



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

MARIA DE LARA PEIXOTO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE ARGAMASSAS
COM AGREGADO MIÚDO DE CONCRETO RECICLADO**

Recife, PE
2023



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

MARIA DE LARA PEIXOTO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE ARGAMASSAS
COM AGREGADO MIÚDO DE CONCRETO RECICLADO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Stela Fucale Sukar

Co-orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Nathalia Bezerra de Lima

Recife, PE
2023

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco

S586a Silva, Maria de Lara Peixoto da
Avaliação do desempenho mecânico de argamassas com
agregado miúdo de concreto reciclado. / Maria de Lara
Peixoto da Silva. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2023.

90 f. il.

Orientadora: Profa. Dra. Stela Fucale Sukar
Coorientadora: Profa. Dra. Nathalia Bezerra de Lima

Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade de
Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

1. Resíduos de Construção e Demolição. 2. Resistência a
Compressão. 3. Agregado Reciclado. 4. Argamassa.
I. Construção Civil - Dissertação. II. Sukar, Stela Fucale
(orient.). III. Lima, Nathalia Bezerra de (coorient.). IV.
Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado
em Construção Civil. V. Título.

CDD: 690.028

MARIA DE LARA PEIXOTO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE ARGAMASSAS
COM AGREGADO MIÚDO DE CONCRETO RECICLADO**

BANCA EXAMINADORA:

Orientadora

Documento assinado digitalmente
 STELA FUCALE SUKAR
Data: 21/03/2023 11:58:52-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Stela Fucale Sukar
Universidade de Pernambuco

Coorientadora

Documento assinado digitalmente
 NATHALIA BEZERRA DE LIMA
Data: 20/03/2023 13:14:53-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Nathalia Bezerra de Lima
Universidade Federal de Pernambuco

Examinadores

Documento assinado digitalmente
 ELIANA CRISTINA BARRETO MONTEIRO
Data: 20/03/2023 22:40:57-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro
Universidade de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 TIAGO FELIPE DE ABREU SANTOS
Data: 20/03/2023 14:23:27-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos
Universidade Federal de Pernambuco

DEDICATÓRIA

*À minha mãe (Sandra Peixoto),
eu meu esposo (Carlos Lima)
e à minha filha (Maria Eva).*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado coragem e fé, sempre me guiando ao longo desta caminhada árdua e prazerosa e me cercando de pessoas incríveis, principalmente, por ter me dado forças para seguir em frente com o meu programa experimental durante os nove meses de gestação.

À minha querida mãe, Sandra, por toda oração, dedicação, cuidado, amparo, amor e paciência em toda a minha vida. Que sabe que minhas lutas não foram fáceis, que muitas dificuldades surgiram ao longo do meu caminho, mas com a graça de Deus, muitos sonhos foram realizados.

Agradeço ao meu esposo, Carlos, por ser paciente, amoroso, companheiro, compreensivo, por me incentivar nos momentos em que mais precisei e por ter me ajudado muito durante os dias e as madrugadas de trabalhos cansativos no laboratório.

À minha filha Maria Eva por ser meu motivo de força, garra e motivação.

À minha família pela motivação e suporte oferecidos durante toda a minha trajetória e por acreditarem na minha capacidade, cada um teve um papel fundamental.

À Professora Dra^a. Stela Fucale Sukar pela confiança em mim depositada, humildade e gentileza na orientação desta dissertação, e acima de tudo, por me oferecer novos desafios e novas oportunidades.

À Professora Dra^a. Nathalia Bezerra de Lima por ter aberto as portas do Laboratório de Engenharia Molecular e Materiais (LEM) do Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM), pela confiança em mim depositada, pela orientação dada, pelas oportunidades, pela motivação, pelos ensinamentos, pelo cuidado, carinho e conselhos.

Ao Professor Dr. Jaime Cabral, Coordenador do PEC, pela atenção, compreensão e paciência, principalmente durante a minha qualificação que ocorreu no período de gestação e a defesa que ocorreu durante a minha licença maternidade.

À Lúcia Rosani, secretária do PEC, pela atenção, paciência e carinho demonstrados desde o início do Mestrado.

A todos os professores do PEC, permanentes e colaboradores, que contribuíram para a minha formação acadêmica e profissional. Em especial, a Professora Dra^a. Eliana Barreto pela leitura atenciosa, correção, críticas construtivas e sugestões na banca deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) pela execução dos ensaios e pelas análises necessárias para caracterização microestrutural.

Ao Professor Dr. Tiago Felipe, por também abrir as portas do INTM para o desenvolvimento da minha pesquisa e pela leitura, críticas construtivas e sugestões durante a sua participação na banca deste trabalho, além da ajuda que me ofereceu durante esse percurso.

À minha amiga Heliana Nascimento, por toda dedicação e ajuda fornecidas para o meu crescimento e desenvolvimento científico. Muito obrigada!

Ao meu colega Sanderson, por ser meu parceiro nesse mestrado, além de um grande exemplo de profissional.

Aos colegas do LEM, Laboratório de Engenharia Molecular e Materiais: Heliana Nascimento, Bruno Teti, Luiz Fernando, Hisla Cavalcante, Adson Régis, Rafael Manta e Elena Violin, por todas as colaborações científicas.

Aos meus amigos que permaneceram ao meu lado em momentos de dificuldade e de alegria durante toda a graduação e Mestrado, em especial a Luciana, Júlia e Lucas.

Ao Programa University Chapter da SBPMat - Universidade Federal de Pernambuco por promover meu crescimento profissional, habilidades de liderança, visão multi-institucional e multidisciplinar na área de Ciência e Engenharia de Materiais e áreas afins.

Aos órgãos de fomento: FACEPE, CNPQ, FACEPE, FINEP, CAPES.

Os meus sinceros agradecimentos às empresas Tecomat – Tecnologia da Construção e Materiais por fornecer os resíduos de concreto essenciais para este estudo e à Ciclo ambiental pelo beneficiamento dos resíduos de concreto.

Ao meu primo, Alberto Alexandre, por te me ajudado a durante a preparação para os ensaios no meu período de gestação.

À Amanda Peixoto, por ter me orientado para o processo seletivo do mestrado.

A todos que contribuíram de forma direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.

RESUMO

Com a crescente demanda da indústria da construção civil em reduzir os impactos negativos no meio ambiente provenientes da extração de agregados naturais, geração de resíduos e descarte deste material, nas últimas décadas, pesquisas referentes à utilização de agregados reciclados miúdos, especialmente na produção de argamassa, têm sido desenvolvidas em função dos seus benefícios ambientais e econômicos. Neste sentido, a pesquisa tem como objetivo analisar o desempenho mecânico de um conjunto de argamassas produzidas com substituição parcial e total de agregados reciclados miúdos de resíduos de concreto. O programa de investigação laboratorial consistiu na coleta de materiais e realização de ensaios físicos e mecânicos nos agregados natural e reciclado e nas argamassas produzidas. Foram realizados ensaios de caracterização dos agregados, como composição granulométrica, massa unitária, índice de volume de vazios, massa específica, absorção de água e módulo de finura. Posteriormente, foram moldados corpos de prova cilíndricos de $\varnothing 5 \times 10$ cm de argamassa considerando as proporções de referência de 1:2,5, 1:4, 1:5,5 e 1:7, com substituições parciais e total da areia fina de 30%, 50% e 100% pelo agregado miúdo reciclado, e conduzidos ensaios de caracterização no estado fresco, como determinação do índice de consistência, densidade de massa. No estado endurecido foram realizados ensaios de resistência à compressão para avaliar o comportamento mecânico dos materiais preparados. Além disto, ensaios de difração de raios-x foram realizados para obter informações estruturais das argamassas. A análise da composição granulométrica do agregado miúdo reciclado mostrou que a dimensão máxima característica dos grãos corresponde a 2,36 mm, equivalente a DMC da areia fina utilizada, enquanto o módulo de finura de 2,83, sendo superior em aproximadamente 2,7%. Por sua vez, a absorção de água do agregado reciclado foi de 20,1%, a massa específica correspondeu a 1,56g/cm³ e a massa específica do agregado seco de 1,99 g/cm³, sendo superior à absorção de água da areia fina que corresponde à 12,5%. A substituição parcial de 30% e 50% apresentaram melhores resultados em relação à consistência da argamassa, exceto para a proporção de 1:7,0 que ultrapassou o índice de consistência fixado, devido a relação água cimento ser superior às demais proporções. Os resultados de resistência à compressão simples revelaram que as argamassas preparadas com as proporções de 1:2,5, 1:4 e 1:5,5 podem ser utilizadas para fins estruturais uma vez que atingiram a resistência à compressão mínima de 30MPa. A proporção de 1:4 com taxa de substituição de 30% apresentou melhor trabalhabilidade e resistência à compressão de 44,92MPa, sendo a mais indicada. Além disso, Todos os difratogramas DRX indicaram picos de difração referentes às fases do Quartzo (SiO₂), bem como Quartzo (SiO₂), bem como Portlandita (Pt, Ca(OH)₂), Etringita (Et, Ca₆ Al₂ (SO₄)₃ (OH)₁₂ .26H₂O). Em todos os difratogramas, o SiO₂ apresentou pico mais intenso com 2 θ em 26,5°. Finalmente, conclui-se que a utilização de agregado miúdo de concreto reciclado para a produção de argamassa contribui para o desenvolvimento sustentável uma vez que é possível reduzir a utilização de matérias primas naturais, tal como a areia.

PALAVRAS-CHAVE: resíduos de construção e demolição, resistência à compressão, agregado reciclado, argamassa.

ABSTRACT

With the growing demand from the civil construction industry, in order to reduce the negative impacts on the environment from the extraction of natural aggregates, waste generation, and disposal of this material, in recent decades, research has been carried out on the use of fine recycled aggregates, especially in the processing of mortar, have been developed based on their environmental and economic benefits. In this sense, the main goal of this work was to analyze the mechanical performance of a set of mortars produced with partial and total replacement of fine recycled aggregates from concrete waste. The methodology involved collecting materials and performing physical and mechanical tests on the produced natural and recycled aggregates and mortars. In addition, aggregate characterization tests were also carried out, such as granulometric composition, unit mass, void volume index, specific mass, water absorption and fineness modulus. Subsequently, cylindrical specimens of $\varnothing 5 \times 10$ cm of mortar were prepared by considering the reference proportions of 1:2.5, 1:4, 1:5.5 and 1:7, with partial and total replacement of fine sand of 30%, 50% and 100% by recycled fine aggregate, and characterization tests conducted in the fresh state, such as determination of the consistency index, density of pasta. In the hardened state, compressive strength tests were performed to evaluate the mechanical behavior of the prepared materials. In addition, x-ray diffraction tests were carried out to obtain structural information on the mortars. The analysis of the granulometric composition of the recycled fine aggregate showed that the maximum characteristic dimension of the grains corresponds to 2.36 mm, equivalent to the DMC of the fine sand used, while the fineness modulus of 2.83, being approximately 2.7% higher. Further, the water absorption of the recycled aggregate was 20.1%, the specific mass corresponded to 1.56g/cm³ and the specific mass of the dry aggregate was 1.99 g/cm³, being higher than the water absorption of the fine sand corresponding to 12.5%. Partial replacement of 30% and 50% showed better results in terms of mortar consistency, except for the proportion of 1:7.0 which exceeded the fixed consistency index, due to the water-cement ratio being higher than the other proportions. The compressive strength results revealed that the mortars prepared with the proportions of 1:2.5, 1:4 and 1:5.5 can be used for structural investigations since they reached the minimum compressive strength of 30MPa. The 1:4 ratio with a replacement rate of 30% showed better workability and a compressive strength of 44.92MPa, being the most indicated. All XRD diffractograms indicated diffraction peaks referring to the phases of Quartz (SiO₂), as well as Portlandite (Pt, Ca(OH)₂), Ettringite (Et, Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂.26H₂O). In all diffractograms, SiO₂ presented the most intense peak with 2θ at 26.5°. Finally, the employ of fine recycled concrete aggregate to produce mortar contributes to sustainable development since it is possible to reduce the use of natural raw materials, such as sand.

KEYWORDS: construction and demolition waste, compressive strength, structural properties, recycled aggregate, mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Levantamento da implementação de usinas de reciclagem (privadas e públicas) de RCD no Brasil ao longo dos anos.....	14
Figura 2 - Perfil das usinas de reciclagem de RCD (privada, pública ou pública-privada) no Brasil ao longo dos anos.....	15
Figura 3 - Produção dos agregados reciclados e a capacidade máxima das usinas instaladas no Brasil, em milhões de toneladas.	16
Figura 4 - Composição granulométrica do agregado reciclado e areia natural.	18
Figura 5 - Distribuição granulométrica – Areia Natural e Agregado Reciclado.....	19
Figura 6 - Influência do teor de AR na densidade em massa: a) misturas sem correção da relação a/c; b) mistura com correção da água cimento.....	24
Figura 7 - Microscopia eletrônica de varredura.....	26
Figura 8 - Difractometria de Raios X.....	27
Figura 9 - Análise térmica	28
Figura 10 - Fluxograma da pesquisa	30
Figura 11 - Corpos de prova de concreto com resistência de 30MPa para beneficiamento.....	31
Figura 12 - Britador utilizado na pesquisa	32
Figura 13 - Agregado miúdo reciclado.....	32
Figura 14 - Armazenamento dos agregados miúdos reciclados	33
Figura 15 - Peneiramento do agregado miúdo reciclado (amostra 1).....	36
Figura 16 - Peneiramento do agregado miúdo reciclado (amostra 2).....	36
Figura 17 - Argamassadeira para produção da argamassa	40
Figura 18 - Corpos de prova após moldagem.....	40
Figura 19 - Desmoldagem e identificação dos corpos de prova.....	40
Figura 20 - Cura submersa.....	40
Figura 21 - Ensaio para determinação do índice de consistência	42
Figura 22 - Corpo de prova preparado para o ensaio de resistência à compressão simples.....	43
Figura 23 - Curva granulométrica para o material acumulado da areia fina	45
Figura 24 - Curva granulométrica para o material acumulado do agregado miúdo reciclado ..	47
Figura 25 - Índice de consistência das proporções de referência	48
Figura 26 - Índice de consistência da proporção 1:2,5 com substituições de 30%, 50% e 100%	49

Figura 27 - Índice de consistência da proporção 1:4 com substituições de 30%, 50% e 100%	49
Figura 28 - Índice de consistência da proporção 1:5,5 com substituições de 30%, 50% e 100%	50
Figura 29 - Índice de consistência da proporção 1:7 com substituições de 30%, 50% e 100%	51
Figura 30 - Resultados do ensaio de resistência à compressão da proporção 1:2,5 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%	56
Figura 31 - Resultados do ensaio de resistência à compressão da proporção 1:4 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%	57
Figura 32 - Resultados do ensaio de resistência à compressão da proporção 1:5,5 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%	58
Figura 33 - Resultados do ensaio de resistência à compressão da proporção 1:7 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%	58
Figura 34 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:2,5 de referência	60
Figura 35 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:2,5 com substituição de 30%	61
Figura 36 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:2,5 com substituição de 50%	61
Figura 37 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:2,5 com substituição de 100%	62
Figura 38 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:4 de referência	63
Figura 39 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:4 com substituição de 30%	63
Figura 40 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:4 com substituição de 50%	64
Figura 41 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:4 com substituição	64
Figura 42 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:5,5 de referência	65
Figura 43 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:5,5 com substituição de 30%	66
Figura 44 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:5,5 com substituição de 50%	66
Figura 45 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:5,5 com substituição de 100%	67
Figura 46 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:7 de referência	68
Figura 47 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:7 com substituição de 30%	68
Figura 48 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:7 com substituição de 50%	69
Figura 49 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:7 com substituição de 100%	69
Figura 50 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:2,5 de referência e com substituições	70
Figura 51 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:4 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%	70

Figura 52 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:5,5 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%.....	71
Figura 53 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:7 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características determinadas para os agregados estudados	20
Tabela 2: Composição química (% em massa) por FRX dos agregados	29
Tabela 3 - Caracterização do cimento CP V – ARI utilizado na pesquisa	34
Tabela 4 - Definição do teor de argamassa ideal (Proporção 1:5,5).....	38
Tabela 5 - Argamassa de referência de com areia fina.....	38
Tabela 6 - Proporção das quatro famílias com os três percentuais de substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado.....	39
Tabela 7 - Composição granulométrica da areia fina (amostra 1 e amostra 2)	44
Tabela 8 - Caracterização da areia fina (amostra 1 e amostra 2).....	45
Tabela 9 - Composição granulométrica do agregado miúdo reciclado (amostra 1 e amostra 2)	46
Tabela 10 - Caracterização do agregado miúdo reciclado (amostra 1 e amostra 2)	46
Tabela 11 - Índice de consistência.....	47
Tabela 12 - Densidade em massa	52
Tabela 13 - Resultados de ensaios de resistência à compressão simples	54
Tabela 14: Resumo dos resultados de caracterização das argamassas nos estados fresco e endurecido	59
Tabela 15: Resultados de resistência à compressão simples de 192 corpos de prova.....	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Massa específica e absorção de água de agregados miúdos reciclados de concreto	21
Quadro 2 - Valores de índice de consistência.....	23
Quadro 3 - Valores de densidade em massa	24
Quadro 4 - Valores de resistência à compressão simples de concretos com agregado reciclado miúdo de concreto	25
Quadro 5 - Ensaios de caracterização do agregado miúdo reciclado	35
Quadro 6 - Ensaios de caracterização da areia	36
Quadro 7 - Configuração das argamassas	37
Quadro 8 - Ensaios de caracterização no estado endurecido.....	41
Quadro 9 - Ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido	42

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
1.1	Justificativa	10
1.2	Objetivos	11
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>11</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>11</i>
2.	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	12
2.1	Definição e classificação	12
2.2	Reciclagem dos resíduos de construção e demolição	13
<i>2.2.1</i>	<i>Utilização de agregado reciclado na construção civil</i>	<i>16</i>
2.3	Propriedades do agregado miúdo reciclado de concreto	17
<i>2.3.1</i>	<i>Composição granulométrica, massa unitária e índice de volume de vazios</i>	<i>18</i>
<i>2.3.1.1</i>	<i>Composição Granulométrica</i>	<i>18</i>
<i>2.3.1.2</i>	<i>Massa unitária e índice de volume de vazios</i>	<i>20</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Absorção de água e massa específica</i>	<i>20</i>
2.4	Efeito do uso de agregado reciclado miúdo de concreto nas propriedades da argamassa	22
<i>2.4.1</i>	<i>Propriedades no estado fresco</i>	<i>22</i>
<i>2.4.1.1</i>	<i>Índice de consistência</i>	<i>22</i>
<i>2.4.1.2</i>	<i>Densidade em massa</i>	<i>23</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Propriedades no estado endurecido</i>	<i>25</i>
<i>2.4.2.1</i>	<i>Resistência à compressão simples</i>	<i>25</i>
<i>2.4.2.2</i>	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	<i>26</i>
<i>2.4.2.3</i>	<i>Difração de Raios-X</i>	<i>27</i>
<i>2.4.2.4</i>	<i>Análise Termogravimétrica</i>	<i>27</i>
<i>2.4.2.5</i>	<i>Fluorescência de raios-X</i>	<i>28</i>
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	Programa de Investigação	30
3.2	Agregado reciclado	31
<i>3.2.1</i>	<i>Coleta, beneficiamento, separação e armazenamento</i>	<i>31</i>
3.3	Agregado natural	33
3.4	Cimento	33

3.5	Água	34
3.6	Ensaio de caracterização dos agregados miúdos reciclados	35
3.7	Ensaio de caracterização do agregado natural	35
3.8	Dosagem, moldagem e cura das argamassas	37
3.9	Ensaio de Caracterização da argamassa no estado fresco	41
3.9.1	<i>Densidade de massa</i>	41
3.9.2	<i>Determinação do índice de consistência</i>	41
3.10	Ensaio de caracterização no estado endurecido	42
3.10.1	<i>Resistência à compressão simples</i>	42
3.10.2	<i>Difratometria de Raios X (DRX)</i>	43
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS PARCIAIS	44
4.1	Caracterização dos materiais	44
4.1.1	<i>Caracterização da areia fina</i>	44
4.1.2	<i>Caracterização do agregado miúdo reciclado</i>	45
4.2	Propriedades da argamassa no estado fresco	47
4.2.1	<i>Índice de Consistência</i>	47
4.2.2	<i>Densidade de massa</i>	51
4.3	Caracterização no estado endurecido	54
4.3.1	<i>Resistência à compressão simples</i>	54
4.3.2	<i>Difratometria de Raios X</i>	60
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICE A	82

1. INTRODUÇÃO

A construção civil tem destaque na economia mundial e brasileira. Vale destacar que de acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2022), o Produto Interno Bruto (PIB) da construção cresceu 10,5%, considerando a taxa acumulada nos últimos quatro trimestres do ano de 2022. O setor possui dados positivos em relação à geração de emprego e renda. Ainda, segundo o CBIC (2022), o número de pessoas empregadas no setor cresceu 3,8% ao passar de 7,213 milhões nos três primeiros meses do ano de 2022 para 7,487 milhões. Com isso, a construção civil é um dos setores mais importantes para o desenvolvimento econômico do Brasil. Contudo, as atividades da indústria da construção civil são responsáveis por um grande impacto ambiental, provocando o aumento do consumo de recursos naturais e da geração de resíduos sólidos. Segundo Almeida *et al.*, (2020), são gerados entre 50% a 70% de resíduos da construção civil (RCC) no Brasil. A incorreta destinação de resíduos de construção possui elevado impacto ambiental. Para Ribeiro *et al.*, (2021), em torno de 60% do total dos resíduos da construção civil são destinados incorretamente. Logo, práticas que visem diminuição da geração e reaproveitamento dos resíduos são de fundamental importância para a sustentabilidade ambiental.

No contexto mundial da geração de resíduos sólidos, a União Europeia gera mais de 350 milhões de toneladas por ano, enquanto os Estados Unidos produzem cerca de 534 milhões de toneladas. Por sua vez, a China é a maior produtora de resíduos de construção, com geração anual de 2,360 bilhões de toneladas e reaproveitamento de apenas 5% do total. Já o Reino Unido reaproveita 89,9% e os Estados Unidos reaproveitam mais que 70% dos seus resíduos. (RUIZ *et al.* 2020; WHITTAKER, *et al.*, 2021).

A construção civil consome 40% do total de extração de recursos naturais, como, por exemplo, rochas naturais, agregados e minérios para produção de cimento e argamassa. Este consumo tem superado a demanda global de materiais. Somente no ano de 2020, o Brasil produziu cerca de 252 milhões de toneladas de brita e 353 milhões de toneladas de areia, totalizando 605 milhões de toneladas de agregados para construção civil. (JOHN, 2017; ANEPAC, 2021).

Com relação ao cimento Portland, este é o material industrializado mais produzido mundialmente, em que a massa total produzida é de aproximadamente 4,6 bilhões de

toneladas por ano. O cimento é responsável por 10% das emissões de CO₂ e 6% das emissões de gases efeito estufa (GEE). No ano de 2020, o Brasil consumiu mais de 60 milhões de toneladas de cimento, o consumo de cimento para a produção de argamassa equivale a 40%. (UNITED, *et al.*, 2017; CALDAS *et al.*, 2020).

Segundo Lima (2017), nas últimas décadas houve a realização de pesquisas no Brasil, com a finalidade de avaliar as propriedades dos agregados reciclados, bem como analisar o seu comportamento como agregado para concreto, argamassas, aterros, estacas de fundação, em substituição pelo agregado natural.

Para Macedo (2021), a utilização de agregado miúdo de concreto reciclado em substituição ao agregado natural na produção de argamassas pode gerar melhorias fundamentais nas propriedades das argamassas, no estado fresco e endurecido. Como também, de acordo com Pimentel (2018), tal substituição pode proporcionar melhor resultado quanto à capacidade de retenção de água, sendo importante uma vez que contribui para a hidratação do cimento e consequentemente maior resistência da argamassa.

O uso de agregado miúdo de concreto reciclado é uma forma de minimizar os impactos ambientais e de maximizar os benefícios econômicos da produção de pasta de argamassa. (PILLARD *et al.*, 2020; RÉMOND *et al.*, 2020).

É imprescindível a utilização de materiais alternativos, como o agregado miúdo de concreto reciclado para a produção de argamassa, de forma a assegurar um bom desempenho e durabilidade. Assim como, contribuir para o desenvolvimento sustentável, já que reduzirá a geração de resíduos, disposição inadequada e utilização de matérias primas naturais.

1.1 Justificativa

Segundo dados levantados pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), no ano de 2016, é possível verificar que no Brasil, cerca de 20% a 50% das matérias primas naturais são consumidas pela construção civil. De acordo com Sokolovicz (2020), neste mesmo ano, aproximadamente 60% do total de resíduos gerados nos municípios brasileiros é proveniente da construção civil.

A diversificação das características dos materiais miúdos presentes nos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) possui expressiva influência no que se diz respeito à aplicação destes resíduos em argamassas. Deste modo, a caracterização desses agregados é importante e deve ser fundamentada em critérios quanto à origem, forma, textura e granulometria (SANTOS, 2018). Portanto, uma justificativa importante é que este trabalho busca contribuir com as análises sobre o comportamento mecânico de um conjunto de argamassas produzidas com resíduos, acreditando no seu potencial de introdução no mercado da construção civil.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Estudar as propriedades e o desempenho mecânico de um conjunto de argamassas produzidas com agregados reciclados de resíduos de concreto.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atender ao objetivo geral proposto, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar os agregados reciclados miúdos de resíduos de concreto;
- Avaliar a resistência à compressão de argamassas produzidas com agregados miúdos de resíduos de concreto;
- Identificar as fases cristalinas presentes na argamassa produzida com agregado reciclado através de difração raios-X;
- Comparar o comportamento da pasta de argamassa de referência com as pastas de argamassa produzidas com agregados reciclados.

2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.1 Definição e classificação

De acordo com o Art. 2º da Resolução Nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), os resíduos da construção e demolição são considerados como aqueles que são provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos.

Os resíduos de construção e demolição são classificados de acordo com critérios estabelecidos no Art. 3º da Resolução Nº 307 do CONAMA (2002), descritos adiante:

Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fio etc.) produzidas nos canteiros de obras;

Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;

Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;

Classe D: são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde (CONAMA, 2002, Art. 3, p.572).

A norma NBR 10004 (ABNT, 2004a), classifica os resíduos sólidos em:

- Resíduos Classe I – São resíduos classificados como perigosos, ou seja, possuem características tais como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade entre outros, onde há a possibilidade de representar riscos à saúde pública ou ao meio ambiente, quando gerenciado de forma incorreta;
- Resíduos Classe II – Não perigosos. São divididos em:
 - a) Resíduos classe II A – São resíduos não inertes, os quais podem ter propriedades, assim como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Os resíduos não inertes são considerados como os resíduos que não enquadram tantos os resíduos de classe I quanto os resíduos de classe II B.

- b) Resíduos classe II B – São resíduos inertes, nos quais se enquadram grande parte dos resíduos de construção e demolição do Brasil. Os resíduos inertes quando são colocados a um contato dinâmico e estático com água destilada à temperatura ambiente, não tem nenhum de seus componentes solubilizados a concentrações maiores aos especificados pelos padrões de potabilidade de água. (ABNT NBR 10007, 2004c; ABNT NBR 10006, 2004b).

2.2 Reciclagem dos resíduos de construção e demolição

A produção de resíduos de construção e demolição é predominante nos centros urbanos brasileiros, ou seja, no Sudeste do país são gerados cerca 44,5 milhões de toneladas de RCD por ano, já no Nordeste produz-se 29 milhões de toneladas por ano, na região Sul 15,1 milhões de toneladas por ano, seguido do Norte que produz cerca de 9,3 milhões de toneladas por ano e no Centro-Oeste equivale a 8,3 milhões de toneladas por ano. (ABRECON, 2022).

De acordo com a Resolução CONAMA Nº. 307/2002, os devem ter destinação final em função da sua correta classificação:

Classe A: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;

Classe B: deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;

Classe C: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Classe D: deverão ser armazenados, transportados, reutilizados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas. (CONAMA, 2002, p.06).

É imprescindível que os RCD sejam gerenciados com a finalidade de possibilitar a sua reutilização e/ou reciclagem. Segundo Rodrigues (2015), os investimentos em reciclagem estão vinculados ao mercado de compra de cada material reciclado proveniente do RCD e da capacidade do gerador de segregar os resíduos.

A reciclagem de RCD implica em reduzir o consumo de recursos naturais, ou seja, diminuir a extração de areia, brita natural, sendo extração clandestina e inadequada de agregados, além de reduzir o descarte incorreto. (MATUELLA, 2017; CAROLINO, 2021). Com isso, quando

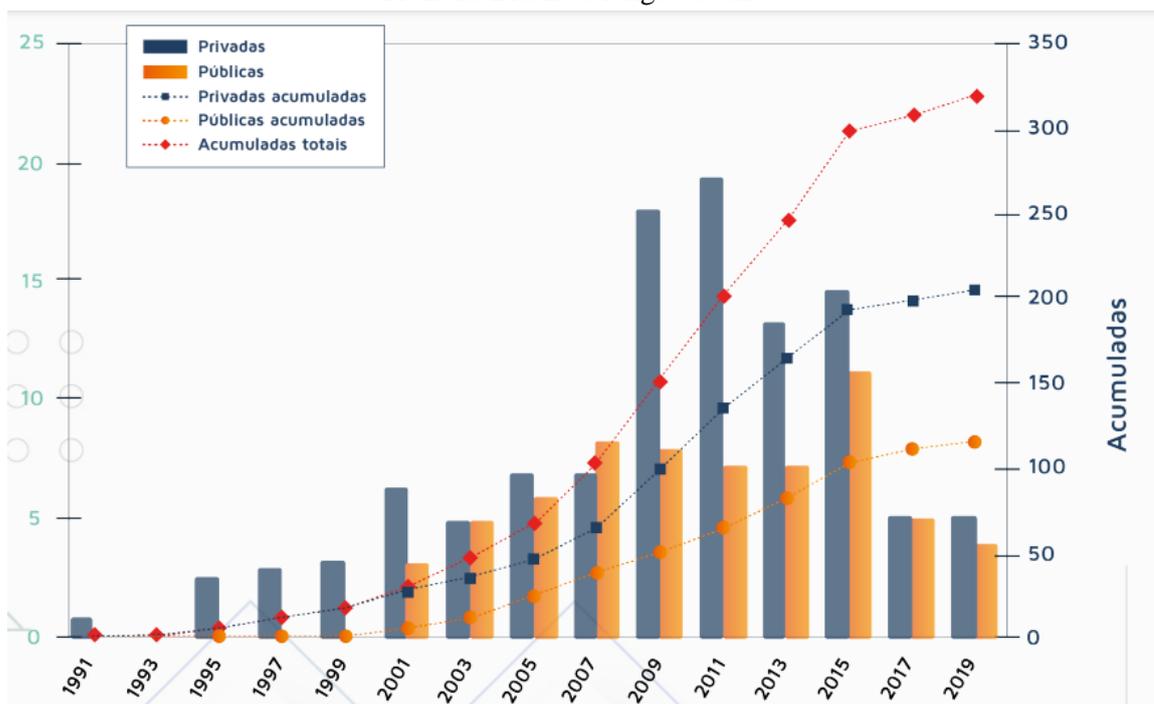
os resíduos de Classe A são separados, armazenados e destinados corretamente, pode haver beneficiamento e reaproveitamento dos mesmos.

Conforme a ABRECON (2022), as usinas de reciclagem produzem aproximadamente 25 milhões de metros cúbicos de agregado reciclado, tal material é proveniente da reciclagem de RCD, o qual pode substituir de forma parcial ou total o agregado natural.

A composição dos resíduos de construção e demolição está relacionada com a região de produção, com o estágio e tipo de construção e com a técnica de demolição utilizada. No Brasil, a composição média dos RCD é de aproximadamente 65% de origem mineral, 13% é oriundo de resíduos de madeira, 8% de resíduos de plástico e 14% estão ligados a outros tipos de resíduos (BERNARDO, 2019; SOUZA *et al.*, 2019).

De acordo com a ABRECON (2022), é possível analisar o histórico da implementação de usinas de reciclagem (privadas e públicas) de RCD no Brasil ao longo dos anos (Figura 1). São considerados dois tipos mais comuns de usinas, fixa e móvel, onde cerca de 2/3 das usinas de reciclagem de RCD são fixas, totalizando 200 usinas e 1/3 são móveis, o que equivale a 100 usinas.

Figura 1- Levantamento da implementação de usinas de reciclagem (privadas e públicas) de RCD no Brasil ao longo dos anos



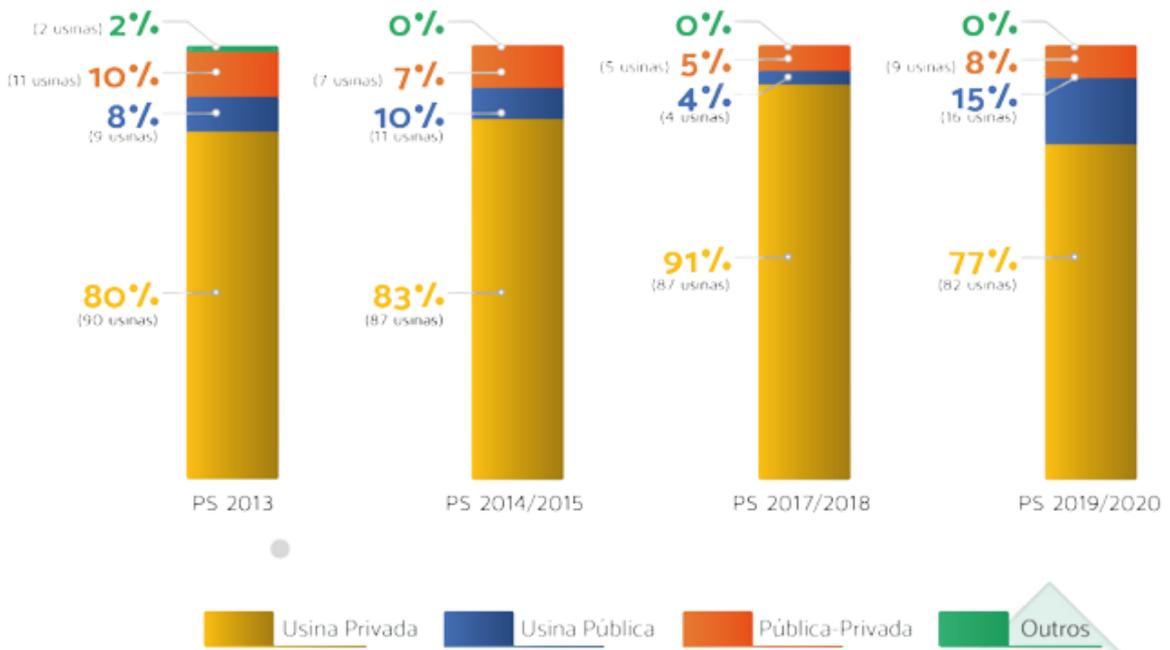
Fonte: ABRECON (2022).

A partir do histórico da implementação de usinas de reciclagem no país, é possível perceber que houve o crescimento das usinas privadas de 1991 até 2013, mantendo o aumento estabilizado até 2015. Por sua vez, a quantidade de usinas públicas aumentou gradativamente a partir do ano de 2001, tendo seu pico de crescimento em 2015. Contudo, a implementação tanto das usinas privadas quanto das usinas públicas sofreu uma significativa redução no ano de 2017 ao ano de 2019.

Ainda, segundo a ABRECON (2022), tal queda ocorreu devido à crise econômica instaurada no Brasil que atingiu o setor da indústria, bem como nem todas as usinas instaladas no país possuem cadastro.

É possível verificar o perfil das usinas de reciclagem de RCD (privada, pública ou pública-privada) no Brasil ao longo dos anos (Figura 2).

Figura 2 - Perfil das usinas de reciclagem de RCD (privada, pública ou pública-privada) no Brasil ao longo dos anos



Fonte: ABRECON (2022).

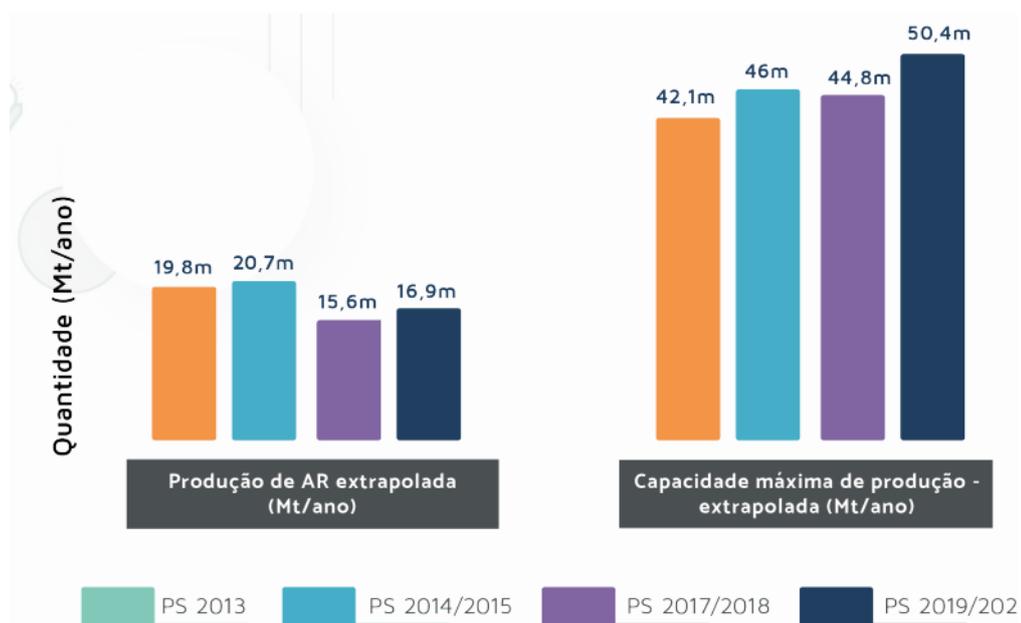
Segundo a ABRECON (2022), as usinas ativas pertencentes à iniciativa privada correspondem a 77%, à gestão pública equivale a 15% e as usinas público-privada representam 8% das usinas instaladas no Brasil nos anos de 2019 e 2020.

Para Barros (2017 apud Carneiro, 2001), existem diversas vantagens ligadas aos pilares ambientais, sociais e econômicos em relação à reciclagem de RCD, tais como: redução da extração de matéria prima natural, minimização dos impactos gerados pela poluição causada pela geração de resíduos, geração de emprego e renda, redução do custo com remoção resíduos descartados de forma inadequada.

2.2.1 Utilização de agregado reciclado na construção civil

A produção de agregados reciclados vem variando em relação à capacidade máxima das usinas instaladas no Brasil, em milhões de toneladas (Figura 3).

Figura 3 - Produção dos agregados reciclados e a capacidade máxima das usinas instaladas no Brasil, em milhões de toneladas.



Fonte: ABRECON (2022).

Segundo pesquisa realizada pela ABRECON (2022), a produção nacional dos agregados reciclados por ano apresenta oscilações entre 16 milhões e 20 milhões de toneladas por ano, enquanto a capacidade máxima de produção das usinas tem aumentado, ou seja, cresceu de 42 milhões para 50 milhões por ano. Desta forma, observa-se que a produção de agregados reciclados é menor que a capacidade produtiva máxima das usinas, limitando-se a 20 milhões de toneladas/ano, ou seja, operando a menos de 50% de sua capacidade. Este problema pode ser motivado por falhas de fiscalização, falta de cumprimento das leis, existência de usinas clandestinas, entre outros.

De acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004e), os agregados reciclados de resíduos de construção e demolição são classificados como agregado de resíduo de concreto (ARC), sendo proveniente de material de Classe A, contendo 90% de materiais à base de cimento Portland e rochas em sua composição mínima. Além disso, pode ser classificado como agregado de resíduo misto (ARM), contendo menos 90% de materiais à base de cimento Portland e rocha. Tais agregados reciclados devem ser destinados para obras de pavimentação viária e para produção de concreto sem função estrutural, além de outras aplicações.

A utilização dos agregados reciclados necessita estar correlacionada com a produção de resíduos, processo de britagem e propriedades do material, com a finalidade de acrescentar um valor econômico a este material que possui um relevante potencial de mercado. (BERNARDO, 2019).

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas mostrando o potencial de reaproveitamento dos RCD como agregado reciclado além de apresentar o comportamento e desempenho destes materiais quando usados em diferentes aplicações na construção civil (UNITED, *et al.*, 2017; CARASEK *et al.*, 2018; CALDAS *et al.*, 2020; PILLARD *et al.*, 2020; RÉMOND *et al.*, 2020; RUIZ *et al.* 2020; NAWAZ *et al.*, 2020; WHITTAKER, *et al.*, 2021; BEDOYA *et al.*, 2022).

2.3 Propriedades do agregado miúdo reciclado de concreto

As propriedades do agregado miúdo reciclado de concreto dependem das características do concreto original, a partir do qual os agregados reciclados são obtidos; o processo de beneficiamento também pode afetar as características dos agregados reciclados, uma vez que tal processo depende do tipo do britador utilizado. (COLANGELO *et al.*, 2017; BERNARDO, 2019; LIMA, 2020)

Desta forma, a possibilidade de utilização de agregados reciclados em argamassas depende de suas propriedades físico-mecânicas, que são determinadas por meio de ensaios de granulometria, massa unitária, índice de volume de vazios, massa específica, absorção de água, módulo de finura, dimensão máxima característica, entre outros.

A seguir são apresentadas e analisadas algumas propriedades físico-mecânicas de agregados reciclados de RCD, estudadas por diversos autores, que foram empregados para produção de argamassas.

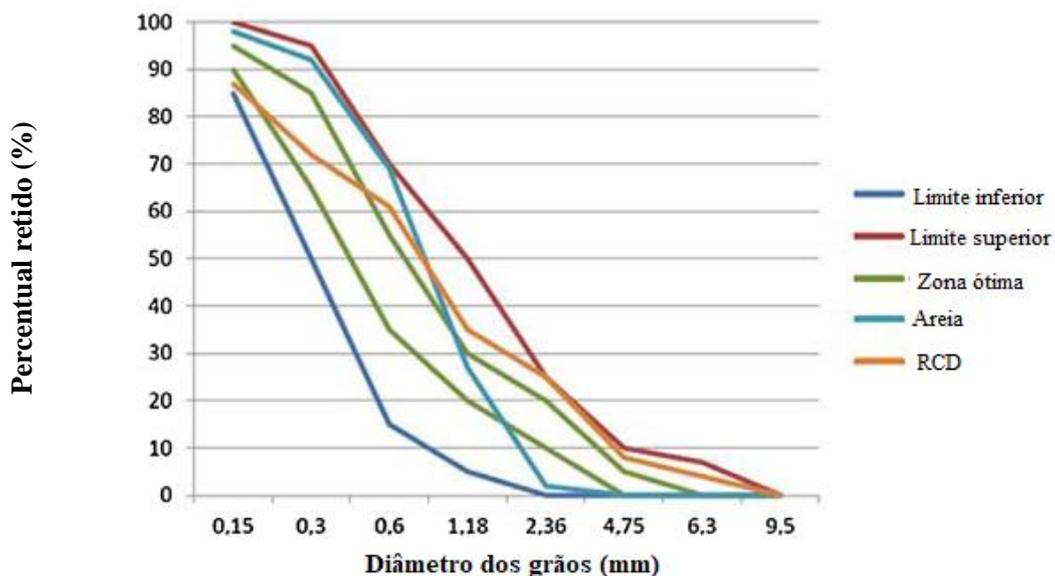
2.3.1 Composição granulométrica, massa unitária e índice de volume de vazios

2.3.1.1 Composição Granulométrica

De acordo com Dultra *et al.* (2015), a granulometria dos agregados influencia diretamente nas propriedades finais dos produtos de argamassas, bem como o tamanho e o formato das partículas podem modificar tais propriedades.

Azevedo *et al.* (2020), produziu argamassa em laboratório, utilizando RCD proveniente de processo de demolição de uma estrutura de concreto armado, sendo tais resíduos beneficiados em uma usina de reciclagem. Com isso, para padronização da granulometria dos agregados reciclados, realizou-se o peneiramento em peneira de 4,8mm de abertura. A composição granulométrica do agregado reciclado e da areia natural, utilizados para a produção de argamassas, está apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Composição granulométrica do agregado reciclado e areia natural.



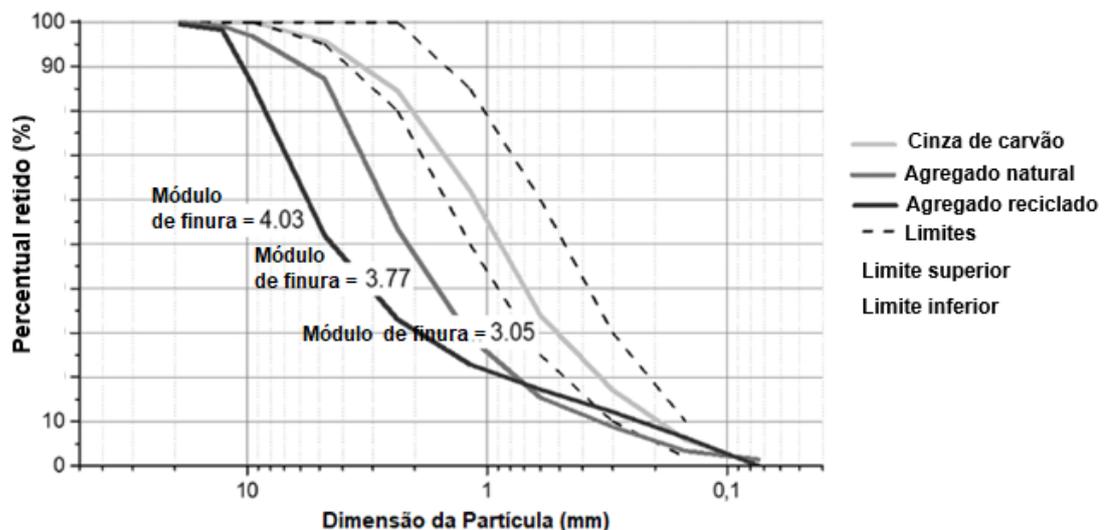
Fonte: Adaptado de Azevedo et al. (2020)

Com base no estudo da distribuição granulométrica realizada pelos autores (Figura 4), observa-se que tanto o agregado reciclado quanto a área natural permaneceram dentro dos

limites ótimos superior e inferior, apresentando um potencial de uso. Além disso, é possível evidenciar que a areia natural possui uma distribuição mais linear em relação ao agregado reciclado, uma vez que a mesma possui grãos mais homogêneos e circulares, enquanto as partículas do agregado reciclado são mais achatadas com bordas, devido ao processo de britagem, segundo os autores.

Bedoya *et al.* (2022), utilizou agregado reciclado fornecido por uma empresa que realiza demolições de concreto das obras públicas na Colômbia para produção de argamassa. Desta forma, para realização do estudo, os agregados foram processados por meio de um britador de mandíbulas para obter partículas < 10 mm, e em seguida conduzidos os ensaios para obter a distribuição granulométrica da areia natural e do agregado reciclado (Figura 5).

Figura 5 - Distribuição granulométrica – Areia Natural e Agregado Reciclado



2.3.1.2 Massa unitária e índice de volume de vazios

Segundo a NBR 16972 (ABNT, 2021), a massa unitária é a massa que as partículas do agregado ocupam em determinado volume. Já o índice de volume de vazios é a relação entre o volume total de vazios e o volume total de grãos.

Carasek et al. (2018), realizaram uma ampla caracterização dos agregados de RCD, com a finalidade de comparar os agregados reciclados de natureza cimentícia com os mistos (cerâmico e cimentício) e com a areia natural quartzosa, em granulometrias distintas (Tabela 1).

Tabela 1: Características determinadas para os agregados estudados

Agregado	DMC (mm)	MF	TMP (%)	ABS (%)	ME (g/cm ³)	MU (g/cm ³)	e	η (%)	Eo(%)	φ	UC (%)	CI
ANat1	1,18	1,91	1,62	0,85	2,70	1,43	0,89	0,47	0,53	0,78	6,30	1,40
ANat3	2,36	2,20	4,10	2,97	2,73	1,44	0,89	0,47	0,53	0,79	8,50	1,49
AMis1	1,18	1,62	6,58	6,11	2,68	1,21	1,22	0,55	0,45	0,79	21,00	1,53
AMis3	2,36	2,07	13,96	12,01	2,69	1,46	0,85	0,46	0,54	0,79	16,60	1,66
ACim3	2,36	2,09	17,60	16,58	2,54	1,28	0,99	0,50	0,50	0,81	19,20	1,50

Notas: DMC - dimensão máxima característica; MF - módulo de finura; TMP - teor de material pulverulento; ABS - absorção de água do agregado; ME - massa específica real dos grãos; MU - massa unitária; e - índice de vazios não compactado ($=ME/MU - 1$); η - porosidade [$=e/(1+e).100$]; Eo - fator de empacotamento ($=100-\eta$); f - esfericidade; UC - umidade crítica; CI - coeficiente de inchamento.

Fonte: Adaptado de CARASEK *et al.* (2018).

A partir dos resultados do ensaio de massa unitária (Tabela 1), é possível observar que o agregado reciclado cimentício (ACim3) e agregado misto (AMis1) obtiveram valores inferiores (1,28 e 1,21g/cm³, respectivamente) ao agregado natural ANat3 (1,44g/cm³). Entretanto, as variações não foram significantes, podendo ocorrer pelo encaixe espontâneo de suas partículas devido a quantidade e tamanho e forma dos grãos. Além disso, os agregados naturais mostraram comportamento semelhante em relação aos agregados reciclado cimentício e misto (Tabela 1).

2.3.2 Absorção de água e massa específica

A absorção de água e a massa específica de agregados reciclados de concreto são características que influenciam diretamente nas propriedades das argamassas.

Segundo a NBR 16916 (ABNT, 2021), a absorção de água dos agregados é o acréscimo de massa dos grãos porosos em relação à massa no estado seco, devido à penetração de água nos poros permeáveis. Já a massa específica é a relação entre a massa do agregado na condição saturada superfície seca e seu volume, excluindo os poros permeáveis.

Com base na no levantamento de diferentes autores sobre as características dos agregados reciclados de concreto, o Quadro 1 apresenta alguns estudos com valores de massa específica e absorção de água.

Quadro 1 - Massa específica e absorção de água de agregados miúdos reciclados de concreto

Referência	Ano	Taxa de absorção de água (%)	Massa específica (g/cm³)
Colangelo <i>et al.</i>	2017	1,10	2,21
Pedro	2017	6,10	2,40
Carasek <i>et al.</i>	2018	16,58	2,54
Bernardo	2019	16,79,	2,47
Lima	2020	12,65	2,36
Nawaz <i>et al.</i>	2020	7,12%	2,31

Fonte: Autora.

A NBR 15116 (ABNT, 2004), determina que a absorção de água do agregado reciclado miúdo de concreto deve ser inferior a 12%.

Colangelo *et al.* (2017) estudou as propriedades da argamassa com o uso de agregado reciclado miúdo de concreto. O autor obteve 1,1% de absorção de água e 2,21g/cm³ de massa específica, atendendo aos critérios da NBR 15116/2004. Assim como Pedro (2017) e Nawaz *et al.* (2020), que obtiveram 6,1% de absorção de água e 2,40g/cm³ de massa específica; e 7,12% de absorção e 2,31g/cm³ respectivamente.

Na pesquisa realizada por Carasek *et al.* (2018), Bernardo (2019) e Lima (2020), foi reportado que a absorção de água foi superior ao estabelecido pela NBR 15116/2004. Este comportamento pode estar relacionado com as características de cada agregado reciclado miúdo de concreto utilizado e os métodos de ensaios adotados.

2.4 Efeito do uso de agregado reciclado miúdo de concreto nas propriedades da argamassa

A substituição parcial de agregado miúdo natural por agregado reciclado miúdo de concreto em argamassas tem mostrado que é possível obter melhorias das principais propriedades tecnológicas e ambientais dessas argamassas, gerando um aumento significativo de compactidade, melhorando a resistência mecânica, mesmo que não modifiquem a absorção de água por capilaridade das argamassas. (AZEVEDO *et al.*, 2020; BEDOYA *et al.*, 2022)

Em relação ao estado fresco, argamassas produzidas com agregado reciclado miúdo de concreto necessitam do aumento da quantidade de água necessária para dar a trabalhabilidade adequada. Além disso, a composição granulométrica desses agregados afeta o comportamento reológico das argamassas, assim como os teores das frações fina dos agregados reciclados e o empacotamento dos grãos. (CARASEK *et al.*, 2018)

Com relação ao estado endurecido de argamassas produzidas com agregado reciclado miúdo, quanto maior for a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados há o aumento de poros e a formação de uma microestrutura mais heterogênea, em função da textura, forma e tamanho dos grãos, contribuindo desta forma para a redução das propriedades mecânicas da argamassa.

2.4.1 Propriedades no estado fresco

2.4.1.1 Índice de consistência

A consistência está diretamente relacionada com a fluidez da argamassa e com a sua capacidade de escoamento, sendo controlada pela quantidade de pasta em torno dos agregados (BERNARDO, 2020; MACEDO, 2021).

Por sua vez, a granulometria dos agregados reciclados está correlacionada com a consistência das argamassas, podendo influenciar a fluidez e viscosidade da argamassa. Logo, quanto melhor for a distribuição granulométrica, melhor será a lubrificação entre os grãos, permitindo a redução do atrito entre os materiais (CARASEK *et al.*, 2018; FERREIRA *et al.*, 2019; CUENCA-MOYANO *et al.*, 2020).

Argamassas produzidas com agregados reciclados apresentam consistência mais seca, se for mantida a relação água cimento em função do percentual de substituição, conforme se percebe no Quadro 2.

Quadro 2 - Valores de índice de consistência

Referência	Percentual de substituição	Relação água cimento	Índice de consistência médio (mm)
Carasek <i>et al.</i> (2019)	Agregado natural (ANat1)	1,80	267
	Agregado natural (ANat3)	1,60	229
	50% - Agregado reciclado misto (AMist1)	1,80	258
	50% - Agregado reciclado misto (AMist3)	1,60	258
	50% - Agregado reciclado Cimentício (ACim3)	1,60	275
Souza <i>et al.</i> (2020)	Referência	0,68	262
	15% (sem correção de água)	0,68	231
	30% sem correção de água)	0,68	214
	15% (com correção de água)	0,72	259
	30% (com correção de água)	0,76	261
Cuenca-Moyano <i>et al.</i> (2020)	Referência	1,40	153
	25%	1,40	148,75
	50%	1,40	131
	75%	1,40	103,75
	100%	1,40	100

Fonte: Autora

Para Souza *et al.* (2020), as argamassas necessitam de correção da relação água cimento em relação às proporções de referência, em função das diferentes propriedades físicas dos agregados, para manter a trabalhabilidade da argamassa.

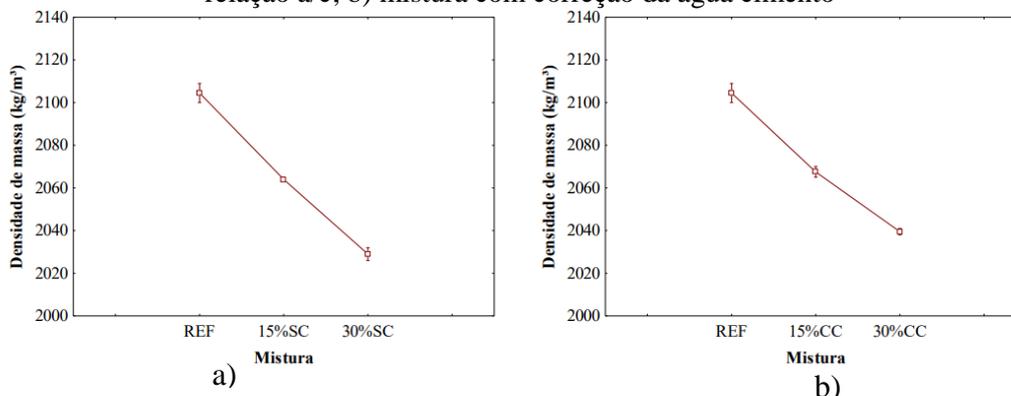
No estudo realizado por Carasek *et al.* (2018), pode-se observar que ocorreu uma pequena discrepância nos resultados médios de índice de consistência, sendo mais significativa em comparação ao índice de consistência obtido na ACim3 com o índice apresentado pela ANat3, obtendo um percentual de 20% de diferença. Podendo ser explicada pelo aumento da relação água cimento da argamassa ACim3.

2.4.1.2 Densidade em massa

A densidade em massa das argamassas produzidas com agregado reciclado, no estado fresco, sofre uma redução nos seus valores, em função da menor massa específica que os grãos de material reciclado apresentam. Desta forma, a utilização de maiores percentuais de agregado

reciclado podem reduzir os valores da massa específica (CARASEK *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2020; FERREIRA *et al.*, 2019). Este comportamento pode ser identificado na Figura 6.

Figura 6 - Influência do teor de AR na densidade em massa: a) misturas sem correção da relação a/c; b) mistura com correção da água cimento



Fonte: Adaptado de SOUZA *et al.* (2020).

Na pesquisa realizada por Souza *et al.* (2020), pode-se observar que o consumo de água utilizado na produção das argamassas interfere na densidade em massa, uma vez que quanto maior a quantidade de água livre na argamassa no estado fresco, maior será o teor da pasta melhorando o preenchimento dos vazios (Figura 6). Diante deste contexto, a densidade em massa aumenta se comparada a uma mistura com o mesmo percentual de agregado reciclado e menor relação água cimento (Quadro 3).

Quadro 3 - Valores de densidade em massa

Referência	Percentual de substituição (%)	Relação água cimento	Densidade em massa média (g/cm³)
Carasek <i>et al.</i> (2019)	Agregado natural (ANat1)	1,8	2,01
	Agregado natural (ANat3)	1,6	1,97
	50% - Agregado reciclado misto (AMist1)	1,8	1,83
	50% - Agregado reciclado misto (AMist3)	1,6	1,95
	50% - Agregado reciclado Cimentício (ACim3)	1,6	1,79
Souza <i>et al.</i> (2020)	Referência	0,68	2,15
	15% (sem correção de água)	0,68	2,06
	30% sem correção de água)	0,68	2,03
	15% (com correção de água)	0,72	2,07
	30% (com correção de água)	0,76	2,04
Cuenca-Moyano <i>et al.</i> (2020)	Referência	1,40	1,96
	25%	1,40	1,88
	50%	1,40	1,94
	75%	1,40	1,88
	100%	1,40	1,76

Fonte: Autora

As argamassas produzidas com agregado reciclado apresentam uma menor densidade de massa, tornando as argamassas mais porosas no estado endurecido, o que pode interferir negativamente para a sua resistência mecânica e durabilidade. (CUENCA-MOYANO *et al.*, 2020; JESUS *et al.*, 2019).

2.4.2 Propriedades no estado endurecido

2.4.2.1 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples de argamassas produzidas com agregado reciclado pode variar em função da relação água cimento e do percentual de substituição de cada proporção (Quadro 4).

Quadro 4 - Valores de resistência à compressão simples de concretos com agregado reciclado miúdo de concreto

Referência	Percentual de substituição pelo agregado reciclado	Relação água cimento	Resistência à compressão (Mpa)
Lima (2017)	Referência	0,360	61,89
	30%	0,362	57,30
	50%	0,367	60,32
	100%	0,451	47,68
Cuenca-Moyano <i>et al.</i> (2020)	Referência	1,40	7,0
	25%	1,40	9,7
	50%	1,40	11,3
Souza <i>et al.</i> (2020)	Referência	0,68	17
	15% (sem correção de água)	0,68	18,9
	30% sem correção de água)	0,68	19,8
	15% (com correção de água)	0,72	15
	30% (com correção de água)	0,76	15,8
Bedoya <i>et al.</i> (2022)	Referência	0,53	16,0
	30%	0,53	19,0
	50%	0,53	23,0
	70%	0,53	20,0
	100%	0,53	21,0

Fonte: Autora

Com base nos resultados de resistência à compressão obtidos por Souza *et al.*, (2020), é possível observar que a resistência à compressão simples variou conforme a relação água cimento de cada substituição. O aumento da resistência para o percentual de 50% pode ser em função da maior absorção das partículas de agregado reciclado, que reduz a relação água cimento da argamassa.

Bedoya *et al.*, (2022), constatou o aumento da resistência à compressão simples em argamassas produzidas com 100% de agregado reciclado. Os resultados estão relacionados à capacidade de reação entre a cinza de carvão e o hidróxido de cálcio presente nos antigos produtos de hidratação do agregado reciclado para aumentar a atividade pozolânica.

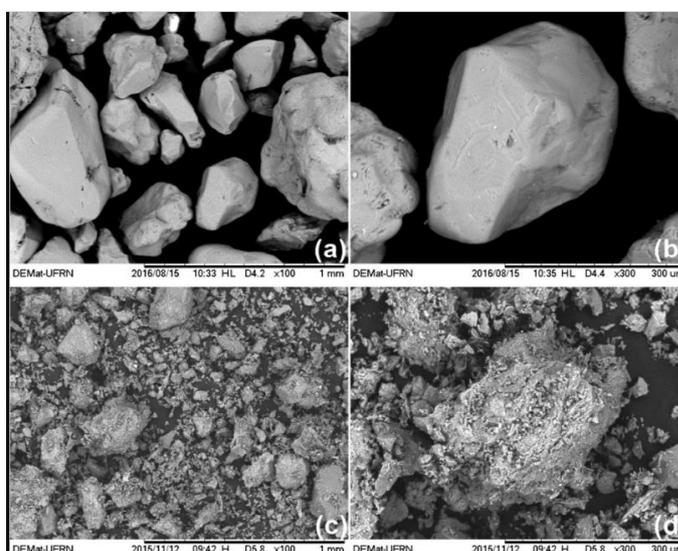
Já para Cuenca-Moyano *et al.*, (2020), houve o crescimento da resistência à compressão em função do crescimento do percentual de substituição, tal aumento pode ter ocorrido devido à maior absorção das partículas de agregado reciclado, que reduz a relação água cimento da argamassa.

Segundo Lima (2017), as proporções de referência e com substituição de 50% atingiram resistências médias superiores aos 60MPa, contudo o teor de substituição de 30% não ultrapassou 58MPa com variação na relação água cimento.

2.4.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma caracterização para a observação e análise das características microestruturais de materiais sólidos (Figura 7). O objetivo deste ensaio é identificar e fazer uma análise dos compostos e produtos gerados na argamassa com agregados reciclados (LEAL, 2019).

Figura 7 - Microscopia eletrônica de varredura



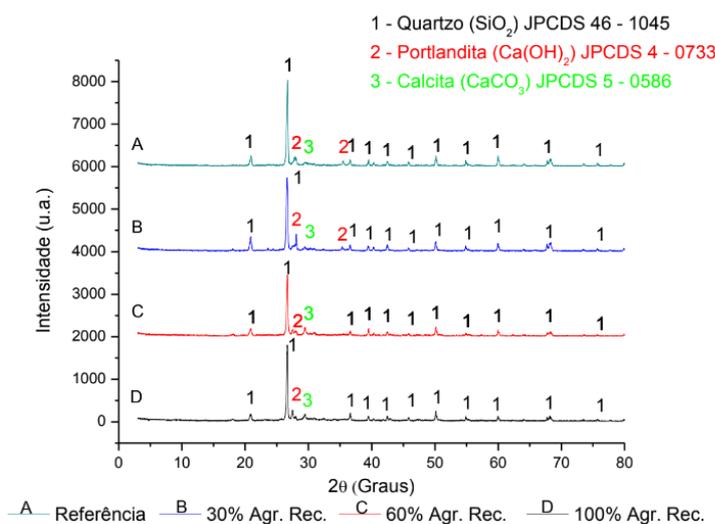
Fonte: FERREIRA *et al.* (2019)

Segundo Ferreira *et al.* (2019), a partir da microscopia eletrônica de varredura foi possível observar que a textura da superfície e a variação granulométrica são os grandes diferenciais das argamassas produzidas com agregado reciclado. Os agregados reciclados possuem diferentes tamanhos e formas de partículas dispersas, bem como uma superfície porosa texturizada áspera e rugosa, indicando desta forma a maior absorção de água dos agregados reciclados.

2.4.2.3 Difração de Raios-X

A difração de raios-X tem a finalidade de identificar as fases cristalinas presentes na argamassa produzida com agregado reciclado, a partir de picos gerados na difração dos raios produzidos pelos átomos característicos do mineral (Figura 8) (UGIONI *et al.*, 2017; BEDOYA *et al.*, 2022).

Figura 8 - Difratometria de Raios X



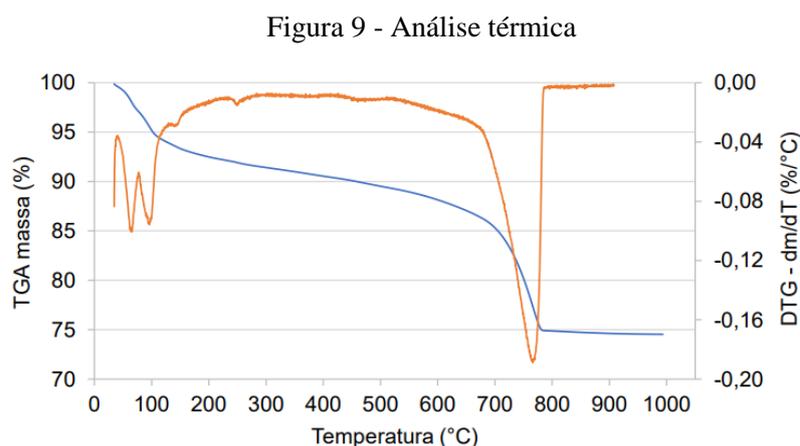
Fonte: UGIONI *et al.* (2017).

Na pesquisa realizada por Ugioni *et al.*, (2017), foram identificadas três fases: quartzo (SiO_2) JPCDS 46-1045; portlandita (Ca(OH)_2) JPCDS 4-0733; calcita (CaCO_3), JPCDS 5-0586. Essas fases são encontradas com muita frequência em amostras de compósitos cimentícios.

2.4.2.4 Análise Termogravimétrica

A Análise Termogravimétrica (TG) é um método de análise termoanalítica que identifica a variação de massa de uma amostra em relação à temperatura, identificando hidratos amorfos

como o *C-S-H* (silicato de cálcio hidratado) (Figura 9). Esta análise pode ser realizada para estabelecer a decomposição térmica ou pirólise de materiais orgânicos, inorgânicos e biológicos, calcinação e torrefação de minerais, corrosão de materiais em várias atmosferas, entre outros. (SCRIVENER *et al.*, 2016; LIMA, 2022).



Fonte: LIMA. (2022)

Na pesquisa realizada por Lima (2022), é possível constatar a perda de massa do agregado reciclado em função da temperatura, sendo de até 1000°C. A partir da análise do gráfico (Figura 9), observa-se que entre as temperaturas de 0°C e 100°C a perda de massa foi em torno de 5%, podendo estar associada à água livre, ao *C-S-H* e aos aluminatos presentes no agregado reciclado. Contudo, entre as temperaturas de 700°C a 800°C, a porcentagem de massa foi reduzida de 85% para 75%, onde houve perda de massa durante a descarbonatação, possivelmente, do CaCO_3 .

2.4.2.5 Fluorescência de raios-X

Segundo Nascimento-Dias *et al.* (2017), a análise química por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX), permite a identificação da composição química dos materiais através da determinação quantitativa dos elementos químicos existentes no material. A Tabela 2 apresenta a composição química por FRX dos finos dos agregados naturais e reciclados.

Tabela 2: Composição química (% em massa) por FRX dos agregados

Constituintes	Finos	
	Finos do agregado natural	Finos do agregado reciclado
SiO ₂	95,81	40,40
CaO	-	29,83
Al ₂ O ₃	2,38	10,18
Fe ₂ O ₃	-	8,91
SO ₃	0,13	5,03
K ₂ O	-	1,57
SrO	-	1,13
ZrO ₂	-	0,99
TiO ₂	0,94	0,76
Outros	0,74	1,20

Fonte: Adaptado de FERREIRA *et al.* (2019).

De acordo com o estudo realizado por Ferreira *et al.* (2019), é possível observar que os finos de agregados naturais possuem um elevado teor de sílica (>95%), devido a sua natureza exclusivamente quartzosa. Já os maiores teores identificados nos finos de agregados reciclados foram de dióxido de silício (SiO₂), óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃), onde a composição química dessas amostras pode ser caracterizada como sílico-aluminosas.

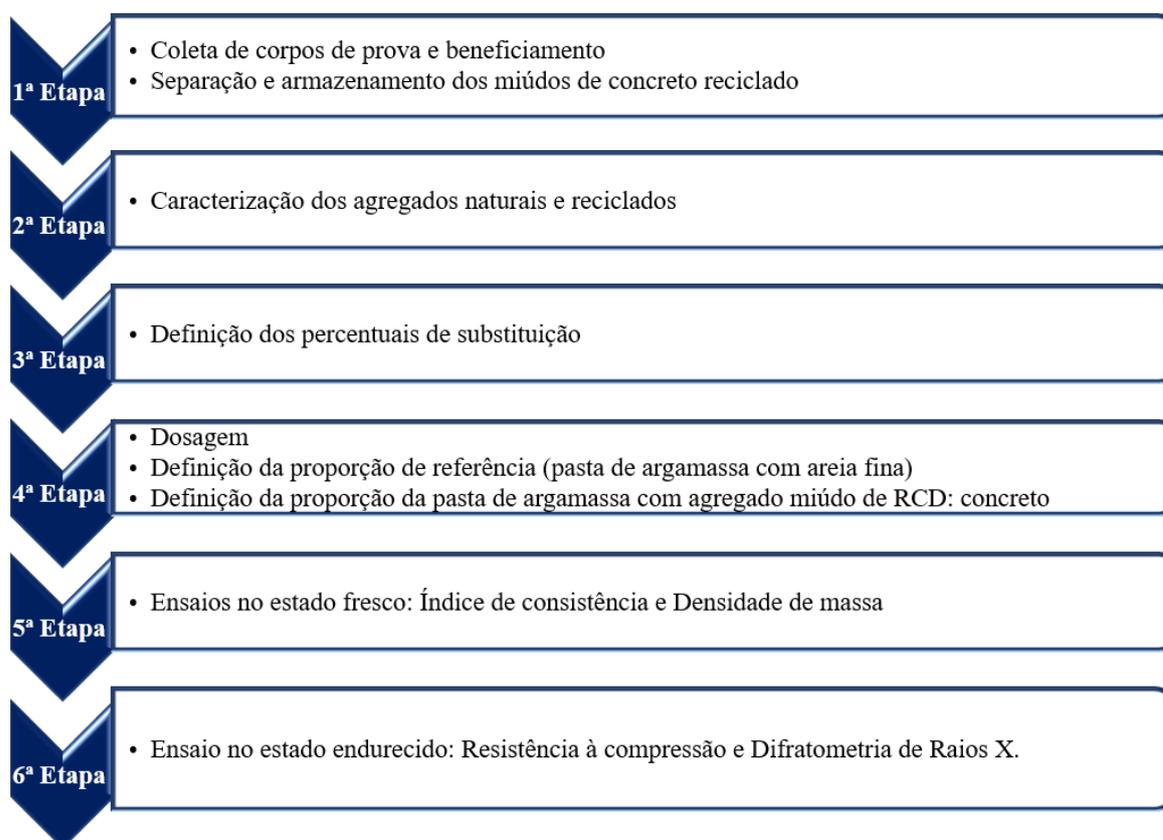
Desta forma, os resultados obtidos indicam a variedade da composição química dos finos de agregados reciclado, que por sua vez podem ocasionar perda de resistência e influenciar o desempenho de argamassas e concretos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Programa de Investigação

O programa de investigação laboratorial desenvolvido na pesquisa está apresentado de forma resumida no fluxograma da Figura 10, sendo constituído de 06 etapas.

Figura 10 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autora

Na primeira etapa realizou-se a coleta de corpos de prova de concreto e posterior beneficiamento dos mesmos, com a separação e armazenamento dos agregados miúdos de concreto reciclado produzidos. Em seguida, realizou-se a segunda etapa, que consistiu na caracterização dos agregados naturais e reciclados em laboratório. Já na terceira etapa, definiu-se os percentuais de substituição, tais como: 0%, 30%, 50% e 100%.

A quarta etapa foi composta pela determinação da dosagem da argamassa, definição da proporção de referência e definição da proporção com a substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo de concreto reciclado. Posteriormente, nas etapas 05 e 06,

executou-se os ensaios de laboratório, nos estados fresco e endurecido de todas as proporções investigadas das argamassas produzidas.

Os ensaios de laboratório para caracterização dos agregados natural e reciclado, assim como os ensaios nas argamassas produzidas, tanto no estado fresco e endurecido, foram conduzidos no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

3.2 Agregado reciclado

3.2.1 Coleta, beneficiamento, separação e armazenamento

Foram coletados 350 corpos de prova de concreto com resistência de 30MPa (Figura 11), o que equivale a aproximadamente 350kg para beneficiamento, separação, armazenamento e realização dos ensaios de caracterização, produção de argamassa e moldagem dos corpos de prova. O material foi coletado conforme recomendação da NBR NM 26:2009 – Agregados – Amostragem.

Figura 11 - Corpos de prova de concreto com resistência de 30MPa para beneficiamento



Fonte: Autora

Depois da separação, o material foi beneficiado por um britador de grande capacidade pertencente a uma central de reciclagem localizada na Região Metropolitana do Recife (Figura 12). O triturador é composto por mandíbulas que trituram os resíduos em três granulometrias diferentes, sendo elas de 25mm, 19mm e 6,3mm.

Figura 12 - Britador utilizado na pesquisa



Fonte: Autora

Após a trituração, realizou-se a separação apenas do resíduo com granulometria equivalente à areia fina, cuja tamanho máximo das partículas era de 4,75 mm (Figura 13).

Figura 13 - Agregado miúdo reciclado



Fonte: Autora

Os agregados reciclados foram colocados em sacos de 30cm x 60cm para a realização dos ensaios de caracterização e para a confecção das argamassas e moldagem dos corpos de prova para os ensaios de laboratório. Em seguida, os agregados reciclados ensacados foram armazenados e identificados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) – POLI/UPE (Figura 14).

Figura 14 - Armazenamento dos agregados miúdos reciclados



Fonte: Autora

3.3 Agregado natural

A areia utilizada nesta pesquisa foi do tipo natural fina, proveniente de uma jazida localizada no município de Vitória de Santo Antão – PE. Inicialmente, a areia foi seca em estufa à temperatura de 100 °C, antes de ser ensaiada e empregada na produção da argamassa. Além disso, a areia foi passada na peneira de abertura 4,75mm e utilizou-se o material passante, antes de ser utilizada na confecção da argamassa de referência.

3.4 Cimento

Para a produção da argamassa, utilizou-se o cimento Portland CP V- Alta Resistencia Inicial (ARI). Este tipo de cimento foi selecionado por ser mais puro em relação aos outros cimentos disponíveis no mercado, em virtude de que em sua composição não há adições minerais pozolânicas, sendo mais significativo para os resultados da pesquisa. As informações quanto às propriedades químicas e físico-mecânicas foram fornecidas pelo fabricante (Tabela 2).

Tabela 3 - Caracterização do cimento CP V – ARI utilizado na pesquisa

Ensaio químicos					
Ensaio	Norma	Unidade	Resultado	Especificação da norma	
Perda ao Fogo (PF 950C)	NM18/2012	%	6,13	$\leq 6,50$	
Trióxido de Enxofre (SO ₃)	NBR14656/2001	%	4,12	$\leq 4,50$	
Resíduo Insolúvel (RI)	NM22/2004	%	1,00	$\leq 3,50$	
Óxido de Cálcio (CaO)	NM13/2013	%	1,85	não aplicável	
Óxido de Magnésio (MgO)	NBR14656/2001	%	2,52	$\leq 6,50$	
Ensaio físicos					
Ensaio	Norma	Unidade	Resultado	Especificação da norma	
Blaine	NBR16372/15	cm ² /g	5011,00	não aplicável	
Ret.75mic	NBR11579/13	%	0,20	$\leq 6,00$	
Ret.45mic	NBR12826/14	%	2,00	não aplicável	
Ínicio de Pega (IP)	NBR16607/18	min	145,00	$\geq 60,00$	
Fim de Pega (FP)	NBR16607/18	min	-	não aplicável	
Ensaio mecânicos - ABNT NBR 7215/1996					
Ensaio	Norma	Unidade	Desvio	Resultado	Especificação da norma
Resistência à compressão (1 dia)	NBR7215/19	MPa	0,47	24,60	$\geq 14,00$
Resistência à compressão (3 dias)	NBR7215/19	MPa	1,59	35,80	$\geq 24,00$
Resistência à compressão (7 dias)	NBR7215/19	MPa	1,24	40,60	$\geq 34,00$
Resistência à compressão (28 dias)	NBR7215/19	MPa	0,59	48,30	não aplicável

Fonte: Elaborada pela autora de acordo com dados fornecidos pelo fabricante.

3.5 Água

A água utilizada foi oriunda da Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa). Esta água atende aos requisitos mínimos de qualidade retratados na NBR 15900 (ABNT, 2009), sem requerer ensaios específicos para avaliar as impurezas que possam causar reações químicas no concreto, logo considerou-se que a mesma pode ser utilizada na produção de argamassa.

3.6 Ensaios de caracterização dos agregados miúdos reciclados

Os ensaios de caracterização dos agregados miúdos reciclados foram realizados no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) da UFPE, seguindo as normas técnicas (Quadro 5).

Quadro 5 - Ensaios de caracterização do agregado miúdo reciclado

Ensaio	Norma
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa Unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Índice de volume de vazios	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Massa específica	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Absorção de água	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)

Fonte: Autora

O ensaio para determinação da composição granulométrica foi realizado conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Foram pesadas duas amostras de 500g do agregado miúdo reciclado. Em seguida, as amostras foram expostas a uma temperatura de 105°C durante 24 horas. Após este período, as amostras foram colocadas nas peneiras sobrepostas em ordem decrescente, de tal forma: 4,75mm > 2,36mm > 1,18mm > 0,6mm > 0,3mm e 0,15mm. Em seguida, foi realizado o peneiramento eletromecânico, onde as peneiras foram posicionadas e o equipamento foi acionado. Desta forma, ao finalizar o peneiramento eletromecânico, executou-se a pesagem do material retido em cada peneira para obtenção dos percentuais de material retido e acumulado, assim como obtenção das curvas granulométricas e ensaios de caracterização do agregado miúdo reciclado, sendo tal procedimento realizado para cada amostra.

3.7 Ensaios de caracterização do agregado natural

Os ensaios de caracterização foram realizados no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM), seguindo as normas técnicas (Quadro 6).

Quadro 6 - Ensaio de caracterização da areia

Ensaio	Norma
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa Unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Índice de volume de vazios	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Massa específica	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Absorção de água	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)

Fonte: Autora.

Para determinação da composição granulométrica, primeiramente, foram pesadas duas amostras de areia fina, sendo cada uma com o peso equivalente a 500g. Posteriormente, as amostras foram expostas a uma temperatura de 105°C durante 24 horas e inseridas na peneira respeitando a seguinte sequência de abertura: 4,8mm > 2,4mm > 1,2mm > 0,6mm > 0,3mm e 0,15mm, ou seja, as peneiras foram sobrepostas em ordem decrescente.

Em seguida, foi realizado o peneiramento eletromecânico (Figura 15 e 16), onde as peneiras foram posicionadas e o equipamento foi acionado conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Figura 15 - Peneiramento do agregado miúdo reciclado (amostra 1)



Fonte: Autora

Figura 16 - Peneiramento do agregado miúdo reciclado (amostra 2)



Fonte: Autora

Após o peneiramento, foi efetuada a pesagem das quantidades de material retido em cada peneira e realizou-se o cálculo dos percentuais de material retido e acumulado da amostra 1, em como foram obtidas as curvas granulométricas da areia fina e os demais ensaios de caracterização do agregado.

3.8 Dosagem, moldagem e cura das argamassas

O design das argamassas foi realizado a partir de uma seleção e combinação dos materiais constituintes, de modo a propiciar a racionalização de recursos e a obtenção do melhor custo-benefício. A primeira etapa da dosagem consistiu na escolha dos materiais que foram utilizados na produção da pasta de argamassa. Para o estudo foram efetuadas quatro famílias de argamassa de referência com areia fina e quatro famílias com os três percentuais de substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado, todas elas com proporções diferentes (cimento : agregados secos, (1:m)), sendo a 1:2,5, 1:4,0, 1:5,5 e 1:7,0. Ao todo, este estudo contemplou 16 configurações de argamassas diferentes (Quadro 7).

Quadro 7 - Configuração das argamassas

Designação	Configuração/significado da sigla da designação
ARG-REF-PROP2,5	Argamassa de Referência na proporção de 1:2,5 com agregado natural
ARG-REF-PROP4,0	Argamassa de Referência na proporção de 1:4,0 com agregado natural
ARG-REF-PROP5,5	Argamassa de Referência na proporção de 1:5,5 com agregado natural
ARG-REF-PROP7,0	Argamassa de Referência na proporção de 1:7,0 com agregado natural
ARG-SUB30%-PROP 2,5	Argamassa com substituição de 30% na proporção de 1:2,5 (substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado)
ARG-SUB50%-PROP 2,5	Argamassa com substituição de 50% na proporção de 1:2,5 (substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado)
ARG-SUB100%-PROP 2,5	Argamassa com substituição de 100% na proporção de 1:2,5 (substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado)
ARG-SUB30%-PROP 4,0	Argamassa com substituição de 30% na proporção de 1:4,0 (substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado)
ARG-SUB50%-PROP 4,0	Argamassa com substituição de 50% na proporção de 1:4,0 (substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado)
ARG-SUB100%-PROP4,0	Argamassa com substituição de 100% na proporção de 1:4,0 (substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado)
ARG-SUB30%-PROP5,5	Argamassa com substituição de 30% na proporção de 1:5,5 (substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado)
ARG-SUB50%-PROP5,5	Argamassa com substituição de 50% na proporção de 1:5,5 (substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado)
ARG-SUB100%-PROP5,5	Argamassa com substituição de 100% na proporção de 1:5,5 (substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado)
ARG-SUB30%-PROP7,0	Argamassa com substituição de 30% na proporção de 1:7,0 (substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado)
ARG-SUB50%-PROP7,0	Argamassa com substituição de 50% na proporção de 1:7,0 (substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado)
ARG-SUB100%-PROP7,0	Argamassa com substituição de 100% na proporção de 1:7,0 (substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado)

Fonte: Autora.

A partir do estudo realizado por Santos (2018), foi possível determinar o teor de argamassa a partir de uma proporção 1:5,5, em massa, partindo com 51% e aumentando este teor de argamassa de 2 em 2%. Desta forma, obteve-se o teor ideal de argamassa de 55%, considerando-se este teor como constante para todas as famílias de argamassa produzidas nesta pesquisa (Tabela 4).

Tabela 4 - Definição do teor de argamassa ideal (Proporção 1:5,5)

Definição do teor de argamassa ideal (Proporção 1:5,5)						
Teor (%)	Proporção unitária (1:a:p)	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita (kg)	Água (kg)	a/c
51	1: 2,31: 3,18	7,849	18,171	25	4,068	0,52
53	1: 2,44: 3,05	8,183	20,008	25	4,957	0,6
55	1:2,57:2,92	8,547	22,009	25	5,427	0,63

Fonte: Autora.

A partir da definição do teor ideal de argamassa, foram determinadas as proporções a serem produzidas, com suas respectivas relações a/c (Tabelas 5 e 6). As quantidades foram determinadas de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996).

Tabela 5 - Argamassa de referência de com areia fina

Designação	Proporção em massa	Substituição do agregado	Quantidade de Corpos de prova	Cimento (g)	Areia (g)	Agregado miúdo reciclado (g)	a/c
ARG-REF-PROP2,5	1:2,5	0%	12	936	2241	0	0,40
ARG-REF-PROP4,0	1:4,0	0%	12	936	1638	0	0,46
ARG-REF-PROP5,5	1:5,5	0%	12	936	2415	0	0,55
ARG-REF-PROP7,0	1:7,0	0%	12	936	3182	0	0,87

Fonte: Autora.

Tabela 6 - Proporção das quatro famílias com os três percentuais de substituição da areia fina natural pelo agregado miúdo reciclado

Designação	Proporção em massa	Substituição do agregado	Quantidade de Corpos de prova	Cimento (g)	Areia (g)	Agregado miúdo reciclado (g)	a/c
ARG-SUB30%-PROP 2,5	1:2,5	30%	12	936	609	261	0,40
ARG-SUB50%-PROP 2,5		50%	12	936	435	435	0,40
ARG-SUB100%-PROP 2,5		100%	12	936	0	870	0,40
ARG-SUB30%-PROP 4,0	1:4,0	30%	12	936	1146,6	491,4	0,46
ARG-SUB50%-PROP 4,0		50%	12	936	819	819	0,46
ARG-SUB100%-PROP4,0		100%	12	936	0	1638	0,46
ARG-SUB30%-PROP5,5	1:5,5	30%	12	936	1690,416	724,464	0,55
ARG-SUB50%-PROP5,5		50%	12	936	845,208	845,208	0,55
ARG-SUB100%-PROP5,5		100%	12	936	0	2414,88	0,55
ARG-SUB30%-PROP7,0	1:7,0	30%	12	936	2227,68	954,72	0,87
ARG-SUB50%-PROP7,0		50%	12	936	1591,2	1591,2	0,87
ARG-SUB100%-PROP7,0		100%	12	936	0	3182,4	0,87

Fonte: Autora.

Após o design e definição das proporções, as argamassas foram produzidas e moldadas em moldes cilíndricos Ø 5 x 10cm, sendo moldados 12 corpos de prova para cada configuração de proporção, isto é, totalizando 192 corpos de prova.

As argamassas foram produzidas em uma argamassadeira automática Engetotus, modelo 400040 (Figura 17), do Laboratório 20 do Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) da UFPE. Após a moldagem, as faces superiores dos moldes ficaram protegidas por uma placa de acrílico para cura inicial (Figura 18).

Figura 17 - Argamassadeira para produção da argamassa



Fonte: Autora.

Figura 18 - Corpos de prova após moldagem



Fonte: Autora.

Após 24 horas, procedeu-se com a desmoldagem e identificação dos corpos de prova (Figura 19). Em seguida, os corpos de prova foram colocados em cura submersa em recipientes com água por 28 dias desde o momento da desmoldagem até a realização dos ensaios de resistência à compressão (Figura 20)

Figura 19 - Desmoldagem e identificação dos corpos de prova



Fonte: Autora.

Figura 20 - Cura submersa



Fonte: Autora.

3.9 Ensaio de Caracterização da argamassa no estado fresco

Os ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco foram realizados no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) da UFPE, tais ensaios foram realizados conforme as normas técnicas (Quadro 8). Um total de 192 CPs foram utilizados para caracterizar as argamassas estudadas, tanto de referência quanto às com substituição por agregados miúdos reciclados.

Quadro 8 - Ensaio de caracterização no estado endurecido

Ensaio	Norma	Quantidade de corpos de prova
Densidade de massa	NBR 13278 (ABNT, 2005)	192
Determinação do índice de consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)	192

Fonte: Autora.

3.9.1 Densidade de massa

O ensaio para determinação e cálculo (Equação 1) da densidade em massa da argamassa no estado fresco, foi executado de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 13278 (ABNT, 2005).

$$A = \frac{M_c - M_v}{V_r}$$

Onde:

A - Densidade de massa (g/cm³);

M_c - Massa do recipiente contendo a argamassa fresca (g);

M_v - Massa do recipiente vazio (g);

V_r - Volume do recipiente (cm³).

3.9.2 Determinação do índice de consistência

Para determinação do índice de consistência da argamassa no estado fresco, foi executado de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 13276 (ABNT, 2016) (Figura 21). O índice de consistência foi fixado em 240 ± 10mm.

Figura 21 - Ensaio para determinação do índice de consistência



Fonte: Autora

3.10 Ensaios de caracterização no estado endurecido

Os ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido foram realizados no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM), tais ensaios foram realizados conforme as normas técnicas (Quadro 9). Foram utilizados 192 corpos de provas para os ensaios mecânicos, no caso ensaio de resistência à compressão simples, e 49 amostras para os demais ensaios.

Quadro 9 - Ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido

Ensaio	Norma	Quantidade de corpos de prova/amostra
Resistência à compressão simples	NBR 7215 (ABNT, 2019)	192
Difratometria de Raios X	ASTM R975 (2013)	16 amostras

Fonte: Autora

3.10.1 Resistência à compressão simples

Após o término dos 28 dias de cura, os corpos de prova foram pesados com a finalidade de obter a massa úmida em gramas, posteriormente foram secos durante 24h em estufa a uma temperatura de 100°C.

Em seguida, executou-se o ensaio de acordo com a NBR 7215/2019. As rupturas foram realizadas em uma prensa manual Engetotus modelo 400261, com capacidade máxima de 20T (Figura 22). Para cada configuração de proporção, foram rompidos 12 corpos de prova. No total, romperam-se 192 corpos de prova.

Figura 22 - Corpo de prova preparado para o ensaio de resistência à compressão simples



Fonte: Autora

3.10.2 Difractometria de Raios X (DRX)

As análises de difração de raios-x foram realizadas em um difratômetro *Shimadzu Diffractometer XRD-7000* com os seguintes parâmetros: medição standards, *scan mode continuo ou fixed time*, *scan axis θ e 2θ* , faixa de medição de 5° - 70° , velocidade de medição de $0,0100^{\circ}/\text{min}$, tempo por passo de $0,020\text{s}$, voltagem 20kV , corrente de 30mA , voltagem de 30kV e fendas $1:1:0,30\text{mm}$. As fases presentes nas amostras dos argamassas de referência e recicladas foram identificadas através do software XRD 6100-7000.

Os ensaios foram realizados no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM) da UFPE.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS PARCIAIS

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Caracterização da areia fina

Com base na composição granulométrica da areia, observou-se que a dimensão máxima característica (DMC) dos grãos da amostra 1 foi de 2,36mm, enquanto o módulo de finura foi de 2,23 (Tabela 7). Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), esta granulometria compreende a zona 2 e equivale a uma areia fina.

Tabela 7 - Composição granulométrica da areia fina (amostra 1 e amostra 2)

Amostra 1						
Peneiras(mm)	Peneira	Retido + peneira (g)	Retido (g)	Percentual retido	Retido acumulado (g)	Percentual retido acumulado
4,75	438,50	438,50	0,0	0,0%	0,0	0,0%
2,36	407,00	418,50	11,5	2,3%	11,5	2,3%
1,18	370,00	409,00	39,0	7,8%	50,5	10,1%
0,60	317,00	436,50	119,5	23,9%	170,0	34,0%
0,30	308,50	496,00	187,5	37,5%	357,5	71,5%
0,15	297,00	374,50	77,5	15,5%	435,0	87,0%
FUNDO	379,00	430,00	51,0	10,2%	486,0	97,2%
Amostra 2						
Peneiras(mm)	Peneira	Retido + peneira (g)	Retido (g)	Percentual retido	Retido acumulado (g)	Percentual retido acumulado
4,75	438,50	438,70	0,2	0,0%	0,2	0,0%
2,36	407,00	411,50	4,5	0,9%	4,7	0,9%
1,18	370,00	425,00	55,0	11,0%	59,7	11,9%
0,60	317,00	490,50	173,5	34,7%	233,2	46,6%
0,30	308,50	506,00	197,5	39,5%	430,7	86,1%
0,15	297,00	342,50	45,5	9,1%	476,2	95,2%
FUNDO	379,00	398,50	19,5	3,9%	495,7	99,1%

Fonte: Autora.

A partir da Tabela 8 é possível observar os resultados de caracterização da areia fina. A partir da curva granulométrica da areia (Figura 23), é possível observar que o material se enquadra parcialmente dentro da zona ótima estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2009), exceto por três pontos que ficaram dentro do limite utilizável inferior.

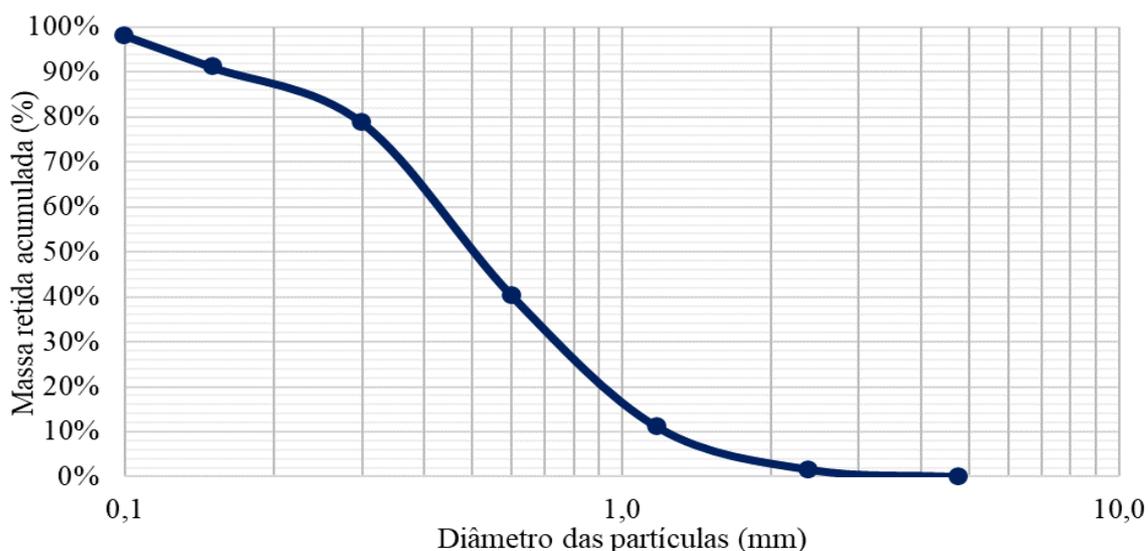
Tabela 8 - Caracterização da areia fina (amostra 1 e amostra 2)

Propriedade	Resultado	Procedimento do ensaio
Absorção de água (%)	12,50	NBR NM 30 (AMN, 2001)
Dimensão máxima característica (mm)	2,36	NBR NM 248 (AMN, 2003)
Módulo de finura	2,23	NBR NM 248 (AMN, 2003)
Massa específica (g/cm ³)	1,56	NBR NM 52 (AMN, 2009)
Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	2,26	NBR NM 52 (AMN, 2009)
Massa unitária (kg/m ³)	2800,50	NBR NM 45 (AMN, 2006)

Fonte: Autora.

A absorção de água da areia fina correspondeu a 12,5%, o módulo de finura foi de 2,23, com massa específica de 1,56g/cm³ e massa específica do agregado seco de 2,26g/cm³ (Tabela 8).

Figura 23 - Curva granulométrica para o material acumulado da areia fina



Fonte: Autora.

4.1.2 Caracterização do agregado miúdo reciclado

A Tabela 9 apresenta a composição granulométrica do agregado miúdo reciclado, em que a dimensão máxima característica dos grãos corresponde a 2,36mm, equivalente a DMC da areia fina utilizada, enquanto o módulo de finura foi de 2,83, sendo superior em aproximadamente 26,9%.

Tabela 9 - Composição granulométrica do agregado miúdo reciclado (amostra 1 e amostra 2)

Peneiras(mm)	Peneira	Retido + peneira (g)	Retido (g)	Percentual retido	Retido acumulado (g)	Percentual retido acumulado
4,75	438,50	438,50	0,0	0,0%	0,0	0,0%
2,36	407,00	412,50	5,5	1,1%	5,5	1,1%
1,18	370,00	509,00	139,0	27,8%	144,5	28,9%
0,60	317,00	479,00	162,0	32,4%	306,5	61,3%
0,30	308,50	446,00	137,5	27,5%	444,0	88,8%
0,15	297,00	342,00	45,0	9,0%	489,0	97,8%
FUNDO	379,00	387,00	8,0	1,6%	497,0	99,4%
Peneiras(mm)	Peneira	Retido + peneira (g)	Retido (g)	Percentual retido	Retido acumulado (g)	Percentual retido acumulado
4,75	438,50	438,50	0,0	0,0%	0,0	0,0%
2,36	407,00	416,00	9,0	1,8%	9,0	1,8%
1,18	370,00	524,00	154,0	30,8%	163,0	32,6%
0,60	317,00	492,50	175,5	35,1%	338,5	67,7%
0,30	308,50	414,00	105,5	21,1%	444,0	88,8%
0,15	297,00	336,00	39,0	7,8%	483,0	96,6%
FUNDO	379,00	392,00	13,0	2,6%	496,0	99,2%

Fonte: Autora.

A absorção de água do agregado reciclado foi de 20,1%, a massa específica correspondeu a 1,56g/cm³ e a massa específica do agregado seco de 1,99g/cm³, sendo superior à absorção de água da areia fina, este aumento de percentual ocorreu devido à porosidade dos agregados reciclados, onde geralmente apresentam uma massa específica equivalente ou menor e maior absorção de água.

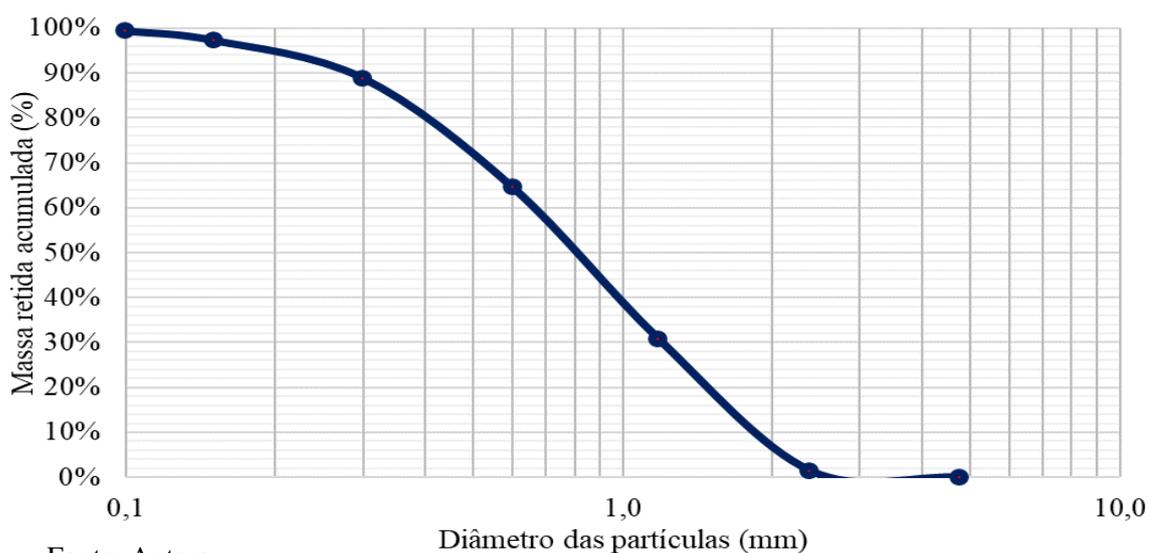
A partir da curva granulométrica do agregado reciclado (Figura 24), é possível observar que o material se enquadra, em sua grande parte, entre a zona utilizável inferior e a zona ótima inferior, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 10 - Caracterização do agregado miúdo reciclado (amostra 1 e amostra 2)

Propriedade	Resultado	Procedimento do ensaio
Absorção de água (%)	20,10	NBR NM 30 (AMN, 2001)
Dimensão máxima característica (mm)	2,36	NBR NM 248 (AMN, 2003)
Módulo de finura	2,83	NBR NM 248 (AMN, 2003)
Massa específica (g/cm ³)	1,56	NBR NM 52 (AMN, 2009)
Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	1,99	NBR NM 52 (AMN, 2009)
Massa unitária (kg/m ³)	1901,50	NBR NM 45 (AMN, 2006)

Fonte: Autora.

Figura 24 - Curva granulométrica para o material acumulado do agregado miúdo reciclado



4.2 Propriedades da argamassa no estado fresco

4.2.1 Índice de Consistência

A Tabela 11 apresenta o resultado do índice de consistência das argamassas após o ensaio.

Tabela 11 - Índice de consistência

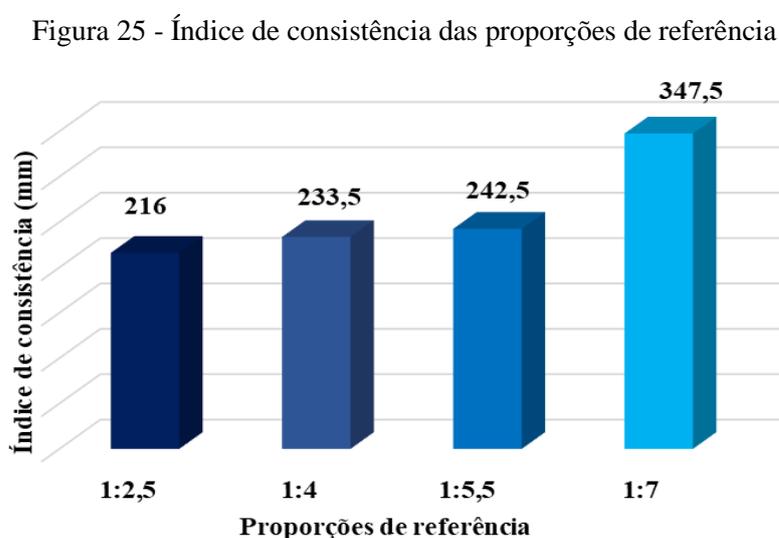
Proporção	Designação	Índice de Consistência (mm)
1:2,5	ARG-REF-PROP2,5	216
	ARG-SUB30% - PROP 2,5	147,5
	ARG-SUB50% - PROP 2,5	152,5
	ARG-SUB100% - PROP 2,5	167,5
1:4	ARG-REF- PROP 4,0	233,5
	ARG-SUB30% - PROP 4,0	232,50
	ARG-SUB50% - PROP 4,0	218,50
	ARG-SUB100% - PROP 4,0	194,00
1:5,5	ARG-REF- PROP 5,5	242,5
	ARG-SUB30% - PROP 5,5	207,50
	ARG-SUB50% - PROP 5,5	194,00
	ARG-SUB100% - PROP 5,5	152,50
1:7	ARG-REF- PROP 7,0	347,5
	ARG-SUB30% - PROP 7,0	335,00
	ARG-SUB50% - PROP 7,0	292,50
	ARG-SUB100% - PROP 7,0	275,00

Fonte: Autora.

Com base na revisão de literatura, o índice de consistência foi fixado em 240 ± 10 mm, logo evidenciou-se que o índice de consistência está diretamente relacionado com a proporção de argamassa, com o percentual de adição e principalmente com a relação água cimento.

A substituição parcial de 30% e 50% apresentaram resultados melhores em relação à consistência da argamassa, exceto para a proporção de 1:7,0 que ultrapassou o índice de consistência fixado, devido a relação água cimento ser superior às demais proporções.

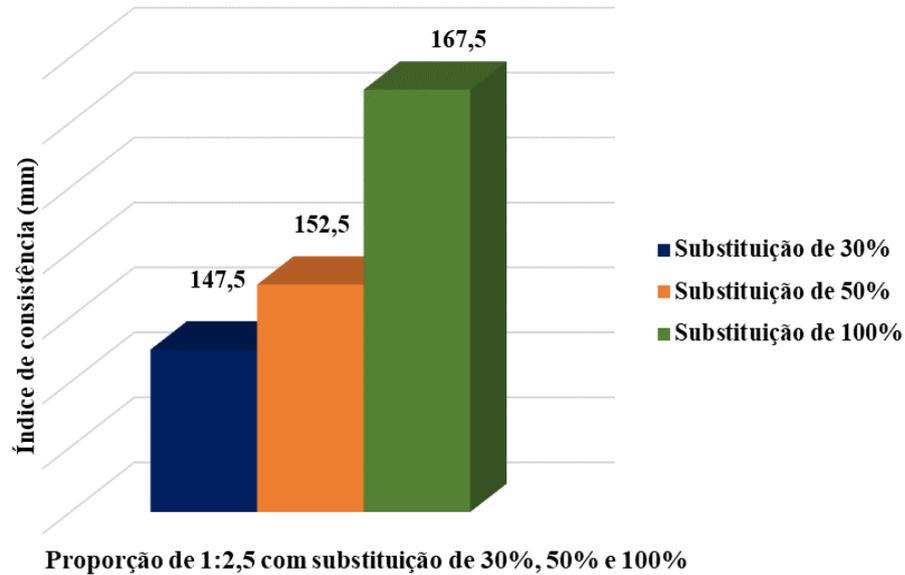
O gráfico apresentado na Figura 25, apresenta o índice de consistência das proporções de referência. Os índices de consistência de referência aumentaram em função da proporção utilizada. Para a proporção de 1:2,5 utilizou-se a relação água cimento de 0,40, com o aumento das proporções de 1:4, 1:5,5 e 1:7, também houve o aumento da relação água cimento, tais como 0,46; 0,55 e 0,87 respectivamente. Desta forma, obteve-se uma maior angulosidade e rugosidade superficial desse material.



Fonte: Autora.

A Figura 26 apresenta os resultados do índice de consistência da proporção 1:2,5 com substituições de 30%, 50% e 100% de forma gráfica. Em função dos percentuais de substituição para a proporção de 1:2,5, foi necessário realizar correções da água livre para manter a trabalhabilidade dentro dos níveis adotados para esse trabalho. Para a proporção de 30% manteve-se a relação água cimento de 0,40, contudo para a taxa de 50% foi necessário aumentar a relação água cimento para 0,48 e para a taxa de 100% a quantidade de água foi aumentada e a nova relação água cimento foi de 0,57.

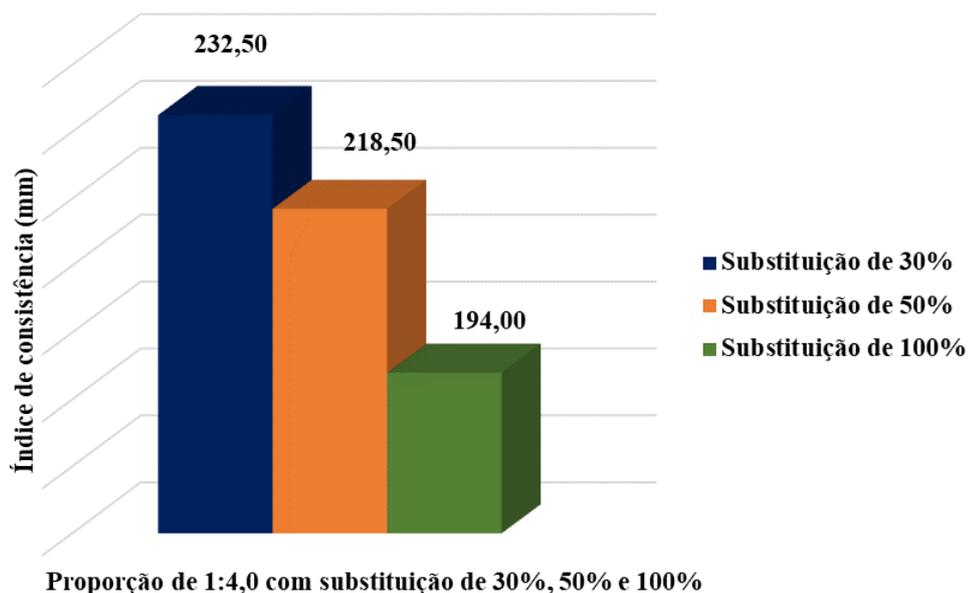
Figura 26 - Índice de consistência da proporção 1:2,5 com substituições de 30%, 50% e 100%



Fonte: Autora.

A Figura 27 apresenta os resultados do índice de consistência da proporção 1:4 com substituições de 30%, 50% e 100% de forma gráfica. Para os percentuais de substituição 50% e 100% da proporção de 1:4, foi necessário realizar correções da água livre que passou a ser 0,51. Assim, pode-se observar que houve uma boa trabalhabilidade para a taxa de 30% atendendo ao índice de consistência fixado de 240 ± 10 mm.

Figura 27 - Índice de consistência da proporção 1:4 com substituições de 30%, 50% e 100%

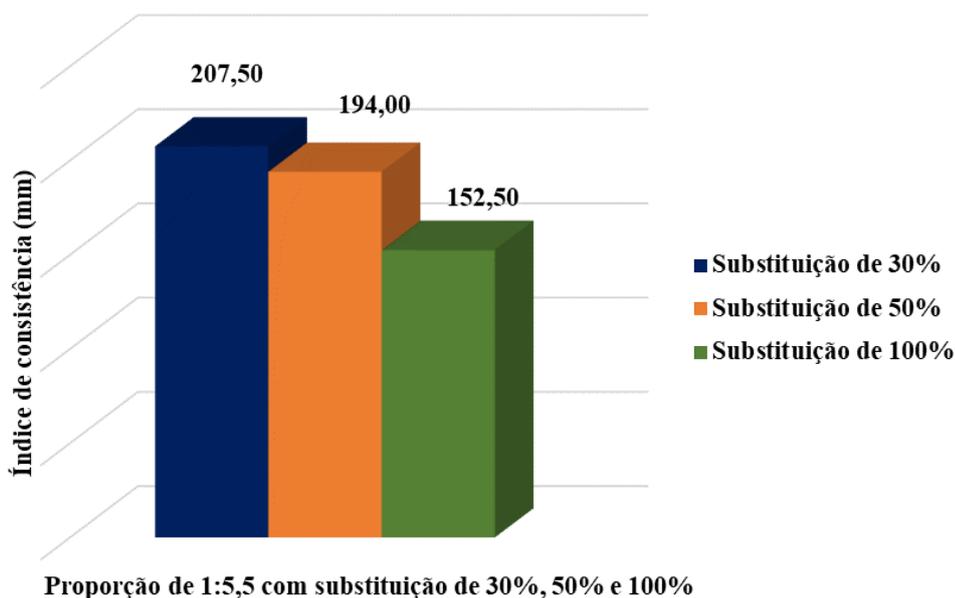


Fonte: Autora.

Também foi observado que em função do aumento da proporção e da taxa de substituição, mesmo havendo a correção da relação água cimento, o índice de consistência não seguiu o comportamento típico de argamassa constituídas de agregados naturais, já que há uma quantidade de materiais diferentes fazendo com que ocorram muitas variáveis que podem interferir nos resultados.

Os resultados do índice de consistência da proporção 1:5,5 com substituições de 30%, 50% e 100% estão apresentados na Figura 28. No caso da proporção de 1:5,5 com a relação água cimento de 0,55 não houve a necessidade de ajustes na quantidade de água. Contudo, observa-se que para a taxa de 30% o índice de consistência foi de 207,5mm, para 50% foi de 194,00mm e para a taxa 100% foi de 152,5, comprovando desta forma que quanto maior a taxa de substituição, menor é a trabalhabilidade da argamassa, sendo equivalente aos estudos realizados por Cuenca-Moyano *et al.* (2020) e Souza *et al.* (2020).

Figura 28 - Índice de consistência da proporção 1:5,5 com substituições de 30%, 50% e 100%

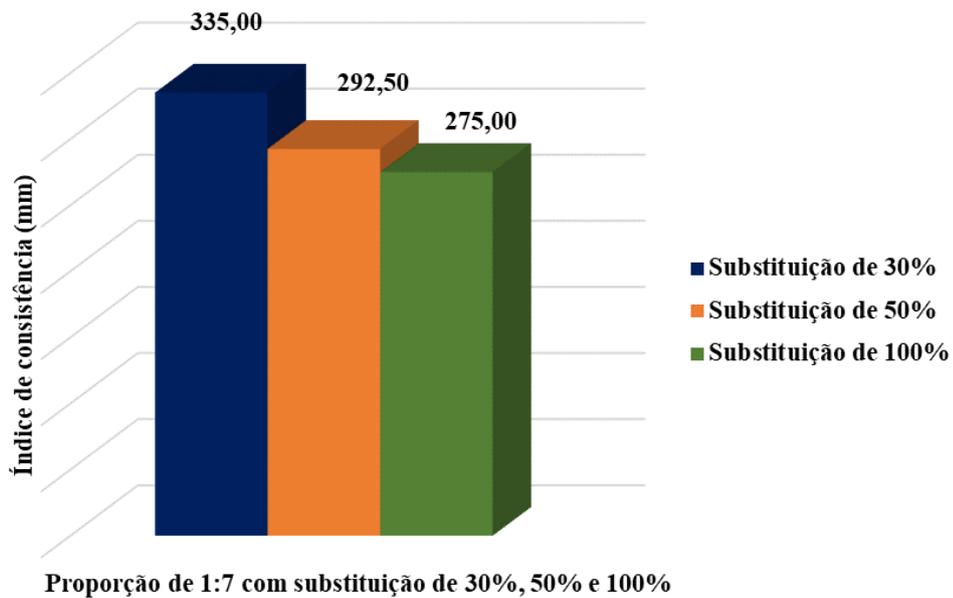


Fonte: Autora.

A Figura 29 apresenta o gráfico com os resultados do índice de consistência da proporção 1:7 com substituições de 30%, 50% e 100%. O índice de consistência das argamassas produzidas com a proporção de 1:7 foi superior ao índice determinado de 240 ± 10 mm, uma vez que a

relação de água cimento foi de 0,87, tornando a trabalhabilidade inadequada quando comparada com a literatura. Pode-se observar que para a taxa de 100% de substituição o índice de consistência da argamassa foi reduzido, evidenciando que o percentual de substituição total interfere diretamente na consistência da argamassa.

Figura 29 - Índice de consistência da proporção 1:7 com substituições de 30%, 50% e 100%



Fonte: Autora.

Com base nos resultados apresentados, as argamassas 1:4 de referência, como também a substituição de 30% de areia atenderam ao índice de consistência estabelecido, tornando a trabalhabilidade da argamassa adequada para o uso.

4.2.2 Densidade de massa

Os resultados da densidade em massa para as proporções de referência e para as proporções com substituição de 30%, 50% e 100% estão indicados na Tabela 12.

Tabela 12 - Densidade em massa

Proporção	Designação	Tamanho da amostra	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação	Erro padrão	Intervalo de confiança de 95%
1:2,5	ARG-REF-PROP2,5	12	2,22	0,01	0,44	0,0040	0,0078
	ARG-SUB30%-PROP 2,5	12	2,180	0,040	1,920	0,017	0,034
	ARG-SUB50%-PROP 2,5	12	2,160	0,040	1,930	0,017	0,033
	ARG-SUB100%-PROP 2,5	12	2,060	0,040	2,050	0,017	0,034
1:4	ARG-REF-PROP 4,0	12	2,19	0,020	0,87	0,0078	0,0152
	ARG-SUB30%-PROP 4,0	12	2,080	0,160	7,550	0,064	0,126
	ARG-SUB50%-PROP 4,0	12	2,070	0,160	7,800	0,066	0,129
	ARG-SUB100%-PROP 4,0	12	2,080	0,020	1,170	0,010	0,020
1:5,5	ARG-REF-PROP 5,5	12	2,18	0,01	0,45	0,0040	0,0079
	ARG-SUB30%-PROP 5,5	12	2,140	0,040	1,680	0,015	0,029
	ARG-SUB50%-PROP 5,5	12	2,160	0,170	7,890	0,070	0,136
	ARG-SUB100%-PROP 5,5	12	2,140	0,070	3,160	0,028	0,054
1:7	ARG-REF-PROP 7,0	12	2,15	0,01	0,57	0,0050	0,0099
	ARG-SUB30%-PROP 7,0	12	2,070	0,040	1,930	0,016	0,032
	ARG-SUB50%-PROP 7,0	12	2,010	0,200	9,920	0,814	0,160
	ARG-SUB100%-PROP 7,0	12	1,920	0,220	11,590	0,091	0,178

Fonte: Autora.

Observou-se que a densidade média das argamassas, para todas as configurações de proporções definidas, foi diminuindo em função do aumento da quantidade de agregados reciclados em sua composição, variando de 2,01 g/cm³ a 2,22 g/cm³. Esse resultado pode ter ocorrido em função da menor massa específica que os grãos de material reciclado apresentam.

Em sua pesquisa, Lima (2020) observou um decréscimo de 11,74% na densidade da argamassa para a taxa de substituição de 100% de agregados graúdos reciclados. Bem como, Cuenca-Moyano *et al.* (2020), obteve uma redução de 10,20% na densidade da argamassa para a taxa de substituição de 100%. Souza *et al.* (2020), também constatou que com o aumento do percentual de substituição houve a redução de 5,86% na densidade em massa da argamassa.

Ainda na Tabela 12, estão apresentados os parâmetros estatísticos tais como desvio padrão, coeficiente de variação, erro padrão e intervalo de confiança de 95%. Com isso, pela análise da variância, pode-se evidenciar que a utilização de agregado reciclado influencia na densidade em massa, ou seja, quanto maior a taxa de substituição maior é o coeficiente de variação.

O desvio padrão das amostras analisadas, em sua maioria, indica que a amostra é mais homogênea e permanece próxima da média. No entanto, houve o aumento do desvio padrão para as proporções de ARG-SUB30% - PROP 4,0 e ARG-SUB50% - PROP 4,0 com desvio padrão de 0,16, ARG-SUB50% - PROP 5,5 com desvio padrão de 0,17, ARG-SUB50% - PROP 7,0 com desvio padrão de 0,20 e ARG-SUB100% - PROP 7,0 com desvio padrão de 0,22. Este aumento do desvio padrão ocorreu devido à variação da densidade para algumas configurações, tais como: ARG-SUB30% e ARG-SUB50% da proporção de 1:5,5 apresentou uma amostra com a densidade fora da média, bem como ARG-SUB50% da proporção de 1:5,5 apresentou duas amostras abaixo da média, ARG-SUB50% e ARG-SUB100% da proporção de 1:7 apresentaram uma amostra fora da média.

4.3 Caracterização no estado endurecido

4.3.1 Resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado nas argamassas na idade de 28 dias de cura. A Tabela 13 apresenta os valores médios de resistência à compressão simples, assim como seus respectivos desvios-padrões e coeficientes de variação das amostras (Apêndice A).

Tabela 13 - Resultados de ensaios de resistência à compressão simples

Proporção	Percentual de Substituição	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
1:2,5	ARG-REF-PROP2,5	51,99	4,80	9,24
	ARG-SUB30%-PROP 2,5	53,21	10,27	19,31
	ARG-SUB50%-PROP 2,5	39,18	14,42	36,8
	ARG-SUB100%-PROP 2,5	28,88	13,59	47,08
1:4	ARG-REF- PROP 4,0	62,82	4,70	7,49
	ARG-SUB30%-PROP 4,0	49,92	7,46	14,96
	ARG-SUB50%-PROP 4,0	44,43	2,20	4,95
	ARG-SUB100%-PROP 4,0	46,03	2,37	5,16
1:5,5	ARG-REF- PROP 5,5	54,09	5,33	9,87
	ARG-SUB30%-PROP 5,5	34,7	4,93	14,22
	ARG-SUB50%-PROP 5,5	51,40	12,3	24,97
	ARG-SUB100%-PROP 5,5	42,82	18,23	42,59
1:7	ARG-REF- PROP 7,0	21,62	2,88	13,33
	ARG-SUB30%-PROP 7,0	20,72	9,88	47,56
	ARG-SUB50%-PROP 7,0	21,42	8,41	39,31
	ARG-SUB100%-PROP 7,0	16,94	7,10	41,92

Fonte: Autora.

A partir da Tabela 13, é possível verificar que o comportamento das argamassas avaliadas quanto aos resultados de resistência à compressão simples variou de acordo com a relação a/c de cada proporção e taxa de substituição.

Observou-se que as argamassas produzidas na proporção de 1:2,5 (ARG-REF-PROP2,5; ARG-SUB30%-PROP2,5, SUB50%-PROP2,5 e ARG-SUB100%-PROP2,5) apresentou variação na resistência à compressão. Os desvios-padrões variaram entre 4,80MPa e 14,41MPa. A configuração ARG-SUB30%-PROP2,5 apresentou um coeficiente de variação de 10,27%, isto se justifica pelo fato de quatro amostras se manterem perto da média e duas amostras apresentarem resultados de resistência à compressão de 66,01MPa e 70,23MPa respectivamente.

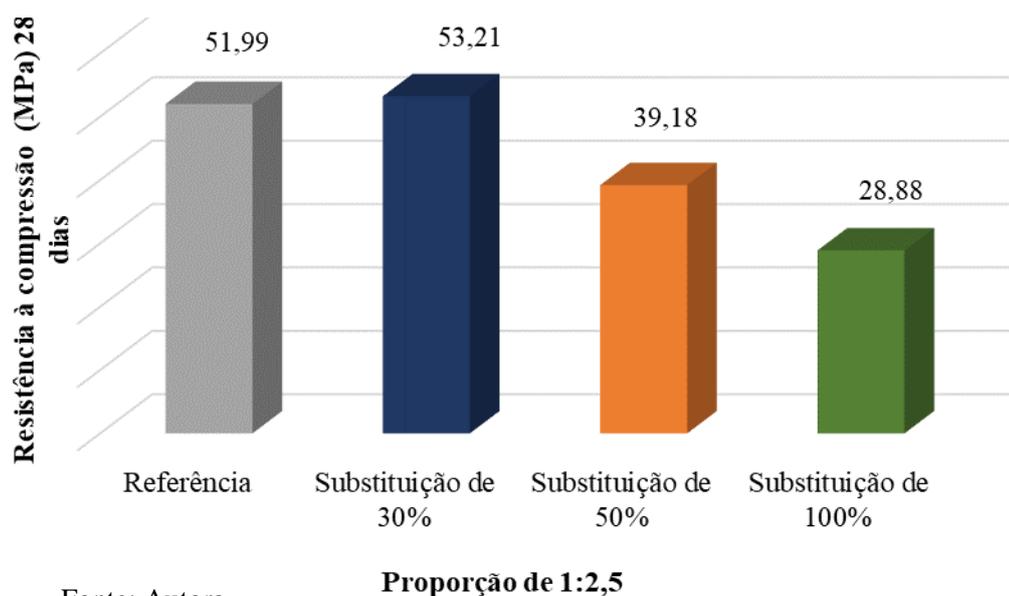
Já para as argamassas produzidas com a proporção de 1:4 (ARG-REF-PROP4,0; ARG-SUB30%-PROP4,0, SUB50%-PROP4,0 e ARG-SUB100%-PROP4,0), apresentaram semelhança nos valores médios de resistência à compressão. Os desvios-padrões se estabeleceram entre 2,20MPa e 4,46MPa. Pode-se observar a partir dos coeficientes de variação que não houve uma tendência de crescimento ou redução com o aumento da taxa de substituição de agregados reciclados.

A argamassas produzidas com a proporção de 1:5,5 (ARG-REF-PROP5,5; ARG-SUB30%-PROP5,5, SUB50%-PROP5,5 e ARG-SUB100%-PROP5,5) apresentaram redução na resistência à compressão quando comparados aos resultados obtidos pelas configurações da proporção de 1:4. Os desvios-padrões se estabeleceram entre 4,93MPa e 18,23MPa. Ainda, constata-se através dos coeficientes de variação, que houve uma tendência de crescimento entre as taxas de substituição de 30% e 50%.

No caso das argamassas da proporção de 1:7 (ARG-REF-PROP7,0; ARG-SUB30%-PROP7,0; SUB50%-PROP7,0 e ARG-SUB100%-PROP7,0) apresentaram significativa redução na resistência à compressão quando comparados aos resultados obtidos pelas configurações da proporção de 1:2,5; 1:4 e 1:5,5. Os desvios-padrões mostram grandes variações de 2,88MPa a 9,88MPa.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão da proporção 1:2,5 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100% estão apresentados em forma gráfica para melhorar a visualização (Figura 30).

Figura 30 - Resultados do ensaio de resistência à compressão da proporção 1:2,5 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%



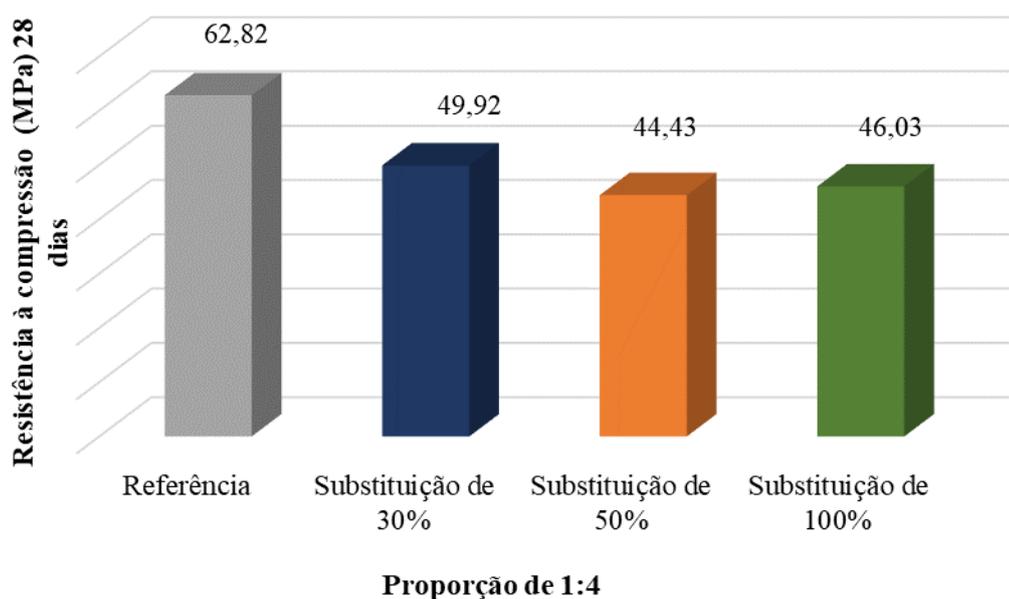
Fonte: Autora.

Com base na Figura 30, a argamassa de referência apresentou um resultado médio de 51,99MPa, já ARG-SUB30%-PROP2,5 superou o resultado de referência obtendo a média de 53,21MPa, uma vez que não houve ajustes na relação água cimento. Contudo, com o aumento da relação água cimento pode-se verificar que para as taxas de substituição de 50% e 100% houve uma redução da resistência à compressão de aproximadamente 24,64% e 44,45% respectivamente, isto pode ter ocorrido em função da correção da quantidade de água. O mesmo ocorreu na pesquisa realizada por Souza *et al.* (2020), onde houve um decréscimo de aproximadamente 12% na resistência à compressão da argamassa. Para Cuenca-Moyano *et al.* (2020), houve um decréscimo na resistência para o percentual de 25% considerando a mesma relação água cimento, ou seja, sem haver correção para uma taxa de substituição menor.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão da proporção 1:4 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100% são mostrados na Figura 31. Verifica-se que a argamassa de referência apresentou um resultado médio de 62,82MPa, contudo houve um decréscimo de 20,53%, 29,27% e 26,72% para as configurações ARG-SUB30%-PROP4,0, SUB50%-PROP4,0 e ARG-SUB100%-PROP4,0, sucessivamente. Esta redução em relação à proporção

de referência pode ter ocorrido por um conjunto de fatores, tais como a massa específica e absorção de água do agregado reciclado e pelos ajustes realizados na relação água cimento.

Figura 31 - Resultados do ensaio de resistência à compressão da proporção 1:4 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%

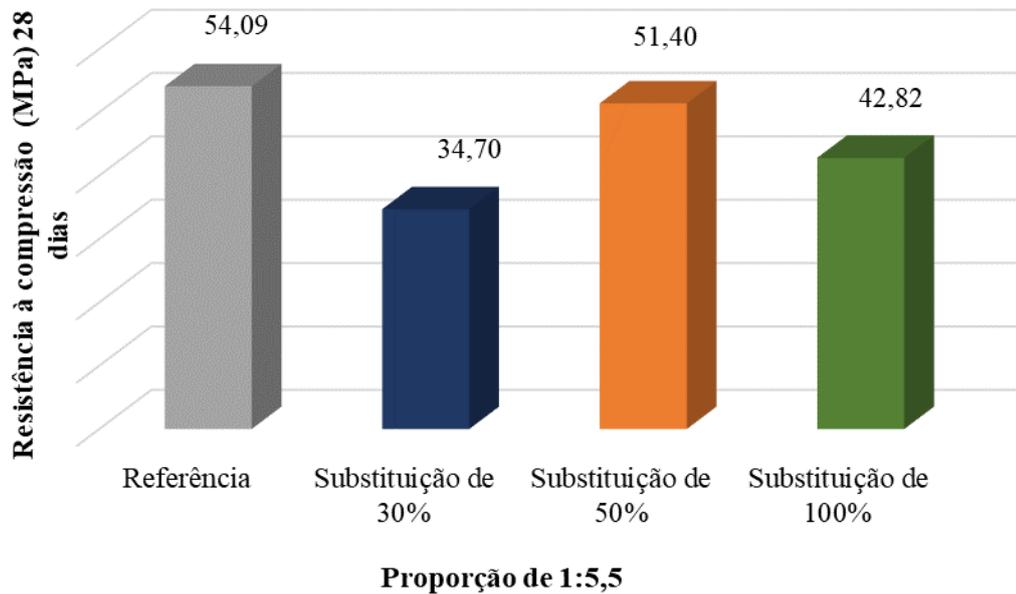


Fonte: Autora.

Este comportamento ocorreu, parcialmente, de forma semelhante na pesquisa realizada por Ferreira *et al.* (2019), no qual houve um decréscimo de 15,71% para a taxa de substituição de 50% em relação à argamassa de referência.

A partir da Figura 32 é possível observar os resultados do ensaio de resistência à compressão da proporção 1:5,5 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%. Diante dos resultados de resistência à compressão da argamassa produzida com a proporção de 1:5,5, observa-se que a argamassa de referência apresentou um resultado médio de 54,09MPa, contudo houve um decréscimo de 35,84%, 4,97% e 20,83% para as configurações ARG-SUB30%-PROP5,5, SUB50%-PROP5,5 e ARG-SUB100%-PROP5,5, sucessivamente, tal redução da resistência pode ter sido ocasionado por uma falha experimental. Esta redução em relação à proporção de referência pode ter sido influenciada pela relação água cimento de 0,55.

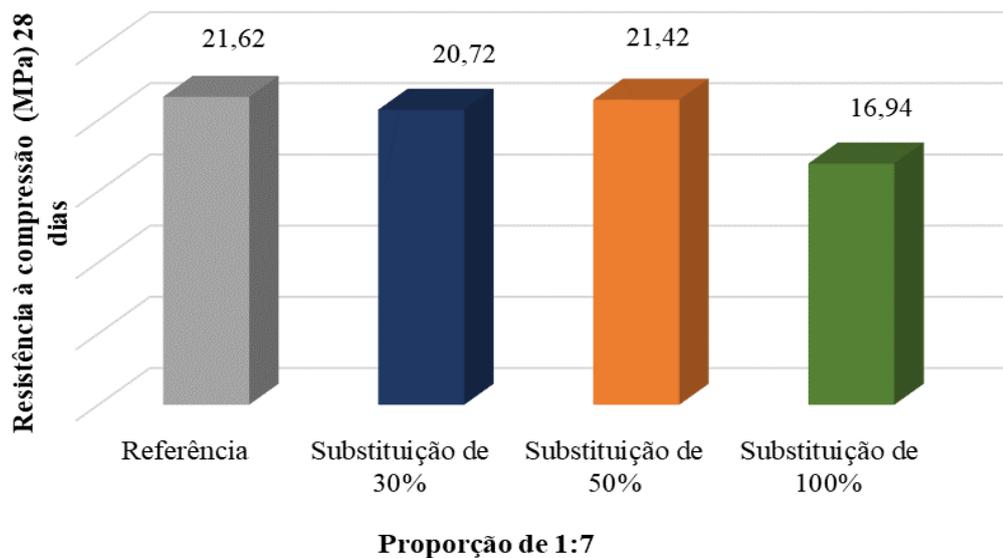
Figura 32 - Resultados do ensaio de resistência à compressão da proporção 1:5,5 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%



Fonte: Autora.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão das argamassas produzidas com a proporção 1:7 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100% estão apresentados de forma gráfica na Figura 33.

Figura 33 - Resultados do ensaio de resistência à compressão da proporção 1:7 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%



Fonte: Autora.

A argamassa produzida com a proporção de 1:7 apresentou resultados de resistência à compressão inferiores às demais proporções, tanto para as de referência quanto para as argamassas produzidas com taxa de substituição de 30%, 50% e 100% que se mostraram com resistência entre 16,94MPa e 21,42MPa. Esta redução pode ser explicada pelo aumento da relação água cimento de 0,87.

Diante dos resultados expostos de resistência à compressão das argamassas estudadas, pode-se constatar que para a taxa de 30% de substituição na proporção de 1:2,5 não houve alteração na relação água cimento e, conseqüentemente, houve o aumento da resistência à compressão média, com valor equivalente a 53,21MPa. Em contrapartida, a proporção de 1:4 para as taxas de substituição de 30%, 50% e 100% não obtiveram resistência à compressão superior em relação à proporção de referência, mas apresentaram bons resultados de resistência correlacionados com o índice de consistência e a densidade em massa das argamassas. Principalmente a argamassa preparada com substituição de 30%, que apresentou uma resistência à compressão de 49,92MPa, bem como índice de consistência de 232mm e densidade média de 2,08g/cm³ sem relevantes variações, conforme Tabela 14.

Tabela 14: Resumo dos resultados de caracterização das argamassas nos estados fresco e endurecido

Proporção	Designação	Índice de Consistência (mm)	Densidade em massa média	Resistência à compressão média (MPa)
1:2,5	ARG-REF-PROP2,5	216	2,22	51,99
	ARG-SUB30% - PROP 2,5	147,5	2,18	53,21
	ARG-SUB50% - PROP 2,5	152,5	2,16	39,18
	ARG-SUB100% - PROP 2,5	167,5	2,06	28,88
1:4	ARG-REF- PROP 4,0	233,5	2,19	62,82
	ARG-SUB30% - PROP 4,0	232,5	2,08	49,92
	ARG-SUB50% - PROP 4,0	218,5	2,07	44,43
	ARG-SUB100% - PROP 4,0	194	2,08	46,03
1:5,5	ARG-REF- PROP 5,5	242,5	2,18	54,09
	ARG-SUB30% - PROP 5,5	207,5	2,14	34,7
	ARG-SUB50% - PROP 5,5	194	2,16	51,40
	ARG-SUB100%- PROP 5,5	152,5	2,14	42,82
1:7	ARG-REF- PROP 7,0	347,5	2,15	21,62
	ARG-SUB30% - PROP 7,0	335	2,07	20,72
	ARG-SUB50% - PROP 7,0	292,5	2,01	21,42
	ARG-SUB100% - PROP 7,0	275	1,92	16,94

Fonte: Autora.

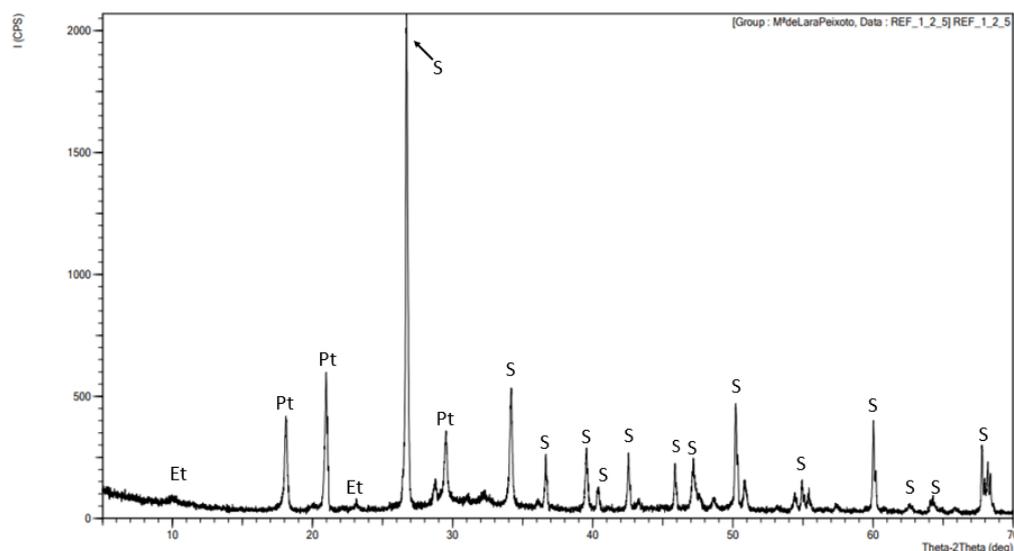
4.3.2 Difractometria de Raios X

Segundo Lima *et al.* (2023), análises estruturais e microestruturais são características importantes para identificar os aspectos químicos do comportamento mecânico de argamassas. Desta forma, é possível identificar as fases existentes nas argamassas a partir da difração de raios X (DRX).

Os difratogramas indicaram composição mineralógica composta por fases SiO_2 , com um pico mais intenso para as argamassas de referência, devido à derivação das rochas naturais. Já a composição mineralógica das argamassas produzidas com agregado reciclado apresentou uma grande variedade de fases cristalinas e amorfas de seus componentes (concreto e argamassa). Além disso, foi possível observar outras fases tais como: Portlandita (Pt, $\text{Ca}(\text{OH})_2$). De acordo com Lima *et al.* (2023), a formação da fase Portlandita é proveniente das reações de hidratação do óxido de cálcio (CaO) que está presente na composição do cimento. Compactuando com os resultados obtidos por Ugioni *et al.* (2017), que evidenciou três fases: Quartzo (SiO_2); Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e Etringita (Et, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$) que são encontradas, de forma geral, em amostras de concreto.

Os difratogramas referentes às argamassas produzidas com a proporção de 1:2,5, tanto de referência quanto com as substituições, apresentam picos de difração correspondentes às fases Quartzo (S), Portlandita (P) e Etringita (Et), conforme Figuras 34, 35, 36, e 37.

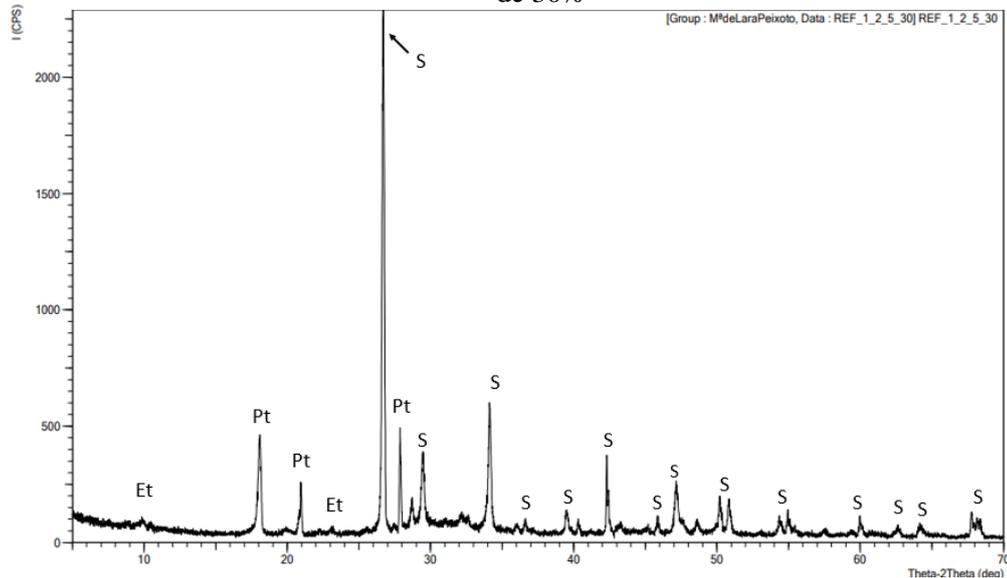
Figura 34 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:2,5 de referência



Com base no difratograma apresentado na Figura 34, é possível observar um pico intenso com 2θ em $26,5^\circ$, devido a fase SiO_2 . Segundo Lima *et al.* (2023), este pico ocorre em função do plano cristalográfico do SiO_2 , bem como em função da quantidade empregada na produção das argamassas. Além disto, a pode-se evidenciar que o menor pico de Quartzo está em 2θ igual a $62,8^\circ$, já a Portlandita apresenta picos com 2θ equivalentes a 18° , 21° e $29,5^\circ$. A Etringita possui picos com 2θ correspondente a 10° e 23° .

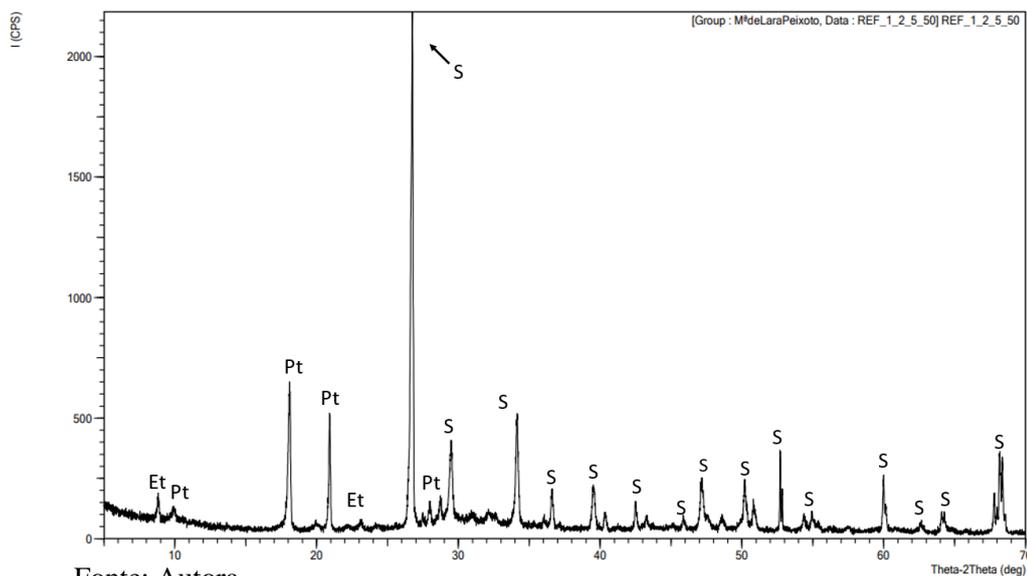
As Figura 35, 36 e 37 apresentam os difratogramas das argamassas produzidas com a proporção de 1:2,5 com taxas de substituições de 30%, 50% e 100%.

Figura 35 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:2,5 com substituição de 30%



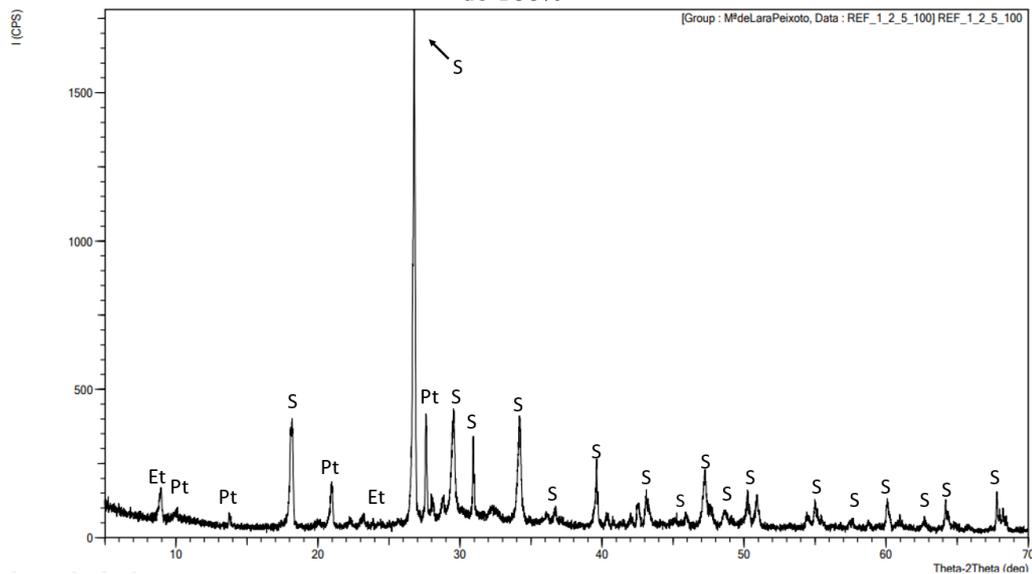
Fonte: Autora.

Figura 36 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:2,5 com substituição de 50%



Fonte: Autora.

Figura 37 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:2,5 com substituição de 100%



Fonte: Autora.

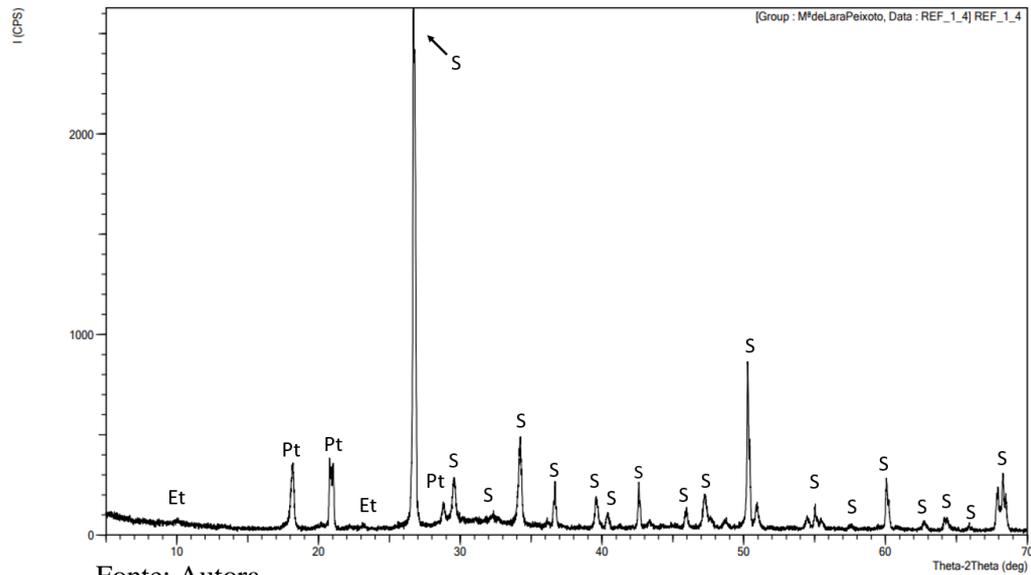
Todos os padrões de DRX das argamassa produzidas com a proporção de 1:2,5 com taxas de substituições de 30%, 50% e 100%, indicam um pico intenso com 2θ em $26,5^\circ$, correspondendo ao padrão de DRX da argamassa de referência apresentada na Figura 34. Para a taxa de substituição de 30% o pico de Quartzo está em 2θ igual a $57,5^\circ$. A Portlandita apresenta picos com 2θ equivalentes a 10° , $14,8^\circ$, 21° e 28° . A Etringita possui picos com 2θ correspondente a $8,9^\circ$ e 23° .

Em relação à taxa de substituição de 50% (Figura 36), o pico de SiO_2 está em 2θ igual a $45,5^\circ$. A fase $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresenta picos com 2θ equivalentes a 10° , $13,9^\circ$, 21° e $27,5^\circ$. Já a fase $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12,26}\text{H}_2$ possui picos com 2θ correspondente a 7° e 24° .

As argamassas produzidas com taxa de substituição de 100% (Figura 37), apresentam pico de SiO_2 está em 2θ igual a $57,5^\circ$. A fase $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresenta picos com 2θ equivalentes a 10° , $13,9^\circ$, 21° e $27,5^\circ$ sendo correspondente à taxa de substituição de 50%. Já a fase $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12,26}\text{H}_2$ possui picos com 2θ correspondente a 7° e 24° .

Os padrões de difração DRX referentes às argamassas produzidas com a proporção de 1:4, das argamassas de referência e com substituições, apresentam picos de difração correspondentes às fases Quartzo (S), Portlandita (P) e Etringita (Et) equivalentes à proporção de 1:4, conforme Figuras 38, 39, 40 e 41.

Figura 38 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:4 de referência



Desta forma, o padrão de difração de DRX da argamassa produzida com a proporção de 1:4 de referência (Figura 38), também possui pico intenso na fase a fase SiO_2 , com 2θ em $26,5^\circ$, possuindo um pico com 2θ em $50,5^\circ$. A fase a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresenta picos com 2θ equivalentes a 18° , 21° e 29° , seguindo o mesmo padrão da argamassa de referência da proporção de 1:2,5. A Etringita possui picos com 2θ correspondente a 10° e 23° .

Os padrões de DRX das argamassas produzidas com a proporção de 1:4 com taxas de substituições de 30%, 50% e 100% estão apresentados nas Figura 39, 40 e 41.

Figura 39 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:4 com substituição de 30%

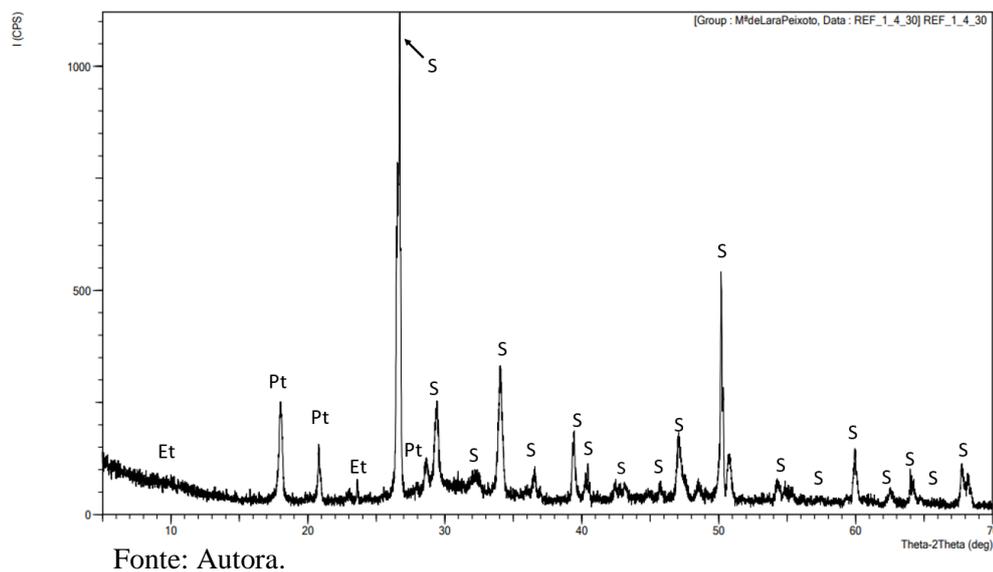


Figura 40 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:4 com substituição de 50%

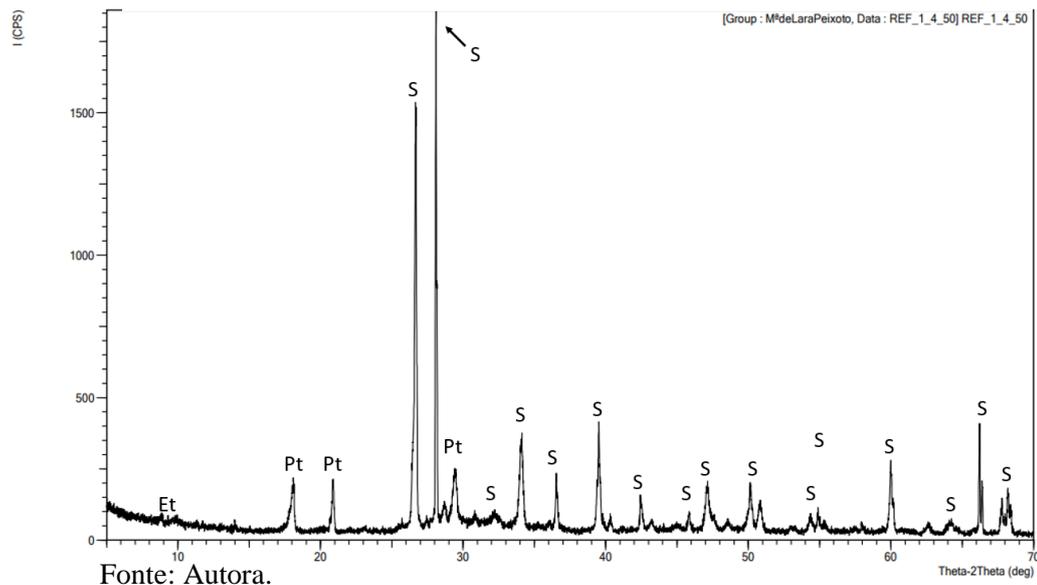
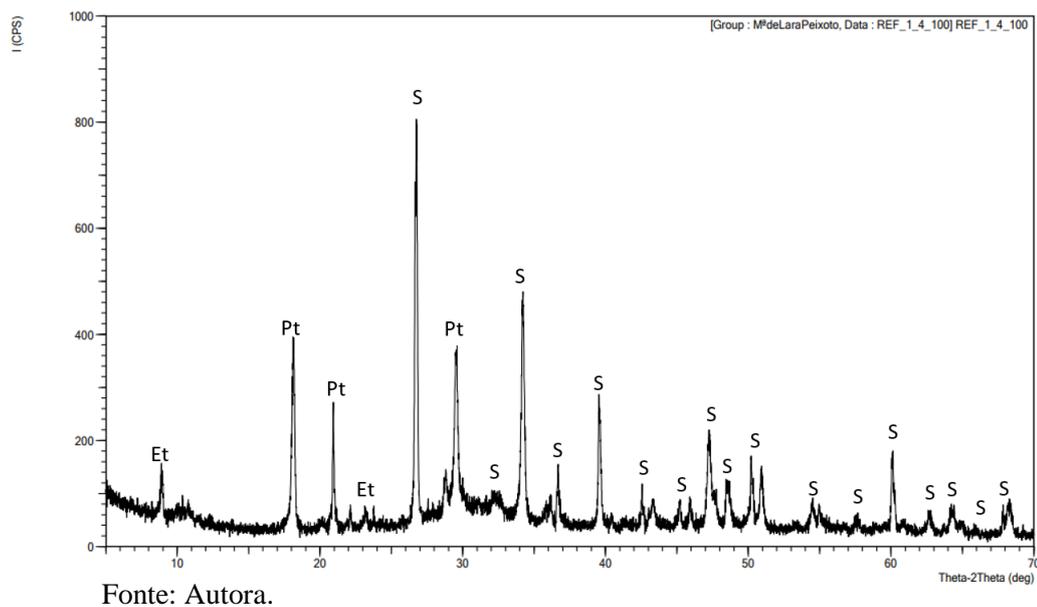


Figura 41 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:4 com substituição de 100%



As argamassas produzidas com a proporção de 1:4 com taxas de substituições de 30%, 50% e 100%, indicam em todos os difratogramas um pico intenso com 2θ em $26,5^\circ$, com exceção da argamassa produzida com taxa de substituição de 50%, no qual o pico mais intenso de Quartzo possui 2θ em 28° .

O difratograma apresentado na Figura 39, corresponde a difração DRX referente à argamassa produzida com taxa de substituição de 30%, no qual o pico do Quartzo está em 2θ igual a 50° .

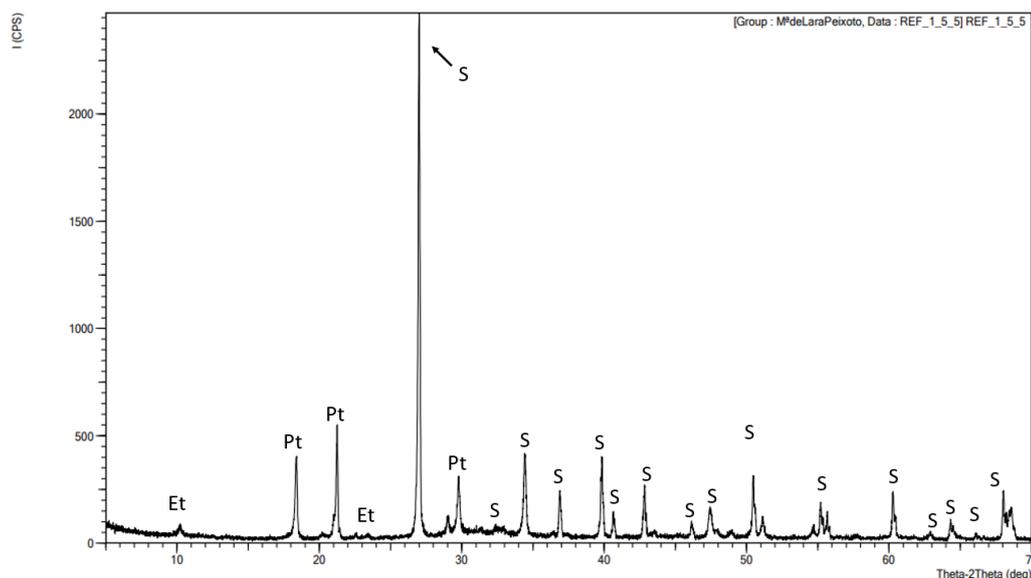
A Portlandita apresenta picos com 2θ em $17,5^\circ$, 21° e $29,5^\circ$. A Etringita possui picos com 2θ correspondente a $6,5^\circ$ e 23° .

Já para a taxa de substituição de 50% (Figura 40), o pico possui 2θ em $26,5^\circ$. A fase $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresenta picos com 2θ equivalentes a 13° , 21° e $29,5^\circ$. Já a fase $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ possui picos com 2θ correspondente a $6,8^\circ$ e 23° .

As argamassas produzidas com taxa de substituição de 100% (Figura 41), apresentam pico possui 2θ correspondente a 34° . A fase $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresenta picos com 2θ equivalentes a 13° , 21° e 30° e a fase $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ possui picos com 2θ correspondente a $6,5^\circ$ e 23° .

As curvas referentes aos difratogramas das argamassas produzidas com a proporção de 1:5,5, das argamassas de referência e com substituições, apresentam picos de difração correspondentes às fases Quartzo (SiO_2); Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e Etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$) equivalentes à proporção de 1:5,5, conforme Figuras 42, 43, 44 e 45.

Figura 42 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:5,5 de referência



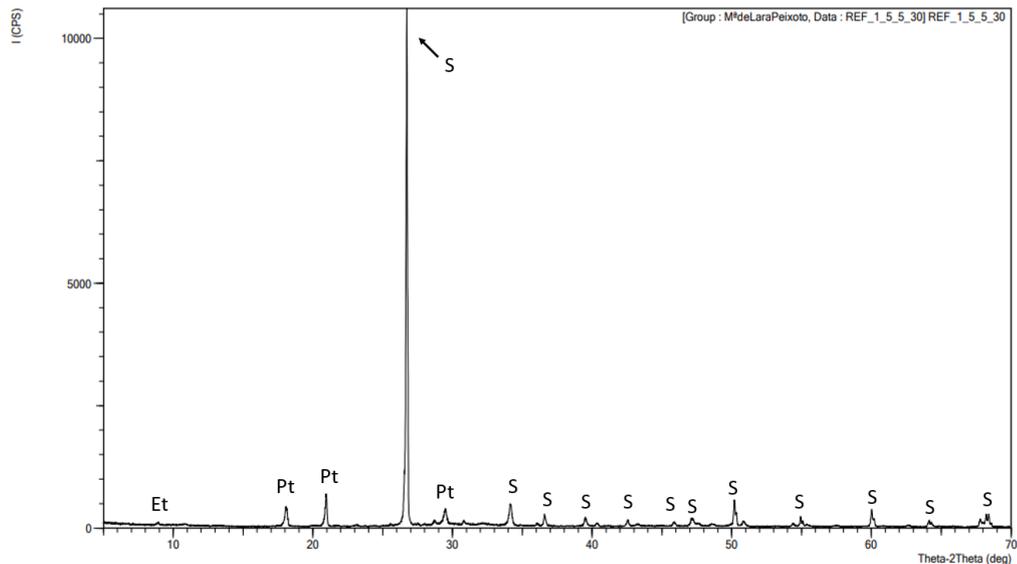
Fonte: Autora.

Os difratogramas da argamassa produzida com a proporção de 1:5,5 de referência (Figura 42), também possui pico intenso na fase a fase SiO_2 , com 2θ variando de $27,5^\circ$. A fase a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresenta picos com 2θ equivalentes a 18° , 21° e 29° , seguindo o mesmo padrão da argamassa

de referência da proporção de 1:2,5 e 1:4. A fase $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ possui picos com 2θ correspondente a 10° e 24° .

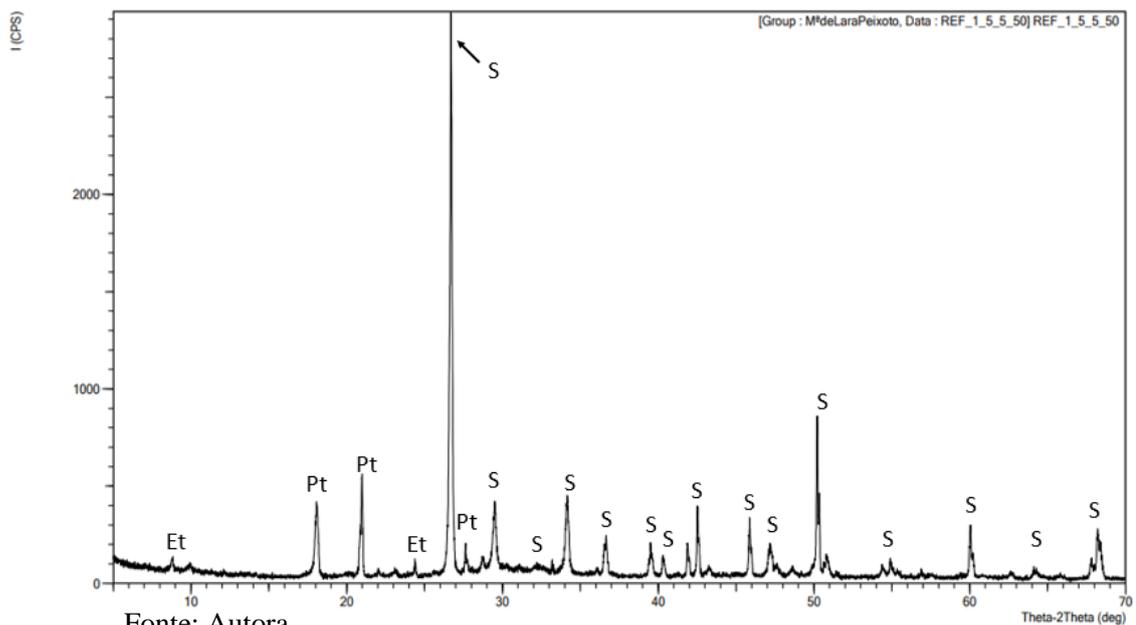
Os padrões de difração DRX das argamassas produzidas com a proporção de 1:5 com taxas de substituições de 30%, 50% e 100% estão apresentados nas Figura 43, 44 e 45.

Figura 43 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:5,5 com substituição de 30%



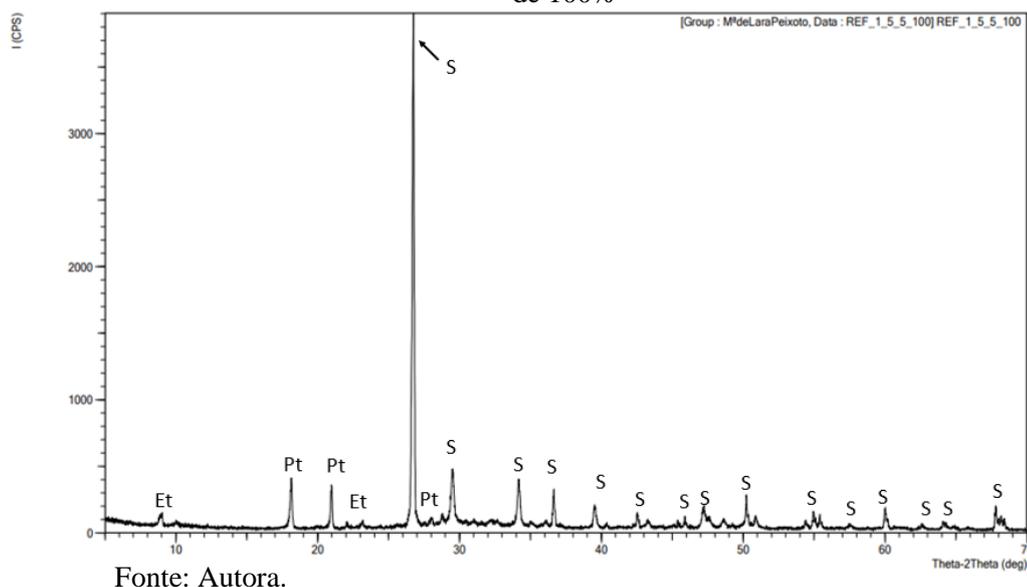
Fonte: Autora.

Figura 44 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:5,5 com substituição de 50%



Fonte: Autora.

Figura 45 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:5,5 com substituição de 100%



Fonte: Autora.

As argamassas produzidas com a proporção de 1:5,5 com taxas de substituições de 30%, 50% e 100%, indicam nos seus respectivos difratogramas um pico intenso com 2θ em $26,5^\circ$, sendo equivalente à argamassa de referência.

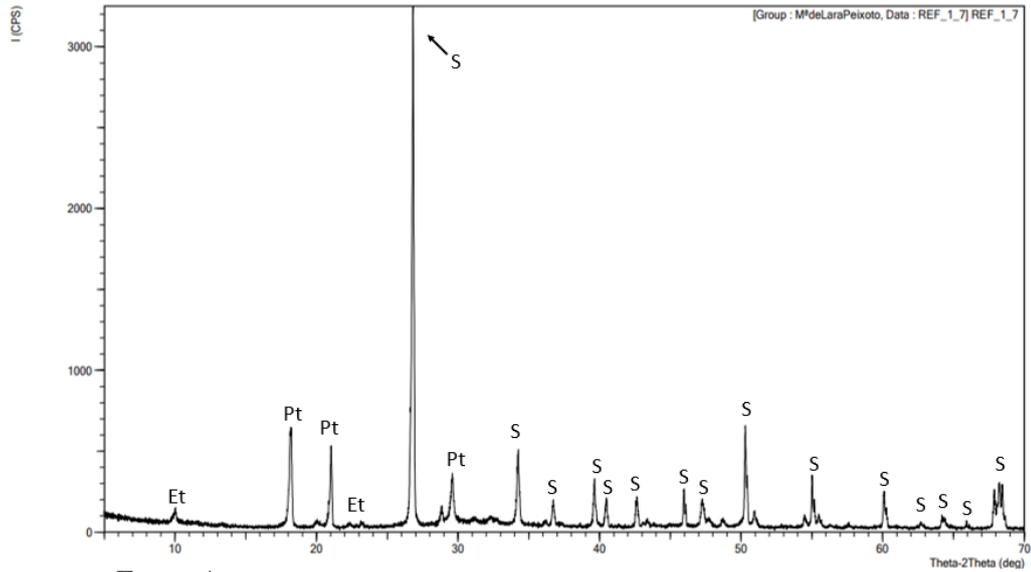
Com isso, a taxa de substituição de 30% apresentou pico do Quartzo no difratograma, para 2θ igual a $57,5^\circ$ (Figura 43). A Portlandita apresenta picos com 2θ equivalentes a 13° , 21° e 28° e a etringita possui picos com 2θ correspondente a $6,9^\circ$ e 23° .

A Figura 44 apresenta o difratograma da argamassa produzida com taxa de substituição de 50%, onde o pico de SiO_2 está em 2θ igual a 64° . A fase $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresenta picos com 2θ equivalentes a 13° , 21° e 28° e a fase $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ possui picos com 2θ equivalente a 8° e 23° .

As argamassas produzidas com taxa de substituição de 100% (Figura 45), apresentam pico de SiO_2 em 2θ igual a $62,5^\circ$. A fase $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresenta picos com 2θ equivalentes a 10° , 18° , $20,9^\circ$ e 28° . A fase $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ possui picos com 2θ correspondente a 8° e 23° igualmente à taxa de substituição de 50%.

Os difratogramas referentes às argamassas produzidas com a proporção de 1:7, apresentam picos de difração correspondentes às fases Quartzo (S), Portlandita (P) e Etringita (Et) equivalentes à proporção de 1:7, conforme Figuras 46, 47, 48 e 49.

Figura 46 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:7 de referência

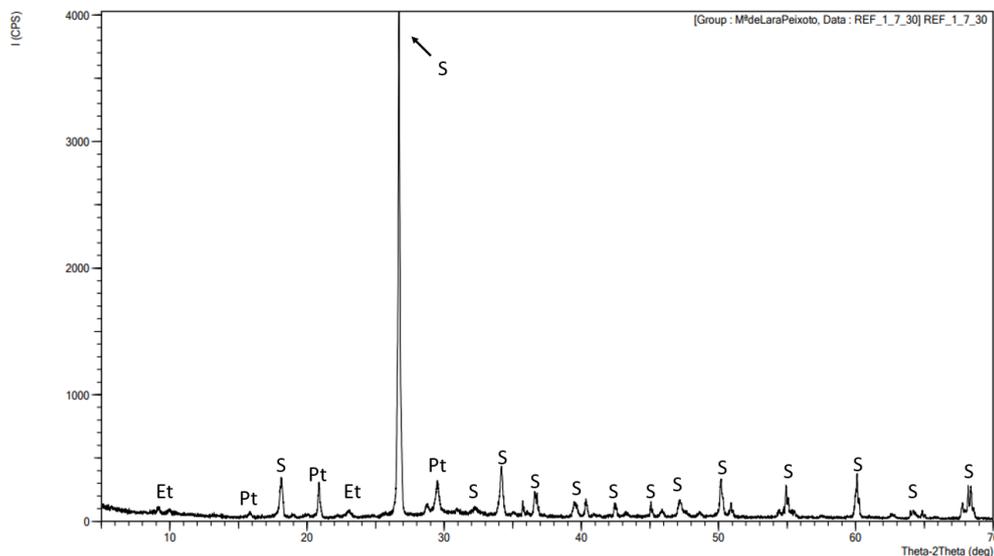


Fonte: Autora.

Os difratogramas da argamassa produzida com a proporção de 1:7 de referência (Figura 45), também possui pico intenso na fase a fase SiO_2 , com 2θ em $26,5^\circ$. A fase a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresenta picos com 2θ equivalentes a 18° , 21° e 29° , sendo equivalente às demais argamassas de referência. A fase $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ possui picos com 2θ correspondente a 10° e 23° .

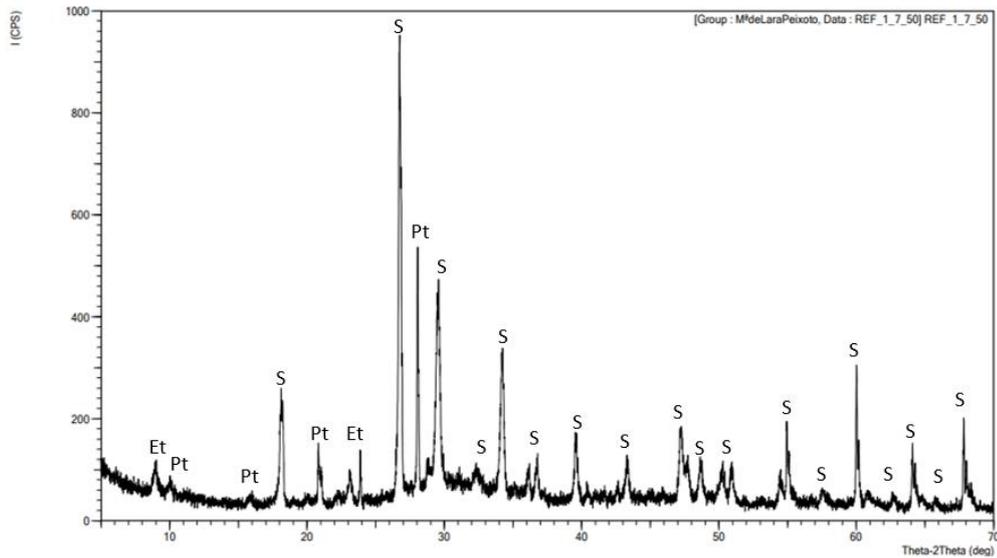
Os padrões de difração DRX das argamassas produzidas com a proporção de 1:7 com taxas de substituições de 30%, 50% e 100% estão apresentados nas Figura 47, 48 e 49.

Figura 47 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:7 com substituição de 30%



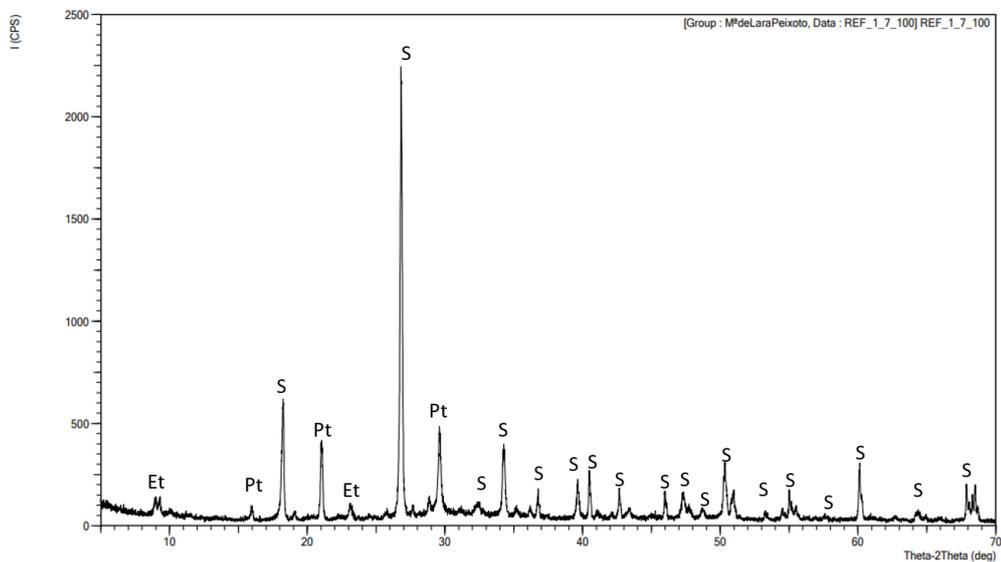
Fonte: Autora.

Figura 48 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:7 com substituição de 50%



Fonte: Autora.

Figura 49 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:7 com substituição de 100%



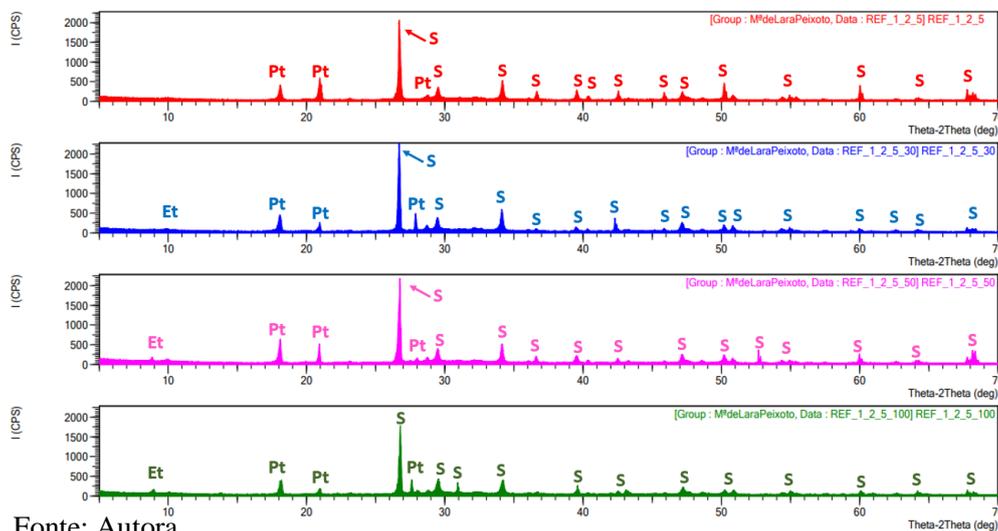
Fonte: Autora.

Todos os padrões de DRX das argamassa produzidas com a proporção de 1:7 com taxas de substituições de 30%, 50% e 100%, indicam um pico intenso com 2θ em $26,5^\circ$. Para a taxa de substituição de 30% o pico de Quartzo está em 2θ igual a 65° . A Portlandita apresenta picos com 2θ equivalentes a $10,5^\circ$, $20,9^\circ$ e $29,5^\circ$ e a Etringita possui picos com 2θ correspondente a 6° e 23° (Figura 47).

Em relação à taxa de substituição de 50%, o pico de SiO_2 está em 2θ igual a 62° . A fase $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresenta picos com 2θ equivalentes a 11° , 21° e $29,5^\circ$. Já a fase $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12,26}\text{H}_2$ possui picos com 2θ correspondente a 8° e 23° (Figura 48).

Para a taxa de substituição de 100%, o menor pico de SiO_2 está em 2θ igual a 58° . A fase $\text{Ca}(\text{OH})_2$ apresenta picos com 2θ equivalentes a 11° , 21° e $29,5^\circ$ sendo correspondente à taxa de substituição de 50%. Por fim, a fase $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12,26}\text{H}_2$ possui picos com 2θ correspondente a 8° e 23° (Figura 49).

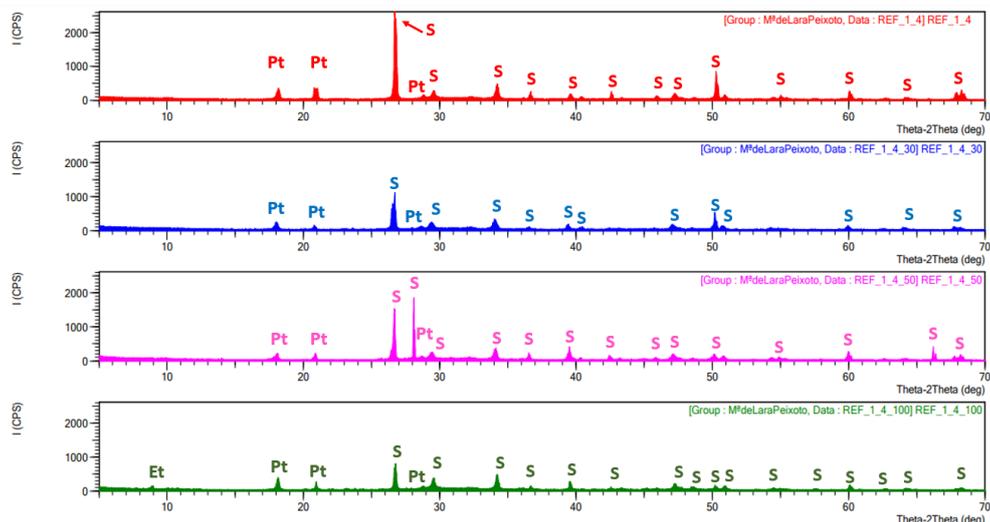
Figura 50 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:2,5 de referência e com substituições



Fonte: Autora.

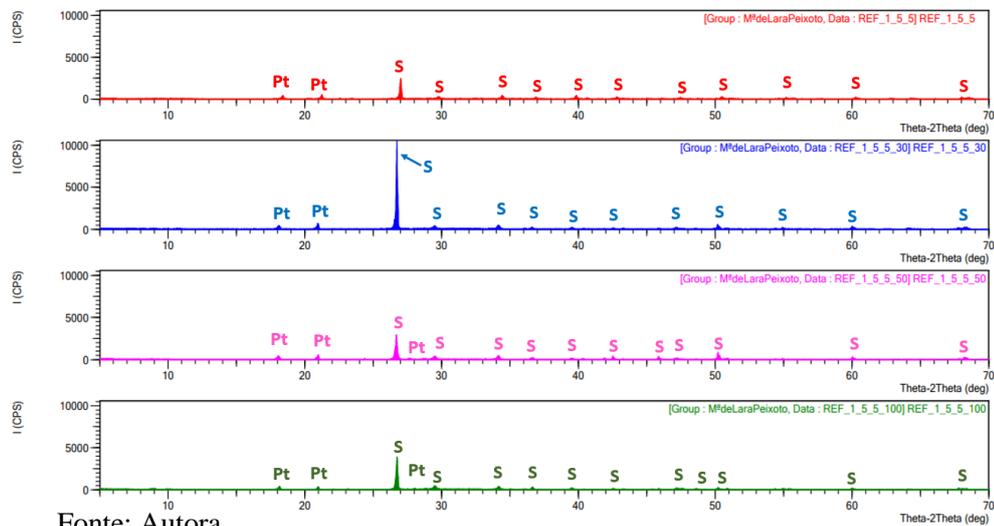
Com base nas Figuras 50, 51, 52 e 53 é possível observar os difratogramas agrupados por proporção e taxa de substituição, com o intuito de facilitar a visualização das fases obtidas.

Figura 51 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:4 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%



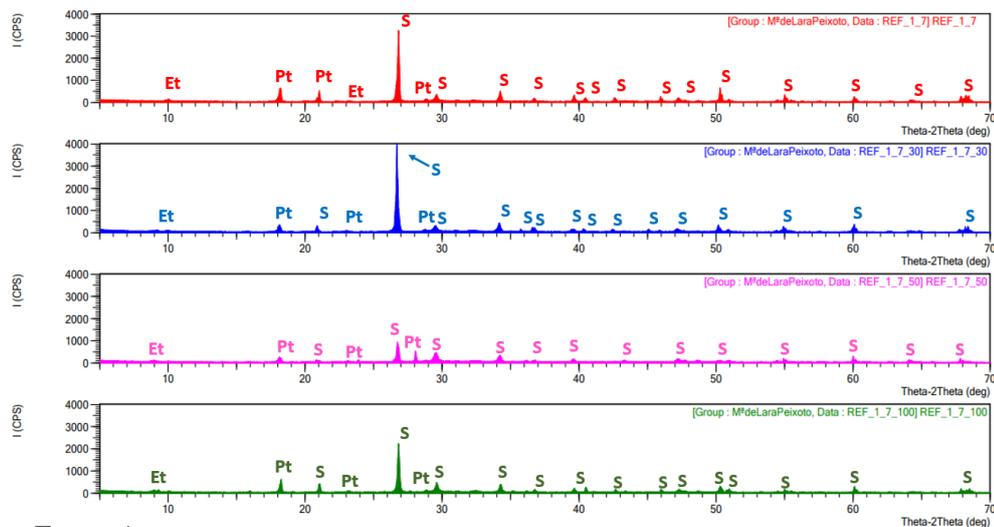
Fonte: Autora.

Figura 52 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:5,5 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%



Fonte: Autora.

Figura 53 - Padrões de difração DRX da argamassa de 1:7 de referência e com substituições de 30%, 50% e 100%



Fonte: Autora

A partir dos resultados obtidos nas Figuras 50, 51, 52 e 53 observa-se a abundância de Quartzo, proveniente de materiais de construção que tem na sua composição a areia, como é o caso dos concretos e das argamassas. Além disso, a Portlandita que é o segundo produto de hidratação mais predominante, corroborando com Ribeiro *et al.* (2021), onde a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ representa entre 20% e 25% do volume de sólidos na argamassa, além disso a presença de etringita ocorre devido a presença de sulfatos de cálcio.

Desta forma, pode-se observar que a presença de Etringita nas proporções de 1:2,5 com taxas 30%, 50% e 100%, assim como na proporção de 1:4 com taxa de 100% e proporção de 1:7 de referência e com taxas de substituição de 30%, 50% e 100%. Sendo assim, a etringita em sua forma amorfa pode causar carbonatação e reação álcali-agregado, o que afeta seu desempenho mecânico e sua durabilidade.

Vale ressaltar que o DRX pode ser utilizado para verificar a ocorrência de reação de carbonatação a partir dos carbonatos de cálcio formados a partir da carbonatação da Portlandita presente nas argamassas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONSIDERAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1 Principais conclusões

Por possuir granulometria equivalente a granulometria do agregado natural, o agregado reciclado pode ser utilizado em substituição do agregado miúdo em argamassas, em função da semelhança entre os módulos de finura. Contudo, a proporção ideal e a taxa de substituição devem estar associadas às propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido.

A textura e forma dos agregados reciclados influenciaram o aumento de 60,8% da absorção de água dos agregados reciclados em relação aos agregados naturais. Ou seja, o agregado natural apresentou uma absorção de água de 12,5% e o agregado reciclado apresentou uma absorção de 20,1%.

O resultado da massa específica dos agregados reciclados foi semelhante ao dos agregados naturais, sendo 1,56g/cm³. Bem como, tanto os agregados naturais quanto os agregados reciclados se enquadraram parcialmente dentro da zona ótima estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Quanto à consistência e a densidade da argamassa, verificou-se que quanto maior é o percentual de substituição, menor é a trabalhabilidade e a densidade da argamassa em função da porosidade, massa específica e absorção de água dos agregados reciclados. Para a taxa de 30% na proporção de 1:4, o índice de consistência resultou em 232mm atendendo ao índice de consistência fixado em 240mm \pm 10mm e a densidade média de 2,08g/cm³ sem relevantes variações.

Com base na resistência à compressão simples, os resultados demonstram que as argamassas preparadas com as proporções de 1:2,5, 1:4 e 1:5,5 podem ser utilizadas para fins estruturais, pois atingiram resistência à compressão mínima de 30MPa. Contudo, a proporção de 1:4 com taxa de substituição de 30% apresentou melhor trabalhabilidade e resistência à compressão de 44,92MPa, sendo a mais indicada.

Todos os difratogramas DRX indicaram picos de difração referentes às fases do Quartzo (SiO₂), bem como Quartzo (SiO₂), bem como Portlandita (Pt, Ca(OH)₂), Etringita (Et,

$\text{Ca}_6 \text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 (\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$). Em todos os difratogramas, o SiO_2 apresentou pico mais intenso com 2θ variando de $26,5^\circ$.

Finalmente, pode-se concluir que a substituição parcial do agregado miúdo natural por agregado reciclado miúdo de concreto apresenta vantagens técnicas e sustentáveis para a proporção de 1:2,5 com taxa de substituição de 30% resultando em 53,21MPa, para a proporção de 1:4 com taxa de substituição de 30% com resultado de 49,92MPa e para a proporção de 1:5,5 com taxa de substituição de 50% que resultou em 51,40MPa.

5.2 Sugestões de futuras pesquisas

Apresenta-se a seguir algumas sugestões para a realização de futuros trabalhos, considerando a pesquisa realizada:

- a) Diminuir a quantidade de cimento utilizado nas formulações de argamassas e estudar sua influência;
- b) Realizar um estudo com mais teores de substituições de agregados naturais pelos agregados reciclados. Uma sugestão é realizar uma pesquisa com os seguintes teores de substituições: 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85% e 95%, dependendo da viabilidade da pesquisa.
- c) Identificar a variação de massa em relação à temperatura, identificando hidratos amorfos como o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) de amostras das argamassas investigadas através da análise termoanalítica;
- d) Identificar e fazer uma análise dos compostos e produtos gerados na argamassa com agregados reciclados através da microscopia eletrônica de varredura;
- e) Fazer a identificação da composição química das argamassas através da determinação quantitativa dos elementos químicos existentes através da análise química por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX);
- f) Realizar uma análise de viabilidade econômica de utilização de RCD em argamassas considerando todas as operações e parâmetros do processo.

REFERÊNCIAS

ANEPAC - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **Indústria Brasileira de Agregados**. Brasília, 2021.

ALMEIDA, M. S. T.; MELO, M. C. de; BOARETO, M. D.; REZENDE, R. M.. Análise da correlação do volume de resíduos sólidos provenientes da construção civil com o produto interno bruto para os municípios no estado de Minas Gerais. **Revista Augustu**. v.24, n. 49, p. 320-331. Rio de Janeiro, 2020.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Versão Corrigida:2019. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9202**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044mm (nº 325) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Versão Corrigida:2009. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Versão Corrigida:2013. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos -Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2004e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1:** Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16137:** Ensaios não destrutivos - Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. **Encontro nacional das usinas de reciclagem de entulho.** São Paulo, 2021. Disponível em < <https://abrecon.org.br/encontro-nacional-das-usinas-de-reciclagem-de-entulho-apresenta-parceria-inedita-e-premia-as-unidades-de-reciclagem-de-rcd/>>. Acesso em: 15 de jun de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. **Encontro nacional das usinas de reciclagem de entulho.** São Paulo, 2021. Disponível em <<https://abrecon.org.br/empresa-do-parana-recebe-certificado-de-melhor-usina-de-reciclagem-de-residuos-da-construcao-civil-do-pais/>>. Acesso em: 15 de jun de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. Programa Setorial 2020: A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. **Epusp.** São Paulo, 104 p. 2022.

AZEVEDO, A. R. G.; CECCHIN, D.; CARMO, D. F.; SILVA, F. C.; CAMPOS, C. M. O.; SHTRUCKA, T. G.; MARVILA, M. T.; MONTEIRO, S. N. Analysis of the compactness and properties of the hardened state of mortars with recycling of construction and demolition waste (CDW). **Journal of Materials Research and Technology.** Rio de Janeiro, v. 9, ed. 3, p. 5942-5952, 2020.

BARROS, H. T. G. **Resíduos de Construção e Demolição: Aspectos e Diretrizes.** 2017. 69f. Monografia (Graduação) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

BEDOYA, M. A.; TOBÓN, J. I. Incidence of recycled aggregates and ternary cements on the compressive strength and durability of ecological mortars. **Case Studies in Construction Materials.** Medellín, v. 17, ed. 01192, 2022.

BERNARDO, K. S. L. **Concreto auto adensável com agregado miúdo reciclado de Concreto**. 2019. 129f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019.

CALDAS, L. R.; CARVALHO, M. T. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação de estratégias para a mitigação dos impactos ambientais de revestimentos argamassados no Brasil. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 343-362, 2020.

CARASEK, H.; GIRARDI, A. C. C.; ARAÚJO, R. C.; ANGELIM, R.; CASCUDO, O. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. **Cerâmica**. São Paulo, v. 64, ed. 370, p. 288-300, 2018.

CAROLINO, A. L. P.; ROSA, J. L.; BORGES, S. P. T.; RIBEIRO, R. B.; SILVA, J. W. J. Utilização de resíduo de construção civil para produção de cobogó de argamassa cimentícia. **Research, Society and Development**. [S.l.], v. 10, n. 7, 2021.

CBIC – Câmara Brasileira da indústria da construção. **Construção Civil: Desempenho e Perspectivas**. Informativo Econômico. Brasília, 2022.

COLANGELO, F.; CIOFFI, R. Mechanical properties and durability of mortar containing fine fraction of demolition wastes produced by selective demolition in South Italy. **Composites Part B: Engineering**. Nápoles, v. 115, p. 43-50, 2017.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 307**, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

CUENCA-MOYANO, G.M.; MARTÍN-MORALES, M.; VALVERDE-PALACIOS, I.; VALVERDE-ESPINOSA, Effects of water to cement ratio, recycled fine aggregate and air entraining/plasticizer admixture on masonry mortar Properties. **Construction and Building Materials**, v. 230, 2020.

DULTRA, E. J. V.; CABALA, G. V.; MOREIRA DE JESUS, L.; SANTOS, L. H. S.; SOARES FILHO, M. N. R.; PEDROZA, A. C. Influência da granulometria e formato de partículas de agregados miúdos originados da britagem de rochas em substituição à areia natural na confecção de matriz cimentícia. **IBRACON**. Bonito, ed. 57, 2015.

FERREIRA¹, R. L. S.; ANJOS, M. A. S.; NÓBREGA, A. K. C.; PEREIRA, J. E. S.; LEDESMA, E. F. The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 601-612, 2019

FERNANDES, Q. G. **Resíduos de construção e demolição: uma abordagem do assunto e a situação do Município de Florianópolis**. 2018. 25f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em MBA em Gestão de Obras e Projetos) – Programa de Especialização em Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

HENRIQUES, R. L. **Utilização da microscopia eletrônica de varredura (mev) para avaliação da ação de cloretos em compósitos de matriz cimentícia**. 2019. 56f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

JESUS, S.; MAIA, C.; FARINHA, C. B.; BRITO, J. de; VEIGA, R. Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste, **Construction and Building Materials**, v. 229, 2019.

JOHN, V. M. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. **IBRACON**. São Paulo, ed. 3, v. 1, cap. 4, 2017.

LIMA, D. A. D. **Obtenção e caracterização de argamassas de revestimento produzidas com resíduos de construção e demolição (RCD) como agregado reciclado**. 2022. 180f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil, Universidade de São Judas, São Paulo, 2022.

LIMA, N. B.; SILVA, D.; VILEMEN, P.; NASCIMENTO, H. C. B.; CRUZ, F.; SANTOS, T. F. A.; OLIVEIRA, R.; PÓVOAS, Y.; PADRON-HERNÁNDEZ, E.; LIMA, N. B. D. A chemical approach to the adhesion ability of cement-based mortars with metakaolin applied to solid substrates. **Journal of Building Engineering**. Recife, v. 65, 2023.

LIMA, V. M. E. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos da indústria de pré-fabricados de concreto**. 2017. 216f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2017.

MACEDO, J. W. N. **Argamassa de revestimento produzida a partir da substituição do agregado natural por resíduo de scheelita e pó de pedra**. 2021. 93f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

MATUELLA, M. F. **Efeitos da composição de resíduos de construção e demolição em seu comportamento mecânico para utilização em pavimentação**. 2017. 172f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

NASCIMENTO-DIAS, B. L.; OLIVEIRA, F. D.; ANJOS, M. J. A utilização e a relevância multidisciplinar da fluorescência de raios X. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. São Paulo, v. 39, n. 4, e 4308, 2017.

NAWAZ, M. A.; QURESHI, L. A.; ALI, B.; RAZA, L. Mechanical, durability and economic performance of concrete incorporating fly ash and recycled aggregates. **SN Applied Sciences**. v. 2, ed 162, 2020.

PEDRO, D.; EVANGELISTA, L., DE BRITO, D. Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. **Construction and Building Materials**. v. 154, 2017.

PIMENTEL, L. L.; PISSOLATO JR., O.; JACINTHO, A. E. P. G. A.; MARTINS, H. L. S. Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil – Avaliação de características físicas e mecânicas. **Revista Matéria**. São Paulo, v. 23, n. 01, 2018.

PILLARD, W.; SEDRAN, T.; ROUGEAU, P. Specifications of concrete with recycled aggregates. **Concrete Recycling Research And Practice**, v. I, p. 269-281, 2020.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. 1. ed. Nova York - EUA: [s.n.].

SOUZA, J. S.; LEITE, M. B. Avaliação da produção e comportamento de argamassas com agregados reciclados de resíduo da construção e demolição. **Brazilian Journal Developmente**. Curitiba, v. 6, n. 10, p.79872-79887, 2020.

RÉMOND, S.; MECHLING, J. M.; TRAUCHESSEC, R.; GARCIA-DIAZ, E.; LAVAUD, R.; CAZACLIU, B. Characterization of recycled concrete aggregates. **Concrete Recycling Research And Prattice**, v. I, p. 33-60, 2020.

RIBEIRO, A. K. S.; MARQUES, S. K. J.; RIBEIRO, I. B. G.; MAIA, S. M. F. Quantificação e classificação dos resíduos procedentes da construção civil no município de Maceió - AL. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**. Florianópolis, v. 10, n. 1, p. 363-384, 2021.

RODRIGUES, B. C. **Blocos de concreto produzidos com agregados reciclados mistos: avaliação das propriedades físicas, mecânicas e térmicas**. 2015. 143f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.

RUIZ, L. A. L.; RAMON, X. R.; DOMINGO, S. G. The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach. **Journal of Cleaner Production**. Barcelona, v. 248, p. 119-238, 2020.

ZEGA, C. J.; SANTOS, G. S. C.; VILLAGRÁN-ZACCARDI, Y. A.; MAIO, A. A. D. Performance of recycled concretes exposed to sulphate soil for 10 years. **Construction and Building Materials**. La Plata, v. 102, part. 1, p. 714-721, 2016.

SANTOS, I. L. **Uso de Finos de Resíduos de Construção e Demolição em concreto autoadensável**. 2018. 120f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

SOKOLOVICZ, B. C. **Avaliação das propriedades mecânicas e microestrutura de concreto de ultra alto desempenho com adições minerais e resíduos industriais**. 2020. 356f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria – Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2020.

SOUZA, J. M.; LUKIANTCHUKI, J. A. Resíduos de construção civil: geração, gestão e uso para fins de pavimentação. **XI Encontro Internacional de Produção Científica**. [S.l], 11^a ed, 2019.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. Concreto autoadensável. 2a ed. São Paulo. **PINI**, 2015.

UGIONI, V. M.; GODINHO, D. S. S. Análise das propriedades mecânicas do concreto produzido com substituições parciais e totais dos agregados graúdos e miúdos por agregados reciclados. **UNESC**, 2017.

UNITED NATIONS ENVIROMENT, KAREN L. SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2018.

WHITTAKER, M. J.; SOUTSOS, K. G. G.; SHA, W.; KLINGE, A.; CASADO, S. P. A.; BRANDER, L.; MOUSAVI, M.; CORREIA, M. S. R.; ZERBI, T.; STAIANO, G.; INGROSSO, I. M. I.; AGNESE, A.; LARGO, A. Novel construction and demolition waste (CDW) treatment and uses to maximize reuse and recycling. **Advances In Building Energy Research**. Itália, v. 15, n. 2, 253–269, 2021.

APÊNDICE A

RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Tabela 15: Resultados de resistência à compressão simples de 192 corpos de prova

Proporção	Percentual de Substituição	Nº CP	Resultado FCK (MPa) - 28 dias	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
1:2,5	0%	1	55,01	51,99	4,803	9,24
		2	53,46			
		3	62,55			
		4	53,8			
		5	51			
		6	57,69			
		7	51,28			
		8	49,07			
		9	49,06			
		10	46,11			
		11	48,11			
		12	46,80			
Proporção	Percentual de Substituição	Nº CP	Resultado FCK (MPa) - 28 dias	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
1:4	0%	1	60,07	62,82	4,707	7,49
		2	63,18			
		3	55,47			
		4	69,14			
		5	60,72			
		6	61,93			
		7	69,06			
		8	70,43			
		9	60,96			
		10	62,59			
		11	63,49			
		12	56,81			
Proporção	Percentual de Substituição	Nº CP	Resultado FCK (MPa) - 28 dias	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
1:5,5	0%	1	49,45	54,09	5,337	9,87
		2	50,53			
		3	48,7			
		4	44,22			
		5	52,62			
		6	56,79			
		7	60,86			
		8	58,74			
		9	54,95			
		10	55,94			
		11	62,55			
		12	53,74			

Proporção	Percentual de Substituição	Nº CP	Resultado FCK (MPa) - 28 dias	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)	
1:7	0%	1	17,61	21,62	2,882	13,33	
		2	20,89				
		3	19,89				
		4	20,87				
		5	19,83				
		6	21,82				
		7	18,54				
		8	20,85				
		9	22,07				
		10	25,95				
		11	23,55				
		12	27,55				
Proporção	Percentual de Substituição	Nº CP	Resultado FCK (MPa) - 28 dias	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)	
1:2,5	30%	1	61,75	53,21	10,274	19,31	
		2	52,03				
		3	60,66				
		4	59,06				
		5	66,01				
		6	70,23				
		7	53,52				
		8	42,29				
		9	41,68				
		10	40,74				
		11	43,00				
		12	47,58				
	50%	50%	1	25,63	39,18	14,419	36,80
			2	24,31			
			3	27,63			
			4	24,74			
			5	25,2			
			6	25,57			
			7	54,3			
			8	55,3			
			9	47,9			
			10	51,3			
			11	55,1			
			12	53,1			
	100%	100%	1	20,25	28,88	13,597	47,08
			2	20,67			
			3	21,4			
			4	21			
			5	20,95			
			6	20,71			
			7	42,45			
			8	42,71			
			9	43,63			
			10	4,65			
			11	45,07			
			12	43,10			

Proporção	Percentual de Substituição	Nº CP	Resultado FCK (MPa) - 28 dias	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
1:4	30%	1	42,71	49,92	7,466	14,96
		2	43,73			
		3	44,44			
		4	52,87			
		5	40,74			
		6	43,65			
		7	55,60			
		8	55,07			
		9	52,87			
		10	45,73			
		11	56,45			
		12	65,18			
	50%	1	42,88	44,43	2,199	4,95
		2	43,16			
		3	43,47			
		4	43,59			
		5	45,03			
		6	48,51			
		7	40,57			
		8	43,06			
		9	47,50			
		10	43,73			
		11	45,70			
		12	45,91			
	100%	1	46,85	46,03	2,374	5,16
		2	44,36			
		3	43			
		4	41,25			
		5	44,34			
		6	48,65			
		7	48,15			
		8	46,50			
		9	46,09			
		10	49,22			
		11	46,93			
		12	47,07			
Proporção	Percentual de Substituição	Nº CP	Resultado FCK (MPa) - 28 dias	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
1:5,5	30%	1	29,39	34,70	4,935	14,22
		2	29,93			
		3	31,96			
		4	30,62			
		5	28,92			
		6	32,67			
		7	38,96			
		8	32,97			
		9	38,61			
		10	43,02			
		11	39,56			
		12	39,80			

	50%	1	40,17	51,40	12,836	24,97
		2	37,82			
		3	38,63			
		4	41,45			
		5	40,23			
		6	37,06			
		7	64,56			
		8	61,83			
		9	60,37			
		10	64,13			
		11	65,79			
		12	64,74			
	100%	1	26,19	42,82	18,236	42,59
		2	23,21			
		3	26,33			
		4	26,76			
		5	22,84			
		6	27,35			
		7	59,00			
		8	60,50			
		9	61,48			
		10	63,10			
		11	58,24			
		12	58,85			
Proporção	Percentual de Substituição	Nº CP	Resultado FCK (MPa) - 28 dias	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
1:7	30%	1	11,59	20,72	9,855	47,56
		2	11,1			
		3	11,71			
		4	12,04			
		5	10,54			
		6	11,11			
		7	30,46			
		8	29,77			
		9	27,69			
		10	29,23			
		11	32,18			
		12	31,25			
	50%	1	13,06	21,42	8,419	39,31
		2	13,26			
		3	13,5			
		4	13,49			
		5	13,51			
		6	13,47			
		7	27,97			
		8	30,00			
		9	29,55			
		10	28,82			
		11	29,79			
		12	30,62			
	100%	1	10,29	16,94	7,103	41,92
		2	9,53			
		3	10,8			
		4	9,92			
		5	10,16			
		6	10,34			
		7	23,30			

	8	22,96		
	9	22,72		
	10	24,58		
	11	24,98		
	12	23,73		

Fonte: Autora