

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

EDUARDA SPECKHAHN

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO
CIVIL UTILIZANDO O MÉTODO DO TRIÂNGULO DE MISTURAS

Joinville

2023

EDUARDA SPECKHAHN

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO
CIVIL UTILIZANDO O MÉTODO DO TRIÂNGULO DE MISTURAS

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Luciano Senff

Coorientador: Eng. Vinícius Ramon Krause

Joinville

2023

EDUARDA SPECKHAHN

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO
CIVIL UTILIZANDO O MÉTODO DO TRIÂNGULO DE MISTURAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 28 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano Senff
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador/Presidente

Eng. Vinícius Ramon Krause
Universidade Federal de Santa Catarina
Coorientador

Eng. Me. João António de Sousa Carvalheiras
Universidade de Aveiro
Membro

Eng. Me. Julia da Rosa Martins
Universidade Federal de Santa Catarina
Membra

Profa. Dra. Marinélia de Neto Capela
Universidade de Aveiro
Membra

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à toda minha família, em especial meus pais Evandro e Juliane, por todos os ensinamentos, apoio, amor e incentivo que sempre me deram.

Ao meu namorado Arthur, por todo o amor, companheirismo e compreensão durante toda a graduação.

Ao meu orientador Dr. Luciano Senff, por todo o auxílio e o tempo dedicado a compartilhar seus conhecimentos comigo, que foram fundamentais durante minha formação acadêmica.

Ao meu coorientador Eng. Vinícius R.K., pelo auxílio nos ensaios laboratoriais e por todo suporte durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao corpo docente da Universidade Federal de Santa Catarina, pelos ensinamentos.

Aos amigos que conheci na UFSC e me auxiliaram durante esse período. Especialmente ao Alex N. M., Bruna S., Larissa X.O., Monique F.O., Vinícius R.K., Victor Hugo D.A., por todos os momentos e experiências compartilhadas, tornando a caminhada mais leve.

À equipe InfraTEC pela oportunidade de aprendizado e contribuição para o crescimento da equipe. Também aos companheiros de equipe pela amizade nessa trajetória.

Agradeço à empresa Perville Engenharia por ceder o laboratório para desenvolvimento desse trabalho. Em especial, ao meu supervisor de estágio, Eng. Marco Antônio K., que sempre incentivou meu crescimento profissional e pessoal.

À Terraplenagem Medeiros por gentilmente fornecer o agregado beneficiado para execução dos traços experimentais.

Aos demais envolvidos, muito obrigada.

RESUMO

Com a alta demanda na construção civil, houve também o aumento de resíduos gerados, tornando necessário uma atenção para a destinação desses resíduos. O presente trabalho visou estudar e desenvolver traços de argamassa a partir de diferentes composições de granulometrias de Resíduos da Construção Civil (RCC). As granulometrias foram divididas em fina (material retido nas peneiras 0,15 mm e 0,30 mm), média (0,60 mm) e grossa (1,18 mm e 2,36 mm). Com esses diferentes traços, pretendeu-se apontar uma forma de melhor aproveitamento desses resíduos, visando reduzir os impactos ambientais na construção civil e entender, a partir de ensaios físicos (densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água) e mecânicos (resistência à tração na flexão e à compressão), qual o traço adequado para o melhor aproveitamento desses resíduos. Para isso, foram preparados sessenta corpos de prova com dez traços diferentes, utilizando o método do planejamento de misturas. Após 7 e 28 dias de cura, realizaram-se os testes físicos e mecânicos para identificar o teor ideal de RCC que deve ser utilizado. Apesar dos diferentes traços terem gerados resultados semelhantes, o traço que apresentou melhor desempenho físico e mecânico foi o que contém 100% de RCC com a granulometria grossa. Os resultados de alguns ensaios não permitiram o ajuste de maneira satisfatória dos modelos matemáticos utilizados (linear, quadrático e cúbico especial). Contudo, para os resultados que permitiram tais ajustes, o modelo cúbico especial foi o que predominou.

Palavras-chave: Argamassa. Resíduos da Construção Civil. Planejamento de misturas. Impactos ambientais.

ABSTRACT

With the high demand in the construction industry, there has also been an increase in generated waste, demanding attention to the disposal of such waste. This present study aims to investigate and develop mortar mixes using different compositions of Construction Waste (CW) granulometries. The granulometries were categorized as fine (material retained on sieves 0.15 mm and 0.30 mm), medium (0.60 mm), and coarse (1.18 mm and 2.36 mm). Through these different mixes, the objective was to identify a more efficient utilization of these waste materials, with the intention of reducing the environmental impacts in the construction sector. Additionally, physical tests (bulk density, open porosity, and water absorption) and mechanical tests (flexural tensile strength and compressive strength) were conducted to determine the optimal mixture for the utilization of these waste materials. To accomplish this, sixty specimens were prepared using ten different mixes, following a mixture design method. Physical and mechanical tests were conducted after 7 and 28 days of curing to identify the ideal content of CW to be used. Despite the similar results obtained from the different mixes, the mix containing 100% coarse CDW exhibited superior physical and mechanical performance. Some test results did not allow for satisfactory adjustment of the mathematical models employed (linear, quadratic, and special cubic). However, for the results that allowed for such adjustments, the special cubic model prevailed.

Keywords: Mortar. Construction Waste. Mixture design. Environmental impacts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de resíduos: (a) Resíduo cinza e (b) Resíduo misto.....	19
Figura 2 - Arranjo <i>Simplex</i> Aumentado	20
Figura 3 – Triângulo de misturas adaptado	23
Figura 4 – Esquema de definição das formulações.....	23
Figura 5 – Plano experimental dos ensaios para caracterização da matéria prima e das amostras.....	24
Figura 6 – Materiais: (a) Cimento, (b) RCC fino, (c) RCC médio e (d) RCC grosso..	25
Figura 7 – Boletim de ensaio do Cimento CP IV-32 RS	26
Figura 8 – Empresa Terraplenagem Medeiros: (a) RCC após beneficiamento e (b) detalhes do RCC utilizado no estudo	27
Figura 9 – Conjunto de peneiras no agitador mecânico para determinação da distribuição granulométrica.....	28
Figura 10 – Determinação da massa específica do material médio: (a) massa do frasco, (b) massa do frasco + agregado e (c) massa do frasco + agregado + água .	31
Figura 11 – Determinação da massa unitária dos materiais: (a) material fino, (b) material médio e (c) material grosso	32
Figura 12 – Argamassadeira utilizada na preparação das misturas.....	34
Figura 13 – Argamassa moldada na mesa de adensamento com contador de golpes	35
Figura 14 – Argamassas após moldagem.....	35
Figura 15 – Corpos de prova desmoldados	36
Figura 16 – Ensaio do índice de consistência: (a) equipamentos utilizados, (b) molde troncônico preenchido com argamassa e (c) medição do espalhamento com auxílio do paquímetro digital.....	37
Figura 17 – Prensa hidráulica utilizada nos ensaios de resistência mecânica	38
Figura 18 – Ensaio de tração na flexão em corpos de prova prismáticos	39
Figura 19 – Ensaio de compressão em corpos de prova prismáticos	40
Figura 20 – Ensaios propriedades físicas: (a) divisão de amostras, (b) corpos de prova imersos em água, (c) obtenção da massa imersa em água e (d) obtenção da massa saturada superfície seca	41

Figura 21 – Média do <i>flow table</i> das misturas variando o teor de RCC.....	47
Figura 22 – Seção transversal dos corpos de prova dos dez traços estudados	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição granulométrica do RCC fino, médio e grosso.....	44
Gráfico 2 – Tendência normal dos dados para o <i>flow table</i>	47
Gráfico 3 – Superfície de resposta para o <i>flow table</i>	48
Gráfico 4 – Distribuição dos resíduos para o <i>flow table</i>	49
Gráfico 5 – Tendência normal dos dados para a absorção de água aos 7 dias.....	49
Gráfico 6 – Superfície de resposta para a absorção de água aos 7 dias de cura	50
Gráfico 7 – Distribuição dos resíduos para a absorção de água aos 7 dias de cura .	51
Gráfico 8 – Absorção de água aos 28 dias de cura.....	52
Gráfico 9 – Densidade aparente aos 7 dias de cura	53
Gráfico 10 – Normalidade para os dados da densidade aparente aos 28 dias de cura	53
Gráfico 11 – Superfície de resposta para a densidade aparente aos 28 dias de cura	54
Gráfico 12 – Distribuição dos resíduos para densidade aparente aos 28 dias de cura	55
Gráfico 13 – Normalidade para os dados da porosidade aberta aos 7 dias de cura .	55
Gráfico 14 – Superfície de resposta para a porosidade aberta aos 7 dias de cura ...	56
Gráfico 15 – Distribuição dos resíduos para a porosidade aberta aos 7 dias de cura	57
Gráfico 16 – Porosidade aberta aos 28 dias de cura de cura	58
Gráfico 17 – Resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias de cura.....	59
Gráfico 18 – Resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Divisão de RCC utilizada	22
Tabela 2 – Proporções de RCC em massa	33
Tabela 3 – Módulo de finura e dimensão máxima característica do RCC	45
Tabela 4 – Massa específica e massa unitária RCC fino, médio e grosso.....	45
Tabela 5 – Análise de variância para o <i>flow table</i>	48
Tabela 6 – Análise de variância para a absorção de água aos 7 dias de cura	50
Tabela 7 – Análise de variância para a absorção de água aos 28 dias de cura	51
Tabela 8 – Análise de variância para a densidade aparente aos 7 dias de cura.....	52
Tabela 9 – Análise de variância para a densidade aparente aos 28 dias de cura.....	54
Tabela 10 – Análise de variância para a porosidade aberta aos 7 dias de cura	56
Tabela 11 – Análise de variância para a porosidade aberta aos 28 dias de cura	57
Tabela 12 – Análise de variância para a resistência à tração na flexão aos 7 dias de cura	59
Tabela 13 – Análise de variância para a resistência à tração na flexão aos 28 dias de cura	59
Tabela 14 – Análise de variância para a resistência à compressão aos 7 dias de cura	60
Tabela 15 – Análise de variância para a resistência à compressão aos 28 dias de cura	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

cm – Centímetros

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP – Cimento Portland

g/cm³ – Gramas por centímetro cúbico

ISO – Organização Internacional para Padronização

mm – Milímetros

MPa – Megapascal

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma MERCOSUL

R² – Coeficiente de Determinação

RCC – Resíduos da Construção Civil

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS	14
1.1.1. Objetivo Geral	14
1.1.2. Objetivos Específicos	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. ARGAMASSAS	16
2.1.1. Propriedades da argamassa no estado fresco	16
2.1.1.1. Trabalhabilidade	16
2.1.2. Propriedades da argamassa no estado endurecido	17
2.1.2.1. Durabilidade	17
2.1.2.2. Resistência Mecânica	17
2.1.2.3. Permeabilidade	18
2.2. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	18
2.3. MÉTODO DO TRIÂNGULO DE MISTURAS	19
3. METODOLOGIA	22
3.1. ASPECTOS ANALISADOS	22
3.2. MATERIAIS	25
3.2.1. Água	26
3.2.2. Cimento	26
3.2.3. Agregado miúdo	26
3.2.3.1. Distribuição granulométrica	27
3.2.3.2. Massa específica	28
3.2.3.3. Massa unitária	31
3.3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	32
3.3.1. Definição das formulações e produção das argamassas	32
3.3.1.1. Mistura dos componentes	33
3.3.1.2. Moldagem e cura dos corpos de prova	34
3.3.2. Ensaio no estado fresco	36
3.3.2.1. Índice de consistência (<i>flow table</i>)	36
3.3.3. Ensaio no estado endurecido	38
3.3.3.1. Resistência mecânica	38

3.3.3.1.1. Resistência à tração na flexão	38
3.3.3.1.2. Resistência à compressão	40
3.3.3.2. Propriedades físicas	41
3.3.3.2.1. Densidade aparente	42
3.3.3.2.2. Absorção de água	42
3.3.3.2.3. Porosidade aberta	42
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	44
4.1. AGREGADO MIÚDO	44
4.1.1. Distribuição granulométrica	44
4.1.2. Massa específica e massa unitária	45
4.2. ARGAMASSAS	45
4.2.1. Ensaios no estado fresco	46
4.2.1.1. Índice de consistência (<i>flow table</i>)	46
4.2.2. Ensaios no estado endurecido	49
4.2.2.1. Absorção de água	49
4.2.2.2. Densidade aparente	52
4.2.2.3. Porosidade aberta	55
4.2.2.4. Resistência à tração na flexão	58
4.2.2.5. Resistência à compressão	60
4.2.3. Análise morfológica	61
5. CONCLUSÃO	63
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

A construção civil demanda uma elevada extração de recursos naturais, por esse motivo, meios que permitam a diminuição do consumo desses recursos e a redução dos impactos ambientais são algumas das principais preocupações do mercado atual. Segundo Lapa (2011), o desenvolvimento de novos materiais e de novas fontes de energia para a Engenharia Civil tem sido fomentado desde a Revolução Industrial, época responsável também pelo surgimento do aço, concreto e ferro nas construções.

Diante do cenário de constante crescimento da construção civil, houve um aumento na geração de Resíduos da Construção Civil (RCC). Tais resíduos são, de acordo com a Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), de 5 de julho de 2002, os resíduos provenientes de demolições, reformas e construções.

Dessa forma, âmbito da sustentabilidade, a construção civil desempenha, como uma de suas principais responsabilidades, um papel crucial ao gerenciar os processos de demolição e garantir a destinação adequada dos resíduos resultantes de sua atividade, destinando esses resíduos para centrais de reciclagem visando beneficiar o material. Uma vez beneficiados, um dos possíveis destinos desse material (RCC) é a reutilização na composição de argamassas.

O uso de RCC na composição das argamassas, de acordo com Jochem (2012), traz como as principais vantagens a redução do custo e a redução dos impactos ambientais (emissão de poluentes, consumo de energia e consumo de matérias primas naturais). Por outro lado, a variação da composição e a possível presença de materiais contaminantes, são as desvantagens desse tipo de resíduo.

Dessa maneira, diante das diferentes características adicionadas pelo RCC, é necessário entender como e quais os efeitos de utilizar o material como substituto da areia na composição da argamassa. Nesse sentido, este estudo é importante para que o índice de reaproveitamento de resíduos aumente sem comprometer a qualidade dos materiais e a segurança das obras.

No presente estudo pretende-se, portanto, conhecer qual a porcentagem e a granulometria ideal de RCC para compor um traço de argamassa com o máximo

desempenho físico e mecânico possível. Nesse sentido, primeiramente é necessário definir quais serão as granulometrias utilizadas, desenvolver os traços que serão testados com o método do triângulo de mistura, preparar os corpos de prova, para então, realizar os ensaios necessários e entender qual o traço com o melhor desempenho dentro dos parâmetros analisados.

Neste trabalho, o RCC beneficiado será dividido em três granulometrias diferentes: fina (material retido nas peneiras de 0,15 mm e 0,30 mm), média (0,60 mm) e grossa (1,18 mm e 2,36 mm). Isso possibilitará a utilização da metodologia do planejamento de misturas. No âmbito desse planejamento, será adotado o arranjo *simplex* aumentado, que permite a utilização de pontos internos no triângulo de misturas. Cada ponto representará uma proporção distinta de material fino, médio e grosso, resultando no total de dez misturas a serem desenvolvidas.

1.1. OBJETIVOS

Para resolver a problemática da alta geração de impactos ambientais na construção civil, propõe-se alguns objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver argamassas com resíduo de construção civil pelo método do triângulo de misturas.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver formulações em argamassas com RCC pelo método do triângulo de misturas;
- Avaliar o comportamento das misturas do estado fresco através do índice de consistência (*flow table*);
- Produzir corpos de prova prismáticos para realização de ensaios físicos (densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta) e mecânicos (resistência à tração na flexão e à compressão) aos 7 e 28 dias de cura;

Determinar, a partir dos resultados obtidos, o teor ideal de cada granulometria pré-definida de RCC necessário para o traço adequado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o objetivo de enfrentar o desafio do aumento na geração de Resíduos da Construção Civil (RCC), é essencial obter um embasamento teórico a respeito dos materiais utilizados no desenvolvimento de argamassas com diferentes granulometrias, por meio do método do triângulo de mistura. Neste contexto, este capítulo aborda as propriedades das argamassas, do material estudado (RCC) e a metodologia adotada.

2.1. ARGAMASSAS

Inicialmente, é importante destacar que a argamassa é a “mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13281, 2005, p. 2). Com base nesta informação, a seguir apresenta-se as propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas de revestimento que servem como camada de regularização de ambientes internos e externos, de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005).

2.1.1. Propriedades da argamassa no estado fresco

2.1.1.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma característica fundamental das argamassas no seu estado fresco e pode variar de acordo com a finalidade para a qual a argamassa será utilizada. Segundo a definição de Carasek (2010), a trabalhabilidade refere-se à facilidade com que é possível misturar, transportar, aplicar, consolidar e finalizar uma argamassa no seu estado fresco.

De acordo com Carasek (2010), a trabalhabilidade da argamassa está relacionada ao comportamento do material, sendo considerada adequada quando

permite ao aplicador executar o trabalho de forma eficiente, ou seja, com rapidez, boa aderência e um acabamento superficial satisfatório. A avaliação da trabalhabilidade da argamassa pode ser feita por meio do ensaio da mesa de consistência (*flow table*), conforme especificado pela NBR 13 (ABNT, 2019) e NBR 13276 (ABNT, 2016), que fornecem os equipamentos e a metodologia necessária para realizar o teste.

Segundo Carasek (2010), o aumento na produtividade da aplicação da argamassa aumenta conforme a argamassa se torna leve e trabalhável. Portanto, a trabalhabilidade é uma das propriedades que possuem importância na definição do traço de argamassa adequado para a finalidade proposta pelo presente trabalho.

2.1.2. Propriedades da argamassa no estado endurecido

2.1.2.1. Durabilidade

A durabilidade de uma argamassa está relacionada à sua capacidade de resistir aos efeitos adversos provenientes de fatores externos. Nesse sentido, a resistência do revestimento contra agentes prejudiciais à sua estrutura é um indicativo de maior durabilidade. Conforme apontado por Baía e Sabbatini (2001), ao projetar um revestimento de argamassa, é essencial considerar aspectos que podem impactar negativamente na durabilidade, como a formação de fissuras, espessura excessiva, qualidade da argamassa e a proliferação de microrganismos. Portanto, é imprescindível prestar atenção a esses fatores para garantir a longevidade e a performance adequada do revestimento de argamassa.

2.1.2.2. Resistência Mecânica

A resistência mecânica é uma das propriedades essenciais para determinar a durabilidade dos revestimentos externos de argamassa. Conforme destacado por Tristão (1995), a correta definição da resistência mecânica é crucial para determinar a elasticidade da argamassa, sendo a elasticidade diretamente relacionada à sua durabilidade.

De acordo com Tristão (1995), as argamassas devem possuir resistência mecânica adequada para suportar com segurança as movimentações do substrato,

que podem ocorrer devido a fatores como recalque, dilatação e umedecimento. No entanto, é importante ressaltar que a adição de água, apesar de melhorar a trabalhabilidade da argamassa, diminui a resistência mecânica da argamassa. Por esse motivo, é importante entender a finalidade da argamassa a ser preparada para entender o quão resistente ela deve ser sem que atrapalhe a trabalhabilidade.

2.1.2.3. Permeabilidade

Para o desenvolvimento da argamassa é característica relevante sua permeabilidade, que, de forma resumida, é a quantidade de água que o revestimento permite passar pelos seus poros. Isso ocorre justamente pela composição porosa da argamassa, que permite a percolação de água tanto no seu estado líquido, quanto no seu estado gasoso (BAÍA; SABBATINI, 2001).

Em geral, um material com alto teor de permeabilidade, pode apresentar uma estrutura interna com maior porosidade aberta, menor densidade aparente e maior absorção de água. Este fato pode estar associado a presença de espaços vazios disponíveis e que estejam interconectados entre si para o fluxo de água através dos poros. Sobre isso, a NBR 9778 (ABNT, 2005) apresenta o procedimento para obtenção dos valores de absorção de água, de porosidade aberta e de densidade aparente em argamassas.

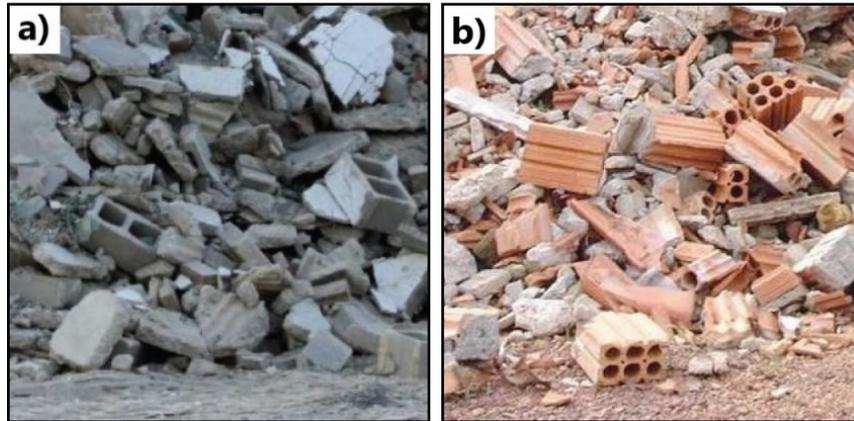
2.2. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A geração de resíduos de construção e demolição é um significativo problema ambiental, visto que o setor da construção civil é o maior consumidor de matérias primas entre os setores industriais (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011). Esse grande impacto ambiental se dá, também, pelo grande volume gerado pelos RCC. De acordo com dados da Pesquisa Setorial (ABRECON, 2022), estima-se que, a cada ano, a construção civil no Brasil gere cerca de 100 milhões de toneladas RCC, que se não destinados corretamente, podem causar impactos negativos ao meio ambiente.

Em face desses dados, é possível perceber a importância da adoção de práticas mais sustentáveis na construção civil, com o objetivo de reduzir o desperdício de materiais, ampliar a reciclagem e reutilização de resíduos. Para isso, a escolha de

materiais mais sustentáveis em conjunto com a adoção de técnicas construtivas mais eficientes e limpas, são alguns dos caminhos para uma construção civil mais amigável com o meio ambiente. A Figura 1 ilustra dois tipos comuns de RCC.

Figura 1 – Tipos de resíduos: (a) Resíduo cinza e (b) Resíduo misto



Fonte: Pesquisa Setorial ABRECON (2022).

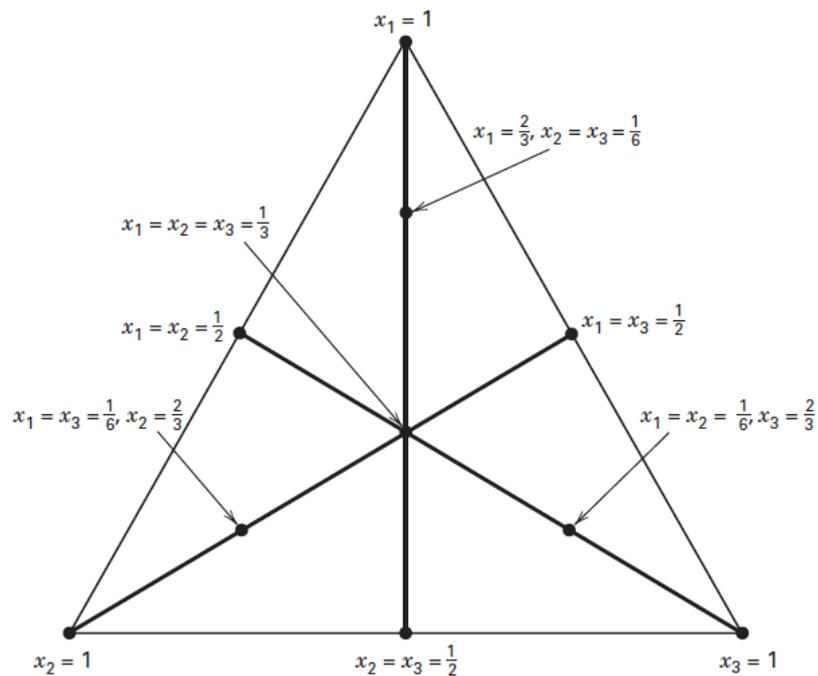
Neste trabalho o tipo de RCC utilizado foi o misto, uma vez que uma das formas de reaproveitamento do RCC é triturá-lo para permitir sua utilização como substituto da areia na produção de uma argamassa. Para isso, é importante observar que, diferentemente da areia convencional oriunda de seixos e areias lavadas de rio, que é pouco porosa, os agregados reciclados são bastante porosos. Por esse motivo, a resistência e durabilidade dessa argamassa são controladas pela porosidade tanto da pasta de cimento quanto do agregado (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011).

2.3. MÉTODO DO TRIÂNGULO DE MISTURAS

Para otimizar a formulação de uma mistura de vários componentes, é possível utilizar a técnica de estatística conhecida como método do planejamento de misturas, também conhecido como método do triângulo de misturas. Esse método, quando utilizado corretamente, permite uma interpretação e análise mais rápida e clara dos resultados obtidos. De acordo com, Barros Neto, Scarminio e Bruns (2001), mais importante que a análise de dados na estatística, é o planejamento dos experimentos para obtenção dos dados.

Nesse sentido, existem duas classes principais de planejamentos de mistura, o *simplex-lattice* e o *simplex-centróide*. No entanto, existe também uma terceira forma conhecida como arranjo *simplex* aumentado, que permite a utilização de pontos internos no triângulo, além do centróide (MONTGOMERY, 2012), para a obtenção de dados que serão utilizados para complementar o estudo com diferentes traços de argamassa. A Figura 2 representa o arranjo *simplex* aumentado.

Figura 2 - Arranjo *Simplex* Aumentado



Fonte: *Design and Analysis of Experiments* (2012).

Segundo Calado e Montgomery (2003), os modelos matemáticos mais utilizados no planejamento de misturas são o linear, o quadrático e o cúbico especial e estão representados nas Equações 1, 2 e 3, respectivamente.

Linear:

$$y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i \quad (1)$$

Quadrático:

$$y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j}^q \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

Cúbico Especial:

$$y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum_{i < j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j < k} \sum_{i < j < k} \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (3)$$

Nesse método, as proporções de cada componente e seus efeitos sobre a propriedade ou qualidade final da mistura são levadas em consideração. Permitindo assim, que seja possível encontrar a combinação ideal de componentes junto com a maximização da eficiência da mistura.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, será apresentada uma descrição clara e organizada dos materiais e métodos utilizados no desenvolvimento de argamassas com resíduos de construção civil. Essa descrição será baseada nos conceitos da metodologia do triângulo de misturas e contará com o auxílio do *Software Statistica*.

3.1. ASPECTOS ANALISADOS

Inicialmente, para a definição das formulações, optou-se por separar o resíduo de construção civil de acordo com sua granulometria, separando-as em: fina (F), média (M) e grossa (G). A granulometria fina (F) consistiu no material retido nas peneiras de tamanho 0,15 mm e 0,30 mm. Já a granulometria média (M), foi composta pelo material retido na peneira de tamanho 0,60 mm. Por fim, a granulometria grossa (G) representou o material retido nas peneiras 1,18 mm e 2,36 mm. A Tabela 1 exemplifica a divisão de materiais utilizada.

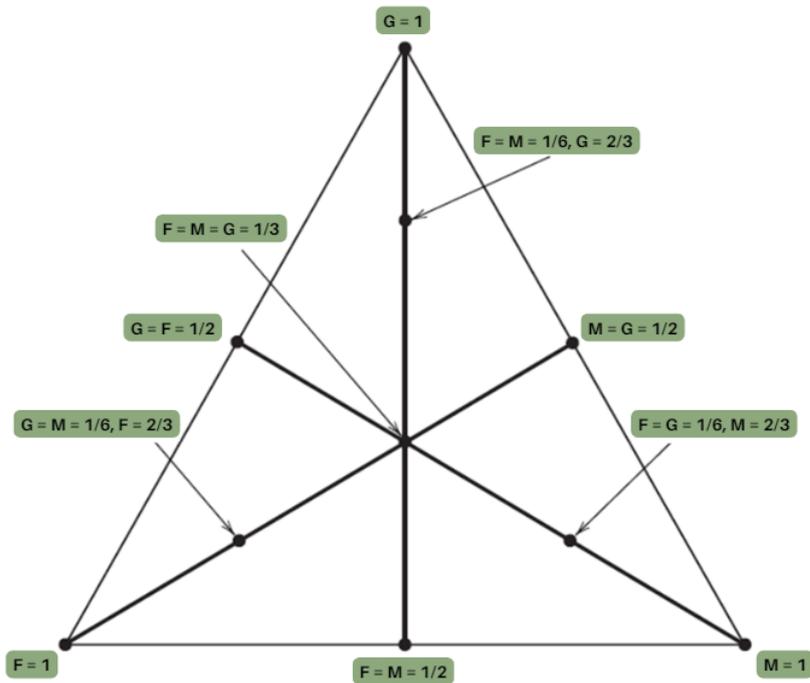
Tabela 1 – Divisão de RCC utilizada

Material	Divisão	Abertura Peneira (mm)
Resíduo de construção civil beneficiado	Fino (F)	0,15 e 0,30
	Médio (M)	0,60
	Grosso (G)	1,18 e 2,36

Fonte: Autora (2023).

A partir disso, para a análise das misturas, no presente trabalho optou-se por utilizar o arranjo *simplex* aumentado, que permite a análise de dez misturas distintas. Essas misturas são compostas, resumidamente, por diferentes proporções dessas três granulometrias pré-definidas de RCC. A Figura 3 representa o triângulo de misturas adaptado com as proporções das três granulometrias utilizadas como parâmetro.

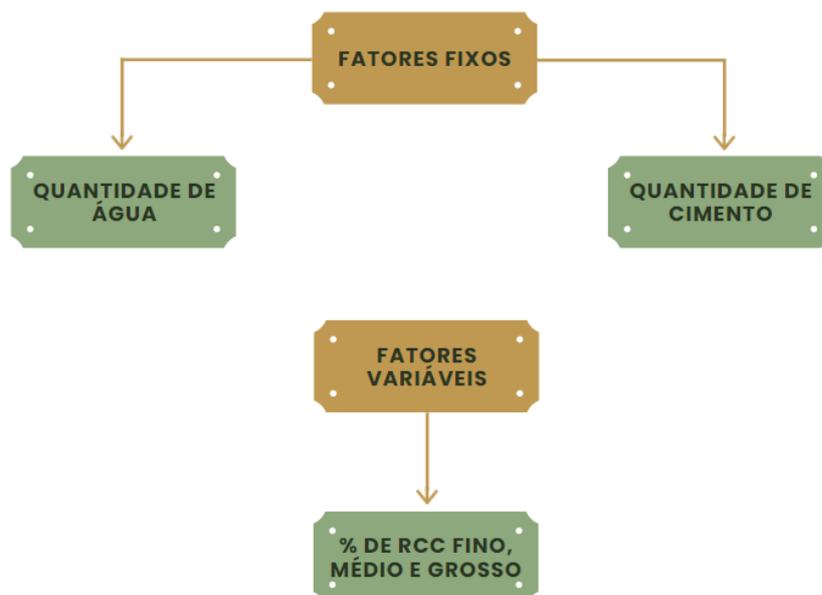
Figura 3 – Triângulo de misturas adaptado



Fonte: Adaptado de Design and Analysis of Experiments (2012).

Para o desenvolvimento dos traços das argamassas, o RCC dividido em materiais pré-definidos foi o único fator variável nas misturas. Nesse sentido, as quantidades de água e de cimento foram as mesmas em todos os traços. A Figura 4 mostra o esquema utilizado para definição das formulações.

Figura 4 – Esquema de definição das formulações



Fonte: Autora (2023).

Para analisar os efeitos da utilização de RCC em cada traço de argamassa, foi elaborado um plano experimental de misturas que consistiu em realizar as caracterizações no estado fresco e endurecido das argamassas, além da caracterização do resíduo em si. A Figura 5 apresenta o plano de experimentos utilizado nos ensaios da argamassa em estudo.

Figura 5 – Plano experimental dos ensaios para caracterização da matéria prima e das amostras



Fonte: Autora (2023).

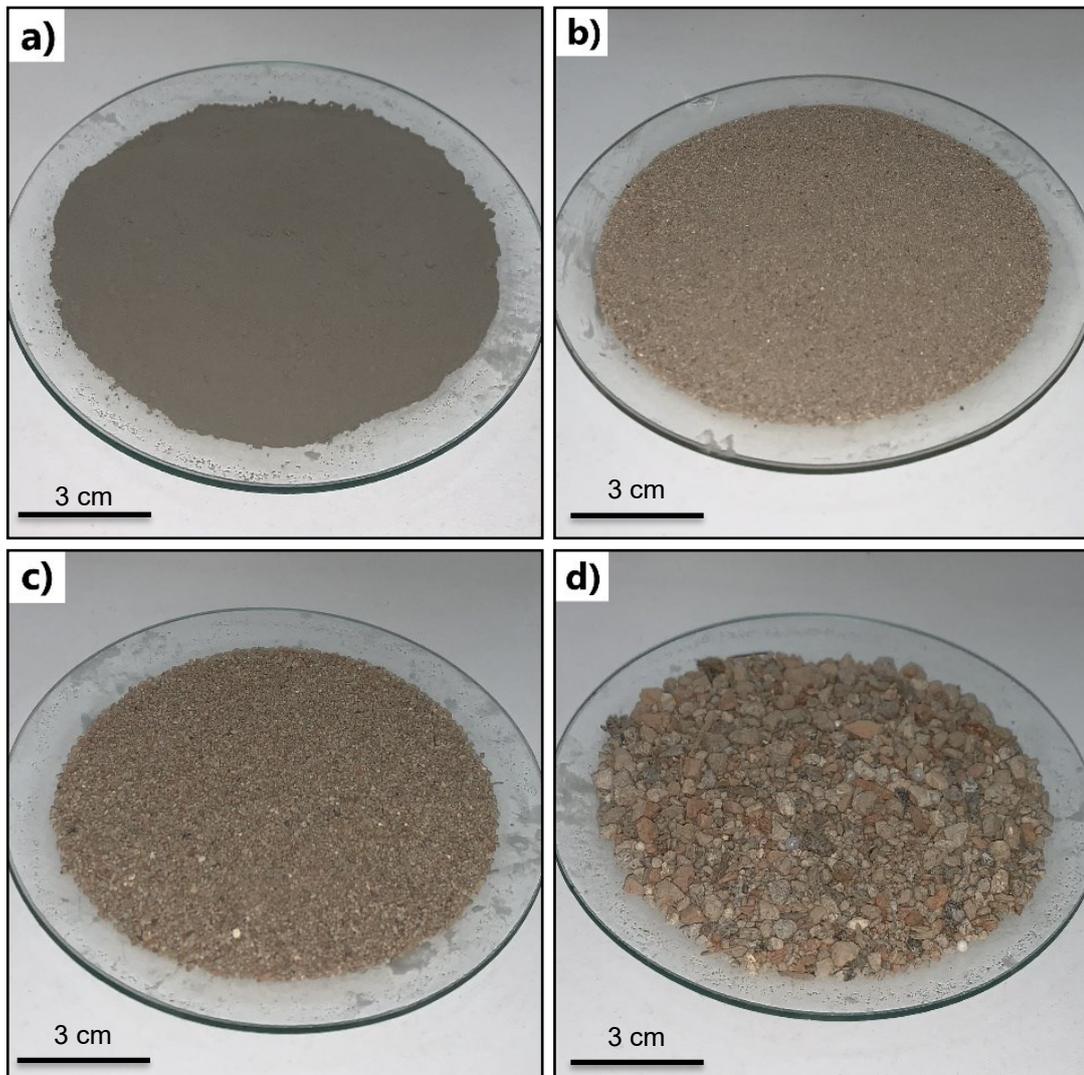
Os ensaios de caracterização do material e a produção de todos os corpos de prova foram realizados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável, localizado no Centro Tecnológico de Joinville. Para os demais ensaios, foi utilizado o laboratório da empresa Perville Engenharia e Empreendimentos.

Para a realização dos testes, foram produzidos 6 corpos de prova prismáticos, a partir de cada uma das misturas, no tamanho padrão 4 cm x 4 cm x 16 cm, totalizando 60 corpos de prova. Os ensaios para obtenção dos resultados analisados no presente trabalho foram realizados quando os corpos de prova completaram 7 e 28 dias de cura.

3.2. MATERIAIS

A argamassa é uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânicos e água, conforme NBR 13529 (ABNT, 2013). No presente trabalho, para o desenvolvimento da argamassa, optou-se pela composição de água, cimento Portland CP IV F-32 e agregado miúdo proveniente de RCC. O traço escolhido para compor a argamassa foi o 1:3 (1 parte de cimento para 3 partes de RCC), por ser normalmente utilizado na construção civil. A Figura 6 apresenta os materiais sólidos utilizados na produção das argamassas.

Figura 6 – Materiais: (a) Cimento, (b) RCC fino, (c) RCC médio e (d) RCC grosso



Fonte: Autora (2023).

3.2.1. Água

A água utilizada para o desenvolvimento dessa argamassa foi obtida da rede de distribuição pública da cidade de Joinville/SC.

3.2.2. Cimento

Neste trabalho, utilizou-se o cimento “CP IV-32 RS todas as obras” da marca Votorantim, que apresenta ampla disponibilidade na região. O boletim de ensaio de cimento com as características químicas, físicas e mecânicas do cimento CP IV-32 RS do mês de setembro de 2020 está apresentado na Figura 7. A massa específica do cimento, de acordo com a empresa produtora é de 2,92 g/cm³.

Figura 7 – Boletim de ensaio do Cimento CP IV-32 RS

Ensaio	Químicos				Físicos e mecânicos										
	Teores (%)				Finura (%)		Blaine	Água de	Tempo Pega		Expansib. a	Resist. à Compressão (MPa)			
	PF	MgO	SO ₃	RI	#200	#325	(cm ² /g)	consist. (%)	Início (min)	Fim (min)	quente (mm)	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias
Limites de Norma	≤ 6,5	N/A	≤ 4,5	N/A	≤ 8,0	N/A	N/A	N/A	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0	N/A	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0 ; ≤ 49,0
Média	4,24	5,13	2,27	22,88	0,41	3,23	4616,67	29,95	261,67	328,33	0,08	14,11	23,84	29,00	43,25
Desvio Padrão	0,58	0,16	0,12	2,81	0,05	0,60	179,61	0,44	18,50	24,34	0,19	1,06	1,34	1,54	0,64
Mínimo	3,03	4,90	2,11	18,72	0,30	2,10	4350,00	29,00	240,00	300,00	0,00	12,50	21,90	27,00	42,80
Máximo	4,83	5,37	2,45	28,07	0,50	4,00	4980,00	30,60	295,00	375,00	0,50	15,90	25,50	31,90	43,70

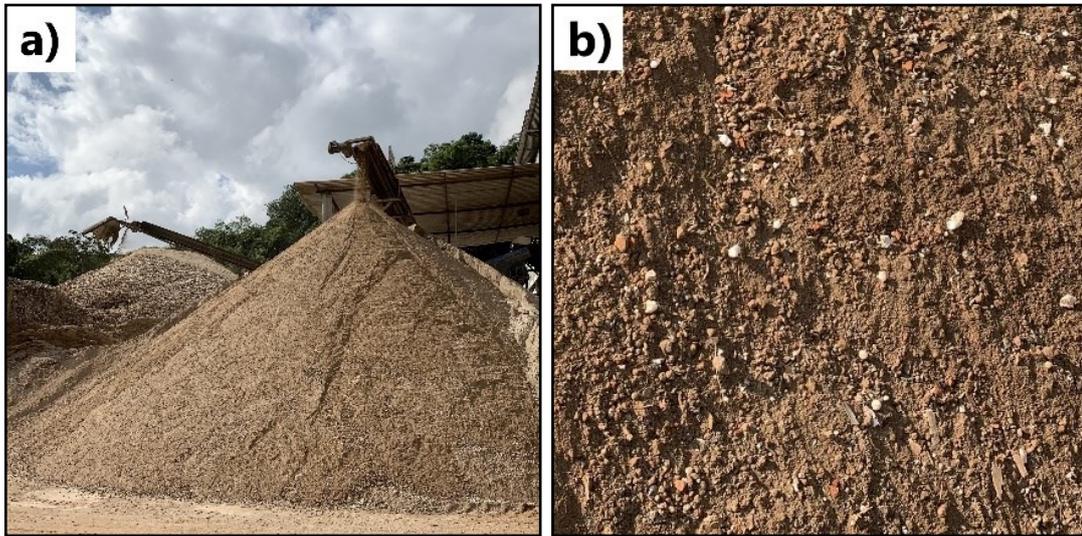
Fonte: Votorantim (2020).

3.2.3. Agregado miúdo

Conforme definido pela norma NBR 7211 (ABNT, 2022), os grãos que atravessam a peneira com abertura de 4,75 mm e são retidos na peneira de 150 µm são classificados como agregado miúdo.

O resíduo de construção civil empregado como agregado miúdo para compor argamassas nesse estudo foi fornecido pela empresa Terraplenagem Medeiros de Joinville/SC. O material beneficiado pela empresa tem como origem os resíduos depositados nas caçambas provenientes de obras de construção e demolição. A Figura 8 ilustra o RCC após o processo de beneficiamento e os detalhes do material utilizado.

Figura 8 – Empresa Terraplenagem Medeiros: (a) RCC após beneficiamento e (b) detalhes do RCC utilizado no estudo



Fonte: Autora (2023).

3.2.3.1. Distribuição granulométrica

Inicialmente, foi definido a porcentagem de material retido nas peneiras de diferentes aberturas denominada distribuição granulométrica. De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022), a distribuição granulométrica dos agregados deve seguir o método de ensaio presente na NBR 17054 (ABNT, 2022), para garantir sua correta aferição.

No início do ensaio, a amostra de RCC foi submetida a uma secagem de 24 horas em estufa a uma temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Em seguida, duas amostras de 500 g cada foram agitadas durante 5 minutos em um agitador mecânico de peneiras. Após agitado, o valor médio aritmético do peso retido em cada peneira, a partir dos dois ensaios, foi utilizado para traçar a curva de distribuição granulométrica.

Nesse sentido, as peneiras utilizadas no ensaio seguiram as séries normal e intermediária, em conformidade com os requisitos da norma NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2010). A configuração das peneiras incluiu aberturas de 6,3 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm e 0,075 mm, além do fundo e da tampa do recipiente. A Figura 9 apresenta o agitador mecânico e o conjunto de peneiras utilizados no ensaio.

Figura 9 – Conjunto de peneiras no agitador mecânico para determinação da distribuição granulométrica



Fonte: Autora (2023).

A determinação da dimensão máxima característica e do módulo de finura pode ser realizada de acordo com a norma NBR 17054 (ABNT, 2022). A dimensão máxima característica é a abertura de peneira correspondente à porcentagem de material retido acumulado igual ou imediatamente inferior a cinco por cento.

Por outro lado, o módulo de finura foi obtido através da soma das porcentagens retidas acumuladas de agregado nas peneiras da série normal, dividida por cem. Esses parâmetros são importantes para caracterizar as propriedades granulométricas do material estudado.

3.2.3.2. Massa específica

Os ensaios para determinação da massa específica seca, da massa específica saturada superfície seca e da massa específica absoluta dos materiais, que

anteriormente foram denominados como fino, médio e grosso provenientes do agregado miúdo em RCC, foram realizados conforme previsto pela NBR NM 52 (ABNT, 2009).

Para a realização dos ensaios, foi preparado um total de 500 g de agregado seco em estufa, por um período de 24 horas, a uma temperatura controlada de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, para cada tamanho de material. Após o processo de secagem, o material foi colocado em um picnômetro e a massa total do conjunto foi medida.

Em seguida, adicionou-se água ao frasco até atingir a marca de 500 ml e o conjunto foi deixado em repouso por uma hora, em um banho de água em temperatura ambiente. Posteriormente o frasco foi preenchido novamente até a marca de 500 ml com água. Dessa forma, a massa do conjunto contendo o agregado e a água foi então determinada.

Por fim, o material foi retirado do frasco e submetido a mais 24 horas de secagem em estufa para determinar sua massa final. Esses procedimentos foram realizados com o objetivo de obter dados sobre a densidade do agregado miúdo estudado.

Para a determinação da massa específica aparente do agregado seco, Equação 4 é utilizada.

$$d_1 = \frac{m}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_a}} \quad (4)$$

Onde,

d_1 = Massa específica aparente do agregado seco (g/cm^3);

m = Massa da amostra seca em estufa (g);

m_1 = Massa do conjunto frasco + agregado (g);

m_2 = Massa total frasco + agregado + água (g);

V = Volume do frasco (cm^3);

ρ_a = Densidade da água (g/cm^3).

É importante salientar que, para a determinação da massa específica do agregado saturado superfície seca, foi utilizado o agregado úmido inicialmente. A

massa específica saturada superfície seca pode ser determinada através da Equação 5.

$$d_2 = \frac{m_s}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_a}} \quad (5)$$

Onde,

d_2 = Massa específica aparente do agregado saturado superfície seca (g/cm³);

m_s = Massa da amostra saturada superfície seca (g);

m_1 = Massa do conjunto frasco + agregado (g);

m_2 = Massa total frasco + agregado + água (g);

V = Volume do frasco (cm³);

ρ_a = Densidade da água (g/cm³).

Já para a determinação da massa específica do material, foi utilizada a Equação 6.

$$d_3 = \frac{m}{\left(V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_a}\right) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (6)$$

Onde,

d_3 = Massa específica do agregado (g/cm³);

m = Massa da amostra seca em estufa (g);

m_1 = Massa do conjunto frasco + agregado (g);

m_2 = Massa total frasco + agregado + água (g);

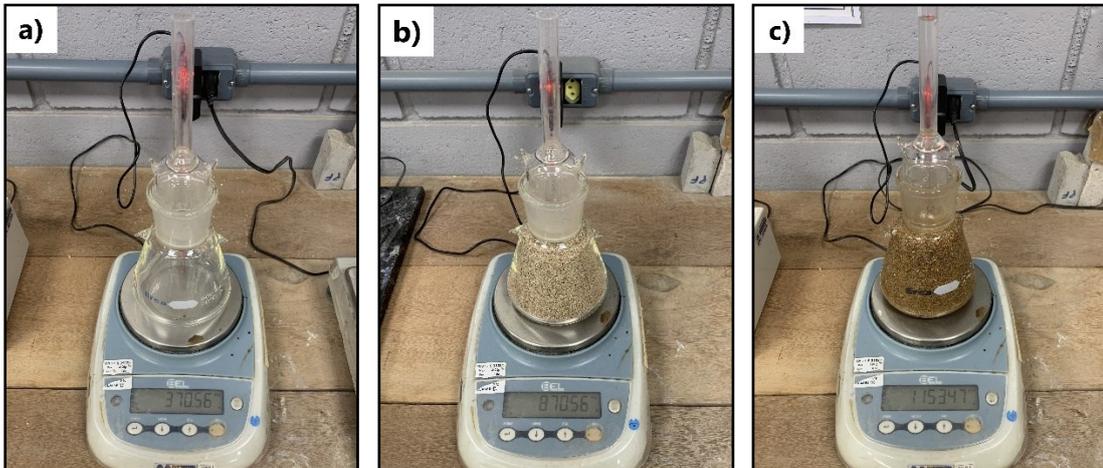
m_s = Massa da amostra saturada superfície seca (g);

V = Volume do frasco (cm³);

ρ_a = Densidade da água (g/cm³).

A realização do ensaio com auxílio do picnômetro para determinação da massa específica do material médio está apresentada na Figura 10. Para os materiais fino e grosso foi utilizado o mesmo método.

Figura 10 – Determinação da massa específica do material médio: (a) massa do frasco, (b) massa do frasco + agregado e (c) massa do frasco + agregado + água



Fonte: Autora (2023).

3.2.3.3. Massa unitária

A relação entre a massa de um agregado e o volume, considerando os vazios entre os grãos, é conhecida como massa unitária. Para a determinação das massas unitárias dos materiais fino, médio e grosso, foram utilizadas as instruções da NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Inicialmente foi determinada a massa de um recipiente de volume conhecido. Em seguida, o recipiente foi preenchido com o material sem ser compactado e a massa do conjunto foi aferida.

A partir desses dados, foi possível determinar a massa unitária de cada material com a Equação 7.

$$\rho_{ap} = \frac{m_1 - m_2}{V} \quad (7)$$

Onde,

ρ_{ap} = Massa unitária (g/cm³);

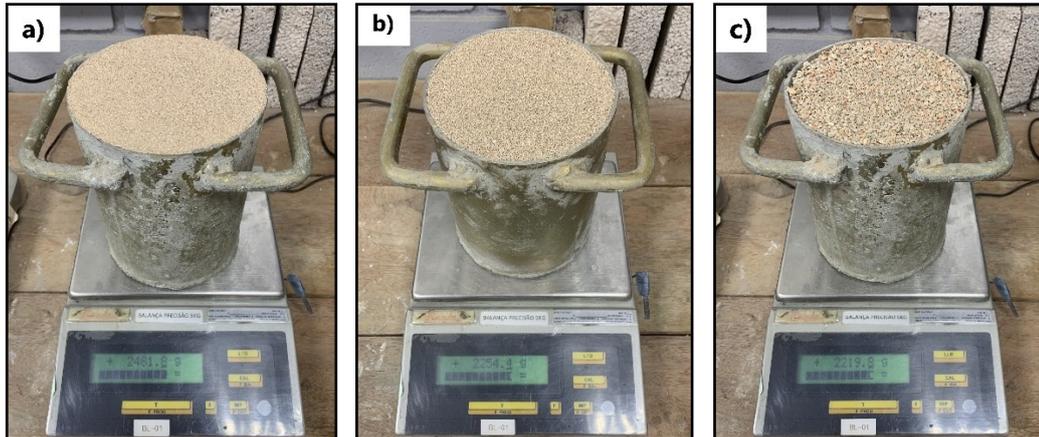
m_1 = Massa do recipiente com material (g);

m_2 = Massa do recipiente (g);

V = Volume do cilindro (cm³).

A realização desse ensaio com os materiais fino, médio e grosso está apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Determinação da massa unitária dos materiais: (a) material fino, (b) material médio e (c) material grosso



Fonte: Autora (2023).

3.3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia experimental usada para o desenvolvimento dos diferentes traços de argamassa utilizados neste estudo consistiu na definição das misturas, na produção das argamassas, na moldagem dos corpos de prova e, por último, nos ensaios de caracterização das amostras. Essa última etapa foi importante para análise e entendimento dos diferentes efeitos gerados na argamassa com a variação da porcentagem de cada material pré-definido (RCC fino, médio e grosso).

3.3.1. Definição das formulações e produção das argamassas

Para definição da quantidade de água utilizada nos traços de argamassa, foi utilizado o ensaio *flow table*, procedimento que será detalhado posteriormente. Para esse ensaio, inicialmente, foi encontrada a quantidade de água para que a argamassa com cem por cento de material fino alcançasse um índice de consistência de 240 ± 10 mm.

Em seguida, essa mesma quantidade de água foi testada com a argamassa cem por cento de material grosso, para verificação da segregação de material. De

toda maneira, como não houve segregação e o objetivo principal é analisar os diferentes aspectos gerados com a variação do teor pré-definido de RCC na argamassa, optou-se por utilizar esse valor fixo de água para todos os traços.

O traço final utilizado em massa neste estudo foi o 1 : 3 : 1,08. Sendo 1 para o cimento, 3 para a quantidade de RCC e 1,08 para a quantidade de água. As dez formulações utilizadas com as proporções de RCC em massa estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Proporções de RCC em massa

Formulação	% RCC	Material Fino (g)	Material Médio (g)	Material Grosso (g)
1	100 F	100	0	0
2	100 M	0	100	0
3	100 G	0	0	100
4	50 F 50 M	50	50	0
5	50 M 50 G	0	50	50
6	50 F 50 G	50	0	50
7	16,67 F 66,67 M 16,67 G	16,67	66,67	16,67
8	16,67 F 16,67 M 66,67 G	16,67	16,67	66,67
9	66,67 F 16,67 M 16,67 G	66,67	16,67	16,67
10	33,33 F 33,33 M 33,33 G	33,33	33,33	33,33

Fonte: Autora (2023).

3.3.1.1. Mistura dos componentes

O procedimento de preparação da argamassa foi realizado de acordo com a NBR 16541 (ABNT, 2016). O procedimento iniciou-se com todo o material seco sendo colocado na cuba de uma argamassadeira. Em seguida, acionou-se o misturador na velocidade baixa e aproximadamente setenta e cinco por cento da quantidade de água foi adicionada à cuba, e misturou-se durante trinta segundos.

Posteriormente, a velocidade alta foi acionada por sessenta segundos e então o misturador foi desligado para que, tanto a pá, quanto a superfície interna da cuba fossem raspadas.

Por último, a argamassadeira foi acionada na velocidade baixa para adição dos últimos vinte e cinco por cento de água e a mistura ocorreu por mais trinta segundos.

Esse procedimento foi realizado para a preparação de todas as dez formulações de argamassa com agregado miúdo reciclado. A Figura 12 mostra a argamassadeira utilizada para a preparação das misturas.

Figura 12 – Argamassadeira utilizada na preparação das misturas



Fonte: Autora (2023).

3.3.1.2. Moldagem e cura dos corpos de prova

A NBR 13279 (ABNT, 2005) apresenta os procedimentos utilizados na moldagem e cura dos corpos de prova. Portanto, para seguir a citada norma no presente trabalho, após o preparo da argamassa, uma porção dessa mistura foi introduzida em cada compartimento do molde prismático de forma uniforme e foi aplicado 30 quedas na mesa de adensamento.

Em seguida, a segunda camada de argamassa foi colocada no molde e mais 30 quedas na mesa de adensamento foram realizadas. Por último, os corpos de prova

foram rasados com o auxílio de uma régua metálica. A Figura 13 apresenta o molde prismático na mesa de adensamento com contador de golpes após o processo de moldagem.

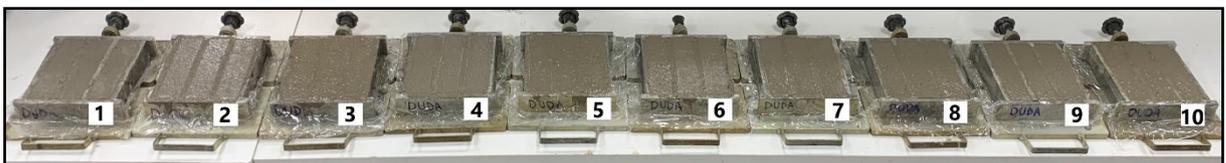
Figura 13 – Argamassa moldada na mesa de adensamento com contador de golpes



Fonte: Autora (2023).

Esse mesmo procedimento foi utilizado na preparação de todas as misturas. A Figura 14 apresenta as dez misturas de argamassas com diferentes teores de RCC logo após moldagem.

Figura 14 – Argamassas após moldagem

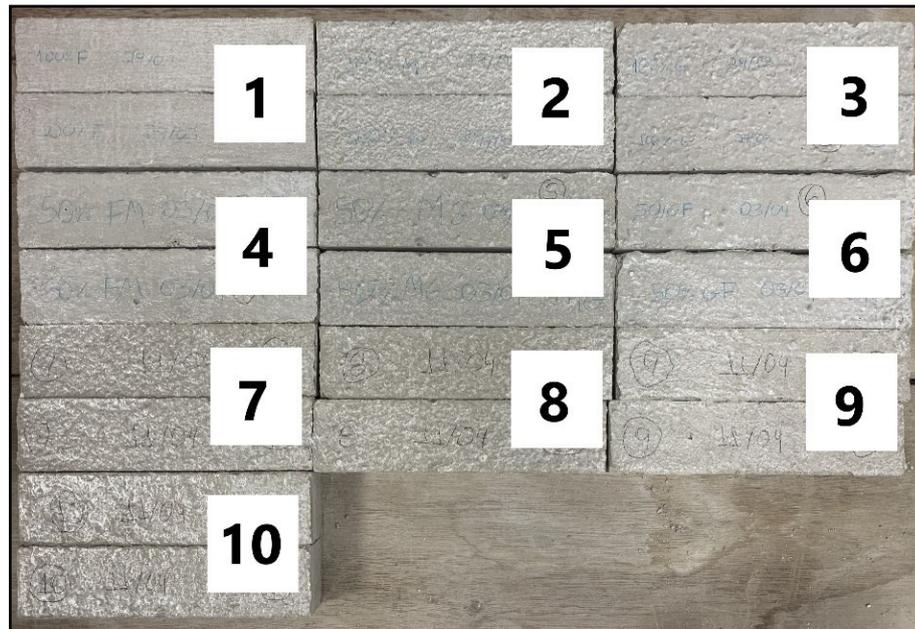


Fonte: Autora (2023).

Tanto o processo de desmoldagem quanto o processo de cura dos corpos de prova ocorreram em ambiente laboratorial, conforme descrito pela NBR 13279 (ABNT, 2005).

A desmoldagem ocorreu em 48 horas. A Figura 15 apresenta dois corpos de prova de um total de três preparados para cada formulação, após o processo de desmoldagem.

Figura 15 – Corpos de prova desmoldados



Fonte: Autora (2023).

3.3.2. Ensaios no estado fresco

3.3.2.1. Índice de consistência (*flow table*)

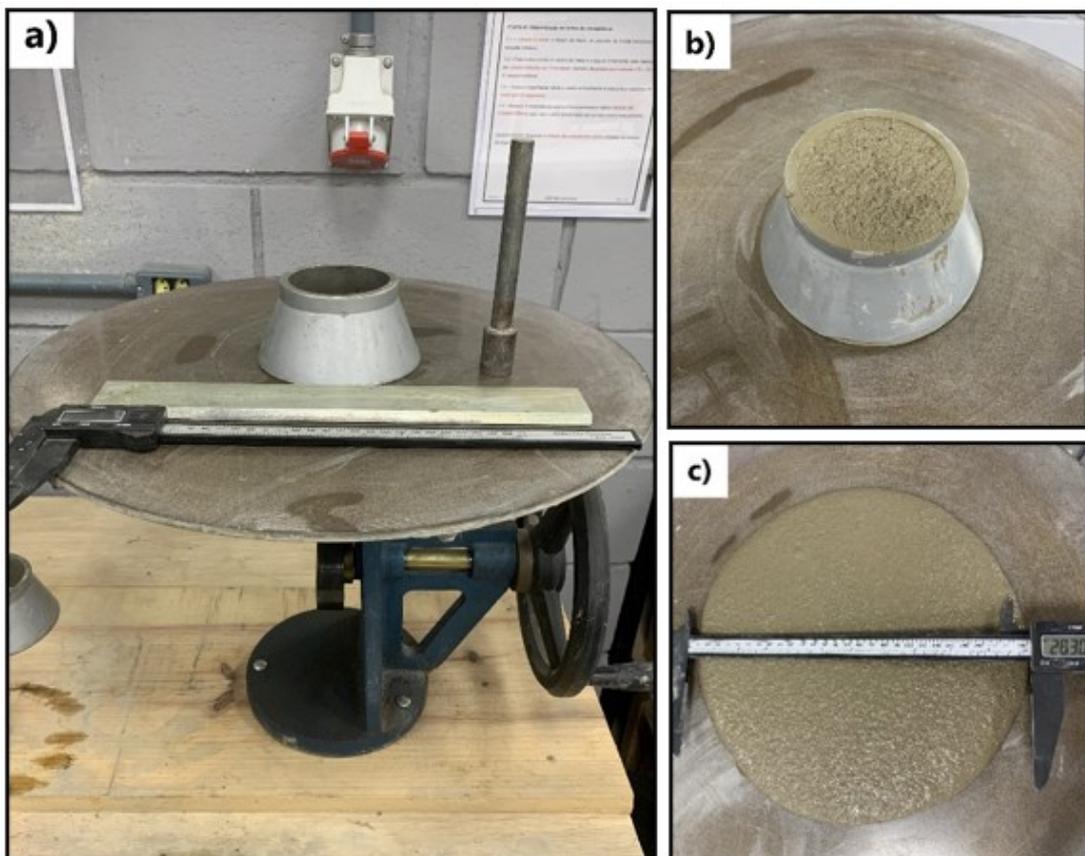
Para avaliar a argamassa em relação a consistência, foram consultadas as normas NBR 13276 (ABNT, 2016) e NBR 7215 (ABNT, 2019), que contêm os equipamentos que devem ser utilizados e o método do ensaio do índice de consistência.

Esse ensaio foi utilizado inicialmente para encontrar a quantidade de água que resultou com os materiais fino, médio e grosso, em uma argamassa sem segregação e sem índice de consistência abaixo de 240 mm. Essa quantidade de água encontrada foi utilizada em todas as misturas. Ainda, através desse mesmo ensaio, foi possível identificar as mudanças na consistência da argamassa nos diferentes traços.

Após a preparação da argamassa, o ensaio foi iniciado com o enchimento do molde troncônico em três camadas de alturas parecidas, com aplicação de quinze, dez e cinco golpes de soquete em cada camada, respectivamente. Na sequência, foi feita a retirada do excesso de argamassa com auxílio da régua metálica, seguido da retirada do molde verticalmente. A manivela da mesa de consistência foi acionada para que a mesa suba e caia 30 vezes, com intervalo de 1 segundo entre cada batida. Por fim, o espalhamento da argamassa foi medido em três pontos diferentes com o paquímetro, sendo o índice de consistência da argamassa a média dos três diâmetros.

A Figura 16 apresenta o equipamento e o procedimento utilizado na determinação do índice de consistência.

Figura 16 – Ensaio do índice de consistência: (a) equipamentos utilizados, (b) molde troncônico preenchido com argamassa e (c) medição do espalhamento com auxílio do paquímetro digital



Fonte: Autora (2023).

3.3.3. Ensaios no estado endurecido

Os ensaios das argamassas no estado endurecido foram realizados com 7 e 28 dias de cura em ambiente laboratorial.

3.3.3.1. Resistência mecânica

A análise da argamassa em relação a resistência mecânica foi realizada através da avaliação das resistências à tração na flexão e à compressão dos corpos de prova em 7 e 28 dias. Para esses rompimentos uma prensa hidráulica calibrada e com capacidade máxima de carga de 100 tf foi utilizada. A prensa está apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Prensa hidráulica utilizada nos ensaios de resistência mecânica



Fonte: Autora (2023).

3.3.3.1.1. *Resistência à tração na flexão*

A norma NBR 13279 (ABNT, 2005) apresenta o método para determinação da resistência à tração na flexão para argamassas. Nesse ensaio foram utilizados os

corpos de prova prismáticos de 160 mm de comprimento, biapoiados em suportes de aço em forma de roletes, com distanciamento entre si de 100 mm.

Após o posicionamento, a carga foi aplicada com um terceiro rolete no centro do corpo de prova até o momento do rompimento. Cada corpo de prova suportou uma carga diferente até o rompimento, e a partir dessa carga, é possível determinar a resistência à tração na flexão de cada um dos traços de argamassa. A Figura 18 mostra a realização do ensaio.

Figura 18 – Ensaio de tração na flexão em corpos de prova prismáticos



Fonte: Autora (2023).

A Equação 8 permite encontrar a resistência à tração na flexão.

$$R_f = \frac{1,5 \times F \times L}{40^3} \quad (8)$$

Onde,

R_f = Resistência à tração na flexão (MPa);

F = Carga aplicada (N);

L = Distância entre os suportes (mm).

3.3.3.1.2. Resistência à compressão

Após o ensaio de flexão em que o corpo de prova prismático foi dividido em duas partes, uma metade do corpo de prova de cada vez foi utilizada para realização do ensaio de compressão. Para determinação da resistência à compressão, o método utilizado foi o definido pela norma NBR 13279 (ABNT, 2005). Foram utilizados dois pratos de aço com dimensões 40 mm x 40 mm x 10 mm alinhados para aplicação da carga. A Figura 19 apresenta a realização do ensaio.

Figura 19 – Ensaio de compressão em corpos de prova prismáticos



Fonte: Autora (2023).

A resistência à compressão é calculada conforme a Equação 9.

$$R_c = \frac{F}{1600} \quad (9)$$

Onde,

R_c = Resistência à compressão (MPa);

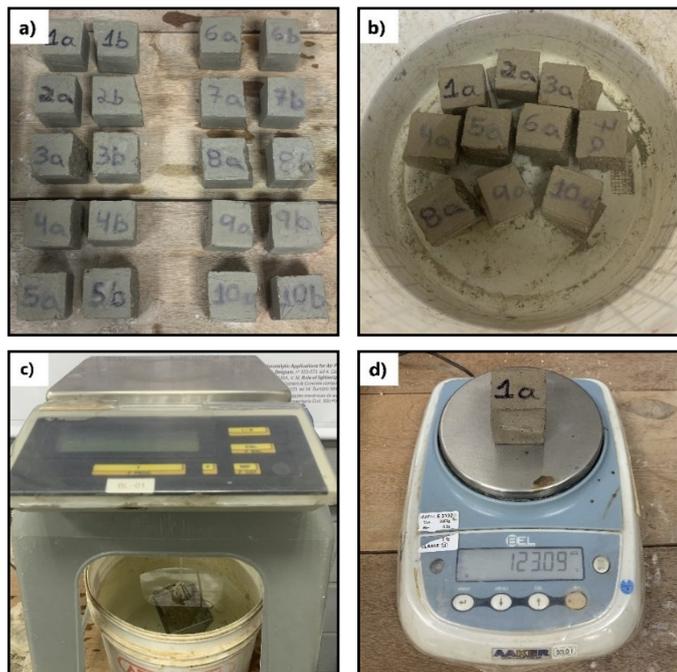
F = Carga aplicada (N);

3.3.3.2. Propriedades físicas

Os ensaios de caracterização física das argamassas no estado endurecido foram realizados de acordo com a ABNT NBR 9778 (ABNT, 2005), com metade de um corpo de prova prismático oriundo do rompimento à tração na flexão. Essa metade foi dividida novamente, formando amostras “a” e “b” para cada formulação. Os ensaios de densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta foram realizados com 7 e 28 dias de cura para efeitos de comparação.

Inicialmente, os corpos de prova foram secos em estufa a uma temperatura de (105 ± 5) °C por 72 horas e o peso de cada amostra foi registrado. Em seguida, as amostras foram imersas em água à temperatura ambiente (entre 20 °C e 25 °C) por 72 horas e, com auxílio de uma balança hidrostática, sua massa imersa em água foi registrada. Por último, todas as amostras foram secas superficialmente e seu peso foi registrado novamente para obtenção da massa saturada superfície seca. A Figura 20 apresenta os ensaios para obtenção das propriedades físicas e a divisão de amostras empregue nos ensaios.

Figura 20 – Ensaio propriedades físicas: (a) divisão de amostras, (b) corpos de prova imersos em água, (c) obtenção da massa imersa em água e (d) obtenção da massa saturada superfície seca



Fonte: Autora (2023).

3.3.3.2.1. Densidade aparente

Para determinação da propriedade física de densidade aparente a Equação 10 foi utilizada.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (10)$$

Onde,

ρ_s = Massa específica da amostra seca (g/cm³);

m_s = Massa seca (g);

m_i = Massa imersa (g);

m_{sat} = Massa saturada superfície seca (g);

3.3.3.2.2. Absorção de água

Já a propriedade física de absorção de água foi obtida a partir da utilização da Equação 11.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (11)$$

Onde,

A = Absorção de água (%);

m_s = Massa seca (g);

m_{sat} = Massa saturada superfície seca (g);

3.3.3.2.3. Porosidade aberta

Para obtenção do índice de vazios da argamassa, foi utilizada a Equação 12.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (12)$$

Onde,

I_v = Índice de vazios (%);

m_s = Massa seca (g);

m_i = Massa imersa (g);

m_{sat} = Massa saturada superfície seca (g);

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados relativos aos ensaios de caracterização do agregado, assim como as propriedades no estado fresco e endurecido da argamassa com RCC em diferentes concentrações.

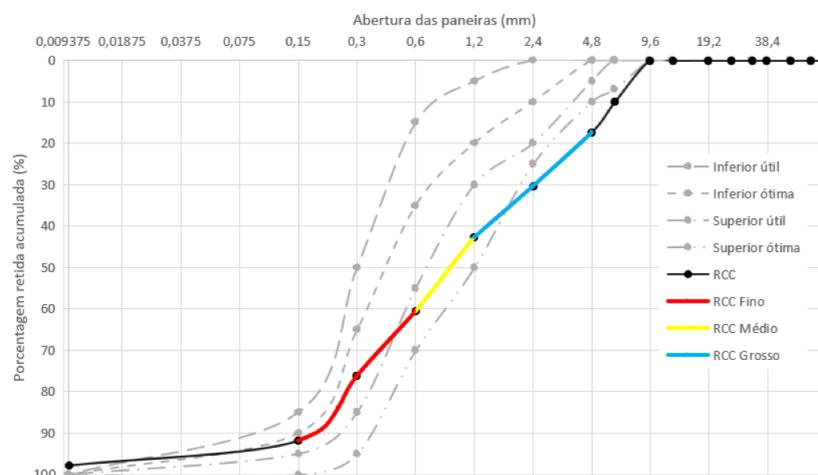
4.1. AGREGADO MIÚDO

Para o RCC beneficiado e dividido em fino, médio e grosso serão apresentadas as propriedades da distribuição granulométrica, massa específica e massa unitária do agregado.

4.1.1. Distribuição granulométrica

A partir dos ensaios de granulometria do RCC foi possível traçar a curva de distribuição granulométrica (Gráfico 1), junto aos limites estabelecidos por norma. Percebe-se que o primeiro trecho, que compreende o material fino e médio, está dentro dos limites, já o trecho final, com uma parte do material grosso, está um pouco fora. Além disso, observa-se que há uma maior concentração de granulometrias do agregado na faixa entre as peneiras de 0,15 mm e de 4,75 mm e que na peneira de abertura 2,36 mm têm-se aproximadamente 70% do material passante.

Gráfico 1 – Distribuição granulométrica do RCC fino, médio e grosso



Fonte: Autora (2023)

Os resultados de módulo de finura e dimensão máxima característica do RCC estão apresentados na Tabela 3. Embora o RCC tenha o diâmetro máximo característico de 9,5 mm, foi utilizado o material retido até a peneira de 2,36 mm, devido ao estudo estar direcionado as argamassas.

Tabela 3 – Módulo de finura e dimensão máxima característica do RCC

Material	Módulo de finura	Dimensão máxima (mm)
RCC	3,19	9,50

Fonte: Autora (2023).

4.1.2. Massa específica e massa unitária

Os resultados de massa específica dos RCC fino, médio e grosso estão apresentados na Tabela 4. Como é possível observar através dos resultados obtidos, os materiais fino, médio e grosso possuem valores de massa específica próximos entre si (entre 2,23 g/cm³ e 2,38 g/cm³). Para efeitos de comparação, têm-se que o material estudado apresenta uma massa específica menor que a areia natural, que é de 2,58 g/cm³, e maior que a argila expandida, de 0,83 g/cm³ (SANTOS et al., 2020).

Tabela 4 – Massa específica e massa unitária RCC fino, médio e grosso

RCC	Peneiras (mm)	Massa específica aparente agregado seco (g/cm ³)	Massa específica aparente agregado saturado superfície seca (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)
F	0,15 e 0,30	2,24	2,26	2,29	1,24
M	0,6	2,30	2,33	2,38	1,13
G	1,18 e 2,36	2,17	2,20	2,23	1,11

Fonte: Autora (2023).

4.2. ARGAMASSAS

Para as argamassas, serão apresentados os resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido, além da análise morfológica dos corpos de prova após o rompimento.

4.2.1. Ensaio no estado fresco

4.2.1.1. Índice de consistência (*flow table*)

A Figura 21 apresenta a média dos resultados para o índice de consistência das misturas com diferentes teores de RCC em sua composição. Esses resultados se referem à média dos diâmetros de espalhamento que foram realizados para cada uma das misturas.

Sobre isso, é importante destacar que os resultados obtidos nas misturas puras (contendo apenas uma granulometria de RCC), misturas binárias (com duas granulometrias) e misturas terciárias (que possuem as três granulometrias), foram comparados entre si.

Ao analisar os resultados das misturas puras, percebe-se que a mistura com o material 100F, obteve um índice de consistência menor do que as misturas com RCC 100M e 100G. Isso se explica pelo fato de que quanto menor é o tamanho do grão, maior a sua área superficial, o que implica em um maior consumo de água livre no sistema, reduzindo o espalhamento.

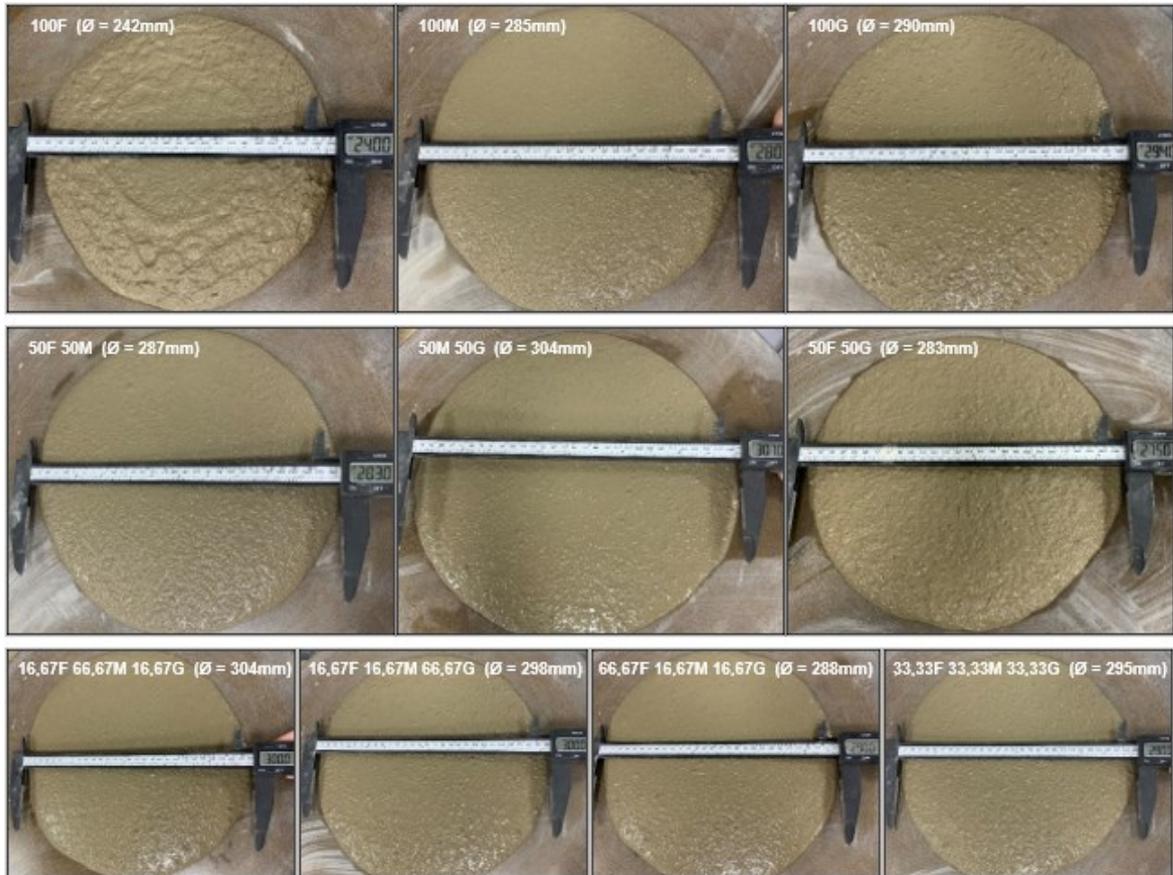
Além disso, é possível perceber que as misturas binárias com ausência de RCC fino apresentam um espalhamento maior, quando comparadas às suas respectivas com material fino.

O mesmo ocorre nas misturas terciárias, as duas argamassas com maior porcentagem de material fino em sua composição, foram as misturas com menor espalhamento.

De toda maneira, apesar desse comportamento se repetir nas misturas puras, binárias e terciárias, as diferenças de espalhamento foram muito mais visíveis nas misturas puras. Nesse sentido, pode-se notar que os efeitos característicos de cada granulometria são mais evidentes quando se tem os grãos utilizados de maneira individualizada.

Por esse motivo, é possível identificar uma menor diferença entre resultados de espalhamento nas combinações binárias e terciárias, uma vez que conforme os materiais fino, médio e grosso são misturados, os resultados do *flow table*, tendem a se aproximar.

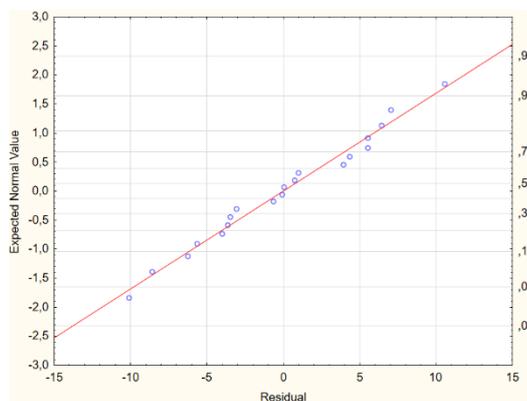
Figura 21 – Média do *flow table* das misturas variando o teor de RCC



Fonte: Autora (2023).

Após análise dos resultados do *flow table* pelo *Software Statistica* observou-se que os dados seguem uma normalidade, conforme apresentado no Gráfico 2. A tendência dos resultados seguirem uma normalidade é um pré-requisito necessário para o emprego da análise de variância (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012).

Gráfico 2 – Tendência normal dos dados para o *flow table*



Fonte: Autora (2023).

A Tabela 5 apresenta a análise de variância, onde é possível observar que dentre os modelos testados, o modelo cúbico especial foi aquele que não apresentou a falta de ajuste (*lack of fit*) significativa.

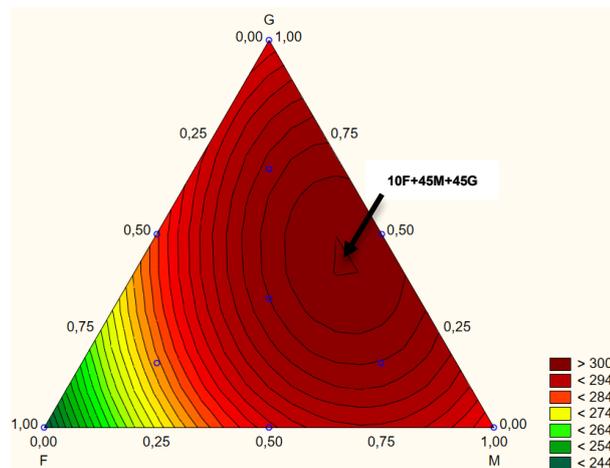
Tabela 5 – Análise de variância para o *flow table*

Source	SS	df	MS	F	p
Model	5398,059	6	899,6765	19,58633	0,000008
Total Error	597,141	13	45,9339		
Lack of Fit	241,141	3	80,3802	2,25787	0,144151
Pure Error	356,000	10	35,6000		
Total Adjusted	5995,200	19	315,5368		

Fonte: Autora (2023).

Quanto a superfície de resposta apresentada no Gráfico 3, os resultados revelaram que a variação dos diâmetros de RCC resultaram em linhas de contorno curvilíneas, indicando a existência de interação entre os fatores estudados. O menor valor de espalhamento está situado no ponto 100F (~244mm), enquanto o maior é para a mistura 10F + 45M + 45G (~300mm).

Gráfico 3 – Superfície de resposta para o *flow table*



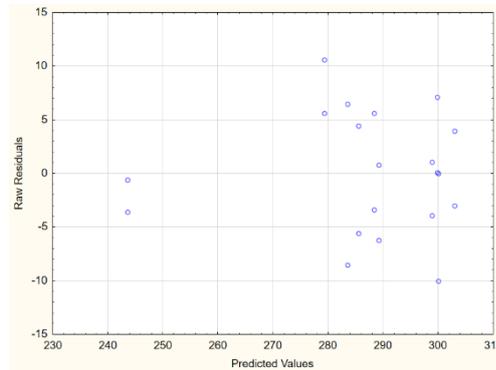
Fonte: Autora (2023).

A Equação 13 representa a superfície de resposta e o valor do coeficiente de determinação (R^2) encontrado para o modelo cúbico especial. Os valores dos parâmetros do modelo (coeficientes) mostram que os grãos M e G são mais importantes, visto que a magnitude desses coeficientes é maior que o F. O modelo cúbico especial apresentou um valor de R^2 superior ao encontrado para o modelo linear, de 0,565378, e para o modelo quadrático de 0,899756.

$$\hat{y} = 243,62F + 285,62M + 288,44G + 98,50FM + 70,13FG + 64,13MG + 44,47FMG \quad (R^2 = 0,900397) \quad (13)$$

O Gráfico 4 representa a distribuição dos resíduos em função dos valores previstos pelo modelo cúbico adotado. Em geral, o referido gráfico mostra que há uma distribuição aleatória dos resultados na parte superior e inferior ao eixo zero do gráfico, exceto quando observado para o valor de ~243 mm.

Gráfico 4 – Distribuição dos resíduos para o *flow table*



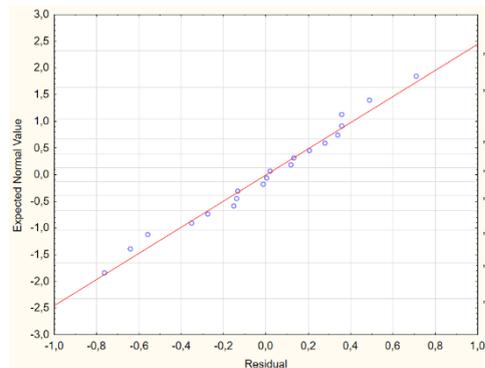
Fonte: Autora (2023).

4.2.2. Ensaios no estado endurecido

4.2.2.1. Absorção de água

O Gráfico 5 apresenta os resultados da absorção de água para 7 dias de cura. Em geral, os dados mostram que seguem uma normalidade.

Gráfico 5 – Tendência normal dos dados para a absorção de água aos 7 dias



Fonte: Autora (2023).

Com base no comportamento dos dados acima, a análise de variância foi testada (Tabela 6). Nos três modelos avaliados, percebeu-se que para o modelo cúbico especial, a falta de ajuste não foi significativa.

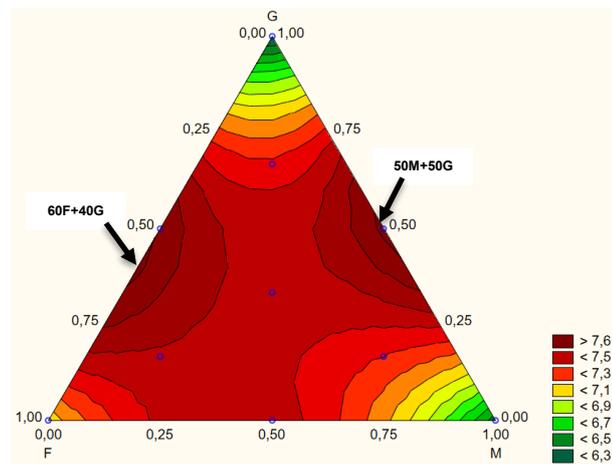
Tabela 6 – Análise de variância para a absorção de água aos 7 dias de cura

Source	SS	df	MS	F	p
Model	4,368728	6	0,728121	3,345050	0,032211
Total Error	2,829727	13	0,217671		
Lack of Fit	1,094977	3	0,364992	2,104005	0,163341
Pure Error	1,734750	10	0,173475		
Total Adjusted	7,198455	19	0,378866		

Fonte: Autora (2023).

A superfície de resposta da absorção de água para 7 dias de cura está representada no Gráfico 6. Os resultados revelaram que a mistura pura dos materiais médio e grosso apresentam os menores valores para absorção de água. Esse fato pode estar atribuído a menor área superficial dos grãos médios e grossos que apresentam menor consumo de água livre no sistema. Já as maiores porcentagens de absorção de água referem-se aos pontos 60F + 40G e 50M + 50G (~7,6%).

Gráfico 6 – Superfície de resposta para a absorção de água aos 7 dias de cura



Fonte: Autora (2023).

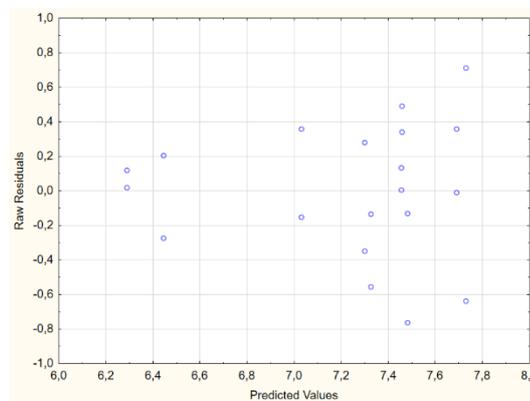
A absorção de água apresenta uma superfície de resposta e um R^2 para o modelo cúbico especial representada na Equação 14. Os valores de R^2 para o modelo linear e quadrático foram, respectivamente, 0,055637 e 0,555345. Como esses valores se apresentaram inferiores ao R^2 do modelo cúbico especial, o modelo mais adequado para representação desses resultados foi o cúbico.

$$\hat{y} = 7,03F + 6,44M + 6,29G + 2,87FM + 4,12FG + 5,45MG - 13,82FMG \quad (14)$$

$$(R^2 = 0,606804)$$

A distribuição dos resíduos para o modelo adotado está representada no Gráfico 7. É possível perceber que o gráfico é descrito melhor para os menores valores para a absorção de água, visto que para valores mais altos de absorção, a dispersão dos erros fica maior. Entretanto, é possível afirmar que em geral, a maioria dos pontos mostram há equilíbrio na distribuição dos resultados.

Gráfico 7 – Distribuição dos resíduos para a absorção de água aos 7 dias de cura



Fonte: Autora (2023).

A análise de variância da absorção de água para os resultados aos 28 dias (Tabela 7), mostrou que houve falta de ajuste significativa para todos os modelos testados: linear, quadrático e cúbico especial.

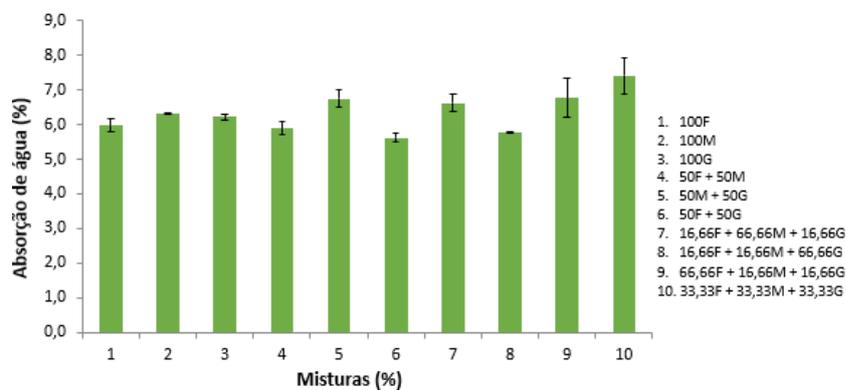
Tabela 7 – Análise de variância para a absorção de água aos 28 dias de cura

Source	SS	df	MS	F	p
Model	0,507172	2	0,253586	0,741849	0,491033
Total Error	5,811108	17	0,341830		
Lack of Fit	5,014608	7	0,716373	8,994005	0,001258
Pure Error	0,796500	10	0,079650		
Total Adjusted	6,318280	19	0,332541		
Source	SS	df	MS	F	p
Model	1,739794	5	0,347959	1,06398	0,420651
Total Error	4,578486	14	0,327035		
Lack of Fit	3,781986	4	0,945496	11,87064	0,000817
Pure Error	0,796500	10	0,079650		
Total Adjusted	6,318280	19	0,332541		
Source	SS	df	MS	F	p
Model	3,545596	6	0,590933	2,770646	0,058303
Total Error	2,772684	13	0,213283		
Lack of Fit	1,976184	3	0,658728	8,270281	0,004617
Pure Error	0,796500	10	0,079650		
Total Adjusted	6,318280	19	0,332541		

Fonte: Autora (2023).

Por conta disso, não foi aplicada a análise de variância para estimação dos efeitos. Em geral a média dos resultados da absorção de água (Gráfico 8) variaram em 10% (entre 5,8% e 6,5%). Isso permite concluir que tais resultados estão muito próximos entre si, quando levado em consideração o desvio padrão. É possível perceber também que de 7 para 28 dias os resultados apresentaram uma redução nos seus valores, esse fato pode ser atribuído a hidratação do cimento, o que torna o material mais denso.

Gráfico 8 – Absorção de água aos 28 dias de cura



Fonte: Autora (2023).

4.2.2.2. Densidade aparente

A análise de variância para densidade aparente aos 7 dias de cura é apresentada na Tabela 8. A falta de ajuste se mostrou significativa para todos os modelos testados.

Tabela 8 – Análise de variância para a densidade aparente aos 7 dias de cura

Source	SS	df	MS	F	p
Model	0,011317	2	0,005658	30,21729	0,000003
Total Error	0,003183	17	0,000187		
Lack of Fit	0,002483	7	0,000355	5,06803	0,010938
Pure Error	0,000700	10	0,000070		
Total Adjusted	0,014500	19	0,000763		

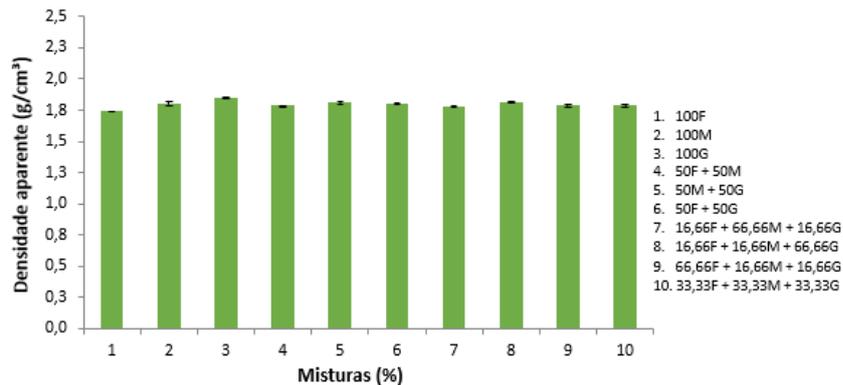
Source	SS	df	MS	F	p
Model	0,012437	5	0,002487	16,87562	0,000017
Total Error	0,002063	14	0,000147		
Lack of Fit	0,001363	4	0,000341	4,86952	0,019336
Pure Error	0,000700	10	0,000070		
Total Adjusted	0,014500	19	0,000763		

Source	SS	df	MS	F	p
Model	0,012960	6	0,002160	18,22882	0,000012
Total Error	0,001540	13	0,000118		
Lack of Fit	0,000840	3	0,000280	4,00178	0,041301
Pure Error	0,000700	10	0,000070		
Total Adjusted	0,014500	19	0,000763		

Fonte: Autora (2023).

Por conta dessa falta de ajuste, para apresentação dos resultados de densidade aparente em 7 dias, foi necessário apresentar o Gráfico 9 no formato de barras. Ao analisar os resultados percebe-se que as densidades aparentes são muito próximas entre si (entre $1,70 \text{ g/cm}^3$ e $1,85 \text{ g/cm}^3$). Esse fato pode estar atribuído aos valores próximos das densidades do RCC fino, médio e grosso.

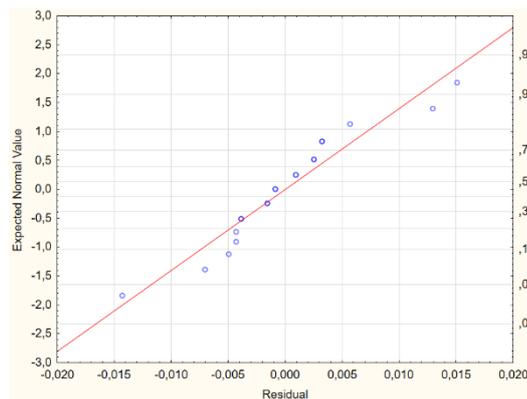
Gráfico 9 – Densidade aparente aos 7 dias de cura



Fonte: Autora (2023).

Para os resultados da densidade aparente aos 28 dias de cura (Gráfico 10), percebe-se que os dados também seguem uma normalidade.

Gráfico 10 – Normalidade para os dados da densidade aparente aos 28 dias de cura



Fonte: Autora (2023).

A Tabela 9 apresenta a análise de variância para a densidade aparente em 28 dias. Foi possível perceber que o modelo cúbico especial foi novamente aquele que melhor se adequou.

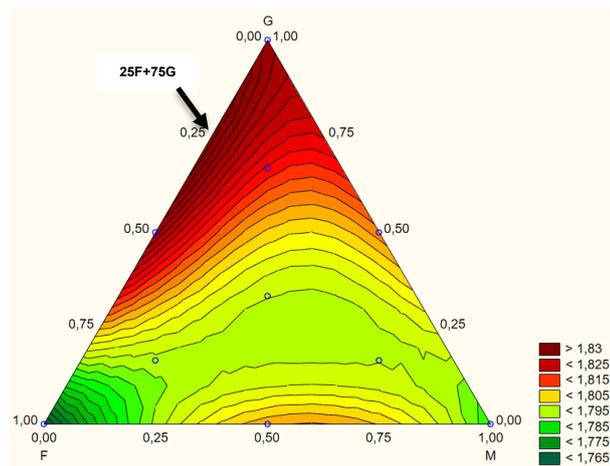
Tabela 9 – Análise de variância para a densidade aparente aos 28 dias de cura

Source	SS	df	MS	F	p
Model	0,007605	6	0,001268	20,23138	0,000007
Total Error	0,000815	13	0,000063		
Lack of Fit	0,000315	3	0,000105	2,09670	0,164323
Pure Error	0,000500	10	0,000050		
Total Adjusted	0,008420	19	0,000443		

Fonte: Autora (2023).

O Gráfico 11 mostra a superfície de resposta para a densidade aparente aos 28 dias de cura. Nota-se que o ponto com maior densidade aparente é para o traço 25F + 75G (~1,83 g/cm³), enquanto o de menor valor se encontra no vértice 100F (~1,77 g/cm³), repetindo o fato das densidades aparentes serem muito próximas entre si visto para os resultados com 7 dias de cura.

Gráfico 11 – Superfície de resposta para a densidade aparente aos 28 dias de cura



Fonte: Autora (2023).

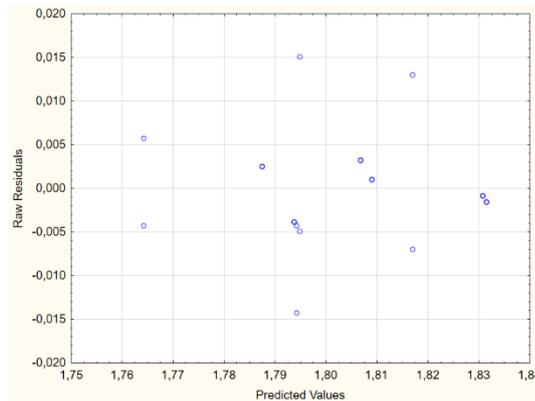
A superfície de resposta para densidade aparente aos 28 dias de cura e o R^2 foram representados conforme a Equação 15. Como esperado, o modelo cúbico especial foi o que apresentou os melhores resultados, visto que os valores de $R^2 = 0,586566$ para o modelo linear e de $R^2 = 0,774662$ para o modelo quadrático se apresentaram inferiores ao do modelo adotado.

$$\hat{y} = 1,76F + 1,79M + 1,83G + 0,12FM + 0,13FG - 0,002MG - 0,75FMG \quad (15)$$

$$(R^2 = 0,903265)$$

Ao analisar o Gráfico 12, que apresenta a distribuição dos resíduos para a densidade aparente aos 28 dias, é possível perceber um equilíbrio na distribuição aleatória dos resultados.

Gráfico 12 – Distribuição dos resíduos para densidade aparente aos 28 dias de cura

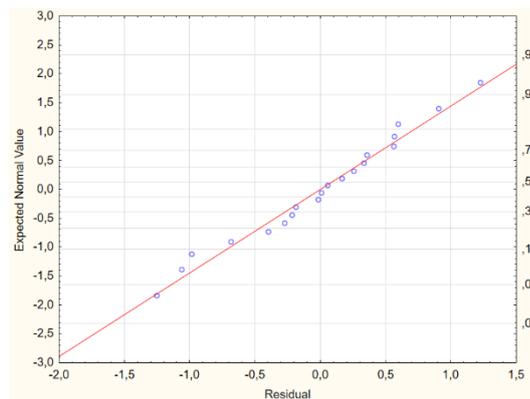


Fonte: Autora (2023).

4.2.2.3. Porosidade aberta

O Gráfico 13 apresenta a normalidade dos resultados de porosidade aberta em 7 dias. É possível observar que os dados se mantiveram próximos da linha de tendência, seguindo a normalidade.

Gráfico 13 – Normalidade para os dados da porosidade aberta aos 7 dias de cura



Fonte: Autora (2023).

Após a validação de que os dados seguiram a normalidade, seguiu-se com a análise de variância. É possível perceber que o modelo cúbico especial não apresentou falta de ajuste e foi o que melhor se adequou quando comparado com os

modelos linear e quadrático. A Tabela 10 apresenta a análise de variância para a porosidade aberta aos 7 dias de cura.

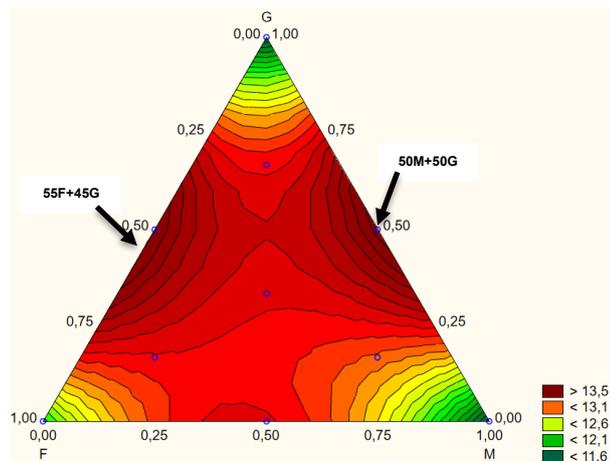
Tabela 10 – Análise de variância para a porosidade aberta aos 7 dias de cura

Source	SS	df	MS	F	p
Model	13,24841	6	2,208068	3,538988	0,026626
Total Error	8,11104	13	0,623927		
Lack of Fit	3,17919	3	1,059732	2,148751	0,157468
Pure Error	4,93185	10	0,493185		
Total Adjusted	21,35946	19	1,124182		

Fonte: Autora (2023).

O Gráfico 14 apresenta a superfície de resposta para a porosidade aberta em 7 dias. Percebe-se que os maiores valores de porosidade aberta estão próximos das regiões 55F + 45G e 50M + 50G (~13,5%). Esses resultados corroboram com aqueles encontrados para absorção de água.

Gráfico 14 – Superfície de resposta para a porosidade aberta aos 7 dias de cura



Fonte: Autora (2023).

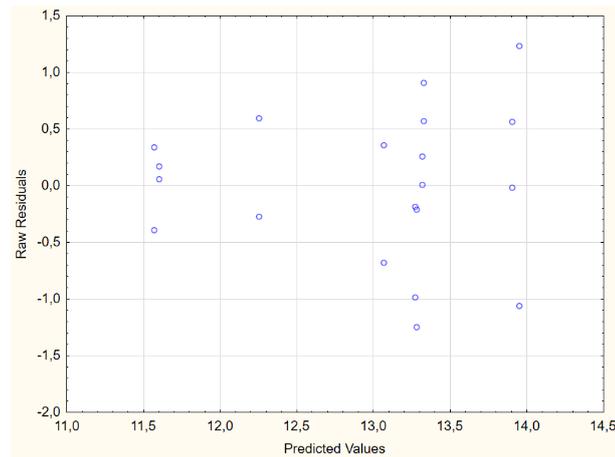
Os valores de R^2 para os modelos linear e quadrático foram 0,018205 e 0,549229, respectivamente. Tais resultados são inferiores ao encontrado para o cúbico especial. A Equação 16 representa a superfície de resposta para a porosidade aberta em 28 dias, assim como o valor de R^2 .

$$\hat{y} = 12,25F + 11,57M + 11,60G + 5,63FM + 7,91FG + 9,45MG - 27,90FMG$$

$$(R^2 = 0,620279) \quad (16)$$

Os dados de distribuição dos resíduos para porosidade aberta em 7 dias estão apresentados no Gráfico 15. É possível perceber que, apesar de haver uma maior dispersão dos resultados à medida que a porosidade aberta aumentou, os dados ainda seguiram uma normalidade.

Gráfico 15 – Distribuição dos resíduos para a porosidade aberta aos 7 dias de cura



Fonte: Autora (2023).

Ao realizar a análise de variância dos dados de porosidade aberta em 28 dias, apresentada na Tabela 11, percebe-se que não foi possível aplicar nenhum dos três modelos (linear, quadrático e cúbico especial), visto que houve uma falta de ajuste significativa para todos os modelos.

Tabela 11 – Análise de variância para a porosidade aberta aos 28 dias de cura

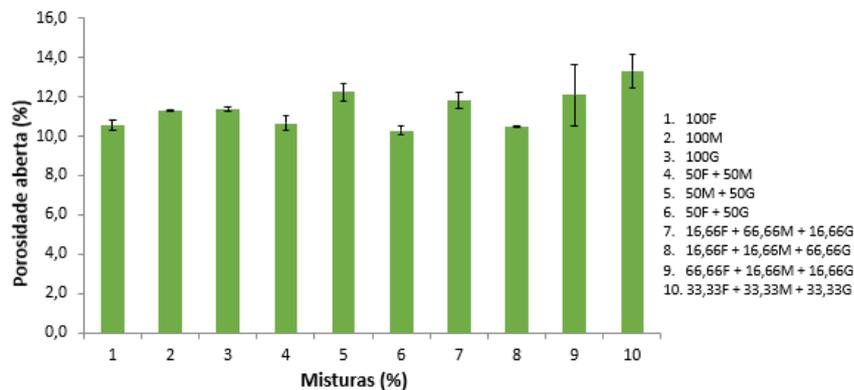
Source	SS	df	MS	F	p
Model	1,69727	2	0,848634	0,830809	0,452634
Total Error	17,36473	17	1,021455		
Lack of Fit	15,00343	7	2,143347	9,076981	0,001212
Pure Error	2,36130	10	0,236130		
Total Adjusted	19,06200	19	1,003263		
Source	SS	df	MS	F	p
Model	5,58318	5	1,116635	1,15981	0,376110
Total Error	13,47882	14	0,962773		
Lack of Fit	11,11752	4	2,779381	11,77055	0,000845
Pure Error	2,36130	10	0,236130		
Total Adjusted	19,06200	19	1,003263		
Source	SS	df	MS	F	p
Model	10,34067	6	1,723445	2,568965	0,072585
Total Error	8,72133	13	0,670871		
Lack of Fit	6,36003	3	2,120009	8,978145	0,003465
Pure Error	2,36130	10	0,236130		
Total Adjusted	19,06200	19	1,003263		

Fonte: Autora (2023).

Portanto, o Gráfico 16 de barras foi usado para a representação dos dados aos 28 dias de cura. Os resultados 1 (100F), 2 (100M) e 3 (100G) estão muito próximos entre si. Tal comportamento pode ser visualizado também aos 7 dias de cura pela Equação 16, onde os coeficientes relativos as misturas puras estão muito próximo entre si.

Na prática, a proximidade dos resultados analisados significa que os impactos desses materiais são semelhantes. Tal fato também pode ser observado para as demais misturas.

Gráfico 16 – Porosidade aberta aos 28 dias de cura de cura



Fonte: Autora (2023).

4.2.2.4. Resistência à tração na flexão

Para os resultados de resistência à tração na flexão aos 7 dias de cura, apresentados na Tabela 12, apesar dos três modelos não terem apresentado uma falta de ajuste significativa, o valor do R^2 é baixo para todos os respectivos modelos, sendo $R^2 = 0,177215$ para o linear, $R^2 = 0,379129$ para o quadrático e $R^2 = 0,379239$ para o cúbico especial.

No caso dos resultados aos 28 dias de cura (Tabela 13), mesmo que o modelo cúbico não tenha apresentado falta de ajuste significativa, os valores de R^2 também foram insatisfatórios. Nesse cenário, correspondendo R^2 ao valor de 0,148416 para o modelo linear, 0,260427 para o modelo quadrático e 0,549916 para o modelo cúbico especial. Por conta disso, não foi possível dar continuidade no estudo da estimativa dos efeitos utilizando os conceitos de análise de variância.

Tabela 12 – Análise de variância para a resistência à tração na flexão aos 7 dias de cura

Source	SS	df	MS	F	p
Model	0,185150	2	0,092575	1,830770	0,190517
Total Error	0,859625	17	0,050566		
Lack of Fit	0,409975	7	0,058568	1,302521	0,340144
Pure Error	0,449650	10	0,044965		
Total Adjusted	1,044775	19	0,054988		

Source	SS	df	MS	F	p
Model	0,396104	5	0,079221	1,709793	0,197059
Total Error	0,648671	14	0,046334		
Lack of Fit	0,199021	4	0,049755	1,106530	0,405574
Pure Error	0,449650	10	0,044965		
Total Adjusted	1,044775	19	0,054988		

Source	SS	df	MS	F	p
Model	0,396220	6	0,066037	1,323674	0,314258
Total Error	0,648555	13	0,049889		
Lack of Fit	0,198905	3	0,066302	1,474520	0,280059
Pure Error	0,449650	10	0,044965		
Total Adjusted	1,044775	19	0,054988		

Fonte: Autora (2023).

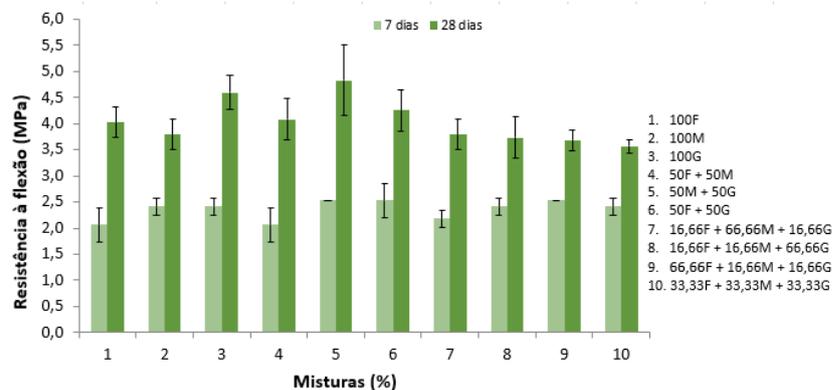
Tabela 13 – Análise de variância para a resistência à tração na flexão aos 28 dias de cura

Source	SS	df	MS	F	p
Model	5,64066	6	0,940109	6,719932	0,000102
Total Error	4,61665	33	0,139899		
Lack of Fit	0,56980	3	0,189935	1,408020	0,259721
Pure Error	4,04685	30	0,134895		
Total Adjusted	10,25731	39	0,263008		

Fonte: Autora (2023).

Diante desse comportamento dos resultados, será adotado o Gráfico 17 de barras para análise da resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias de cura. Percebe-se que para 7 dias, os resultados são semelhantes quando levado em consideração o desvio padrão, igualmente observado para o caso dos 28 dias. A maior diferença foi vista entre as diferentes idades, naturalmente atribuída a hidratação do cimento.

Gráfico 17 – Resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias de cura



Fonte: Autora (2023).

4.2.2.5. Resistência à compressão

Ao analisar a variância da resistência à compressão em 7 dias (Tabela 14), percebe-se que todos os modelos apresentaram falta de ajuste significativo. Já para os resultados aos 28 dias de cura (Tabela 15) nota-se que a falta de ajuste menos significativa dentre os modelos foi a do cúbico. Porém, ao determinar os valores dos R^2 , tais resultados foram muito baixos: linear (0,154240), quadrático (0,270090) e cúbico especial (0,310437). Por conta disso, optou-se em não construir nenhuma superfície de resposta com base nos referidos modelos.

Tabela 14 – Análise de variância para a resistência à compressão aos 7 dias de cura

Source	SS	df	MS	F	p
Model	7,56100	2	3,780502	5,347114	0,011059
Total Error	19,08946	27	0,707017		
Lack of Fit	13,61440	7	1,944914	7,104622	0,000252
Pure Error	5,47507	20	0,273753		
Total Adjusted	26,65047	29	0,918982		

Source	SS	df	MS	F	p
Model	13,75363	5	2,750725	5,118881	0,002465
Total Error	12,89684	24	0,537368		
Lack of Fit	7,42177	4	1,855444	6,777794	0,001284
Pure Error	5,47507	20	0,273753		
Total Adjusted	26,65047	29	0,918982		

Source	SS	df	MS	F	p
Model	14,45597	6	2,409328	4,544223	0,003535
Total Error	12,19450	23	0,530196		
Lack of Fit	6,71943	3	2,239811	8,181860	0,000947
Pure Error	5,47507	20	0,273753		
Total Adjusted	26,65047	29	0,918982		

Fonte: Autora (2023).

Tabela 15 – Análise de variância para a resistência à compressão aos 28 dias de cura

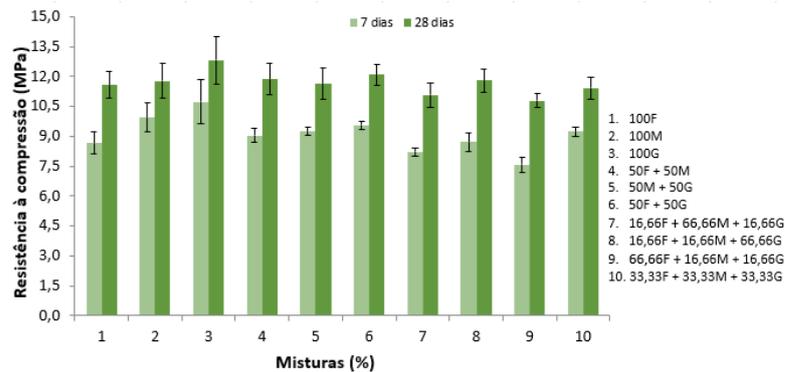
Source	SS	df	MS	F	p
Model	16,03101	6	2,671835	4,727029	0,000494
Total Error	35,60917	63	0,565225		
Lack of Fit	3,56403	3	1,188011	2,224382	0,094543
Pure Error	32,04514	60	0,534086		
Total Adjusted	51,64018	69	0,748408		

Fonte: Autora (2023).

Em geral, no Gráfico 18 percebe-se que aos 7 dias as médias dos resultados variaram entre 8,21 MPa e 10,73 MPa, sendo que para a maioria das misturas as diferenças não são significativas quando observado os valores dos desvios padrões. Analisando apenas as médias, há uma indicação que tais diferenças das misturas puras são relevantes entre si, mas elas tornam-se discretas ao levar em consideração o desvio padrão associado.

Para os resultados aos 28 dias de cura os resultados variaram entre 10,79 MPa e 12,83 MPa, sendo que as misturas com maior percentual de material grosso tenderam a apresentar um resultado superior aos demais. Percebe-se que esses resultados se aproximam quando levado em consideração os valores dos desvios padrões. Igualmente ao observado na resistência a flexão, o que é notório é o efeito da hidratação do cimento acarretando diferenças entre as idades de cura do material.

Gráfico 18 – Resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura



Fonte: Autora (2023).

4.2.3. Análise morfológica

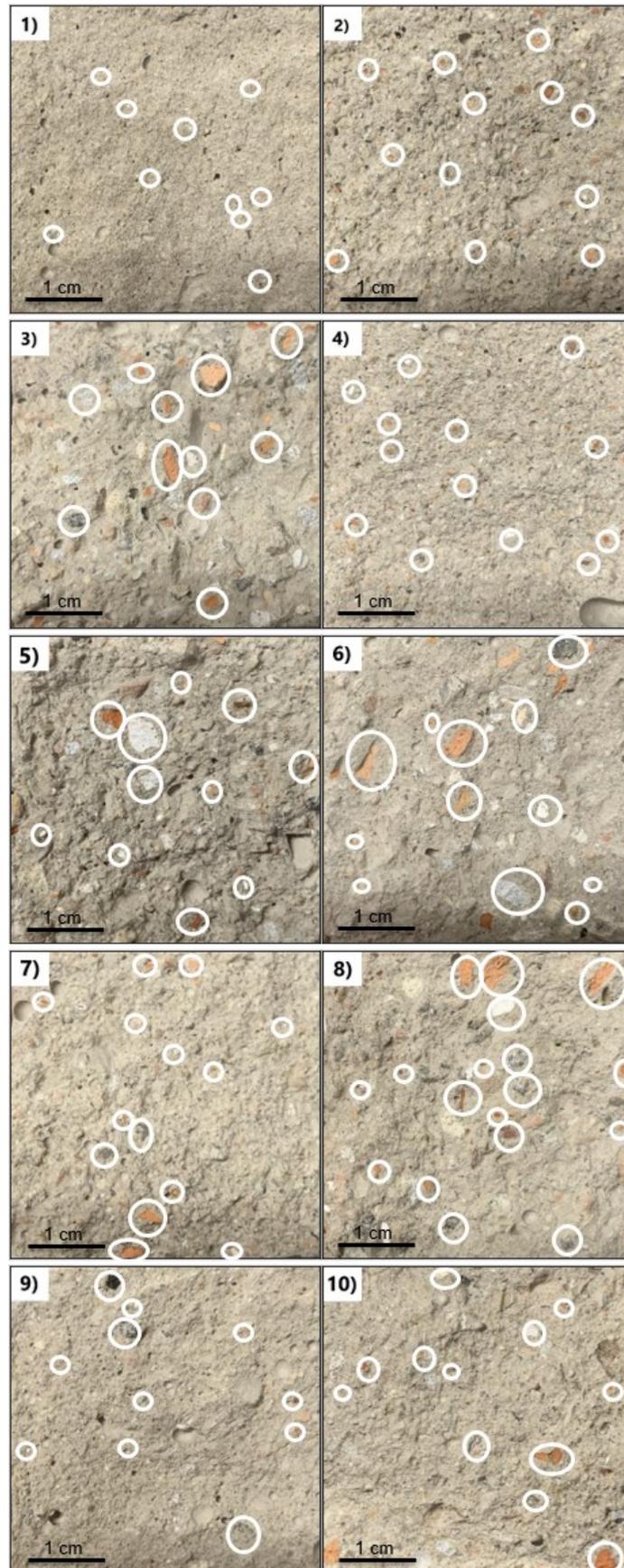
Após romper os corpos de prova de diferentes composições, é possível observar na Figura 28, que a distribuição dos agregados é em geral uniforme. Na prática, isso sugere que há uma estrutura com característica homogênea. Nota-se também que, quanto menor a granulometria do material, mais difícil é de se observar o RCC na matriz.

Além disso, é possível analisar que os corpos de prova com alto teor de material de granulometria fina obtiveram uma superfície de rompimento mais lisa. Cenário diferente ao observado nos corpos de prova com maior teor de material grosso, que apresentaram uma superfície rugosa após o rompimento.

Ainda nesse sentido, observa-se a presença de alguns poros incorporados no processo de mistura e moldagem do corpo de prova para os traços 4, 5 e 9. Nos demais, é possível observar a presença de poros, porém, de menor dimensão.

Ademais, outro ponto que merece ser enfatizado é o fato de que os RCC apresentam maiores fragilidades e, portanto, tendem ao rompimento por cisalhamento facilitada no próprio plano de rompimento do corpo de prova.

Figura 22 – Seção transversal dos corpos de prova dos dez traços estudados



Fonte: Autora (2023).

5. CONCLUSÃO

Diante do estudo apresentado até o momento, percebe-se que para a maioria das propriedades físicas e mecânicas estudadas, os resultados não apresentaram diferença significativa entre si. Nesse sentido, um dos fatores para essa não disparidade entre os resultados foi a manutenção constante do teor de água em todas as misturas. De toda forma, cumpre esclarecer que é um requisito básico para o planejamento de misturas que todos os fatores não estudados sejam constantes. Além disso, o fato dos agregados estudados (fino, médio e grosso) serem provenientes do mesmo resíduo (apresentam as mesmas características físicas) é outra explicação para a pequena diferença entre resultados.

Importante pontuar que em mais de uma ocasião (absorção de água aos 28 dias de cura, densidade aparente aos 7 dias, porosidade aberta aos 28 dias, resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias e resistência à compressão aos 7 e 28 dias), os resultados não permitiram o ajuste de maneira satisfatória dos modelos matemáticos estudados (linear, quadrático e cúbico especial). Esse fato pode estar relacionado à variabilidade dos resultados e, também, ao número de réplicas empregadas no estudo.

Para aqueles que permitiram tais ajustes (*flow table*, absorção de água aos 7 dias de cura, densidade aparente aos 28 dias e porosidade aberta aos 7 dias), o modelo cúbico especial foi o que predominou.

Levando em consideração exclusivamente o valor máximo atingido em termos de propriedades mecânicas, o uso do planejamento de experimentos com misturas revelou que a amostra 3 (100G) foi aquela que apresentou melhores resultados. Simultaneamente, a referida amostra mostrou uma baixa absorção de água e uma alta densidade aparente com valores médios de porosidade aberta, se comparada as demais misturas. Além disso, o material grosso apresenta como vantagem em termos ambientais o fato da maior facilidade de processamento (peneiramento) comparativamente ao fino.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para os futuros acadêmicos que pretendem compreender e analisar o funcionamento e os efeitos do uso de resíduos da construção civil como substituto do agregado miúdo na composição de argamassas, sugere-se:

- Avaliar o comportamento do resíduo da construção civil com variação da quantidade de água, mantendo o *flow table* constante;
- Fazer um estudo dos resíduos da construção civil comparando com agregados tradicionais;
- Fazer um estudo envolvendo a durabilidade do material.

REFERÊNCIAS

- ANGULO, S.C.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto com agregados reciclados. *In*: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto**: ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1731-1767.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529**. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**. Agregados: determinação da composição granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**. Agregados para concreto: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**. Cimento Portland: determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**. Agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**. Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 3310-1**. Peneiras de ensaio: requisitos técnicos e verificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

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

BAÍÁ, Luciana Leone Maciel; SABBATINI, Fernando Henrique. **Projeto e execução de revestimento de argamassa.** 2. ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2001.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** 2 ed. Campinas: Ed. Da Unicamp, 2001.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de experimentos usando o *Statística*.** Rio de Janeiro: E-papers, 2003.

CARASEK, H. Argamassas. *In*: ISAIA, G. C. (org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 885-936.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução n. 307.** Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, 5 jul. 2002. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=98303>. Acesso em: 8 dez. 2022.

JOCHEM, L. F. **Estudo das argamassas de revestimento com RCD: Características físicas e propriedades da microestrutura.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

LAPA, J. S. **Estudo de viabilidade técnica de utilização em argamassa do resíduo de construção oriundo do próprio canteiro de obra.** 2011. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments.** 8. ed. Arizona: John Wiley & Sons, 2012.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis.** 5. ed. Arizona: John Wiley & Sons, 2012.

SANTOS, M. D. *et al.* Estudo da utilização de argila expandida na produção de concreto leve. *In*: V CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS. **Anais [...]** CONAPESC, online, jun. 2020. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/73150>. Acesso em: 4 jun. 2023.

SILVA, N. G. et al. Efeitos do ar incorporado nas propriedades do estado endurecido em argamassas de cimento e areia. *In*: 51º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO. **Anais [...]** IBRACON, Florianópolis, out. 2009. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/ngsilva/links-2/noticias/51CBC0255_lbracon2009_ArIncorporado.pdf. Acesso em: 9 dez. 2022.

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