec} = Volume do recipiente.

3.11 Ensaio no estado endurecido

Para o estado endurecido das argamassas, foram realizados os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, seguindo os procedimentos descritos na 13279 (ABNT, 2005). Foram moldados 3 (três) corpos-de-prova prismáticos de 4x4x16 cm para cada argamassa.

Para a determinação da resistência à tração na flexão, fez-se o ensaio com 3 (três) corpos de prova por mistura quando eles atingiram a idade de 28 dias.

Os valores de resistência à tração na flexão foram determinados através da equação 6.

$$R_f = 1,5 \times F_f \times L / 40^3 \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

Onde,

F_f = Carga (N);

L = Distância entre os suportes (mm).

A Resistência à Tração na Flexão Média foi calculada através da média aritmética das Resistências à Tração na Flexão dos 3 (três) corpos de prova por mistura, conforme o definido na NBR 13279 (ABNT, 2005).

Para a realização do ensaio de resistência à compressão, utilizou-se 6 (seis) corpos de prova prismáticos por composição de argamassa, provenientes do rompimento dos corpos de prova prismáticos no ensaio de Resistência à Tração na Flexão aos 28 dias.

Os valores de Resistência à Compressão Axial foram determinados através da equação 7.

$$R_c = F_c/1600 \quad (\text{MPa}) \quad (7)$$

Onde,

F_c = Carga (N).

Calculou-se a resistência à compressão axial média através da média aritmética das resistências à compressão axial dos 6 (seis) corpos de prova por mistura, conforme o definido na NBR 13279 (ABNT, 2005).

3.12 Análise dos resultados

Por fim, fez-se a análise dos resultados de todos os ensaios realizados, a fim de observar a influência das composições de agregados miúdos reciclados e naturais nos comportamentos das argamassas nos estados fresco e endurecido.

4. RESULTADOS

4.1 Caracterização dos agregados

A caracterização dos cinco tipos de agregados (dois naturais e três reciclados) foi realizada pelo grupo de pesquisa e os resultados encontram-se a seguir.

4.1.1 ARPM - Agregado Reciclado Primário Miúdo

4.1.1.1 Granulometria

Na Tabela 4 são vistos os dados de massa retida (g), percentagem retida individual (%) e percentagem retida acumulada (%) do ARPM.

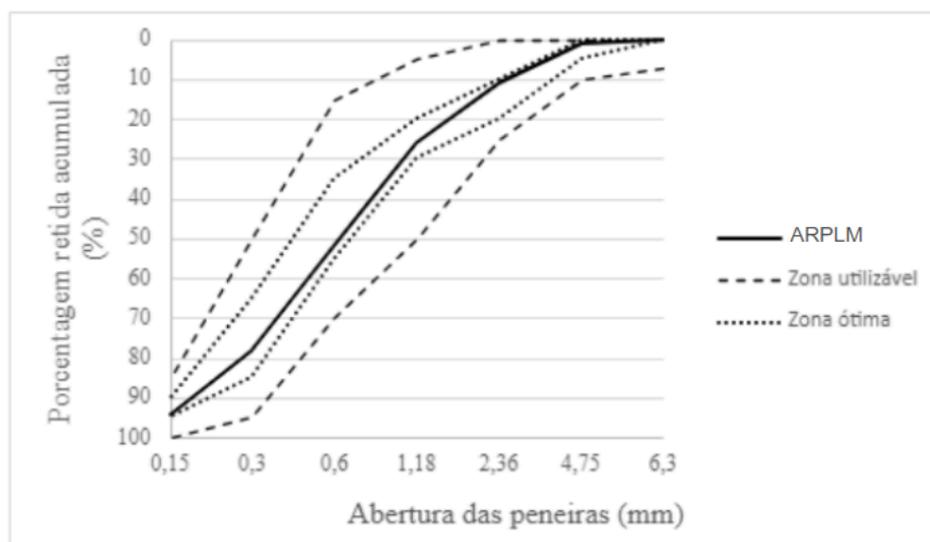
Tabela 4 - Análise granulométrica do ARPM

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)				Porcentagem retida (%)				Média (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
	Ensaio				Ensaio					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)		
9,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
6,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,75	4	5	7	4	0,9	1	1,5	0,9	1,1	1,1
2,36	41	45	49	56	9,1	9,3	10,7	11,4	10,12	11,22
1,18	61	70	72	75	13,6	14,6	15,6	15,3	14,76	25,98
0,6	114	126	123	128	25,6	26,2	26,7	26,3	26,17	52,15
0,3	120	127	117	126	26,9	26,4	25,3	25,7	26,06	78,21
0,15	78	79	69	74	17,4	16,4	15	15,1	15,95	94,17
Fundo	29	30	24	26	6,5	6,2	5,2	5,4	5,83	100
Total	447	483	462	488	100	100	100	100	-	-

Fonte: Relatório (2023c)

Na Figura 10 tem-se a curva granulométrica do agregado. Comparando-se com as zonas ótima e utilizável recomendadas pela NBR 7211 (ABNT, 2022), verifica-se que o material se encontra inteiramente dentro da zona ótima de utilização.

Figura 10 - Distribuição granulométrica do ARPM



Fonte: Relatório (2023c)

4.1.1.2 Massa Unitária

Nas tabelas 5 e 6 estão evidenciados os resultados dos ensaios de massa unitária do ARPM nos estados compactado e solto, respectivamente.

Tabela 5 - Massa unitária do ARPM no estado compactado (Método A)

Determinações	Massa unitária (g/cm ³)
1	1,35
2	1,37
3	1,35
Média	1,36
desvio padrão	0,0115

Fonte: Relatório (2023c)

Tabela 6 - Massa unitária do ARPM no estado solto (Método C)

Determinações	Massa unitária (g/cm ³)
1	1,31
2	1,25
3	1,27
Média	1,28
desvio padrão	0,0306

Fonte: Relatório (2023c)

4.1.1.3 Massa específica

Os resultados obtidos para massa específica do ARPM estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Massa específica do agregado ARPM na condição seca

AMOSTRAS	VOLUME DE ÁGUA (cm ³)	DENSIDADE NA CONDIÇÃO SECA (g/cm ³)
1	401	2,49
2	403	2,46
3	403	2,46
MÉDIA	402,33	2,48

Fonte: Relatório (2023c)

4.1.2 ARSM1 - Agregado Reciclado Secundário Miúdo 1

4.1.2.1 Granulometria

Na Tabela 8 são vistos os dados de massa retida (g), percentagem retida individual (%) e percentagem retida acumulada (%) do ARSM1.

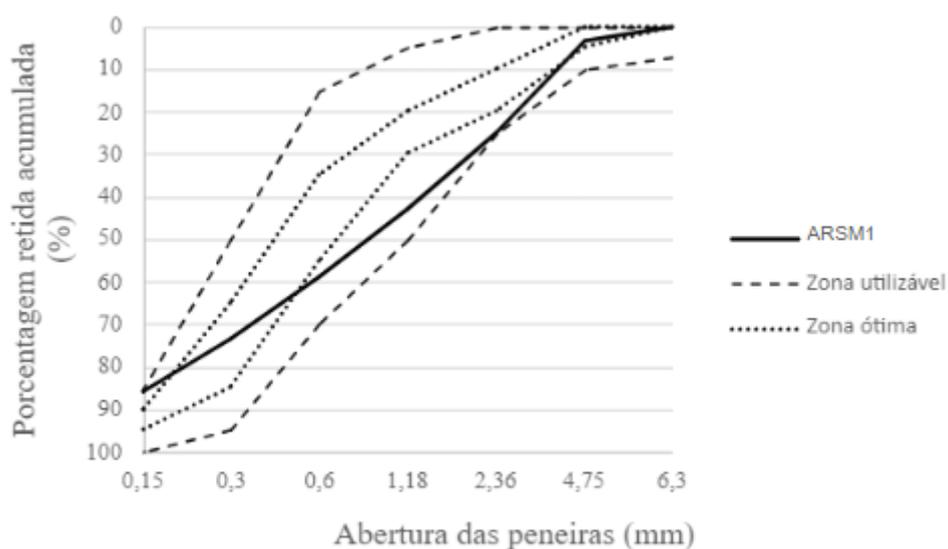
Tabela 8 - Análise granulométrica do ARSM1

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)		Porcentagem retida (%)		Média (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
	ENSAIO (1)	ENSAIO (2)	ENSAIO (1)	ENSAIO (2)		
9,5	0	0	0	0	0,00	0,00
6,3	0	0	0	0	0	0,00
4,75	12,1	8,3	4,2	2,9	4	3,56
2,36	73,5	56,8	25,4	20,1	23	26,31
1,18	55	51,3	19	18,1	19	44,89
0,6	45,3	50,5	15,7	17,9	17	61,65
0,3	41,7	47,8	14,4	16,9	16	77,31
0,15	32,6	38,1	11,3	13,5	12	89,68
Fundo	29	30	10	10,6	10	100
Total	289	283	100	100	-	-

Fonte: Relatório (2023a)

Na Figura 11 tem-se a curva granulométrica do agregado. Comparando-se com as zonas ótima e utilizável recomendadas pela NBR 7211 (ABNT, 2022), verifica-se que o material se encontra entre as zonas utilizável e ótima durante toda a sua distribuição.

Figura 11 - Distribuição granulométrica do ARSM1



Fonte: Relatório (2023a)

4.1.2.2 Massa Unitária

Na tabela 9 estão evidenciados os resultados dos ensaios de massa unitária do ARSM1 no estado solto.

Tabela 9 - Massa unitária do ARSM1 no estado solto (Método C)

Determinações	Massa unitária (g/cm ³)
1	1,39
2	1,39
3	1,41
Média	1,39
desvio padrão	0,0115

Fonte: Relatório (2023a)

Na tabela 10 estão evidenciados os resultados dos ensaios de massa unitária do ARSM1 no estado compactado.

Tabela 10 - Massa unitária do ARSM1 no estado compactado (Método A)

Determinações	Massa unitária (g/cm ³)
1	1,47
2	1,47
3	1,46
Média	1,39
desvio padrão	0,0094

Fonte: Relatório (2023a)

4.1.2.3 Massa específica

Os resultados de massa específica obtidos para o ARSM1 estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e absorção de água do ARSM1

Amostras	Densidade na condição seca (g/cm ³)	Densidade na condição saturada superfície seca (g/cm ³)	Absorção de água (%)
1	2,07	2,23	7,8
2	2,09	2,25	7,7
Média	2,08	2,24	7,7

Fonte: Relatório (2023a)

4.1.3 ARSM2 - Agregado Reciclado Secundário Miúdo 2

4.1.3.1 Granulometria

Na Tabela 12 são vistos os dados de massa retida (g), porcentagem retida individual (%) e porcentagem retida acumulada (%) do ARSM2. Nela, pode-se observar particularidades ao comparar-se com os resultados obtidos

na ARSM1, sabendo-se que ambos os materiais são provenientes dos mesmos resíduos, diferenciando-se, apenas, no porte do britador usado.

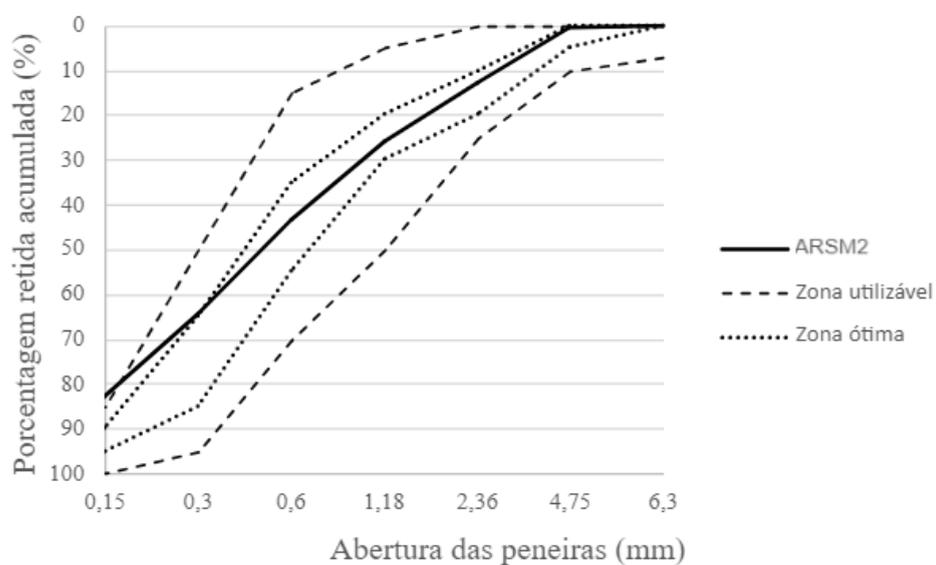
Tabela 12 - Análise granulométrica do ARSM2

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)		Porcentagem retida (%)		Média (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
	ENSAIO (1)	ENSAIO (2)	ENSAIO (1)	ENSAIO (2)		
9,5	0	0	0	0	0,00	0,00
6,3	0	0	0	0	0,00	0,00
4,75	2,63	1,4	0,53	0,28	0,40	0,40
2,36	59,5	65,4	11,91	13,09	12,50	12,90
1,18	64,24	67,7	12,86	13,55	13,20	26,11
0,6	89,4	84,8	17,89	16,98	17,43	43,54
0,3	109,12	102,4	21,84	20,50	21,17	64,71
0,15	88,94	92,6	17,80	18,54	18,17	82,88
Fundo	85,89	85,2	17,19	17,06	17,12	100,00
Total	499,72	499,5	100	100	-	-

Fonte: Relatório (2023b)

Na Figura 12 tem-se a curva granulométrica do agregado. Comparando-se com as zonas ótima e utilizável recomendadas pela NBR 7211 (ABNT, 2022), verifica-se que o material se encontra quase totalmente dentro da zona ótima.

Figura 12 - Distribuição granulométrica do ARSM2



Fonte: Relatório (2023b)

4.1.3.2 Massa Unitária

Nas tabelas 13 e 14 estão evidenciados os resultados dos ensaios de massa unitária do ARSM2 nos estados compactado e solto, respectivamente.

Tabela 13 - Massa unitária do ARSM2 no estado compactado (Método A)

Determinações	Massa unitária (g/cm ³)
1	1,48
2	1,44
3	1,49
Média	1,47
desvio padrão	0,0259

Fonte: Relatório (2023b)

Tabela 14 - Massa unitária do ARSM2 no estado solto (Método C)

Determinações	Massa unitária (g/cm ³)
1	1,105
2	1,132
3	1,119
Média	1,12
desvio padrão	0,0135

Fonte: Relatório (2023b)

4.1.3.3 Massa específica

Os resultados de massa específica obtidos para o ARSM2 estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e absorção de água do ARSM2

Amostras	Volume de água (cm ³)	Densidade na condição seca (g/cm ³)	Densidade na condição saturada superfície seca (g/cm ³)	Absorção de água (%)
1	275,49	2,07	2,23	7,8
2	278,10	2,09	2,25	7,7
Média	276,79	2,08	2,24	7,7

Fonte: Relatório (2023b)

4.1.4 AMNF - Agregado Miúdo Natural Fino

4.1.4.1 Granulometria

Na Tabela 16 são vistos os dados de massa retida (g), percentagem retida individual (%) e percentagem retida acumulada (%) do AMNF.

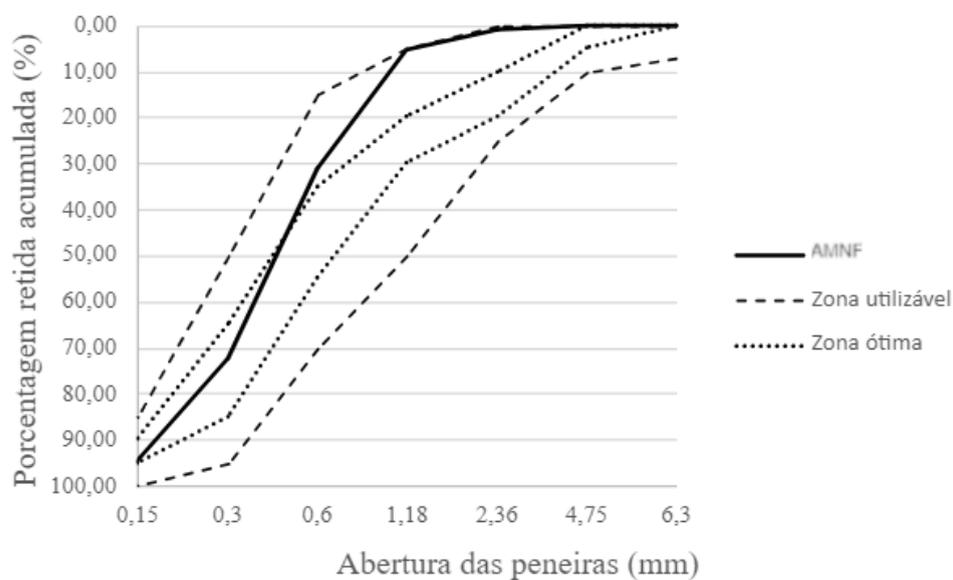
Tabela 16 - Análise granulométrica do AMNF

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)		Porcentagem retida (%)		Média (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
	ENSAIO (1)	ENSAIO (2)	ENSAIO (1)	ENSAIO (2)		
9,5	0	0	0	0	0,00	0
6,3	0	1,3	0	0,26	0,13	0,13
4,75	0	0	0	0	0,00	0,13
2,36	3,4	3,9	0,69	0,78	0,74	0,86
1,18	23,6	22,2	4,77	4,45	4,61	5,47
0,6	131,5	125,7	26,56	25,18	25,87	31,34
0,3	207,3	201,9	41,87	40,44	41,16	72,5
0,15	104,5	114,1	21,11	22,86	21,99	94,48
Fundo	24,8	30,1	5,01	6,03	5,52	100
Total	495,1	499,2	100	-	-	-

Fonte: Relatório (2023d)

Na Figura 13 tem-se a curva granulométrica do agregado. Comparando-se com as zonas ótima e utilizável recomendadas pela NBR 7211 (ABNT, 2022), verifica-se que o material se encontra entre as zonas utilizável e ótima durante toda a sua distribuição.

Figura 13 - Distribuição granulométrica do AMNF



Fonte: Relatório (2023d)

4.1.4.2 Massa Unitária

Nas tabelas 17 e 18 estão evidenciados os resultados dos ensaios de massa unitária do AMNF nos estados compactado e solto, respectivamente.

Tabela 17 - Massa unitária do AMNF no estado compactado (Método A)

Determinações	Massa unitária (g/cm ³)
1	1,456
2	1,456
3	1,456
Média	1,456
desvio padrão	0

Fonte: Relatório (2023d)

Tabela 18 - Massa unitária do AMNF no estado solto (Método C)

Determinações	Massa unitária (g/cm ³)
1	1,537
2	1,537
3	1,543
Média	1,539
desvio padrão	0,0039

Fonte: Relatório (2023d)

4.1.4.3 Massa específica

Os resultados obtidos para a massa específica do AMNF estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e absorção de água do AMNF

Amostras	Volume de água (cm ³)	Densidade na condição seca (g/cm ³)	Densidade na condição saturada superfície seca (g/cm ³)	Absorção de água (%)
1	275,89	2,20	2,23	1,5
2	298,45	2,46	2,48	0,9
Média	287,17	2,33	2,36	1,2

Fonte: Relatório (2023d)

4.1.5 AMNG - Agregado Miúdo Natural Grosso

4.1.5.1 Granulometria

Na Tabela 20 são vistos os dados de massa retida (g), percentagem retida individual (%) e percentagem retida acumulada (%) do AMNG.

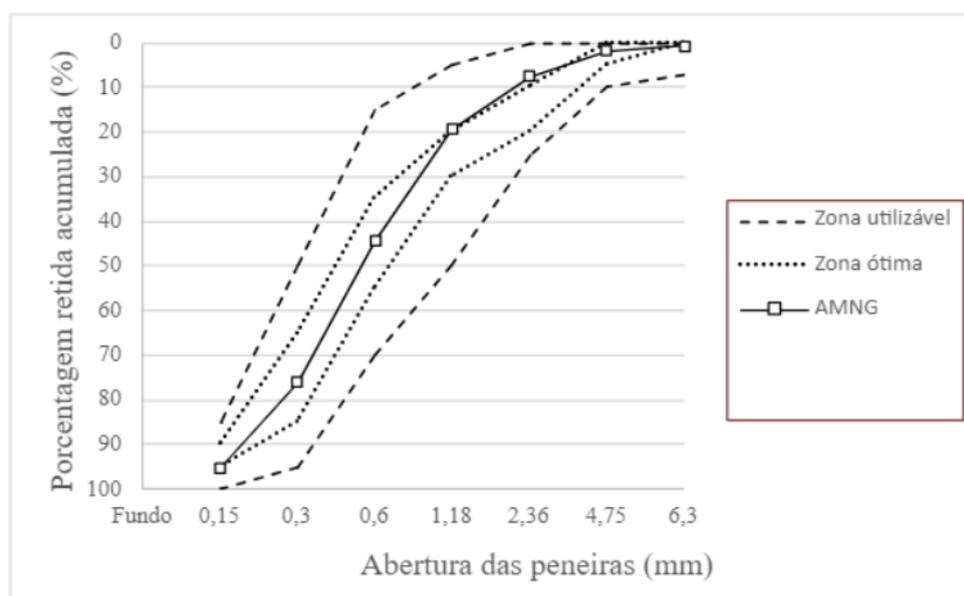
Tabela 20 - Análise granulométrica do AMNG

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)		Porcentagem retida (%)		Porcentagem retida acumulada (%)
	ENSAIO (1)	ENSAIO (2)	ENSAIO (1)	ENSAIO (2)	
9,5	0	0	0	0	0
6,3	2,3	3,8	0,46	0,76	0,61
4,75	5	6,7	1,01	1,34	1,79
2,36	24,6	31,3	4,97	6,26	7,40
1,18	62,5	57,3	12,62	11,47	19,44
0,6	127,5	121,2	25,74	24,25	44,44
0,3	155,7	159,5	31,43	31,92	76,11
0,15	93,1	96,2	18,79	19,25	95,14
Fundo	24,7	23,7	4,99	4,74	100
Total	495,4	499,7	100	100	100

Fonte: Relatório (2023d)

Na Figura 14 tem-se a curva granulométrica do agregado. Comparando-se com as zonas ótima e utilizável recomendadas pela NBR 7211 (ABNT, 2022), verifica-se que os pontos referentes à peneira de abertura 2,36 mm encontram-se levemente fora da zona ótima.

Figura 14 - Distribuição granulométrica do AMNG



Fonte: Relatório (2023d)

4.1.5.2 Massa Unitária

Nas tabelas 21 e 22 estão evidenciados os resultados dos ensaios de massa unitária do AMNG nos estados compactado e solto, respectivamente.

Tabela 21 - Massa unitária do AMNG no estado compactado (Método A)

Determinações	Massa unitária (g/cm ³)
1	1,611
2	1,611
3	1,611
4	1,597
Média	1,607
desvio padrão	0,00674

Fonte: Relatório (2023d)

Tabela 16 - Massa unitária do AMNG no estado solto (Método C)

Determinações	Massa unitária (g/cm ³)
1	1,490
2	1,490
3	1,503
4	1,496
Média	1,495
desvio padrão	6,4529

Fonte: Relatório (2023d)

4.1.5.3 Massa específica

Os resultados obtidos para o AMNG quanto à massa específica estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado saturado superfície seca e absorção de água do AMNG

Amostras	Volume de água (cm ³)	Densidade na condição seca (g/cm ³)	Densidade na condição saturada superfície seca (g/cm ³)	Absorção de água (%)
1	302,26	2,52	2,53	0,5
2	301,05	2,50	2,51	0,7
Média	301,65	2,51	2,52	0,6

Fonte: Relatório (2023d)

4.2 Composição granulométrica

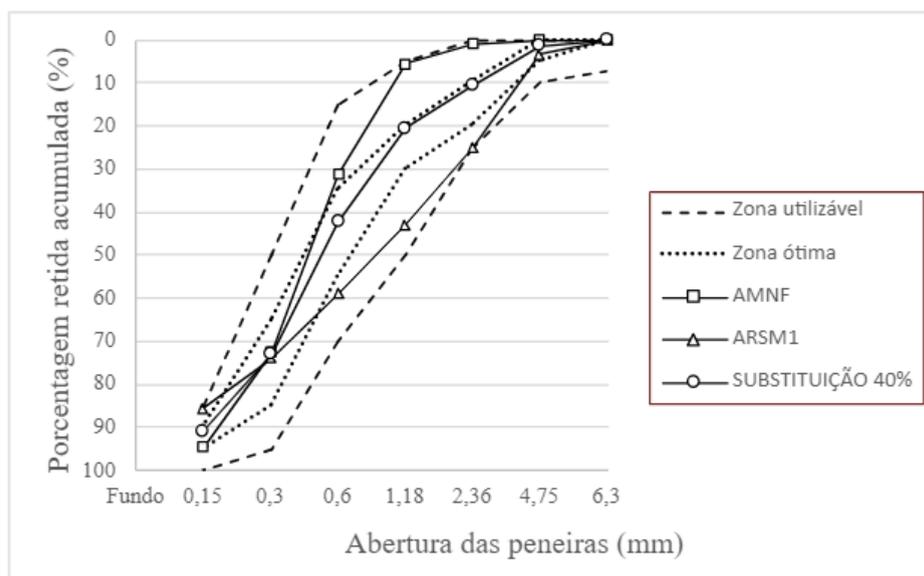
A partir das combinações teóricas realizadas com os cinco diferentes agregados, dois naturais e três reciclados, obteve-se 54 composições. Dentre essas composições, destacou-se as que possuem curvas granulométricas pertencentes à zona ótima definida pela NBR 7211 (2022) e calculou-se os seus respectivos coeficientes de uniformidade e índices de vazios.

4.2.1 Adequação à NBR 7211 (2022)

4.2.1.1 Composições AMNF + ARSM1

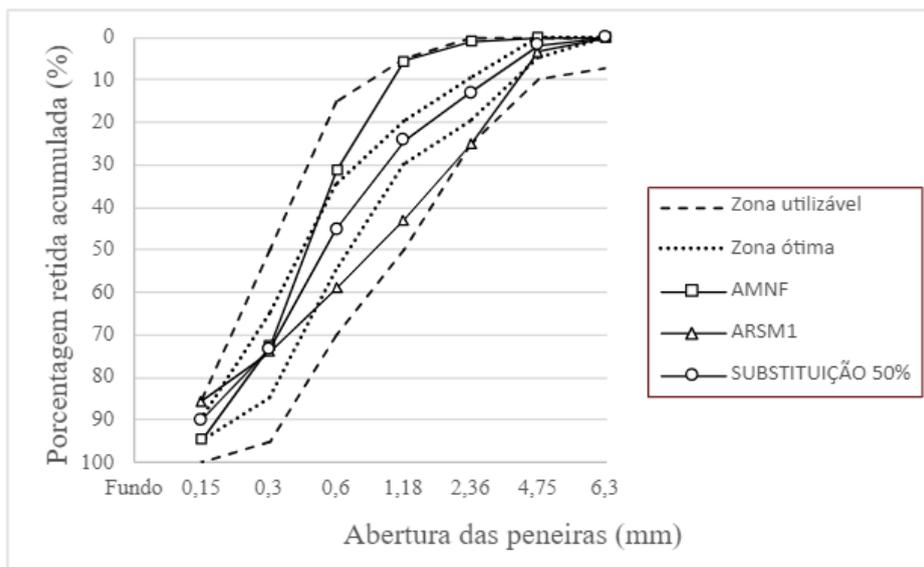
Nas composições que utilizam o AMNF e o ARSM1, observou-se que os teores de substituição de 40% a 70% de agregado natural por reciclado possuem curvas granulométricas dentro da zona ótima definida pela Norma. As curvas plotadas estão disponíveis nas Figuras 15 a 18.

Figura 15- Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM1 com substituição de 40%



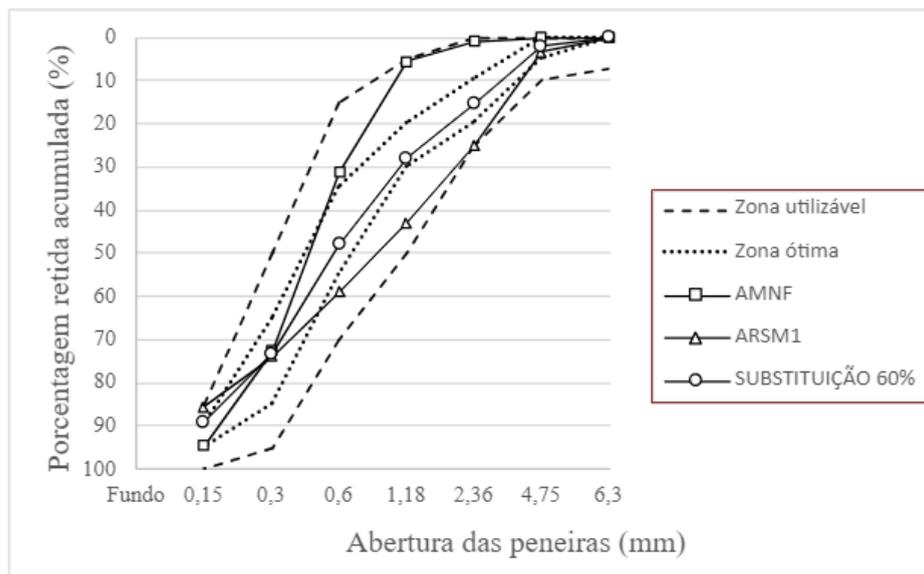
Fonte: Autor (2024)

Figura 16- Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM1 com substituição de 50%



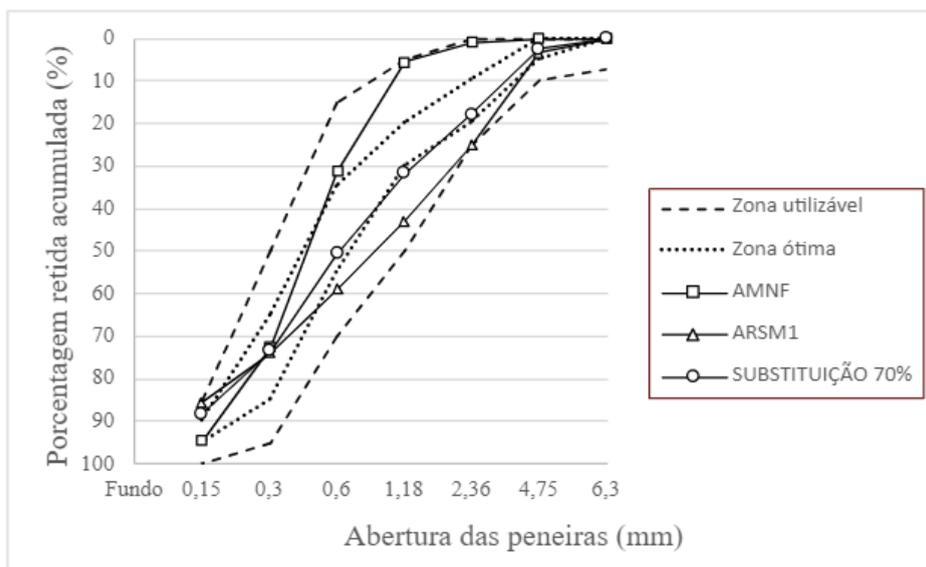
Fonte: Autor (2024)

Figura 17- Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM1 com substituição de 60%



Fonte: Autor (2024)

Figura 18- Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM1 com substituição de 70%

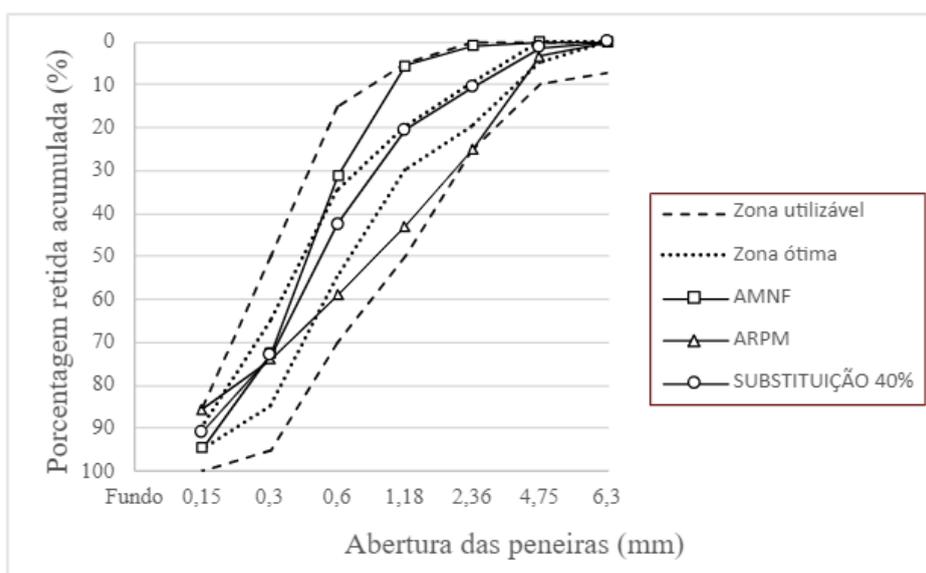


Fonte: Autor (2024)

4.2.1.2 Composições AMNF + ARPLM

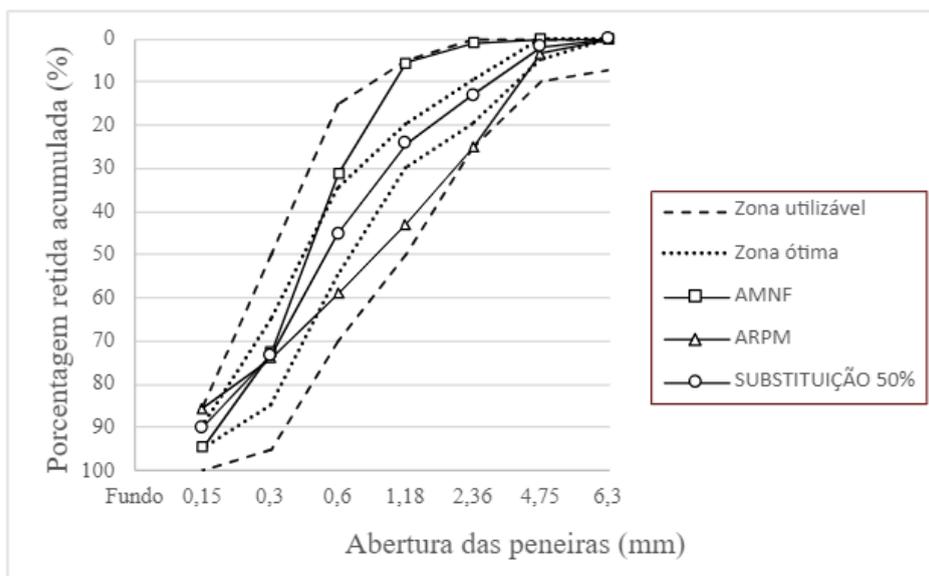
Nas composições que utilizam o AMNF e o ARPLM, observou-se que os teores de substituição de 40% a 70% de agregado natural por reciclado possuem curvas granulométricas dentro da zona ótima definida pela Norma. As curvas plotadas estão disponíveis nas Figuras 19 a 22.

Figura 19 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARPM com substituição de 40%



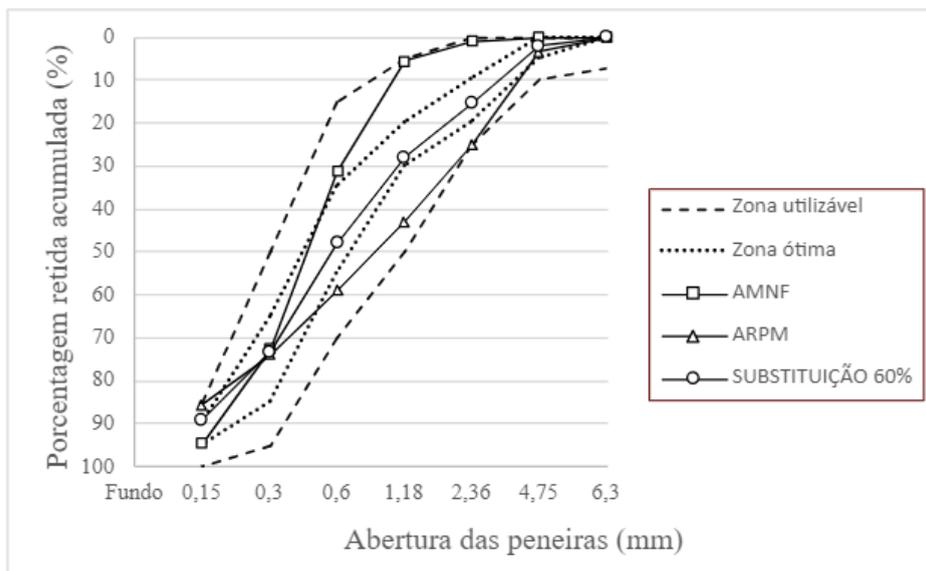
Fonte: Autor (2024)

Figura 20 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARPM com substituição de 50%



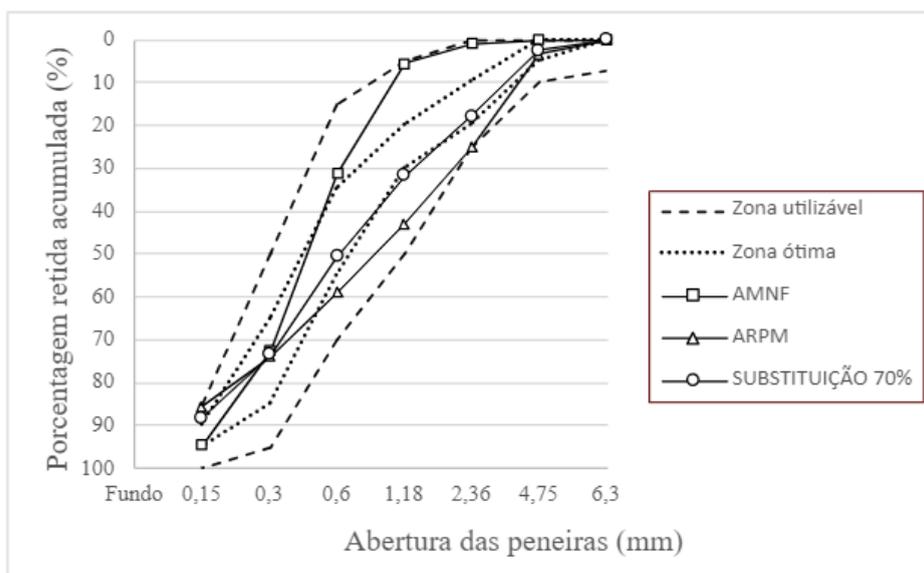
Fonte: Autor (2024)

Figura 21 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARPM com substituição de 60%



Fonte: Autor (2024)

Figura 22 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARPM com substituição de 70%

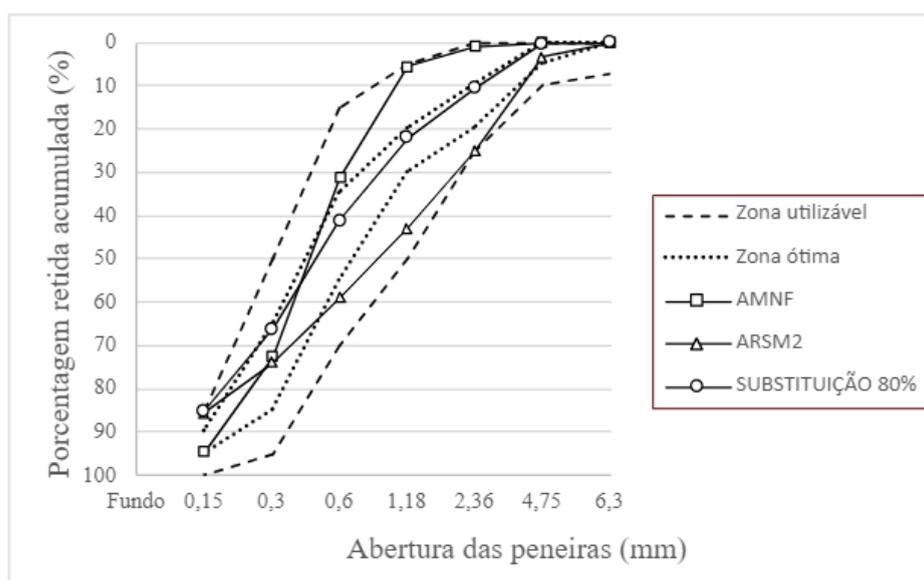


Fonte: Autor (2024)

4.2.1.3 Composições AMNF + ARSM2

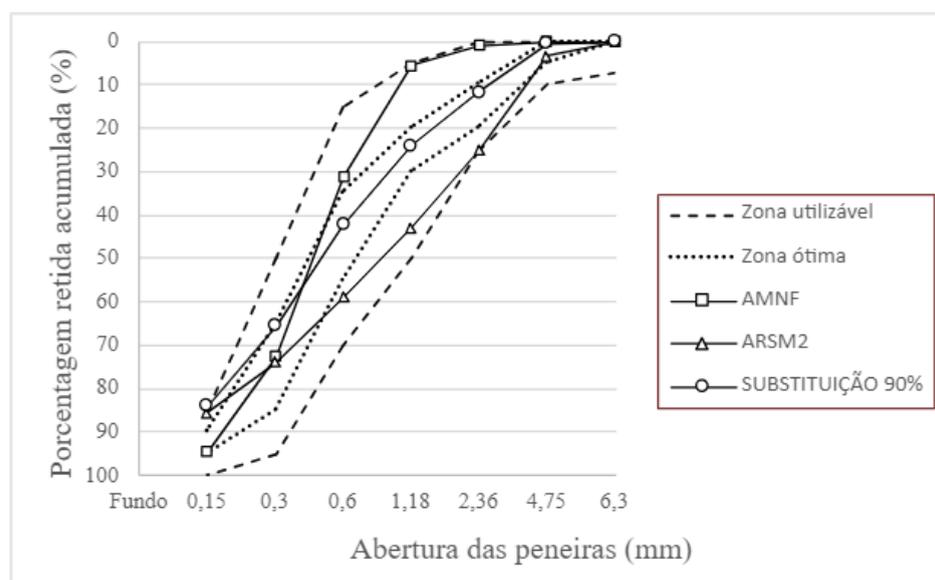
Nas composições que utilizam o AMNF e o ARSM2, observou-se que os teores de substituição de 80 a 90% de agregado natural por reciclado possuem curvas granulométricas dentro da zona ótima definida pela Norma. As curvas plotadas estão disponíveis na Figura 23 e 24.

Figura 23 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM2 com substituição de 80%



Fonte: Autor (2024)

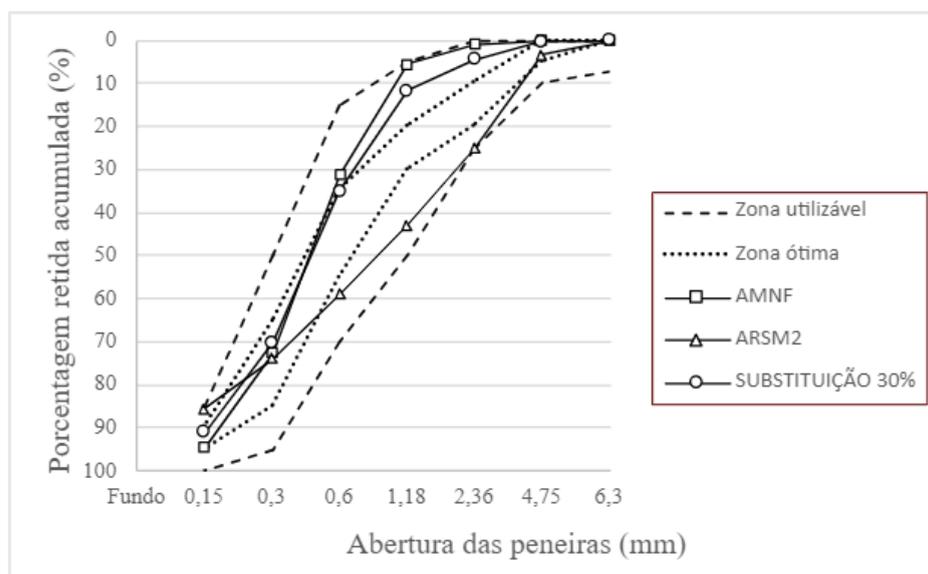
Figura 24 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM2 com substituição de 90%



Fonte: Autor (2024)

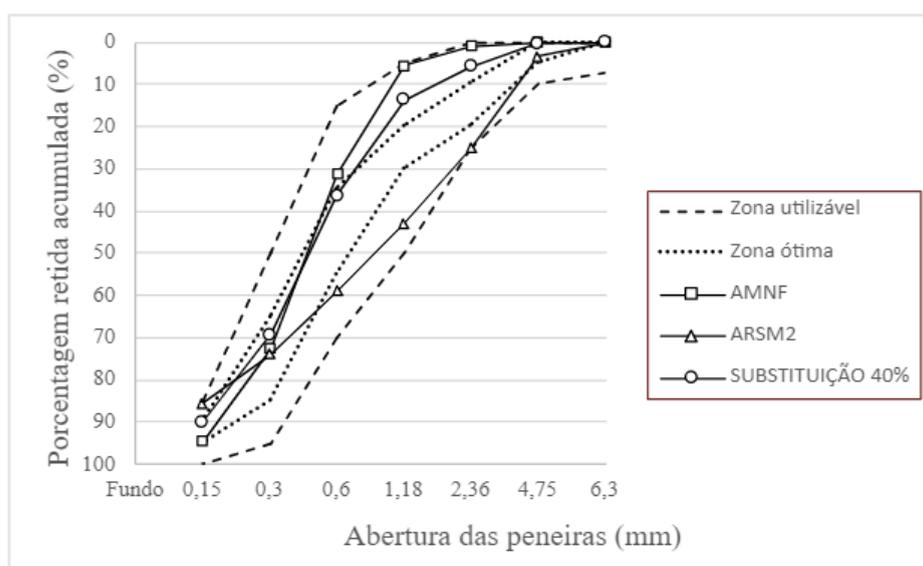
Nessa situação, teve-se que apenas as substituições de 80% e 90% do do agregado natural pelo reciclado possuem curvas granulométricas dentro da zona ótima. Dessa forma, tem-se que o teor de substituição é muito superior ao das outras misturas, mediante que pode influenciar na comparação da influência das composições entre os agregados nos ensaios seguintes. Assim, visando facilitar a análise da interferência das misturas dos agregados nas propriedades das argamassas produzidas, analisou-se os teores de substituição de 30% e 40%, cujas curvas granulométricas pertencem à zona utilizável, das composições de AMNF e ARSM2.

Figura 25 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM2 com substituição de 30%



Fonte: Autor (2024)

Figura 26 - Curvas granulométricas composição AMNF e ARSM2 com substituição de 40%

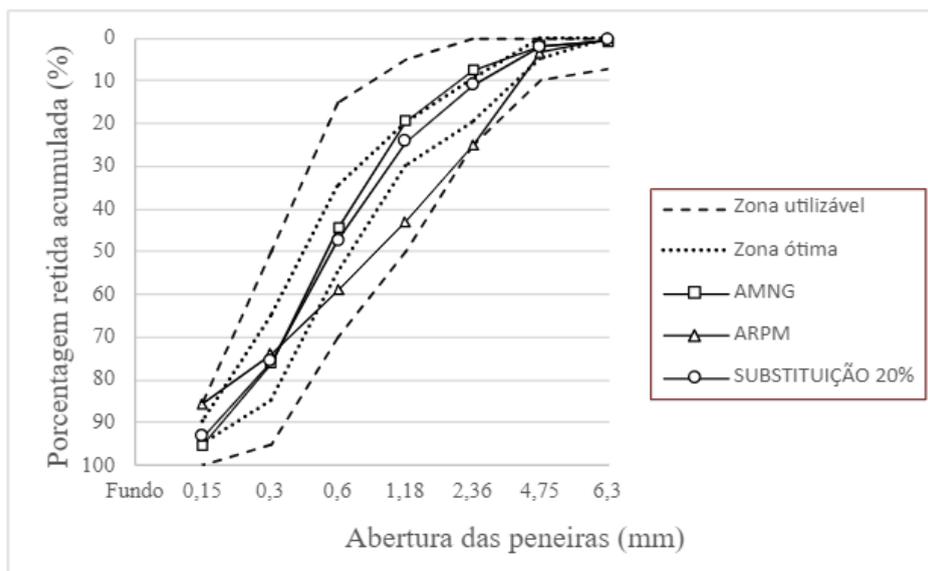


Fonte: Autor (2024)

4.2.1.4 Composições AMNG + ARPM

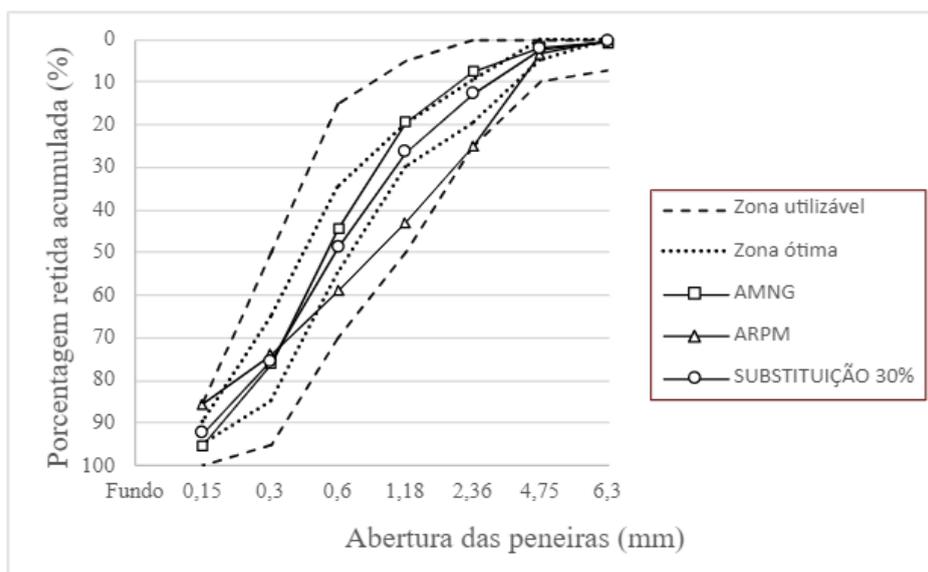
Nas composições que utilizam o AMNG e o ARPM, observou-se que os teores de substituição de 20% a 50% de agregado natural por reciclado possuem curvas granulométricas dentro da zona ótima definida pela Norma. As curvas plotadas estão disponíveis nas Figuras 27 a 30.

Figura 27- Curvas granulométricas composição AMNG e ARPM com substituição de 20%



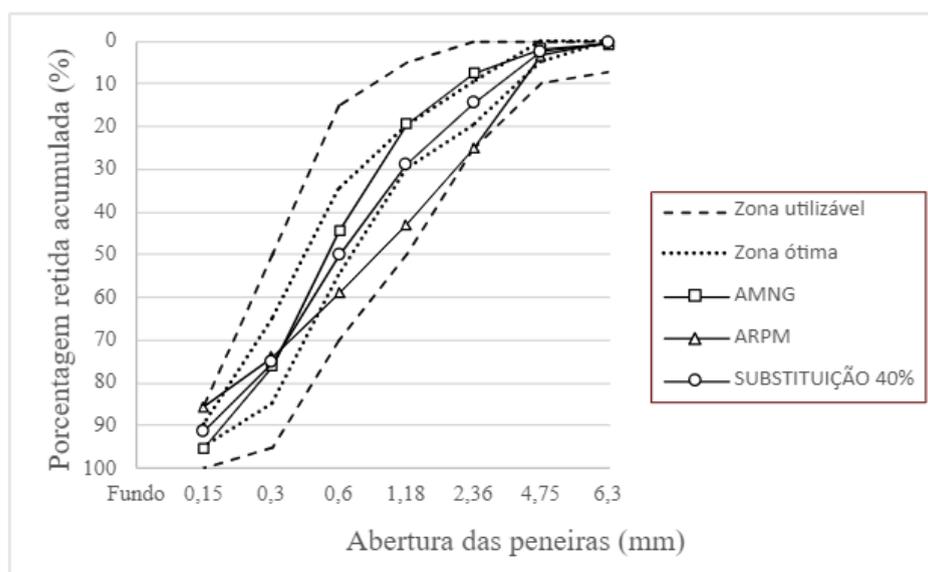
Fonte: Autor (2024)

Figura 28- Curvas granulométricas composição AMNG e ARPM com substituição de 30%



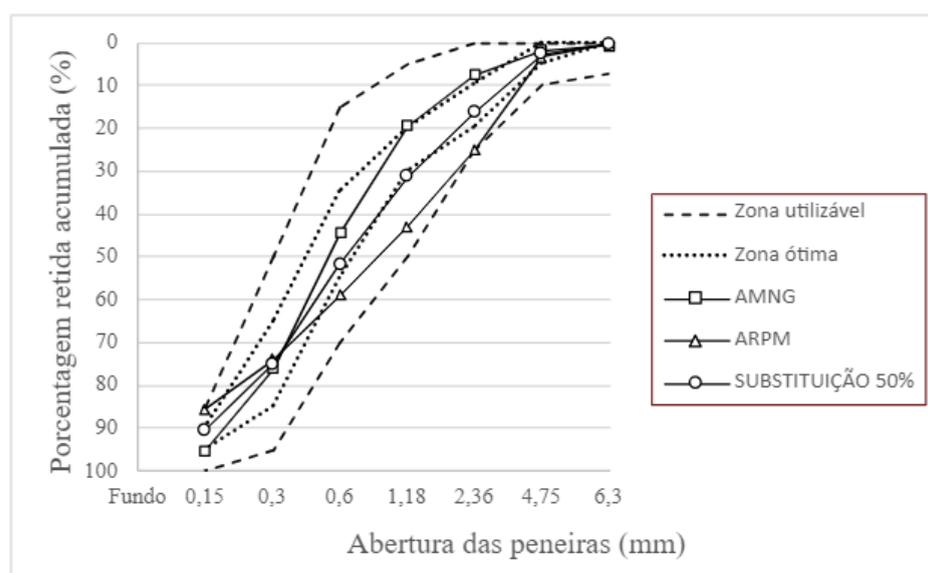
Fonte: Autor (2024)

Figura 29- Curvas granulométricas composição AMNG e ARPM com substituição de 40%



Fonte: Autor (2024)

Figura 30- Curvas granulométricas composição AMNG e ARPM com substituição de 50%

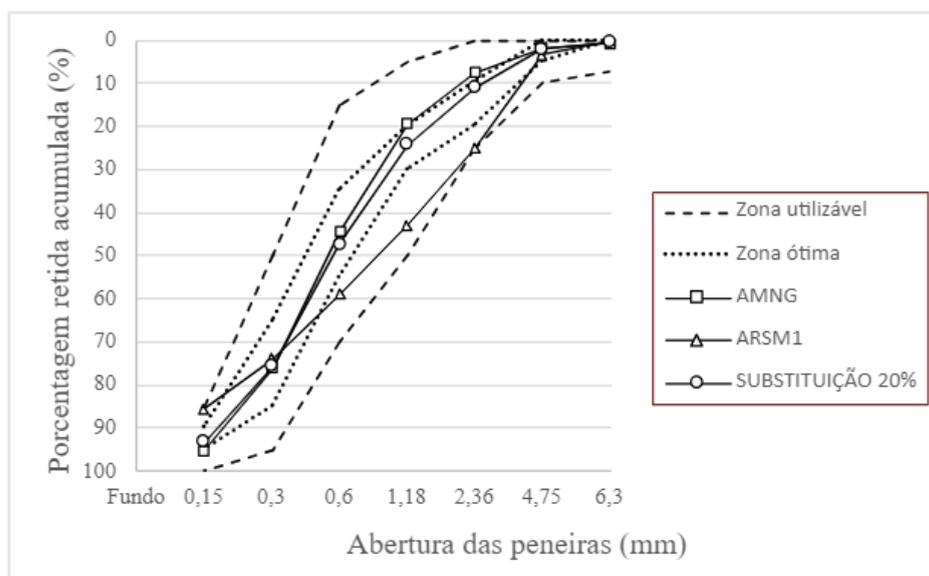


Fonte: Autor (2024)

4.2.1.5 Composições AMNG + ARSM1

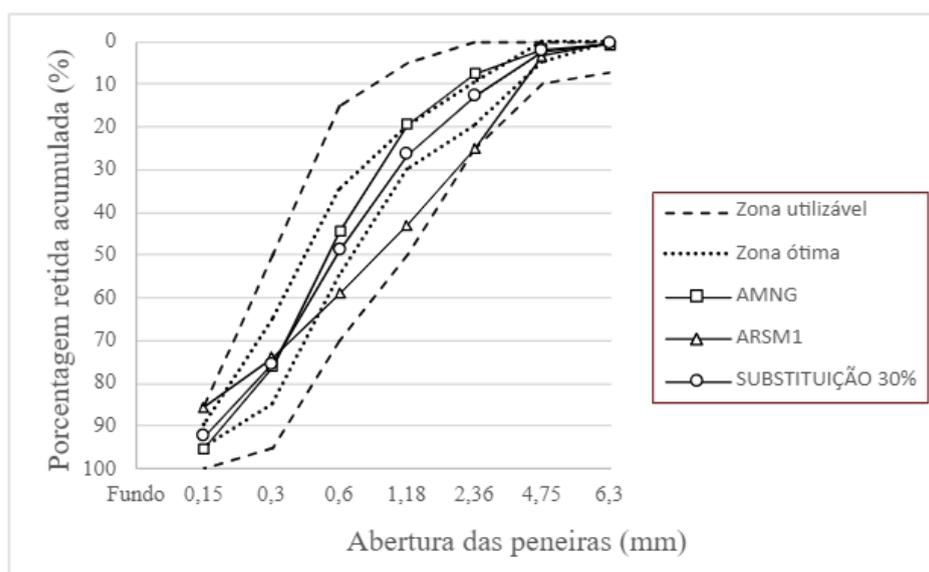
Nas composições que utilizam o AMNG e o ARSM1, observou-se que os teores de substituição de 20% a 50% de agregado natural por reciclado possuem curvas granulométricas dentro da zona ótima definida pela Norma. As curvas plotadas estão disponíveis nas Figuras 31 a 34.

Figura 31- Curvas granulométricas composição AMNG e ARSM1 com substituição de 20%



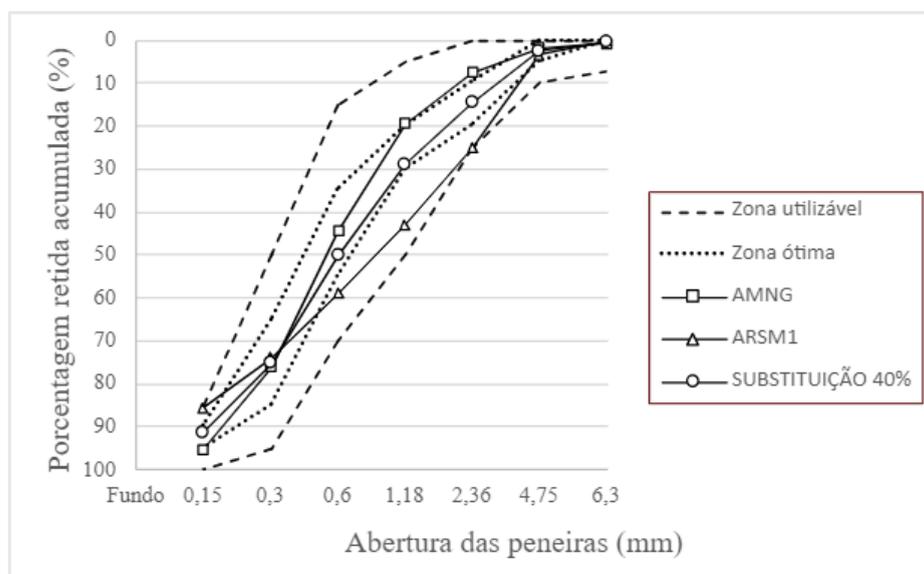
Fonte: Autor (2024)

Figura 32- Curvas granulométricas composição AMNG e ARSM1 com substituição de 30%



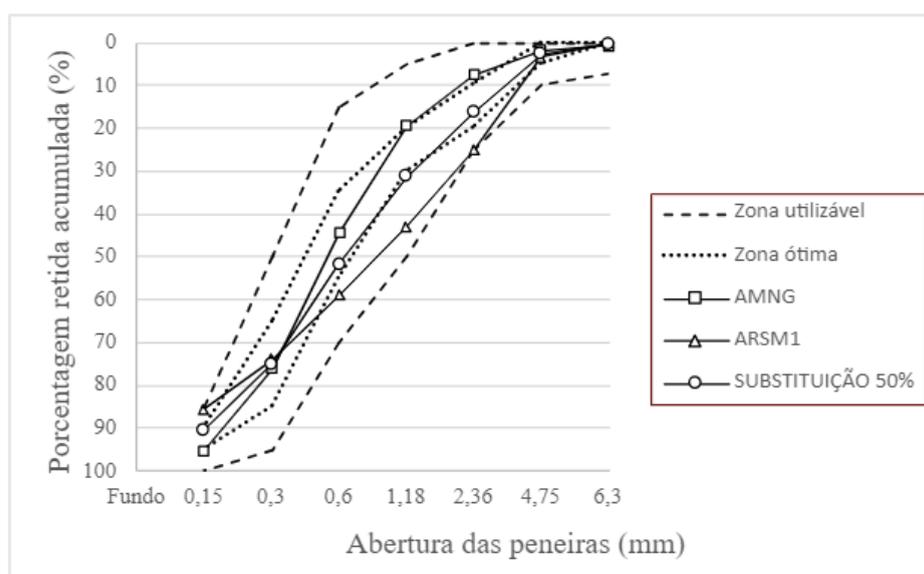
Fonte: Autor (2024)

Figura 33- Curvas granulométricas composição AMNG e ARSM1 com substituição de 40%



Fonte: Autor (2024)

Figura 34- Curvas granulométricas composição AMNG e ARSM1 com substituição de 50%

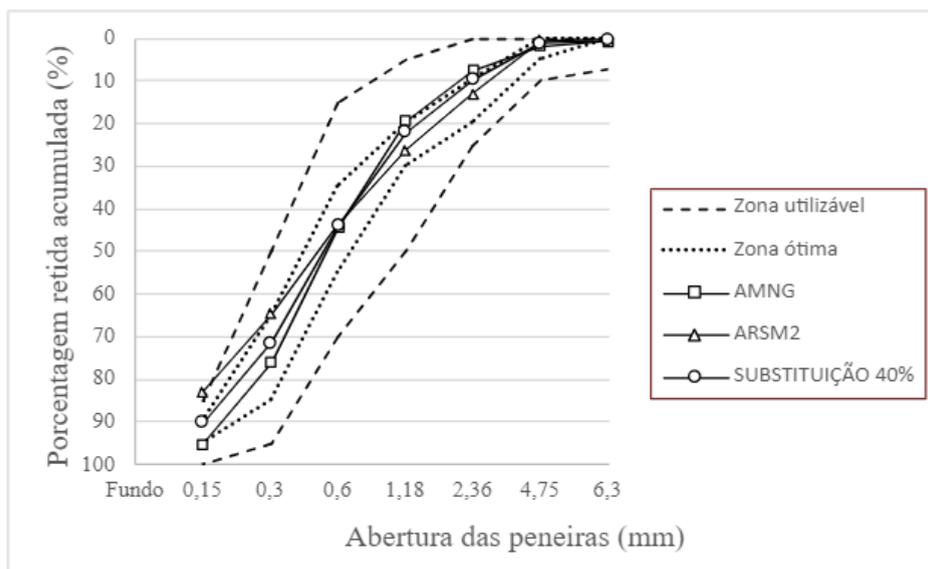


Fonte: Autor (2024)

4.2.1.6 Composições AMNG + ARSM2

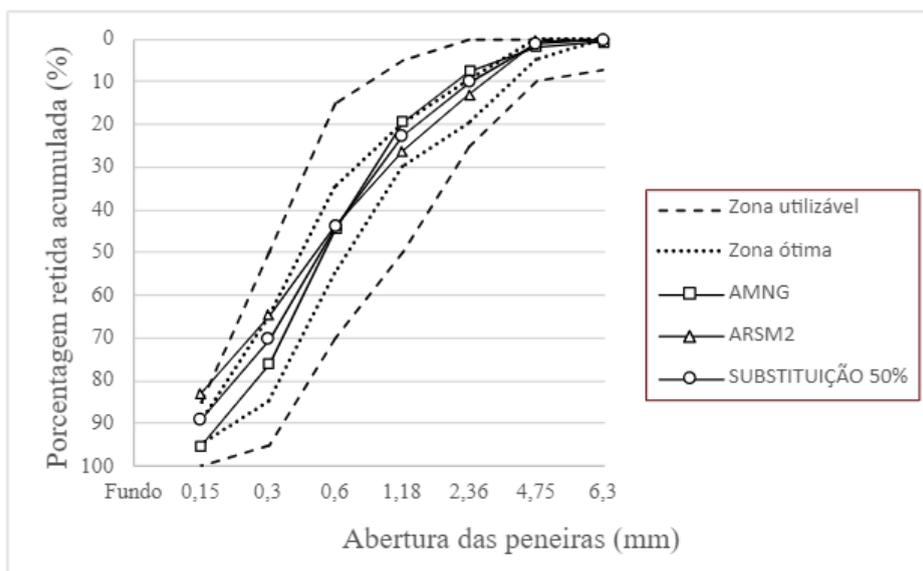
Nas composições que utilizam o AMNG e o ARSM2, observou-se que os teores de substituição de 40% a 60% de agregado natural por reciclado possuem curvas granulométricas dentro da zona ótima definida pela Norma. As curvas plotadas estão disponíveis nas Figuras 35 a 37.

Figura 35- Curvas granulométricas composição AMNG e ARSM2 com substituição de 40%



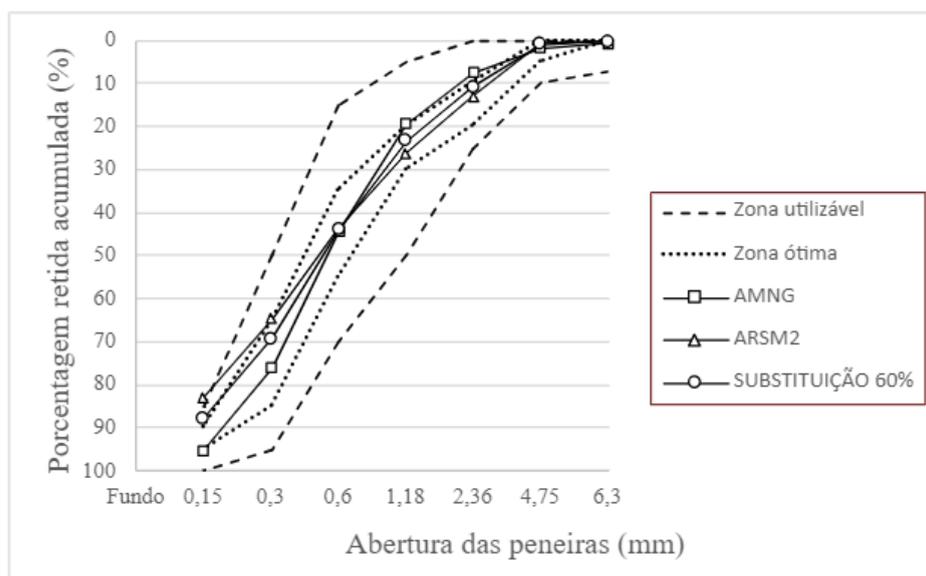
Fonte: Autor (2024)

Figura 36- Curvas granulométricas composição AMNG e ARSM2 com substituição de 50%



Fonte: Autor (2024)

Figura 37- Curvas granulométricas composição AMNG e ARSM2 com substituição de 60%



Fonte: Autor (2024)

4.2.2 Coeficiente de uniformidade

A partir das composições realizadas no *software* Excel, calculou-se os valores dos coeficientes de uniformidade das misturas. Os resultados obtidos estão destacados na Tabela 24.

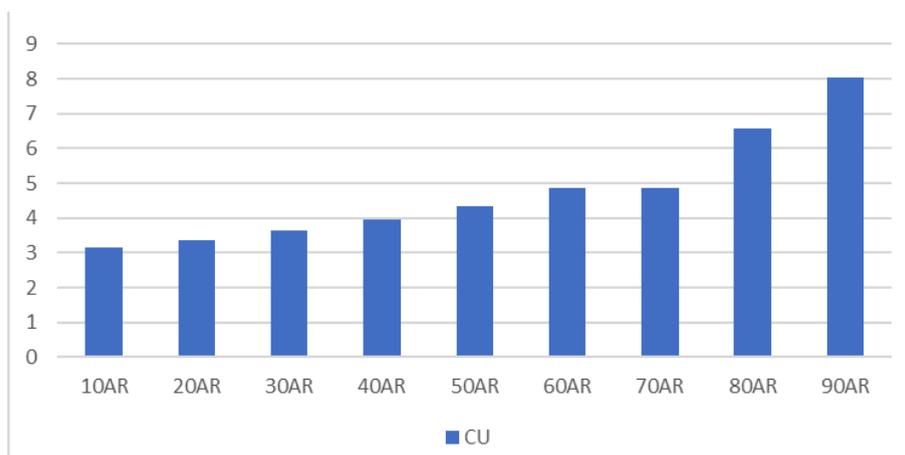
Tabela 24 - Composições x Coeficientes de Uniformidade

AMNF ARSM1	CU	AMNF ARPM	CU	AMNF ARSM2	CU	AMNG ARPM	CU	AMNG ARSM1	CU	AMNG ARSM2	CU
10AR.1	3,153	10AR.2	3,153	10AR.3	3,138	10AR.4	4,025	10AR.5	4,024	10AR.6	3,89
20AR.1	3,368	20AR.2	3,368	20AR.3	3,327	20AR.4	4,412	20AR.5	4,411	20AR.6	4,115
30AR.1	3,628	30AR.2	3,628	30AR.3	3,545	30AR.4	4,865	30AR.5	4,864	30AR.6	4,37
40AR.1	3,948	40AR.2	3,949	40AR.3	3,802	40AR.4	5,405	40AR.5	5,403	40AR.6	4,66
50AR.1	4,353	50AR.2	4,355	50AR.3	4,106	50AR.4	6,057	50AR.5	6,054	50AR.6	4,994
60AR.1	4,878	60AR.2	4,881	60AR.3	4,471	60AR.4	6,861	60AR.5	6,858	60AR.6	5,382
70AR.1	5,582	70AR.2	5,586	70AR.3	4,919	70AR.4	7,88	70AR.5	7,876	70AR.6	5,84
80AR.1	6,569	80AR.2	6,576	80AR.3	5,476	80AR.4	9,211	80AR.5	9,206	80AR.6	6,385
90AR.1	8,036	90AR.2	8,047	90AR.3	6,19	90AR.4	11,029	90AR.5	11,023	90AR.6	7,049

Fonte: Autor (2024)

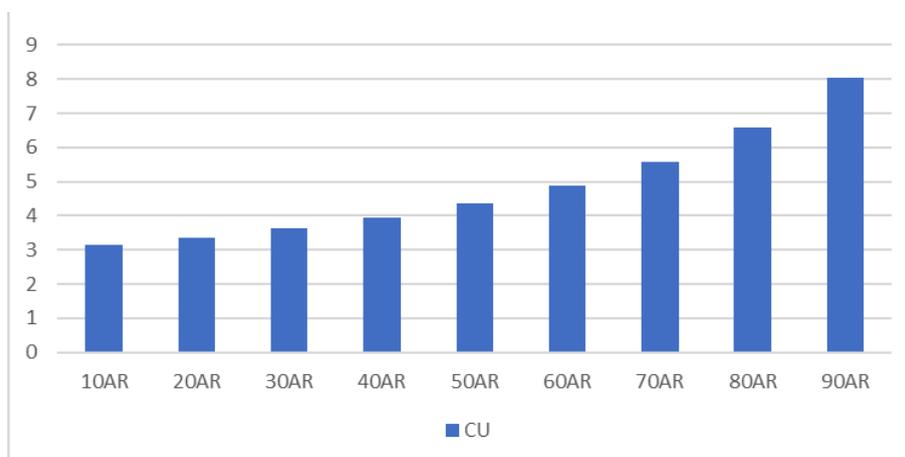
Para facilitar a visualização, plotou-se os gráficos individuais das composições de agregados naturais e reciclados com os seus respectivos coeficientes de uniformidade, que estão dispostos nas figuras 38 a 42.

Figura 38 - Composição x Coeficiente de Uniformidade (AMNF + ARSM1)



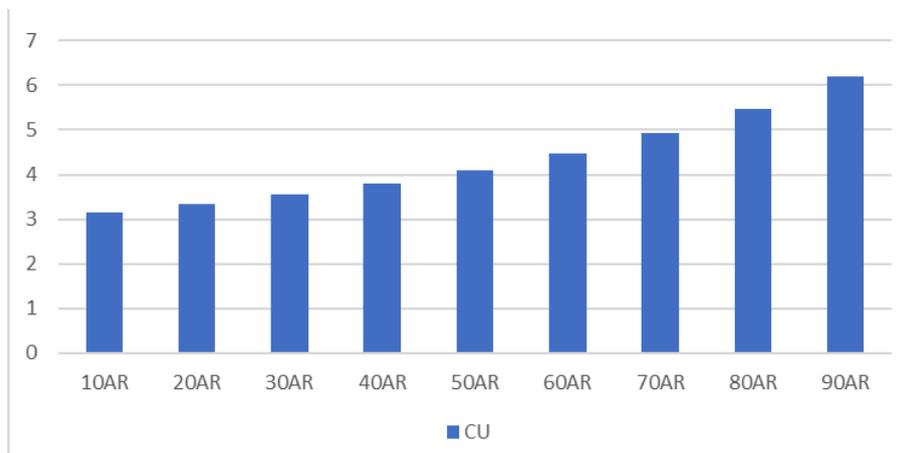
Fonte: Autor (2024)

Figura 39 - Composição x Coeficiente de Uniformidade (AMNF + ARPM)



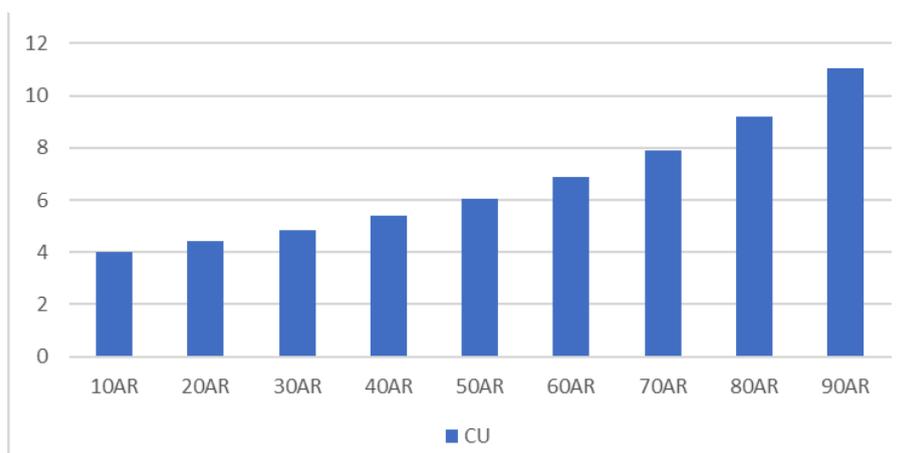
Fonte: Autor (2024)

Figura 40 - Composição x Coeficiente de Uniformidade (AMNF + ARSM2)



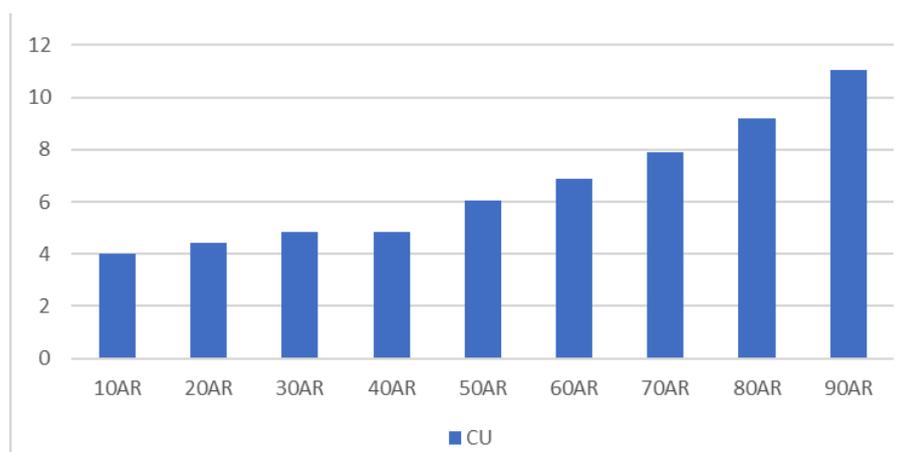
Fonte: Autor (2024)

Figura 41 - Composição x Coeficiente de Uniformidade (AMNG + ARPM)



Fonte: Autor (2024)

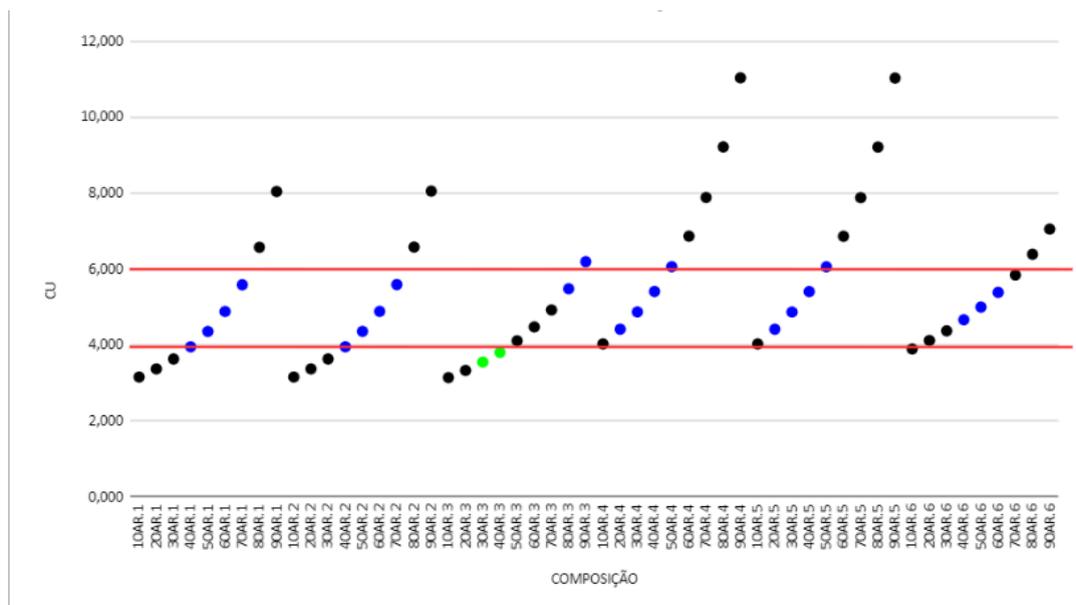
Figura 42 - Composição x Coeficiente de Uniformidade (AMNG + ARSM1)



Fonte: Autor (2024)

Por fim, reuniu-se todos os valores de coeficiente de uniformidade dos seis tipos de combinação de agregados miúdos naturais e reciclados e plotou-se um gráfico de dispersão, visando observar se há alguma tendência entre esses valores e o comportamento das curvas granulométricas das composições dentro das zonas utilizável e ótima definidas pela NBR 7211 (2022). No gráfico, apresentado na Figura 43, os pontos plotados em azul representam os valores de CU das misturas cujas curvas granulométricas estão dentro da zona ótima, além disso os dois pontos em verde as misturas com curvas granulométricas pertencentes à zona utilizável que foram estudadas.

Figura 43- Composição x Coeficiente de Uniformidade (todas as composições)



Fonte: Autor (2024)

Em que:

- As composições .1 se referem às misturas de AMNF + ARSM;
- As composições .2 se referem às misturas de AMNF + ARPM;
- As composições .3 se referem às misturas de AMNF + ARSM2;
- As composições .4 se referem às misturas de AMNG + ARPM;
- As composições .5 se referem às misturas de AMNG + ARSM1;
- As composições .6 se referem às misturas de AMNG + ARSM2.

Dessa forma, pode-se observar que há uma tendência entre os valores de coeficiente de uniformidade das composições que estão dentro dos limites da zona ótima, de modo que, em quase totalidade, os valores se encontram entre 4 e 6. Esse resultado vai de encontro com o esperado, visto que, para um $CU < 5$ tem-se uma areia uniforme e para $5 < CU < 15$, tem-se uma areia com uniformidade média.

No caso das composições .3, que se referem às misturas de AMNF e ARSM2, teve-se que os dois valores de CU das composições com curvas granulométricas pertencentes à zona ótima ficaram próximos a 6, limite superior desse intervalo definido. Ademais, para as composições escolhidas

para o estudo, destacadas em verde, que pertencem à zona utilizável, teve-se que os seus valores ficaram próximo a 4, limite inferior do intervalo.

4.2.3 Definição das composições utilizadas

Tendo posse das composições cujas curvas granulométricas estavam dentro dos limites da zona ótima, selecionou-se pares de misturas, para cada conjunto de agregados naturais e reciclados, para a realização dos ensaios de massa unitária. Para o caso das misturas de AMNF e ARSM2, selecionou-se as composições com substituições de 30% e 40% de agregado natural por reciclado, como citado no item anterior. Os resultados da seleção estão dispostos no Quadro 2.

Quadro 2 - Composições selecionadas para os ensaios de massa unitária

COMPOSIÇÃO	AGREGADOS	PORCENTAGEM (%)
1	AMNF	50
	ARPLM	50
2	AMNF	40
	ARPLM	60
3	AMNF	50
	ARSM1	50
4	AMNF	40
	ARSM1	60
5	AMNF	70
	ARSM2	30
6	AMNF	60
	ARSM2	40
7	AMNG	60
	ARSM1	40
8	AMNG	50
	ARSM1	50
9	AMNG	60
	ARPLM	40
10	AMNG	70
	ARPLM	30
11	AMNG	60
	ARSM2	40
12	AMNG	50
	ARSM2	50

Fonte: Autor (2023)

4.3 Massa específica, massa unitária e índice de vazios das composições de agregados miúdos naturais e reciclados

Os resultados das determinações das massas específicas, massas unitárias nos estados solto e compactado, assim como dos índices de vazios das composições de agregados miúdos naturais e reciclados estão dispostos na Tabela 25.

Tabela 25 - Massas específicas, massas unitárias nos estados solto e compactado e índices de vazios das composições de agregados miúdos naturais e reciclados

COMPOSIÇÃO	AGREGADOS	PORCENTAGEM (%)	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)	MASSA UNITÁRIA MÉTODO C (kg/m ³)	MASSA UNITÁRIA MÉTODO A (kg/m ³)	ÍNDICE DE VAZIOS
1	AMNF	50	2400	1394	1465	39
	ARPLM	50				
2	AMNF	40	2414	1353	1426	41
	ARPLM	60				
3	AMNF	50	2200	1385	1477	33
	ARSM1	50				
4	AMNF	40	2174	1366	1454	34
	ARSM1	60				
5	AMNF	70	2255	1438	1530	32
	ARSM2	30				
6	AMNF	60	2230	1427	1518	32
	ARSM2	40				
7	AMNG	60	2334	1426	1536	34
	ARSM1	40				
8	AMNG	50	2290	1410	1533	33
	ARSM1	50				
9	AMNG	60	2494	1408	1496	40
	ARPLM	40				
10	AMNG	70	2498	1442	1523	39
	ARPLM	30				
11	AMNG	60	2338	1430	1537	34
	ARSM2	40				
12	AMNG	50	2295	1409	1520	34
	ARSM2	50				

Fonte: Autor (2024)

4.4 Definição das composições de agregados miúdos naturais e reciclados utilizadas para a produção de argamassas

Os resultados obtidos nesta seleção, a partir dos índices de vazios das composições, estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Composições de agregados miúdos naturais e reciclados utilizadas nas produções de argamassas

COMPOSIÇÃO	AGREGADOS	PORCENTAGEM (%)
1	AMNG	50
	ARSM1	50
2	AMNG	70
	ARPLM	30
3	AMNF	50
	ARPLM	50
4	AMNG	50
	ARSM2	50
5	AMNF	60
	ARSM2	40
6	AMNF	50
	ARSM1	50

Fonte: Autor (2024)

4.5 Ensaio no estado fresco

A seguir estão os resultados do comportamento das argamassas no estado fresco.

Os valores referentes aos índices de consistência das composições estão presentes na Tabela 26.

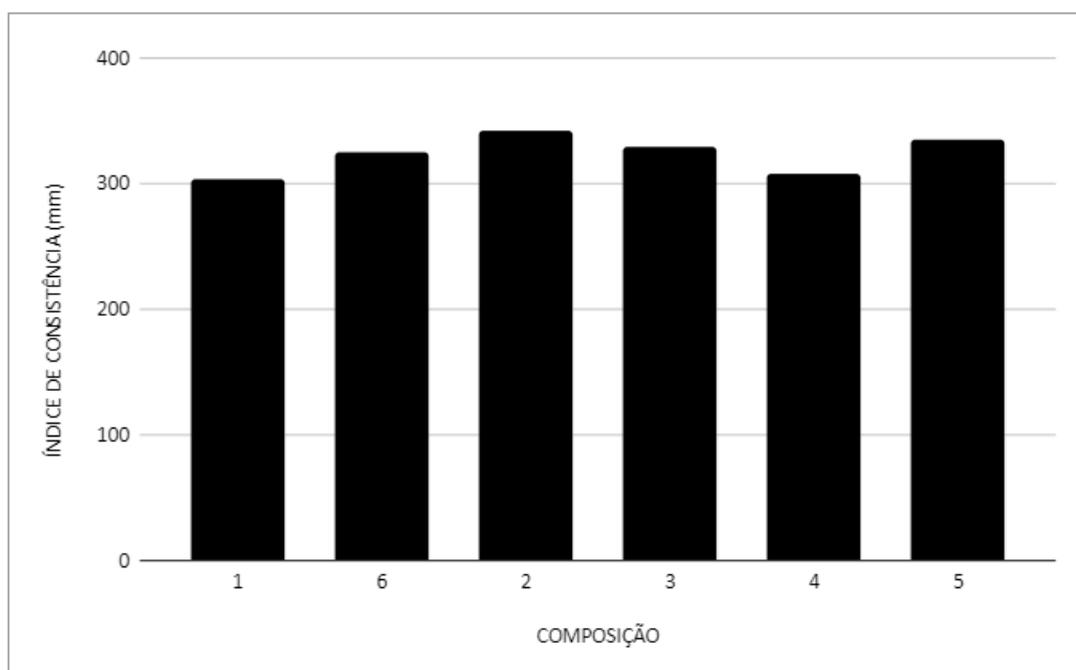
Tabela 26 - Índices de Consistência das Composições de Argamassa

COMPOSIÇÃO	ESPALHAMENTO (mm)			ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (mm)
	d1	d2	d3	
1	302,1	303,3	303,6	303
2	340	343,2	342,2	341,8
3	329,6	329,4	330	329,67
4	305	309,9	309,3	308,07
5	330,5	335,3	340	335,27
6	321,5	326,6	326,6	324,9

Fonte: Autor (2024)

Com base nos valores expostos na Tabela 26, plotou-se o seguinte gráfico de barras, mostrado na Figura 44, para verificar possíveis tendências nos resultados do ensaio com base nas composições de agregados.

Figura 44- Índice de consistência x Composição (todas as composições)



Fonte: Autor (2024)

No gráfico presente da Figura 43, as composições estão dispostas em pares de misturas de mesmo agregado reciclado (1 e 6; 2 e 3; 4 e 5). A partir da análise do gráfico, pode-se observar que em todos os casos, as composições com 50% (maior teor de substituição do estudo) de substituição de agregado miúdo natural por reciclado possuem menor índice de consistência. Na figura 45 tem-se o comportamento de uma das misturas após a realização do ensaio.

Figura 45- Argamassa submetida ao ensaio de Índice de Consistência



Fonte: Autor (2024)

Os valores referentes às massas específicas das composições estão presentes na Tabela 27.

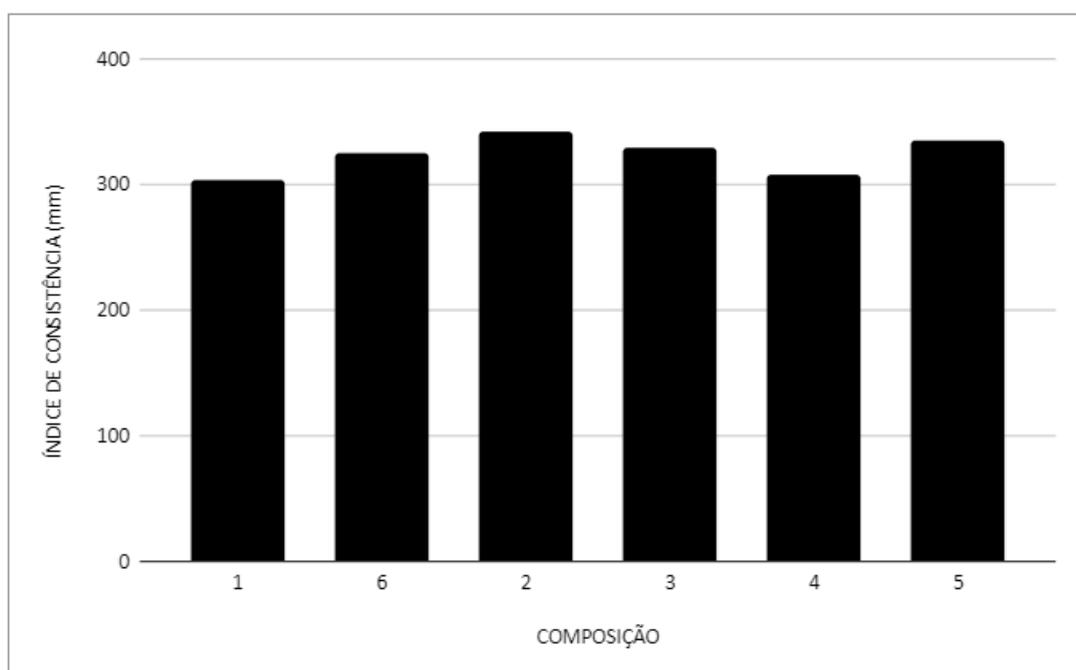
Tabela 27 - Massas Específicas das Composições de Argamassa

COMPOSIÇÃO	MASSA DO RECIPIENTE + ARGAMASSA (g)	MASSA DO RECIPIENTE (g)	VOLUME DO RECIPIENTE (mm ³)	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)
1	1738,9			2206,95
2	1758,2			2258,14
3	1740,4	906,9	376,99	2210,93
4	1733,4			2192,36
5	1748,9			2233,47
6	1741,8			2214,64

Fonte: Autor (2024)

Com base nos valores expostos na Tabela 27, plotou-se o seguinte gráfico de barras, mostrado na Figura 46, para verificar possíveis tendências nos resultados do ensaio com base nas composições de agregados.

Figura 46- Massa específica x Composição (todas as composições)



Fonte: Autor (2024)

No gráfico presente da Figura 46, as composições estão dispostas em pares de misturas de mesmo agregado reciclado (1 e 6; 2 e 3; 4 e 5). A partir da análise do gráfico, pode-se observar que em todos os casos, as misturas com maior porcentagem de substituição de agregado miúdo natural por reciclado possuem menor massa específica, mediante que era esperada, visto que os agregados reciclados possuem menor massa unitária, quando comparados aos agregados naturais.

4.6 Ensaio no estado endurecido

4.6.1 Resistência à tração na flexão aos 28 dias

Os valores referentes à resistência à tração na flexão média aos 28 dias das composições estão presentes na Tabela 28.

Tabela 28 - Resistência à Tração na Flexão Média aos 28 dias das Composições de Argamassa

COMPOSIÇÃO	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO MÉDIA (MPa)
1	1,8
2	1,65
3	1,57
4	1,39
5	1,63
6	1,64

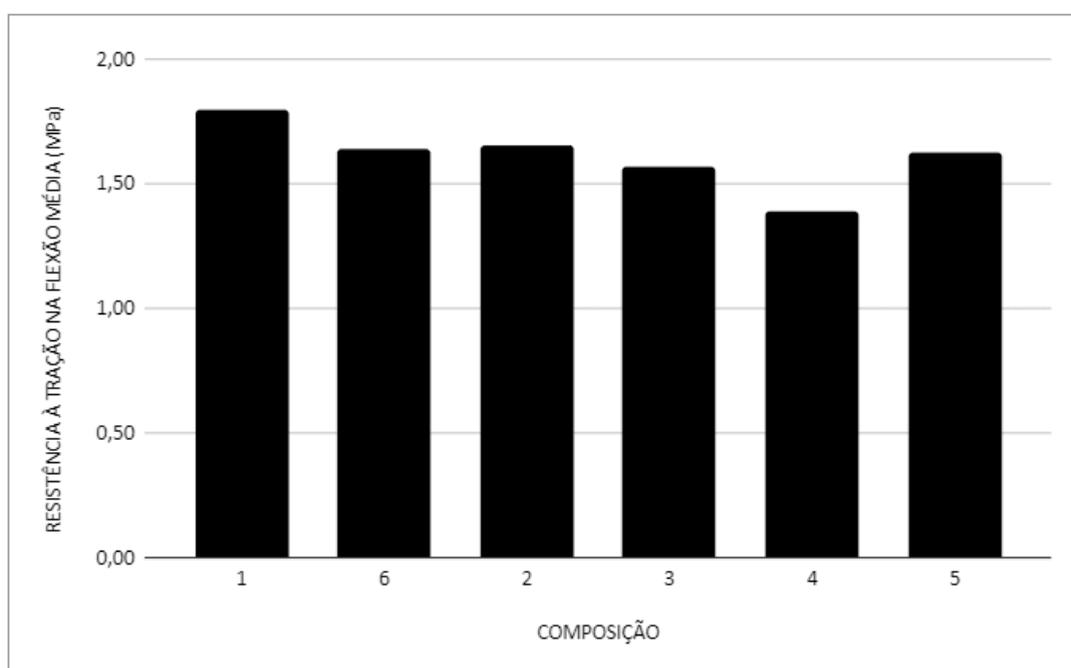
Fonte: Autor (2024)

Calculou-se o desvio absoluto máximo, que é a diferença entre a resistência média e a resistência individual que mais se afasta da média, como forma de verificar se os resultados estão de acordo com a exigência da NBR 13279 (ABNT, 2005). Os resultados dos desvios absolutos máximos, em todas

as 6 (seis) composições, foram menores do que o limite de 0,3 MPa imposto pela norma. Dessa forma, todos os casos estão de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005).

Além disso, com base nos valores expostos na Tabela 28, plotou-se o seguinte gráfico de barras, mostrado na Figura 47, para verificar possíveis tendências nos resultados do ensaio com base nas composições de agregados.

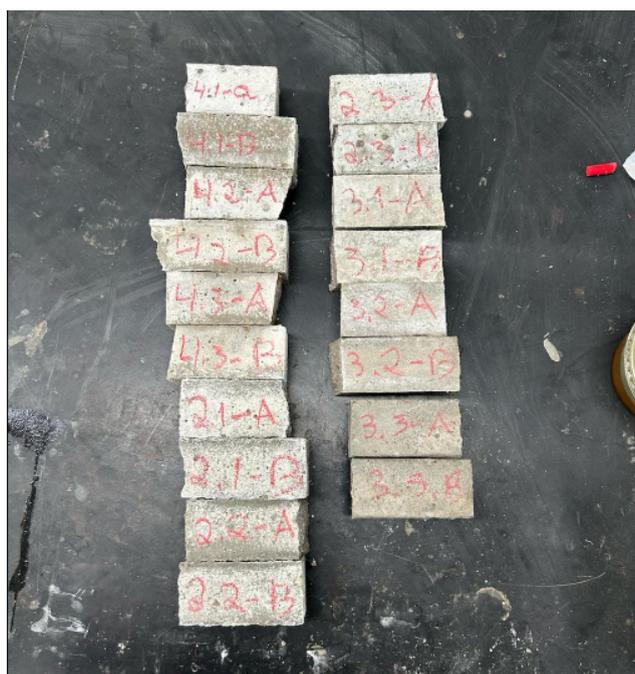
Figura 47- Resistência à tração na flexão média x Composição (todas as composições)



Fonte: Autor (2024)

No gráfico presente da Figura 47, as composições estão dispostas em pares de misturas de mesmo agregado reciclado (1 e 6; 2 e 3; 4 e 5). A partir da análise do gráfico, pode-se observar que em todos os casos, as misturas com menor porcentagem de substituição de agregado miúdo natural por reciclado possuem maior resistência à tração na flexão média. Além disso, dentre as composições 1 e 6, que possuem a mesma fração de substituição de agregado miúdo natural por reciclado, teve-se que a mistura 1, que possui areia grossa, demonstrou uma maior resistência média. Na figura 48 tem-se destacado os corpos de prova após a realização do ensaio.

Figura 48- Corpos de prova rompidos no ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor (2024)

4.6.2 Resistência à compressão axial aos 28 dias

Ao calcular-se o desvio absoluto máximo, como forma de verificar se os resultados estão de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005), teve-se que, em todas as 6 (seis) composições, esses valores foram superiores ao imposto pela norma, que é de 0,5 MPa. Dessa forma, como a norma citada exige um mínimo de 4 (quatro) corpos de prova por mistura para o cálculo da resistência à compressão axial média, eliminou-se os 2 (dois) valores com maior desvio absoluto, a fim de reduzir a variabilidade dos resultados.

Assim, calculou-se uma nova resistência à compressão axial média através da média aritmética dos valores obtidos em 4 (quatro) corpos de prova por mistura. Além disso, fez-se novamente o cálculo dos desvios absolutos máximos das composições, e observou-se que as argamassas 1, 3 e 6 atenderam aos limites previstos na NBR 13279 (ABNT, 2005), enquanto as 2, 4 e 5 não atenderam. No entanto, como a norma exige um mínimo de 4 (quatro) corpos de prova por mistura de argamassa, não foi possível eliminar mais nenhum resultado a fim de corrigir os desvios absolutos máximos das misturas que não atenderam esse critério da norma. Os valores referentes à resistência à compressão axial média das composições estão presentes na Tabela 29.

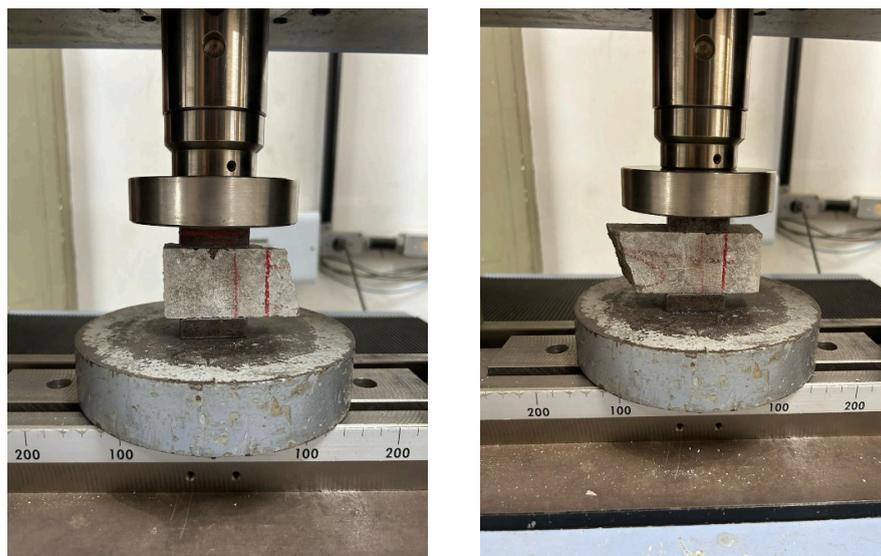
Tabela 29 - Resistência à Compressão Axial Média aos 29 dias das Composições de Argamassa

COMPOSIÇÃO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA (MPa)
1	19,65
2	24,27
3	20,19
4	19,13
5	24,78
6	22,96

Fonte: Autor (2024)

Uma das possíveis causas para a variabilidade nos resultados de resistência à compressão axial das misturas seria a moldagem dos corpos de prova. No entanto, como não houve não-conformidades com os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão, infere-se que possivelmente esse não seja o problema. Ademais, como os corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à compressão axial são derivados do rompimento dos CP utilizados nos ensaios de resistência à tração na flexão, pode-se levantar a possibilidade de que essas variações sejam causadas por avarias nos espécimes durante o primeiro ensaio. No entanto, isso não está previsto em norma. A Figura 49 mostra como foram dispostos os corpos de prova para a realização do ensaio de resistência à compressão axial.

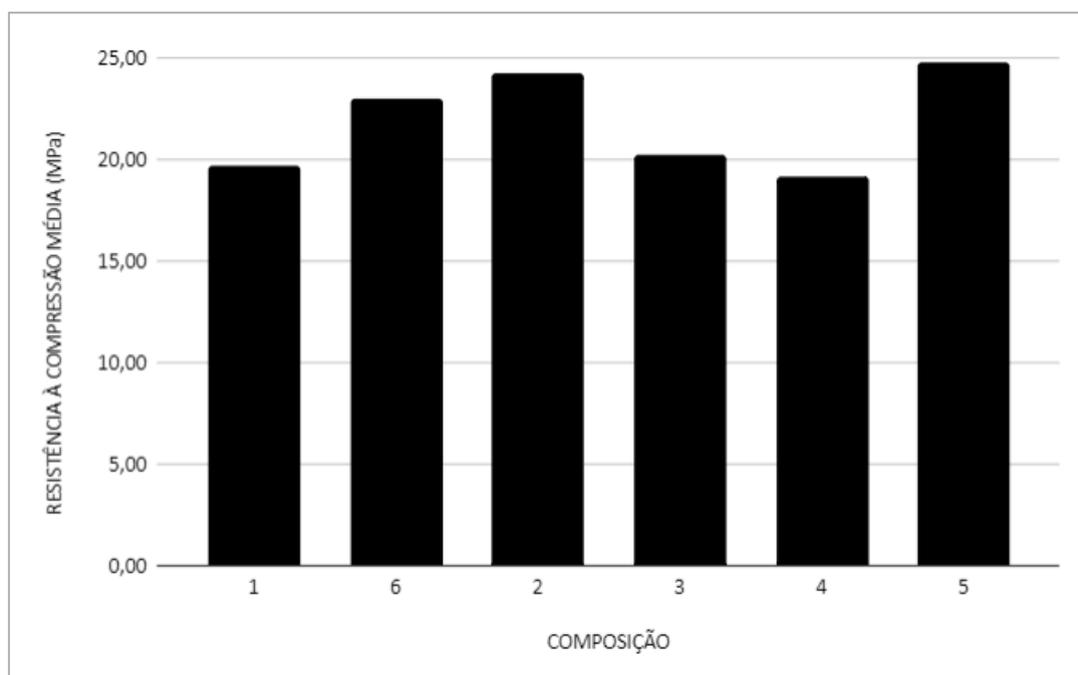
Figura 49- Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Autor (2024)

Ademais, com base nos valores expostos na Tabela 29, plotou-se o seguinte gráfico de barras, mostrado na Figura 50, para verificar possíveis tendências nos resultados do ensaio com base nas composições de agregados.

Figura 50- Resistência à compressão média x Composição (todas as composições)



Fonte: Autor (2024)

No gráfico presente da Figura 50, as composições estão dispostas em pares de misturas de mesmo agregado reciclado (1 e 6; 2 e 3; 4 e 5). A partir da análise do gráfico, pode-se observar que em todos os casos, as misturas com menor porcentagem de substituição de agregado miúdo natural por reciclado possuem maior resistência à compressão média. Além disso, dentre as composições 1 e 6, que possuem a mesma fração de substituição de agregado miúdo natural por reciclado, teve-se que a mistura 6, que possui areia fina, demonstrou uma maior resistência média.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, a influência da utilização de agregados reciclados mistos, provenientes do beneficiamento de RCD, como substituição parcial de agregados miúdos na produção de argamassas foi analisada pelas propriedades do estado fresco e do estado endurecido das misturas.

A parte inicial deste trabalho consistiu na análise, através do *software Excel*, da granulometria de combinações entre agregados miúdos naturais e reciclados, de forma que a parcela de substituição do material de origem natural partisse de 10% a 90%. Essa etapa permitiu observar as misturas que pertenciam à zona ótima definida pela NBR 7211 (ABNT, 2022). Com base nos resultados dessa análise, pôde-se fazer a caracterização das composições de agregados miúdos que foram utilizadas para a produção das argamassas. No estudo, foram utilizadas substituições de 30% a 50% de AMN por AMR na produção das misturas cimentícias, e os resultados seguiram o esperado:

- As composições com maior percentagem de AR obtiveram os menores resultados nos ensaios de índice de consistência, como mostrado no estudo de Frotte *et al.* (2017), em que houve a realização de dosagens com substituições parciais de agregados miúdos naturais por agregados reciclados, obtendo-se a diminuição de trabalhabilidade da mistura ao se aumentar o percentual de substituição;
- As composições com maior percentagem de AR obtiveram os menores resultados nos ensaios massa específica, como mostrado em diversos estudos, como os de Rodrigues (2014) e Cabral *et al.* (2007), nos quais mostraram que as misturas que incorporam agregados reciclados possuem a tendência de apresentar uma redução nos valores proporcional ao teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados, devido aos valores de massa específica dos agregados reciclados serem menores em relação aos agregados convencionais;
- As composições com maior percentagem de AR obtiveram os menores resultados nos ensaios de resistência à tração na flexão e compressão axial, como mostrado no estudo de Santana (2020), em que foi feita a produção de misturas com diferentes teores de substituição de agregados naturais por

reciclados e obteve-se uma grande redução dos valores das resistências com o aumento do teor do material reciclado.

Ademais, teve-se que a argamassa 5 (mistura 5), cujo esqueleto granular é composto por 60% de AMNF e 40% de ARSM2, obteve o maior resultado de resistência à compressão axial média (24,78 MPa) e a sua composição de agregados teve o menor valor de índice de vazios (32).

Em contrapartida, teve-se que a argamassa 4 (mistura 4), cujo esqueleto granular é composto por 50% de AMNG e 50% de ARSM2, obteve os menores resultados nos ensaios de resistência à compressão axial média (19,13 MPa), resistência à tração na flexão média (1,39 MPa) e massa específica no estado fresco (2192,36 kg/m³), enquanto a sua composição de agregados teve o valor de índice de vazios igual a 34.

De modo geral, foi verificado que é viável a utilização dos agregados miúdos reciclados como substituição parcial do esqueleto granular para a produção de argamassas, destacando que as substituições devem respeitar as propriedades requeridas pelo usuário. Para a utilização na produção de futuros concretos com fins estruturais, devido aos resultados das misturas nos estados fresco e endurecido, o presente trabalho recomenda a adoção da combinação AMNF (60%) + ARSM2 (40%).

Dependendo das características dos AN, os AR podem apresentar resultados semelhantes em termos de desempenho das misturas cimentícias. Ou seja, a depender das propriedades dos agregados naturais, a aplicação dos agregados reciclados nas composições de argamassas e concretos pode ser viável e até mesmo benéfica em comparação.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

- Realizar comparativo de resistências mecânicas com a variação da relação água/cimento;
- Comparativo entre métodos de composições granulométricas para a determinação da granulometria ideal;
- Utilização das argamassas produzidas nesse estudo para a fabricação de concretos;

- Analisar as características das argamassas produzidas com combinações de agregados miúdos naturais e reciclados para outras finalidades.

REFERÊNCIAS

ANGELIM, R. R.; ANGELIM, S. C. M.; CARASEK, H.. **Influência da distribuição granulométrica da areia no comportamento dos revestimentos de argamassa**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V., 2003, São Paulo. Anais... São Paulo: ANTAC, 2003.

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregado de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2005.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com agregados reciclados**. ISAIA, GC Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: Arte Interativa, 2011. p. 3.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. ABRELPE. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: Download Panorama 2021 – Abrelpe Acesso em: 11 abr. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467**. Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 7211**. Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos . Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7218**. Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 13277**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13278** Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13528-2**. Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração - Parte 2: Aderência ao substrato. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 13529**. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

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

_____. **NBR 16541**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Preparo da mistura para a realização de ensaios . Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 16915**. Agregados — Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. **NBR 16916**. Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

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

_____. **NBR 16973**. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. **NBR 17053**. Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

_____. **NBR 17054**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA Nº 307, de 05/07/2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA Nº 448, de 18/01/2012**.

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

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 5.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1983.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. 213 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2005.

CHAVES, A. P. et al. **Tecnologia Mineral e suas aplicações na reciclagem de resíduos de construção e demolição**. In: 61 Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Anais. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.

CHEN, H. J.; YEN, T.; CHEN, K. H. **Use of buildings rubbles as recycled aggregates**. Cement and Concrete Research, v. 33, p. 125-132, 2003.

FERRO, Aline Maria Reis. **Reologia do concreto autoadensável leve com agregados reciclados a partir de variações na dosagem de adições minerais**. In: Relatório final do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica - PIBIC, Universidade Federal de Alagoas. 2016.

FROTTÉ, Camila et al. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 22, p. e11811, 2017.

FURNAS, C. C. **Grading aggregates, I - mathematical relations for beds of broken solids of maximum density**. Industrial and Engineering Chemistry, v. 23, n. 9; Sep. 1931. p. 1052 - 1058.

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

GOMES, S. C.; ZHOU, J. L.; LI, W.; LONG, G. **Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: a review**. Resources, Conservation & Recycling: Michigan, v. 145, p. 148-159, 2019.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. **Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate – an experimental study**. Cement and concrete research, v. 32, p. 1301-1311, 2002.

GOLÇALVES, J.P.; TAVARES, L.M.; TOLEDO F., R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R.; CUNHA, E.R. **Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars**. Cement and Concrete Research, volume 37, pages 924 – 932, 2007.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2001.

MALTA, J. O.; SILVA, V. S.; GONÇALVES, J. P. **ARGAMASSA CONTENDO AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**. Revista Eletrônica De Gestão E Tecnologias Ambientais, 1(2), 176–188. 2013.

MALTA, J. O. **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição**. 2012. Dissertação (Mestrado) –Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador/BA, 2012.

MALTA, Juliana Oliveira *et al.* **Influência da pré-saturação do agregado miúdo reciclado na viscosidade e resistência à compressão de argamassas**. Ambiente Construído, v. 14, p. 85-98, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. IBRACON: São Paulo; 2008.

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

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. 2001. 187p. Tese (Doutorado) - Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Carlos, São Carlos.

PIMENTEL, Lia Lorena *et al.* **Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil–Avaliação de características físicas e mecânicas**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, p. e-11969, 2018.

RELATÓRIO de ensaios com agregados reciclados secundários miúdo e graúdo provenientes de resíduos de demolição. **Relatório de pesquisa**. LEMA/UFAL. Maceió, 2023a.

RELATÓRIO de ensaios com agregados reciclados secundários miúdo e graúdo provenientes de resíduos de demolição. **Relatório de pesquisa**. LEMA/UFAL. Maceió, 2023b.

RELATÓRIO de ensaios com agregados reciclados primários limpos miúdo e graúdo provenientes de resíduos de demolição. **Relatório de pesquisa**. LEMA/UFAL. Maceió, 2023c.

RELATÓRIO de ensaios com agregados miúdos naturais. **Relatório de pesquisa**. LEMA/UFAL. Maceió, 2023d.

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

SALLES, P. V.; GOMES, C. L.; POGGIALI, F. S. J.; RODRIGUES, C. de S.. **A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 177-196, jul./set. 2021.

SANTANA, T. da S.; PEREIRA, C. H. de A. F. **Avaliação da influência da utilização de agregado miúdo reciclado em argamassas estabilizadas**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 305-318, jul./set. 2020.

SIPRES, Clarice. **ANÁLISE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA PRODUÇÃO DE CONCRETO SECO PARA PISO INTERTRAVADO**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SOUZA, André. **ARGAMASSA E CONCRETO COM RESÍDUOS DE MÁRMORES E GRANITOS**. In: 59º Congresso Brasileiro do Concreto, 2017, Rio Grande do Sul - Brasil.

TRISTÃO, F. Avancini. **A influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. Florianópolis, 1995. 197p. Dissertação (Mestrado) Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. 197p.

ULSEN, C. **Caracterização tecnológica de resíduos de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos da construção e demolição**. 2011. 222p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2003.

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