



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**UTILIZAÇÃO DE BORRACHA DE PNEU EM ARGAMASSAS COMO  
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DOS AGREGADOS MIÚDOS**

**PRYSCILLA DE BARROS GONÇALVES**

Recife - PE

2023

PRYSCILLA DE BARROS GONÇALVES

**UTILIZAÇÃO DE BORRACHA DE PNEU EM ARGAMASSAS COMO  
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DOS AGREGADOS MIÚDOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, sob Orientação do Professor Dr. Marcus Metri Correa e Coorientação do Professor Dr. Romildo Morant de Holanda.

Recife - PE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

G635u      Gonçalves, Priscilla de Barros  
                 UTILIZAÇÃO DE BORRACHA DE PNEU EM ARGAMASSAS COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DOS  
                 AGREGADOS MIÚDOS / Priscilla de Barros Gonçalves. - 2023.  
                 123 f. : il.

                 Orientador: Marcus Metri Correa.  
                 Coorientador: Romildo Morant de Holanda.  
                 Inclui referências.

                 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em  
                 Engenharia Ambiental, Recife, 2023.

                 1. Descarte. 2. Revestimentos. 3. Reciclagem. 4. Desempenho. I. Correa, Marcus Metri, orient. II.  
                 Holanda, Romildo Morant de, coorient. III. Título

CDD 620.8

---

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo, sem Ele nada disso seria possível, principalmente por ter permitido que eu tivesse determinação e forças para concluir mais uma etapa na minha vida.

A Jesus e a Nossa Senhora que nunca deixaram de me proteger e interceder por mim durante toda minha vida, inclusive durante os desafios da elaboração do trabalho.

Ao meu pai Walmir (in memoriam), não o ter presente fisicamente foi muito difícil em cada etapa do trabalho, mas sei que sem ele eu não estaria alcançando mais essa conquista. De onde ele estiver irá torcer e interceder por mim. Muito obrigada por tudo!

À minha mãe Sílvia, tudo nesse trabalho foi realizado com sua ajuda, cada momento dentro do laboratório em que você parou suas coisas para poder me ajudar pesando ou separando os materiais para realizar os ensaios foi fundamental, além disso toda oração e palavras de conforto foram extremamente importantes para que eu conseguisse chegar até aqui.

À toda minha família, mas em particular a minha prima Suelane, seu esposo Ivo e meu afilhado Matheus, que não pensaram duas vezes em disponibilizar o espaço da sua casa para que fosse possível realizar os experimentos fora do laboratório.

Ao meu orientador Professor Dr. Marcus Metri Correa e ao meu coorientador Professor Dr. Romildo Morant de Holanda, por todos os ensinamentos, paciência e principalmente acolhimento nos momentos mais difíceis. Os senhores são professores que admiro demais e venho me inspirando todos os dias para ser um pouco do que vocês são em sala de aula e com seus alunos.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, por todo o suporte durante da minha permanência no programa.

Ao Centro Universitário Maurício de Nassau, por disponibilizar os laboratórios durante os ensaios que foram realizados.

Aos amigos que incentivaram ou puxaram a orelha quando foi necessário e que sempre estiveram na torcida de que eu conseguisse finalizar o trabalho. Principalmente aos que pararam um pouco as suas atividades para me ajudar, Huannig, Jonas, Camensita, Antenor, Angeles e Deyglis, muito obrigada!

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram no meu processo de conclusão desse novo degrau profissional. A todos meus mais sinceros agradecimentos.

## RESUMO

Atualmente, o descarte de pneu de borracha tem gerado preocupação na sociedade, pois geralmente é feito de forma irregular. A dificuldade de reciclagem do material e o impacto que ele causa ao meio ambiente tem despertado o interesse científico sobre as diversas possibilidades de destino que podem ser dadas a esse material sem causar impacto ao meio ambiente. Sendo assim, o presente trabalho estudou a substituição, de forma parcial, dos agregados miúdos de argamassas fabricadas para revestimentos de paredes por borrachas provenientes da trituração do pneu inservível, para os traços de 1:3, 1:5, 1:0,5:3 e 1:1:5 e com 5%, 10%, 20%, 40% e 60% de substituição. Em condições de laboratório, as principais características que foram avaliadas em relação as viabilidades técnicas e ambiental, constituíram através dos ensaios de granulometria, de consistência da argamassa, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, ensaio capilaridade, já através de protótipos de mini paredes foram verificadas a umidade e resistência de aderência da argamassa no meio ambiente. Ao final do trabalho de pesquisa foi possível verificar, através principalmente da ABNT NBR 13749:2013, que a substituição parcial de agregados miúdos naturais (areia) por resíduos de pneu descartados pode proporcionar melhorias em algumas características técnicas da argamassa e nas características que não obtiveram ganho, ainda assim oferece ganhos ambientais.

**Palavras-chave:** Descarte; Revestimentos; Reciclagem; Desempenho.

## ABSTRACT

Currently, rubber tire disposal has raised concern in society, as it is usually done in an irregular manner. The difficulty of recycling the material and the impact it causes on the environment has aroused scientific interest in the different possibilities of destination that can be given to this material without causing an impact on the environment. Therefore, the present work studied the replacement, in a partial way, of the fine aggregates of mortars manufactured for wall coverings by rubbers from the crushing of the unusable tire, at mixing ratios of 1:3, 1:5, 1:0.5:3, and 1:1:5, with replacement levels of 5%, 10%, 20%, 40%, and 60%. In laboratory conditions, the main characteristics evaluated in terms of technical and environmental feasibility included particle size distribution tests, mortar consistency, axial compressive strength, tensile strength by diametral compression, capillarity tests, and, using mini-wall prototypes, assessments of moisture and adhesive strength of the mortar in the environment. At the end of the research, it was possible to observe, primarily through ABNT NBR 13749:2013, that the partial replacement of natural fine aggregates (sand) with discarded tire residues could lead to improvements in certain technical characteristics of the mortar. For those characteristics that did not see improvement, there were still environmental gains.

**Keywords:** Discard; Coatings; Recycling; Performance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Amostra da areia utilizado para confecção da argamassa.....	22
Figura 2 - Determinação da umidade com emprego do “Speedy” .....	23
Figura 3 - Amostra da borracha utilizada para confecção da argamassa .....	24
Figura 4 - Ensaio de massa específica do cimento .....	25
Figura 5 - Ensaio da massa específica da areia.....	26
Figura 6 - Ensaio da massa específica da borracha .....	27
Figura 7 - Ensaio da massa unitária: (A) Borracha, (B) Cimento.....	28
Figura 8 - Ensaio de granulometria: (A) Areia, (B) Borracha .....	30
Figura 9 - Peneirador e Peneiras durante os ensaios de granulometria .....	30
Figura 10 - Fluxograma das famílias e subfamílias de argamassa .....	32
Figura 11 - Amostras separadas para realização da confecção da argamassa .....	34
Figura 12 - Processo de moldagem dos corpos de prova .....	35
Figura 13 – Ensaio Densidade de massa aparente no estado fresco e o Teor de Ar incorporado .....	36
Figura 14 - Ensaio de consistência da argamassa: (A) moldagem do tronco de cone com a argamassa, (B) retirada do tronco, (C) execução das 30 quedas com a altura aproximada de 3 cm.....	39
Figura 15 - Aferição do tamanho de todos os corpos de prova .....	40
Figura 16 - Corpos de prova durante o ensaio de capilaridade.....	41
Figura 17 - Ensaio de Capilaridade: (A) Pesagem dos corpos de prova após a colocação na água, (B) Corpos de prova após o rompimento na longitudinal .....	42
Figura 18 - Absorção de água por imersão: (A) Corpos de prova na estufa, (B) Corpos de prova submersos durante 72hs .....	44
Figura 19 - Equipamentos utilizados para confecção da argamassa para os ensaios: (A) Misturador mecânico de argamassa, (B) Molde cilíndrico, (C) Balança, (D) Soquete, (E) Prensa para os ensaios de compressão .....	46
Figura 20 - Processo de colocação do desmoldante em todo o molde do corpo de prova .....	47
Figura 21 - Moldagem dos corpos de prova.....	47
Figura 22 - Corpos de prova moldados ainda em processo de cura durante as 72hs iniciais no molde.....	48
Figura 23 - Corpos de prova mantido em temperatura ambiente depois das 72hs iniciais e aguardando completar os 28 dias para o ensaio.....	49
Figura 24 - Assentamento da alvenaria nas argamassadeiras plásticas.....	51
Figura 25 - Protótipos assentados (A) e chapiscados (B) .....	52
Figura 26 - Materiais utilizados na execução do reboco (A) e os protótipos rebocados (B) .....	52
Figura 27 - Processo de aferição da umidade.....	53
Figura 28 - Processo de demarcação das alturas para aferição da umidade .....	54



Figura 29 - Ensaio sendo realizados em momentos de chuva e sol para avaliar as variações de umidade .....	54
Figura 30 - Realização da marcação e furos dos protótipos .....	55
Figura 31 - Processo de colagem dos ganchos .....	56
Figura 32 - Ensaio de arrancamento .....	57
Figura 33 - Gráfico da Massa Específica dos Materiais. ....	59
Figura 34 - Gráfico da Massa Unitária dos Materiais. ....	60
Figura 35 - Gráfico da Granulometria dos Agregados .....	62
Figura 36 - Gráfico da Densidade de Massa Aparente no Estado Fresco no Traço 1:3 .....	63
Figura 37 - Gráfico da Densidade de Massa Aparente no Estado Fresco no Traço 1:5 .....	64
Figura 38 - Gráfico da Densidade de Massa Aparente no Estado Fresco no Traço 1:0,5:3 .....	65
Figura 39 - Gráfico da Densidade de Massa Aparente no Estado Fresco no Traço 1:1:5 .....	66
Figura 40 - Gráfico do Teor de Ar Incorporado no Estado Fresco no Traço 1:3.....	68
Figura 41 - Gráfico do Teor de Ar Incorporado no Estado Fresco no Traço 1:5.....	69
Figura 42 - Gráfico do Teor de Ar Incorporado no Estado Fresco no Traço 1:0,5:3..	70
Figura 43 - Gráfico do Teor de Ar Incorporado no Estado Fresco no Traço 1:1:5.....	71
Figura 44 - Gráfico do Índice de Consistência da Argamassa no Traço 1:3 .....	73
Figura 45 - Gráfico do Índice de Consistência da Argamassa no Traço 1:5 .....	74
Figura 46 - Gráfico do Índice de Consistência da Argamassa no Traço 1:0,5:3.....	74
Figura 47 - Gráfico do Índice de Consistência da Argamassa no Traço 1:1:5 .....	75
Figura 48 - Gráfico da Densidade de Massa Aparente - Traço 1:3 .....	76
Figura 49 - Gráfico da Densidade de Massa Aparente - Traço 1:5 .....	77
Figura 50 - Gráfico da Densidade de Massa Aparente - Traço 1:0,5:3 .....	77
Figura 51 - Gráfico da Densidade de Massa Aparente - Traço 1:1:5 .....	78
Figura 52 - Gráfico Absorção de Água por Capilaridade - Traço 1:3.....	79
Figura 53 - Gráfico Absorção de Água por Capilaridade - Traço 1:5.....	79
Figura 54 - Gráfico Absorção de Água por Capilaridade - Traço 1:0,5:3.....	80
Figura 55 - Gráfico Absorção de Água por Capilaridade - Traço 1:1:5.....	81
Figura 56 - Gráfico Coeficiente de Absorção - Traço 1:3 .....	82
Figura 57 - Gráfico de Coeficiente de Absorção - Traço 1:5 .....	82
Figura 58 - Gráfico de Coeficiente de Absorção - Traço 1:0,5:3 .....	83
Figura 59 - Gráfico de Coeficiente de Absorção - Traço 1:1:5 .....	84
Figura 60 - Gráfico de Absorção de Água por Imersão - Traço 1:3.....	86
Figura 61 - Gráfico de Absorção de Água por Imersão - Traço 1:5.....	86
Figura 62 - Gráfico de Absorção de Água por Imersão - Traço 1:0,5:3.....	87
Figura 63 - Gráfico de Absorção de Água por Imersão - Traço 1:1:5.....	87
Figura 64 - Gráfico de Resistência à Compressão Axial - Traço 1:3.....	89
Figura 65 - Gráfico de Resistência à Compressão Axial - Traço 1:5.....	89

Figura 66 - Gráfico de Resistência à Compressão Axial - Traço 1:0,5:3.....	90
Figura 67 - Gráfico de Resistência à Compressão Axial - Traço 1:1:5.....	90
Figura 68 - Gráfico da Resistência à Tração por Compressão Diametral - Traço 1:3 .....	92
Figura 69 - Gráfico da Resistência à Tração por Compressão Diametral - Traço 1:5 .....	92
Figura 70 - Gráfico da Resistência à Tração por Compressão Diametral - Traço 1:0,5:3 .....	93
Figura 71 - Gráfico da Resistência à Tração por Compressão Diametral - Traço 1:1:5 .....	93
Figura 72 - Gráfico da Umidade .....	95
Figura 73 - Gráfico de Resistência ao Arrancamento - Traço 1:3 .....	96
Figura 74 - Gráfico de Resistência ao Arrancamento - Traço 1:0,5:3 .....	97
Figura 75 - Relatório da Análise de Componentes Principais .....	98
Figura 76 - Gráfico de Perfil de Autovalores .....	99
Figura 77 - Gráfico de Escores.....	100
Figura 78 - Gráfico de Carga Fatorial.....	101
Figura 79 - Gráfico Biplot .....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação dos traços executados e o fator água / cimento.....	33
--	----

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Produção Mundial divulgado no Sumário Mineral 2017 .....	7
Quadro 2 - Resumo da quantidade de ensaios realizados.....	20
Quadro 3 - Quadro dos limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo da NBR 7211.....	31
Quadro 4 - Densidade de massa no estado fresco da NBR 13281-1:2023.....	37
Quadro 5 - Exigências mecânicas para argamassa segundo a NBR 13281 (2001)..	38
Quadro 6 – Coeficiente de Capilaridade da NBR 13281 .....	43
Quadro 7 - Limites de resistência de aderência à tração (Ra) da NBR 13749 .....	58
Quadro 8 - Classificação da Densidade de Massa Aparente pela NBR 13281 .....	67
Quadro 9 - Classificação do Teor de Ar Incorporado da Argamassa pela NBR 13281 .....	72
Quadro 10 – Classificação quanto a Capilaridade das Argamassas segundo a NBR 13281 .....	85

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Objetivo geral .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>4</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
3.1. Areia (Agregados Miúdos).....	5
3.2. Impactos Ambientais da Extração de Areia .....	8
3.2.1. Fase de Instalação .....	8
3.2.2. Fase de Operação.....	9
3.3. Cimento Portland .....	10
3.4. Cal.....	11
3.5. Água.....	12
3.6. Propriedades da Argamassa.....	12
3.7. Uso de borracha de pneu em argamassas.....	17
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1. Definição dos Traços.....</b>	<b>20</b>
<b>4.2. Materiais .....</b>	<b>21</b>
4.2.1. Aglomerantes .....	21
4.2.2. Agregados .....	22
4.2.3. Água .....	24
<b>4.3. Procedimentos Experimentais.....</b>	<b>24</b>
4.3.1. Massa Específica .....	25
4.3.2. Massa Unitária .....	28
4.3.3. Granulometria .....	29
4.3.4. Confeção da Argamassa .....	31
4.3.5. Densidade de massa aparente no estado fresco e o Teor de Ar incorporado.....	35
4.3.7. Densidade de massa aparente no estado endurecido .....	39
4.3.8. Absorção de água por capilaridade .....	41
4.3.10. Resistência à Compressão Axial .....	45
4.3.11. Resistência à tração por compressão diametral.....	50
4.3.12. Ensaio com Protótipo de Mini Paredes .....	50
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>59</b>
<b>5.1. Caracterização Dos Materiais .....</b>	<b>59</b>
5.1.1. Massa específica dos materiais .....	59
5.1.2. Massa unitária dos materiais .....	60
5.1.3. Granulometria .....	61

<b>5.2. Ensaio Da Argamassa Em Estado Fresco .....</b>	<b>62</b>
5.2.1. Densidade de massa aparente no estado fresco e o teor de ar incorporado .....	63
5.2.2. Índice de consistência.....	72
<b>5.3. Ensaio Da Argamassa Em Estado Endurecido .....</b>	<b>75</b>
5.3.1. Densidade de massa aparente no estado endurecido .....	75
5.3.2. Absorção de água por capilaridade .....	78
5.3.3. Absorção de água por imersão .....	85
5.3.4. Resistência à compressão Axial .....	88
5.3.5. Resistência à tração por compressão diametral.....	91
<b>5.4. Ensaio com Protótipo de Mini Paredes.....</b>	<b>94</b>
5.4.1. Absorção por Capilaridade em Mini Paredes.....	94
5.4.2. Ensaio de Resistência de Aderência.....	95
<b>5.5. Análise Multivariada dos Ensaio .....</b>	<b>97</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>103</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>106</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Com a necessidade de preservação ambiental cada vez mais evidente na sociedade, a preocupação com a reciclagem de materiais, principalmente aqueles que geram impactos ambientais significativos, tem sido instrumento de diversos estudos. Prova disso é a grande preocupação atual sobre os destinos dos pneus de borracha utilizados em veículos.

O pneu usado é um resíduo indesejável e um grande problema para a sociedade moderna. Seu descarte irregular pode gerar problemas de saúde pública, pois o acúmulo de água dentro dos pneus descartados pode ser foco de doenças de veiculação hídrica.

Embora os pneus sejam considerados materiais inertes, não contenham metais pesados em sua composição e não sejam solúveis em água, o seu descarte requer um gerenciamento específico, pois não é uma tarefa fácil. Em aterros sanitários, surgem problemas, pois os pneus absorvem os gases liberados pela decomposição de outros resíduos, fazendo com que eles se expandam e, em casos extremos, até estourem, prejudicando a cobertura dos aterros. Além disso, esses materiais têm baixa compressibilidade, o que acelera a saturação e reduz a vida útil dos aterros. Quando os pneus são dispostos em terrenos a céu aberto, surgem dois problemas: riscos para a saúde pública, pois o acúmulo de água da chuva pode se tornar criadouro para micro e macro vetores; e questões ambientais, pois a queima desses pneus libera 10 litros de óleo por unidade, que podem percolar e contaminar o solo e o lençol freático, além da emissão de gases tóxicos como carbono, dioxinas, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e outras substâncias também cancerígenas. (MOTTA, 2008)

Os pneus inutilizáveis, quando descartados de maneira inadequada, tornam-se uma preocupação ambiental devido às suas características químicas que dificultam a biodegradação, levando cerca de 600 anos para se decompor. Para combater esse problema, a logística reversa surge como uma solução, evitando o descarte irregular e proporcionando uma destinação ambientalmente correta para esses pneus. Por meio da logística reversa, os pneus podem ser encaminhados para setores de produção que os transformam em tapetes, asfalto de borracha, gramado sintético,

combustível na indústria de cimentos, entre outros produtos. Essa mudança de comportamento e o conhecimento sobre a importância de descartar corretamente os pneus inutilizáveis podem ser disseminados através da Educação Ambiental. Dessa forma, a sociedade pode aprofundar seus conhecimentos sobre o tema, adotando práticas mais sustentáveis e contribuindo para a preservação do meio ambiente. (LIMA, 2023)

Uma das atividades que mais exploram os recursos naturais não renováveis é a construção civil. Mesmo com uma grande retração das obras ainda é possível verificar que existe um amplo consumo de agregados, conseqüentemente uma quantidade alarmante de extração de recursos naturais pela indústria da construção, assim como apontam Girardi (2016), Pinto e Fioriti (2016). Isto faz com que seja necessária uma racionalização no uso e principalmente pela procura de materiais alternativos para diminuição desses impactos da extração.

Estudos como Moreno (2019), Oliveria (2020), Sakamoto (2020), Rosa et al (2022), entre outros, sobre a produção de argamassa com borracha de pneus mostram que existe uma grande possibilidade deste material substituir, parcialmente, os agregados de origem natural, trazendo assim uma contribuição para o meio ambiente, já que se utiliza o resíduo altamente poluente e substitui materiais que têm a sua fonte finita.

Apensar da borracha ser bastante conhecida por sua excelente capacidade de absorver impactos e choques mecânicos. Essa propriedade é devido à sua estrutura molecular altamente elástica e flexível. Mas além dessa característica existe outra muito importante é a sua baixa taxa de absorção de água. A estrutura molecular da borracha possui cadeias poliméricas que repelem a água. Isso faz com que a borracha seja um material hidrofóbico, ou seja, resistente à penetração de água. A baixa absorção de água torna a borracha adequada para aplicações em ambientes úmidos ou submersos. Ela é frequentemente utilizada em selantes, gaxetas e vedantes para impedir a entrada de água em aplicações como equipamentos marítimos, juntas em veículos e estruturas expostas a condições de umidade. (GUIMARÃES et al, 2019)

Dessa forma, este trabalho tem como proposta avaliar o desempenho de forma experimental das argamassas para revestimento produzidas com substituição parcial dos agregados naturais, por borrachas provenientes da reutilização de pneus



automotivos. Também procura-se avaliar a viabilidade técnica da utilização do material em regiões com características semelhantes à região metropolitana da cidade do Recife-PE.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Estudar de forma experimental a substituição parcial dos agregados miúdos das argamassas para revestimentos por borrachas proveniente de pneus, observando as suas viabilidades técnicas e ambiental.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Realizar um estudo dos traços escolhidos para verificar aquele que proporcionará melhor resultado nas substituições da areia pela da borracha;
- Analisar em corpos de prova os traços que proporcionará melhor resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral, menor absorção de água por capilaridade e por imersão;
- Analisar o comportamento dos revestimentos, aplicados em protótipos em condições ambientais, em relação à capilaridade, permeabilidade e resistência da aderência.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A NBR 13529 (ABNT, 2018) define argamassa para revestimento como: “Uma mistura homogênea de agregados(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”.

Segundo SABBATINI (1984), os revestimentos argamassados têm como função a proteção das vedações e estruturas contra os agentes que podem agredir a estrutura, auxiliando nos fechamentos dos isolamentos termoacústicos, estanqueidade à água e aos gases e à segurança ao fogo. Por fim, também tem função estética.

Os revestimentos argamassados são compostos basicamente por areia (agregado miúdo) e cimento Portland adicionado de cal hidratada (aglomerantes), os quais são misturados com a água, obtendo assim um material plástico e fácil aplicação.

#### 3.1. Areia (Agregados Miúdos)

Os agregados miúdos são definidos pela NBR 7211 (ABNT, 2005) como agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022).

A distribuição granulométrica da areia tem influência na trabalhabilidade e na necessidade da quantidade de água e aglomerantes. Desta forma, o desempenho da argamassa é influenciado por essa distribuição (FERREIRA et al, 2019).

A areia, usada em larga escala na fabricação de vidros e obras de engenharia civil são provenientes da quebra de várias rochas por erosão fluvial ou eólica, com granulometria entre 0,063 e 2mm. Ela costuma ser empregada em diversos tipos de serviços. Segundo a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil (ANEPAC) (2021), o consumo de areia está dividido em 35% para argamassa, 20% concreteiras, 15% construtoras, 10% pré-fabricados, 10% revendedores/lojas, 5% pavimentadoras/usinas de asfalto, 3% órgãos públicos e 2% outros.

As areias utilizadas na construção civil têm origem principalmente a partir de processos naturais de erosão e intemperismo que ocorrem na natureza. A formação das areias envolve diversos processos geológicos que ocorrem ao longo de milhões de anos. Existem diferentes origens para as areias utilizadas na construção civil, e as principais são (FALCÃO BAUER, 2008):

- **Areia de Rios:** Grande parte das areias utilizadas na construção civil é proveniente de rios e leitos de córregos. A ação das águas ao longo do tempo desgasta e fragmenta rochas, criando partículas menores que, eventualmente, são transportadas pelos cursos de água e depositadas nas margens dos rios. Essas acumulações de partículas minerais são o que chamamos de areia de rio.
- **Areia de Cava:** A areia de cava é um tipo específico de areia utilizada na construção civil que é extraída de cavas ou minas a céu aberto. Geralmente, essas cavas são antigas áreas de mineração, onde ocorreu a extração de minerais, como argila, cascalho, areia, entre outros. Após a extração desses minerais, a cava fica com uma grande quantidade de areia, que pode ser utilizada para fins construtivos.
- **Areia de Praias:** As areias de praias também são uma importante fonte para a construção civil. Nesse caso, a ação das ondas do mar e das correntes marinhas desgasta rochas e minerais, formando a areia que encontramos nas praias. Porém as areias das praias brasileiras não são utilizadas para construção civil, devido a sua grande finura e alto teor de cloreto de sódio.
- **Areia de Dunas:** Em algumas regiões, especialmente em desertos, a ação do vento pode acumular areias em dunas. Essas areias podem ser usadas em aplicações específicas na construção. Assim como as areias proveniente de praias, as areias de dunas próximas ao litoral também não são utilizadas.
- **Areia de Pedreiras:** Em algumas situações, a areia utilizada na construção civil pode ser obtida a partir de pedreiras, que são locais de extração de rochas. As rochas são fragmentadas e processadas para produzir areia de alta qualidade.

É importante observar que a qualidade da areia é fundamental para sua utilização na construção civil. A granulometria, forma das partículas, ausência de impurezas e a distribuição de tamanho dos grãos são aspectos cruciais a serem considerados para garantir o desempenho adequado do material nas diferentes aplicações, como na produção de concreto, argamassa, revestimentos e outros componentes construtivos. Por isso, muitas vezes é necessária a realização de análises laboratoriais para verificar a qualidade da areia antes de sua utilização em obras.

Quadro 1 - Produção Mundial divulgado no Sumário Mineral 2017

Discriminação	Produção (10 <sup>3</sup> t)		
	2015	2016	2016/2015 (%)
Brasil	349.087	312.043	-10,6
Estados Unidos	937.000	1.010.000	7,8
Canadá	228.030	280.550	23
Reino Unido	63.000	64.200	1,9

Fonte: BRASIL, 2019

Em 2016, estima-se que foram produzidas cerca de 312 milhões de toneladas de areia, registrando uma diminuição de 10,6% em relação ao ano anterior (conforme apresentado no Quadro 1). No mesmo período, a quantidade de areia declarada no Relatório Anual de Lavra (RAL) foi de aproximadamente 74,6 milhões de toneladas, apresentando uma redução de 16,7% em comparação a 2015 (dados preliminares). Durante o período de 2010 a 2016, a proporção anual entre a quantidade de areia declarada no RAL e a quantidade estimada variou entre 23,8% e 27,0%, com a proporção de 23,9% registrada em 2016. (BRASIL, 2019)

Com base nos dados declarados no RAL em 2016, a produção de areia por estado foi distribuída da seguinte forma: São Paulo com 26,5 milhões de toneladas, Rio Grande do Sul com 10 milhões de toneladas, Paraná com 7,2 milhões de toneladas, Santa Catarina com 5,8 milhões de toneladas, Rio de Janeiro com 5,6

milhões de toneladas e Minas Gerais com 4,9 milhões de toneladas. Juntos, esses seis estados totalizaram 80% da produção declarada de areia em todo o país. (BRASIL, 2019)

### 3.2. Impactos Ambientais da Extração de Areia

A definição de Impacto Ambiental segundo a ISSO 14001 (ABNT, 2015) é “Modificação no meio ambiente, tanto adversa como benéfica, total ou parcial resultante dos aspectos ambientais de uma organização.”

A areia é uma substância mineral que tem origem pela quebra de vários tipos de rochas e que pode ser identificada em diversos tipos de depósitos, como aluviões e coluviões (SANTOS, 2019).

A extração de areia habitualmente é realizada por meio de dois tipos de operações de lavra dependendo do tipo de depósito: desmonte hidráulico ou dragagem hidráulica em leitos submersos. As atividades que causam impacto ao meio ambiente relacionado à atividade de extração de areia em cursos d'água e são encontrados nas fases de instalação, operação e desativação das instalações construídas para extração (NOGUEIRA, 2016).

#### 3.2.1. Fase de Instalação

A fase de instalação de uma extração de areia refere-se ao período inicial do projeto, no qual são realizadas todas as atividades e procedimentos necessários para preparar o local de extração e viabilizar a operação da mineração. Essa fase é crucial para o estabelecimento adequado da área de extração e para garantir que a atividade seja realizada de forma segura e sustentável.

Os principais impactos negativos causados nessa fase pela extração da areia segundo Nogueira (2016), são:

I - Diminuição da qualidade do ar, causada pelo lançamento de gases vindos dos motores e das partículas sólidas.

II - Aparecimento de processos erosivos no solo, devido a interferência da abertura de estradas e da retirada da vegetação.

III - Redução da infiltração de água no solo, causada pela compactação gerada pelo uso de máquinas pesadas.

IV - Diminuição da qualidade do solo, devido a redução da sua fertilidade, plasticidade e aeração, por causa da compactação pelo uso de maquinarias pesadas, e também da retirada da matéria orgânica nas áreas onde o solo foi exposto.

V - Aumento da quantidade das partículas suspensas no curso d'água, devido ao aparecimento de fenômenos erosivos.

VI - Danos à microbiota do solo, gerados pelos serviços de retirada da vegetação e abertura da rede viária e pelo próprio uso das estradas.

VII - Criação de uma possível instabilidade do solo nos ambientes ribeirinhos, devido a quantidade de maquinários e pessoas envolvidas na extração de areia.

VIII - Diminuição do "habitat" silvestre devido a retirada da cobertura vegetal nativa nas áreas que são feitas às instalações das estruturas de extração de areia e das estradas de acesso.

IX - Incomodo à fauna silvestre, provocado pela geração de ruídos do trânsito de máquinas e trabalhadores.

X - Diminuição da base genética de espécies vegetais, devido a retirada da vegetação nativa.

### 3.2.2. Fase de Operação

A fase de operação de uma extração de areia é o período em que a mineração efetivamente acontece, com a extração do material da área previamente preparada na fase de instalação. Nessa etapa, a extração de areia ocorre de forma contínua e consiste na remoção e transporte do material das jazidas para ser utilizado em diversas aplicações na construção civil e outras indústrias.

Os principais impactos negativos causados nessa fase pela extração da areia segundo Nogueira (2016), são:

I - Diminuição da qualidade do ar, causada pelo lançamento de gases vindos dos motores e das partículas sólidas.

II - Aumento da quantidade das partículas suspensas no curso d'água, motivado pela erosão do material mineral no curso d'água, durante a extração de areia.

III - Mudança da calha original dos cursos d'água, causada pelo uso dos equipamentos de extração de areia nos leitos dos rios.

IV - Possibilidade de mudança na velocidade e direção do curso d'água, já que existe uma grande eliminação dos bancos de sedimentos presentes nos leitos dos rios.

V - Contaminação do curso d'água causada pelos resíduos (óleos, graxas, lubrificantes) causado por máquinas que são utilizadas para várias etapas da extração.

VI - Diminuição da qualidade física, química e biológica da água superficial, devido ao lançamento de resíduos do processo de drenagem da areia e por resíduos domésticos gerado pelas instalações provisórias da atividade.

VII - Estresse da fauna aquática, causada pela criação de turbulência no curso d'água durante a extração de areia.

VIII - Probabilidade à diminuição da base genética das espécies animais aquáticas, causada pelas consequências negativas no corpo hídrico, por possíveis derramamentos de óleos, graxas e lubrificantes.

IX - Diminuição da possibilidade de usos múltiplos da água, devido ao aumento da sua turbidez e a possibilidade de sua contaminação.

### 3.3. Cimento Portland

Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) o cimento Portland é definido como “ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland.” A mesma norma informa que durante o processo de fabricação do cimento é possível adicionar quantidades de sulfato de cálcio e alguns minerais que podem ajudar no aumento de resistência e também promover uma proteção maior ao material para alguns ambientes agressivos.

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) informa que os principais cimentos disponíveis no mercado para o uso na construção civil são:

#### I. Cimento Portland Comum (CP I)

CP I – Cimento Portland Comum



- CP I-S – Cimento Portland Comum com Adição
- II. Cimento Portland Composto (CP II)
  - CP II-E – Cimento Portland Composto com Escória
  - CP II-Z – Cimento Portland Composto com Pozolana
  - CP II-F – Cimento Portland Composto com Fíler
- III. Cimento Portland de Alto-Forno (CP III)
- IV. Cimento Portland Pozolânico (CP IV)
- V. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)
- VI. Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS)
- VII. Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC)
- VIII. Cimento Portland Branco (CPB)

E a NBR 13529 (ABNT, 1995) informa que o tipo de cimento mais utilizados para o preparo das argamassas é o CP II, isso é devido ao material ter uma retração controlada, melhor trabalhabilidade, resistência mecânica adequada, menor calor de hidratação e sustentabilidade, ou seja, é o material com melhor custo-benefício.

### 3.4. Cal

O óxido de cálcio, também chamada por cal viva, cal vagem ou óxido de cálcio. Ela tem como sua composição química  $\text{CaO}$ , no meio ambiente ele é encontrado em estado sólido branco e alcalino. A cal é um produto que é utilizado na construção civil, normalmente em pó, podendo ser a cal virgem ou como cal hidratada, nas obras a cal hidratada (hidróxido de cálcio) é mais utilizada, já que ela pode ser misturada nas argamassas de cimento Portland que são utilizadas nos revestimentos de paredes. A diferença entre a cal virgem e a cal hidratada é que a virgem é originada do processo de calcinação e nela encontra-se apenas o óxido de cálcio e o magnésio, já a cal hidratada é o resultado da reação da cal virgem com a água que forma os hidróxidos de cálcio e magnésio (NASCIMENTO, 2022).

A cal tem sido utilizada nas argamassas como uma adição ao aglomerante que propicia uma maior plasticidade à argamassa, permitindo uma melhor trabalhabilidade na execução do revestimento (ABNT, 1995).

### 3.5. Água

A água é necessária no preparo da argamassa pois é ela que ativa as reações químicas dos aglomerantes, mas é importante que seja seguido todas as recomendações de qualidade, para que as impurezas sejam evitadas durante o preparo. A relação água/cimento é um dos parâmetros necessários para determinar a resistência da mistura e por isso é extremamente importante que essa dosagem seja feita com cuidado e observando todos os critérios técnicos (SILVA JÚNIOR, 2014).

### 3.6. Propriedades da Argamassa

É possível agrupar as propriedades dos materiais em químicas e físicas. As transformações químicas são descritas pelas propriedades químicas, assim como as substâncias interagem entre elas, ou até mesmo se transformando em substâncias diferentes. Já as propriedades físicas não são relacionadas com mudança de composição ou de identidade das substâncias, as propriedades físicas são propriedades que podem ser observadas e medidas sem modificação de sua composição. As propriedades físicas são classificadas com extensivas ou intensivas.

As extensivas são proporcionais de forma direta à quantidade de matéria que existe na amostra, enquanto a intensiva independe da quantidade de matéria. As propriedades intensivas são as: Temperatura (T), Pressão (p), cor e Densidade (d), já as extensivas são Massa (m) e Volume (V) (CESÁR; PAOLI; ANDRADE, 2018).

Segundo Santos (2014) é apresentado o método de dosagem de Lara et al. (1995) que é levado em consideração dois tipos de traços de argamassa, traço unitário (1:M – Cimento : Agregado Miúdo) e para as argamassas mistas (Cimento : Cal : Areia).

#### 3.6.1. Em Estado Fresco

##### - Consistência da Argamassa

A argamassa se deforma conforme sofre ações de cargas, essa facilidade de deformação é denominada com consistência ou trabalhabilidade. Esta característica é referente ao comportamento interno das partículas que podem se reorganizar

dependendo da quantidade de pasta aglomerante que fica em torno dos agregados (GIRARDI, 2016).

A trabalhabilidade é uma das propriedades mais essenciais no material fresco e desempenha um papel crítico em sua qualidade e desempenho final. Ela se refere à facilidade e eficiência com que a argamassa pode ser misturada, transportada, colocado e compactado durante a etapa de construção, antes que ele atinja o seu estado endurecido. (ROYCHAND, 2020)

A consistência também é considerada uma propriedade importante para as argamassas, pois é através dela que é possível avaliar a quantidade de água necessária para alcançar a trabalhabilidade necessária para argamassa, para que ela apresente a fluidez necessária e a coesão para se espalhar sobre as superfícies, preencher os espaços vazios e aderir corretamente aos substratos. (ANDRADE et al, 2023)

Os ensaios realizados por outros autores com a substituição da areia pela borracha são comuns encontrar um resultado de aumento do índice conforme o percentual de borracha aumenta, conforme é apresentado por Maneguini (2003), Benazzouk (*et al.*, 2003), Ferreira (2009), Roychand et al (2020), Young Yu (2016) e Zainal (2023).

#### - Densidade de massa aparente no estado fresco e o Teor de Ar incorporado

A densidade de massa aparente no estado fresco é uma medida importante na caracterização da argamassa durante sua etapa inicial de aplicação. Ela tem relação direta com as densidades dos materiais sólidos e com o teor de ar incorporado que vão compor o compósito (ANDRADE, 2019).

Essa propriedade é utilizada para determinar o rendimento da argamassa no estado fresco, ou seja, a quantidade de argamassa necessária para cobrir determinada área ou preencher um determinado volume. Quanto maior a densidade de massa aparente no estado fresco, maior será o rendimento da argamassa, o que pode ser um fator relevante em projetos que envolvem grandes áreas ou volumes a serem revestidos ou preenchidos. (PINTO et al, 2016)

Além disso, a densidade de massa aparente no estado fresco influencia significativamente diversas propriedades da argamassa, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco, uma argamassa com alta densidade de massa tende a apresentar uma melhor trabalhabilidade, o que facilita sua aplicação e manipulação durante a construção. Por outro lado, uma baixa densidade de massa pode resultar em uma argamassa mais fluida e menos coesa, o que pode dificultar sua aplicação e aderência aos substratos. (PINTO et al, 2016)

Conforme observado nas pesquisas de Canova (*et. al.*, 2015), Fernandes (*et. al.*, 2019), Young Yu (2016), as argamassas feitas com a utilização da substituição de areia por borracha houve uma diminuição da densidade de massa no estado fresco.

Já quanto ao teor de ar incorporado tem um comportamento oposto, ele aumenta conforme se aumenta a adição de borracha.

### 3.6.2. Em Estado Endurecido

#### - Absorção de água por capilaridade e Absorção de água por imersão

A porosidade da argamassa é uma propriedade crucial que está intimamente relacionada à sua composição, ao processo de aplicação, à cura adotada e à porosidade da superfície onde é aplicada. Essa característica tem um impacto significativo na durabilidade do revestimento e é de particular importância devido à sua capacidade de acumular umidade e proporcionar o crescimento de fungos. (QUARCIONI et al, 2009)

A porosidade é responsável por determinar a quantidade de espaços vazios presentes na microestrutura da argamassa. Esses espaços vazios são preenchidos com ar ou água e podem afetar várias propriedades do material. Quando a argamassa possui alta porosidade, ela tende a absorver mais água e reter umidade por períodos prolongados. Essa umidade acumulada pode levar ao surgimento de problemas, como o crescimento de fungos, o desenvolvimento de manchas e o deslocamento do revestimento. (QUARCIONI et al, 2009)

A presença de poros na argamassa pode ter um impacto negativo na sua resistência mecânica. Isso ocorre porque os poros representam áreas de menor

resistência, onde as tensões são concentradas e podem levar a fissuração e a falhas no material sob ação de cargas. Além disso, os poros podem reduzir a área de contato entre as partículas da argamassa, prejudicando a transferência de tensões e contribuindo para a diminuição da resistência geral do material. (DULTRA et al, 2015)

O ensaio de absorção de água por imersão é um procedimento utilizado para determinar a capacidade das argamassas de absorver água quando submerso em um meio líquido. Esse ensaio é realizado para avaliar a porosidade do material e sua susceptibilidade à penetração de água, o que pode influenciar sua durabilidade e desempenho em diferentes aplicações. (COSTA, 2022)

A capilaridade nas argamassas é um fenômeno que está relacionado à capacidade do material de absorver e transportar água através de seus poros capilares. Os poros capilares são pequenos canais presentes na microestrutura da argamassa, que têm diâmetros na faixa de micrômetros a milímetros. Esses poros podem ser formados durante o processo de cura e endurecimento da argamassa ou estar presentes desde a sua fabricação. Quando uma argamassa entra em contato com água ou é exposta a ambientes úmidos, os poros capilares começam a agir como pequenos tubos, permitindo que a água seja absorvida pela ação de capilaridade. Essa água é então transportada através dos poros da argamassa, subindo contra a força da gravidade, em direção a áreas mais secas. (PARANHOS et al, 2007)

A compreensão da capilaridade nas argamassas é essencial para o projeto e a execução de construções duráveis e resistentes à ação da água e da umidade. A escolha de materiais e técnicas adequadas pode ajudar a minimizar os efeitos negativos da capilaridade e garantir a performance adequada da argamassa ao longo do tempo. (PARANHOS et al, 2007)

- Resistência à Compressão Axial e Resistência à tração por compressão diametral

A resistência mecânica é uma propriedade essencial para garantir a integridade e a segurança das estruturas construídas com argamassas. Ela representa a habilidade do material de suportar cargas e forças aplicadas, principalmente no caso

de solicitações mecânicas de compressão, quando o material é comprimido pelas extremidades. Para aumentar a resistência mecânica da argamassa, é fundamental encontrar o equilíbrio certo entre os componentes da mistura. A redução da proporção de agregados na argamassa resulta em uma maior quantidade de pasta de cimento, o que aumenta a coesão e a densidade do material. Isso, por sua vez, melhora a capacidade da argamassa de resistir às forças de compressão. Além disso, a relação água/cimento também desempenha um papel crucial na resistência mecânica. Ao reduzir a quantidade de água na mistura, é possível aumentar a densidade e a compacidade da argamassa, evitando a formação excessiva de vazios e porosidade. Dessa forma, uma menor relação água/cimento contribui para uma argamassa mais resistente e com melhor desempenho frente a solicitações mecânicas. (MARCIEL; BARROS; SABBATINI, 1998).

#### - Resistência de Aderência

A aderência é uma propriedade das argamassas que descreve a capacidade do material de ancorar-se adequadamente à superfície onde foi aplicado. Essa ancoragem é alcançada através das tensões normais e tangenciais que se desenvolvem entre a argamassa fresca e a superfície. A qualidade da aderência é essencial para garantir que o revestimento permaneça firmemente aderido à base, evitando o deslocamento e o desprendimento prematuro. A eficácia dessa propriedade depende de vários fatores, incluindo a formulação da argamassa no estado fresco, a execução adequada do revestimento e a limpeza adequada da superfície antes da aplicação. Uma argamassa bem-preparada, com a proporção adequada de cimento, agregados e aditivos, proporciona uma melhor aderência à superfície, o que é fundamental para garantir a estabilidade e a durabilidade do revestimento ao longo do tempo. Além disso, a correta execução da aplicação da argamassa, como a espessura uniforme e a compactação adequada, contribui para uma aderência mais eficaz e confiável. A preparação adequada da superfície, incluindo a remoção de sujeira, poeira, gordura e outras impurezas, é um pré-requisito importante para assegurar que a argamassa se fixe de forma sólida e duradoura à base. A aderência é uma propriedade vital das argamassas que demanda cuidadosa

atenção e execução durante todo o processo de aplicação, contribuindo para a performance e a vida útil do revestimento aplicado. (MARCIEL; BARROS; SABBATINI, 1998).

### 3.7. Uso de borracha de pneu em argamassas

Segundo informações da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP, 2018), a produção de pneus no último trimestre de 2017 apresentou um crescimento de 9,4% e os aumentos mais significativos foram verificados nos pneus de passeio (12,4%) e de comerciais leves (14,5%), demonstrando que cada vez mais a produção do material tem aumentado.

Devido exatamente a essa grande produção de pneus o volume gerado de descarte do material vem aumentando, crescendo a necessidade de estudo envolvendo a reciclagem e reaproveitamento. Isso mostra a necessidade de encontrar métodos fáceis, eficientes em relação ao gasto energético e de baixo custo para reciclar resíduos de pneus (ZHANG, 2020).

Uma dessas alternativas estudadas para a reutilização do material descartado é na construção civil.

Porém hoje uma das grandes dificuldades desse processo é definir padrões, pois esses padrões facilita a comunicação e venda do material (PEDRO, 2011).

Atualmente o material é utilizado nos seguintes serviços da construção civil:

- Engenharia de aterro sanitário;
- Em sistemas de drenagem;
- Em pavimentos rodoviários;
- Campos sintéticos, para jogos de futebol, equitação e golfe.
- Pavimentos antichoque.

Atualmente a produção e utilização de resíduos recicláveis na construção civil tem sido influenciada pela grande quantidade desse material que se encontra disponível. Os tipos de material que podem ser utilizados são diversos, são eles: metais, concreto, plásticos, papéis, madeira, blocos, cerâmicas, solos, gesso. A utilização do material e aplicação dele vai depender dessa origem e as propriedades físicas-químicas e mecânicas (GIRARDI, 2016).

É possível diversas aplicações dos resíduos da construção civil nas argamassas, eles podem ser utilizados tanto para as argamassas de revestimentos como para as de assentamento, mas é muito importante observar a homogeneidade dos materiais que serão utilizados e garantir que o material alternativo será de qualidade (SCHILLER, 2021).

O uso de resíduos de borracha de pneu como substituto de agregados finos e graúdos na matriz de cimento apresenta um potencial promissor para a sustentabilidade e reciclagem de materiais. No entanto, um dos principais desafios enfrentados nessa abordagem é o baixo desempenho de adesão das partículas de borracha com a pasta de cimento. Essa baixa aderência resulta em uma considerável redução na resistência mecânica do concreto de borracha e pode comprometer suas propriedades de durabilidade ao longo do tempo. Para superar esse desafio, pesquisadores têm se empenhado em encontrar maneiras de aprimorar a aderência das partículas de borracha com a matriz de cimento, buscando melhorar as propriedades mecânicas e a resistência à deterioração do concreto e argamassa de borracha. Eles têm investigado fatores como o tamanho das partículas de borracha, a proporção de teor de borracha na mistura e o tratamento das partículas de borracha, incluindo a lavagem com água, a fim de otimizar a interação entre os materiais e potencializar as vantagens da utilização de resíduos de borracha no concreto e na argamassa. (ROYCHAND, 2019)

Os estudos e experimentos conduzidos pelos pesquisadores têm buscado compreender a influência de diferentes parâmetros na melhoria do comportamento de ligação entre a borracha e a pasta de cimento. A análise cuidadosa do tamanho das partículas de borracha é relevante, pois afeta a área de contato e a interação com a matriz de cimento. Além disso, a determinação da porcentagem ideal de teor de borracha na mistura é essencial para encontrar o equilíbrio entre as propriedades desejadas e as limitações impostas pela aderência. Além disso, o tratamento das partículas de borracha, por meio da lavagem com água ou outros métodos, pode desempenhar um papel fundamental na remoção de impurezas e promover uma melhor adesão com a pasta de cimento. Esses esforços de pesquisa têm buscado aprimorar o uso de resíduos de borracha no concreto e na argamassa, tornando-o uma alternativa cada vez mais viável e sustentável para a construção civil, ao mesmo



tempo em que busca soluções para enfrentar os desafios tecnológicos associados ao uso desse material reciclado. (ROYCHAND, 2019)

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

Para execução do trabalho foi desenvolvida revisão bibliográfica para analisar o comportamento dos materiais tradicionais (cimento, areia e cal) e do material que foi utilizado para substituição de parte da areia, a borracha. Foi utilizada as duas normas sobre revestimento de parede para dar base nas outras análises que foram realizadas, a NBR 13529:2013 - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Terminologia e NBR 13281-1:2023 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos e métodos de ensaios. Usando essas duas normas foi possível verificar as principais diferenças entre a argamassa produzida de forma tradicional em relação a argamassa que foi desenvolvida com a substituição da areia pela borracha.

Os ensaios descritos nas normas utilizadas foram realizados no laboratório de materiais construtivos do Centro Universitário Maurício de Nassau.

A quantidade de ensaios realizados é possível observar no Quadro 2.

Quadro 2 - Resumo da quantidade de ensaios realizados.

Ensaio de Granulometria - Areia	108 Ensaios
Ensaio de Granulometria - Borracha	24 Ensaios
Ensaio de Consistência	257 Ensaios
Ensaio de Compressão Axial	360 Corpos de Prova
Ensaio de Tração por Compressão Diametral	360 Corpos de Prova
Ensaio de Absorção de Água por Imersão	360 Corpos de Prova
Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade	360 Corpos de Prova
Ensaio de Resistência de Arrancamento	216 Amostras
<b>Total de Ensaios Realizados</b>	<b>2045 Ensaios</b>

Fonte: Autora, 2022.

### 4.1. Definição dos Traços

A primeira etapa do trabalho foi a definição dos traços, já que a aquisição dos materiais depende de forma direta dessa atividade.

Para o estudo foram escolhidos através de resultados de outros autores e obras que estão em andamento em órgãos públicos, desta forma foram utilizados 4 traços

para obtenção dos resultados que a norma sugere que sejam utilizados em argamassas para revestimento:

- I. 1:3 – A/C = 1,30 (Sem a utilização da Cal) – Reboco Externo;
- II. 1:5 – A/C = 2,10 (Sem a utilização da Cal) – Reboco Interno;
- III. 1:0,5:3 – A/C = 1,30 (Com a utilização da Cal) – Reboco Externo;
- IV. 1:1:5 – A/C = 2,10 (Com a utilização da Cal) – Reboco Interno.

Os traços utilizados foram em relação a Massa/Volume e para isso foi necessário a transformação de Volume para Massa para a aquisição dos materiais.

## 4.2. Materiais

Com a escolha dos traços que foram utilizados foi possível a aquisição dos materiais utilizados.

### 4.2.1. Aglomerantes

Para aglomerante foi utilizado dois grupos, o primeiro grupo utilizou apenas o cimento e o segundo grupo utilizaram cimento e cal.

#### 4.2.1.1. Cimento

O cimento Portland Composto com Pozolana, CP II – Z – 32 utilizado foi da marca POTY. A escolha por essa marca foi feita por conta da facilidade de obtenção no mercado local e por já ser uma marca conhecida em todo país.

#### 4.2.1.2. Cal Hidratada

A Cal Hidratada utilizada foi a da marca ExtraCal com 20kg. A marca foi escolhida por ser a mais comercializada (melhor custo-benefício) nas lojas de materiais de construção.

#### 4.2.2. Agregados

Os agregados utilizados foram Areia fina e Borracha para realizar a substituição.

A areia fina utilizada foi da marca GMIX, que é comercializada em sacos de 20kg, mas como ela passa pelo processo de separação úmida, é necessário realizar a secagem do material para que seja feita a argamassa e para que seja controlado o fator água/cimento. Para esse processo de secagem foi usada a estufa SOLIDSTEEL, com temperaturas de  $100 \pm 5$  °C, por 30 a 40 minutos, dependendo do estado inicial da umidade do material. Na

Figura 1 é possível verificar parte da areia utilizada durante os ensaios.

Figura 1 - Amostra da areia utilizado para confecção da argamassa



Fonte: Autora, 2022.

Para verificação da umidade, apesar de existir outros ensaios possíveis para essa comprovação, foi utilizado o teste de Speedy pela quantidade de amostras que existiam para ser feitas e a rapidez do ensaio. Para isso foi utilizado com base as normativas do DNER-ME (1994), o processo consistiu em separar 20g da areia e

inseriu a amostra em um recipiente hermeticamente fechado, com a colocação da ampola de carbureto de cálcio e duas esferas, ao ser realizada vibração desse recipiente o carbureto de cálcio e a água presente na areia forma um gás acetileno que gera uma pressão interna e é realizada a leitura no manômetro. O ensaio foi registrado conforme a Figura 2.

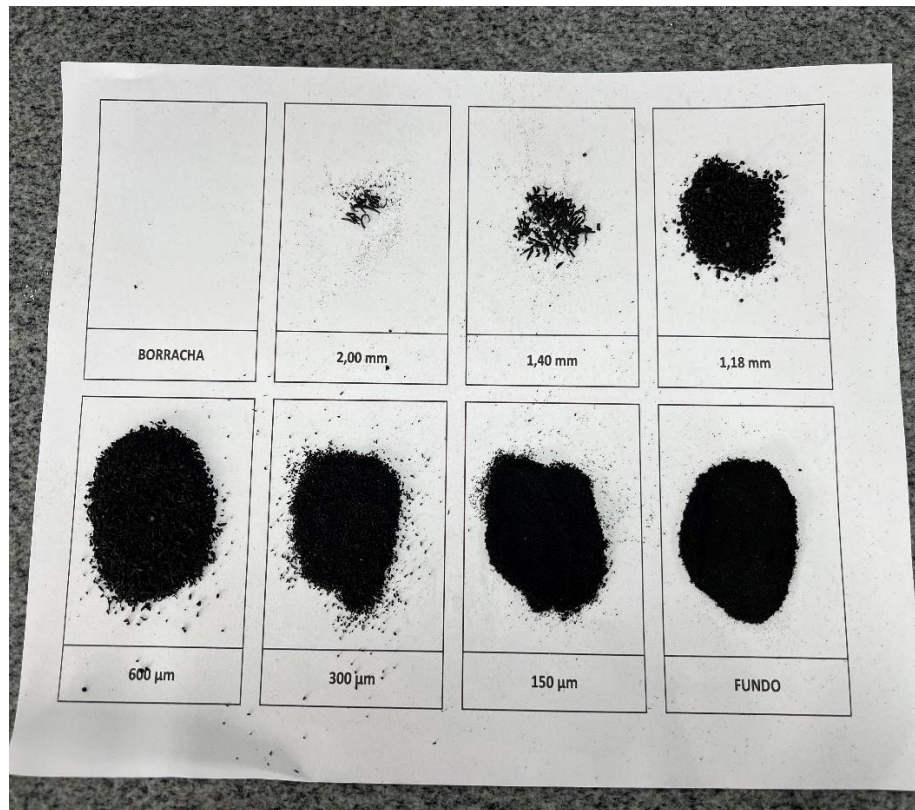
Figura 2 - Determinação da umidade com emprego do “Speedy”



Fonte: Autora, 2022.

A borracha utilizada foi fornecida em pó pela empresa SK Reciclagem que é localizada na cidade de São Sebastião do Passê – BA, a empresa realiza o processo de trituração do pneu na fábrica e é armazenado em sacos de Nylon como 50 kg. O material é originado da trituração tem uma característica laminar, sendo necessário peneirar todo o material para manter apenas o que passa pela peneira de 2mm, já que o objetivo era de manter a granulometria do material na região de característica de agregado fino. Não foi utilizado nenhum tratamento para borracha utilizada na fabricação da argamassa (Figura 3).

Figura 3 - Amostra da borracha utilizada para confecção da argamassa



Fonte: Autora, 2022.

#### 4.2.3. Água

A água utilizada para os ensaios foi a fornecida pela rede de distribuição da cidade do Recife, fornecida pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).

#### 4.3. Procedimentos Experimentais

As análises foram realizadas através dos resultados dos ensaios pelas médias e desvio padrão dos dados levantados ao final dos ensaios.

#### 4.3.1. Massa Específica

##### - Cimento

A metodologia de determinação da massa específica do cimento é regulamentada pela NBR 16605 (ABNT, 2017), que foi realizada com a utilização do frasco de Le Chatellier, onde o líquido que foi utilizado foi o querosene. O valor final foi determinado através da Equação 01 que é informada na NBR.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Onde:

$\rho$  - é a massa específica do material ensaiado, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>);

$m$  - é a massa do material ensaiado, expressa em gramas (g);

$V$  - é o volume deslocado pela massa do material ensaiado, expresso em centímetros cúbico (cm<sup>3</sup>);

Foram utilizadas quatro amostras com 60 gramas de massa seca inicial do cimento. Na Figura 4 apresenta imagem do ensaio de massa específica do cimento.

Figura 4 - Ensaio de massa específica do cimento



Fonte: Autora, 2022.



- Areia

A norma atual para determinação da densidade e da absorção de água pela areia é a NBR 16916:2021, mas como os aparelhos que a norma determina para obtenção dos resultados não estavam disponíveis no laboratório, para esse ensaio foi utilizada a norma NBR 9776 (ABNT, 1987), ela já foi cancelada, mas é sugerido o uso do frasco de Chapman, assim foi feito utilizando o equipamento e as orientações da norma. A massa específica é obtido através da equação 2.

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (2)$$

Onde:

$\gamma$  – massa específica do agregado miúdo; deve ser expressa em g/cm<sup>3</sup>;

L – Leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo).

Foi utilizado amostras de 500 gramas em um volume de 200ml de água inicialmente para que fosse medido o deslocamento de água depois da colocação do material (

Figura 5).

Figura 5 - Ensaio da massa específica da areia





Fonte: Autora, 2022.

#### - Borracha

Como atualmente não existe nenhuma norma que especifique qual deve ser o procedimento a ser utilizado para determinação da massa específica da borracha foram feitas observadas as duas opções de norma já existente para que pudesse ser adaptada para a necessidade da borracha. Através dos estudos bibliográficos feitos antes do início do processo de ensaios, foi verificado que a densidade média da borracha é menor que a da água, sendo descartado a possibilidade da utilização da mesma norma da areia. Já com o querosene é possível a utilização com a borracha, então foi adaptada a NBR 16605 (ABNT, 2017) para a determinação da massa específica da borracha, a fórmula utilizada foi a mesma do cimento, equação 1.

A principal adaptação feita foi a massa inicial para que fosse possível a aferição do volume deslocado (Figura 6).

Figura 6 - Ensaio da massa específica da borracha

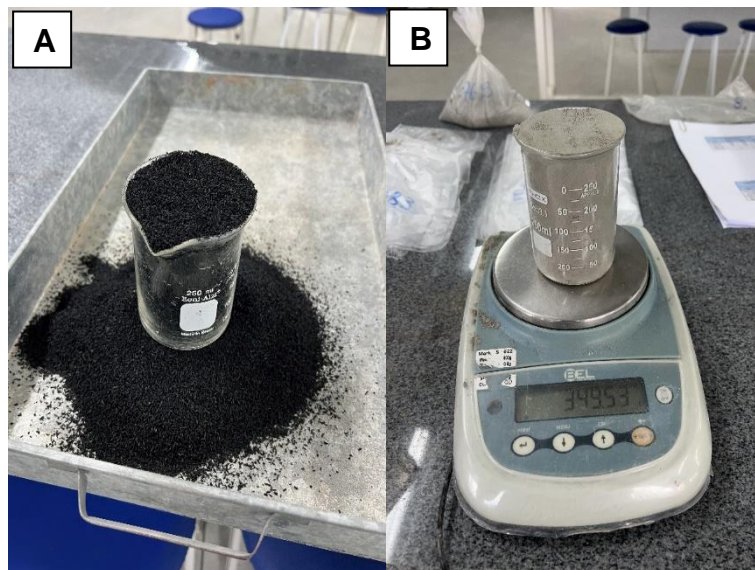


Fonte: Autora, 2022.

#### 4.3.2. Massa Unitária

Já para massa unitária foi utilizada como referência a NBR 16972 (ABNT, 2021), onde a orientação dada pelo documento é que se escolha um recipiente que não se altere conforme a umidade e que seja rígido. Com isso foi escolhido um Becker de vidro que tem uma capacidade completa de 423 ml e como a balança disponível para as pesagens era da marca BEL e tem o recurso de Tara não foi necessário mensurar a massa do recipiente já que em todas as pesagens foram determinadas as taras com o Becker vazio. Para todos os materiais foram utilizados a mesma norma para seguir o mesmo critério de avaliação. A realização do ensaio foi apresentada na Figura 7, na (A) tem a borracha que foi usada para substituição da areia, já na (B) tem o cimento para que fosse realizado o ensaio da massa unitária.

Figura 7 - Ensaio da massa unitária: (A) Borracha, (B) Cimento



Fonte: Autora, 2022.

Para obtenção dos valores da massa unitária das amostras foi realizado o cálculo conforme a equação 3 que é encontrada na norma.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (3)$$

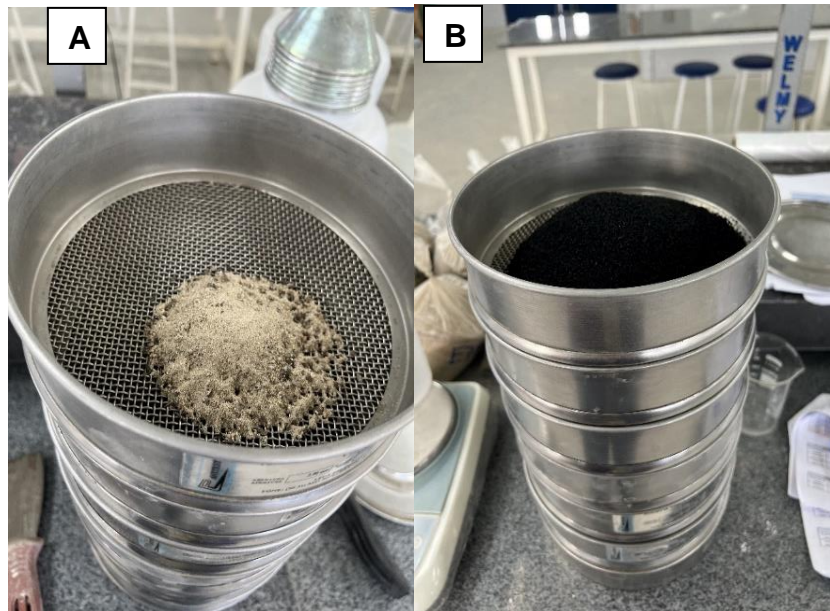
Para o cálculo do índice de vazios foi utilizado os conceitos encontrados através do conceito de Pinto (2006) que utiliza a equação 4 para determinação do valor da propriedade:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (4)$$

#### 4.3.3. Granulometria

Para o ensaio de granulometria dos agregados (areia e borracha) foi utilizado a NBR 17054 (ABNT, 2022), utilizando a série de peneiras de agregados finos (4,75 mm, 2,36 mm, 1,18mm, 600  $\mu$ m, 300  $\mu$ m e 150  $\mu$ m). Para secagem do material foi utilizado a estufa para areia ( $100 \pm 5$  °C) e a borracha foi mantida seca em temperatura ambiente. O ensaio foi realizado tanto para areia como para a borracha (Figura 8). Já para o peneiramento foi utilizado o peneirador da marca Contenco (Figura 9)

Figura 8 - Ensaio de granulometria: (A) Areia, (B) Borracha



Fonte: Autora, 2022.

Figura 9 - Peneirador e Peneiras durante os ensaios de granulometria



Fonte: Autora, 2022.

Para que fosse possível realizar a análise dos parâmetros dos limites da zona ótima e utilizável do agregado foi utilizada a norma de concreto NBR 7211 (ABNT, 2022), já que não existe uma norma específica para as argamassas, Quadro 3.

Quadro 3 - Quadro dos limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo da NBR 7211.

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

NOTAS

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

Fonte: NBR 7211:2009 (Adaptado pela autora)

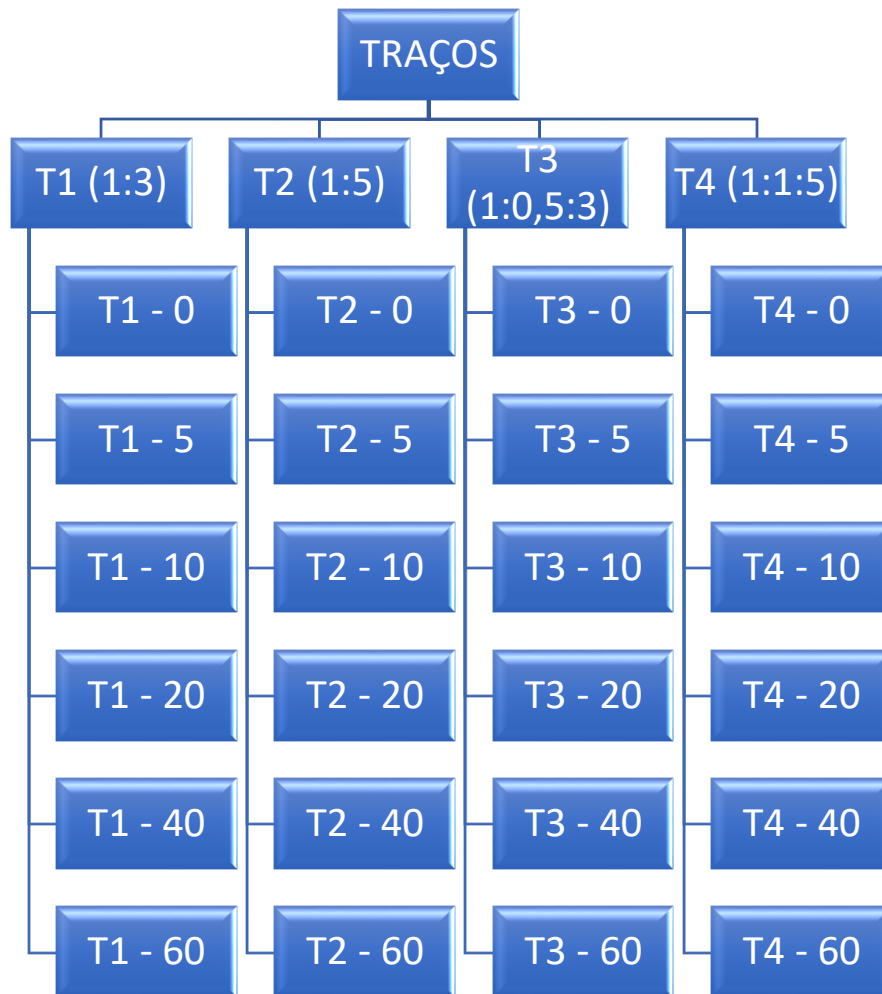
Já o módulo de finura dos agregados miúdo pode ser obtido através da equação 5, conforme NBR 7211 (ABNT, 2022):

$$MF = \frac{\sum \% \text{ acumulados}}{100} \quad (5)$$

#### 4.3.4. Confecção da Argamassa

Para a confecção da argamassa e identificação dos corpos de prova (CP), foi necessário determinar o percentual de substituição do agregado miúdo (areia) pela borracha de pneu e identificar o traço e família, conforme é possível observar na Figura 10, onde a família “T1 – 0” é o traço 1:3 padrão, ou seja, sem nenhuma substituição, já a família “T3 – 20” é o traço 1:5 com 20% de substituição do volume da areia.

Figura 10 - Fluxograma das famílias e subfamílias de argamassa



Fonte: Autora, 2022.

Após a definição dos traços e famílias, foi possível confeccionar a tabela de traços (Tabela 1) para determinação do volume e massa que foi utilizado durante os ensaios. Como o traço foi escolhido em volume foi necessário considerar as massas unitárias de cada material para determinar a quantidade em massa para cada traço. Inicialmente foi considerado 1.000 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 1.450 kg/m<sup>3</sup> de areia, 550 kg/m<sup>3</sup> de cal e 350 kg/m<sup>3</sup> de borracha.

A quantidade de material da tabela 1 foi calculada para que fosse possível utilizar o misturador disponível no laboratório, esse volume era para conseguir moldar até 6 corpos de prova.

Tabela 1 - Relação dos traços executados e o fator água / cimento

TRAÇO (1:3)		Cimento		Agregado (Areia)		Borracha		Cal	Água	A/C
Família / Subfamília	Massa (g)	Massa (g)	%	Massa (g)	%	Massa (g)	Massa (g)	Massa (g)		
T1 - 0	400,00	1.740,00	100%	-	0%	-	520,00	520,00	1,30	
T1 - 5	400,00	1.653,00	95%	21,00	5%	-	520,00	520,00	1,30	
T1 - 10	400,00	1.566,00	90%	42,00	10%	-	520,00	520,00	1,30	
T1 - 20	400,00	1.392,00	80%	84,00	20%	-	520,00	520,00	1,30	
T1 - 40	400,00	1.044,00	60%	168,00	40%	-	520,00	520,00	1,30	
T1 - 60	400,00	696,00	40%	252,00	60%	-	520,00	520,00	1,30	
TRAÇO (1:5)		Cimento		Agregado (Areia)		Borracha		Cal	Água	A/C
Família / Subfamília	Massa (g)	Massa (g)	%	Massa (g)	%	Massa (g)	Massa (g)	Massa (g)		
T2 - 0	250,00	1.812,50	100%	-	0%	-	525,00	525,00	2,10	
T2 - 5	250,00	1.721,88	95%	21,88	5%	-	525,00	525,00	2,10	
T2 - 10	250,00	1.631,25	90%	43,75	10%	-	525,00	525,00	2,10	
T2 - 20	250,00	1.450,00	80%	87,50	20%	-	525,00	525,00	2,10	
T2 - 40	250,00	1.087,50	60%	175,00	40%	-	525,00	525,00	2,10	
T2 - 60	250,00	725,00	40%	262,50	60%	-	525,00	525,00	2,10	
TRAÇO (1:0,5:3)		Cimento		Agregado (Areia)		Borracha		Cal	Água	A/C
Família / Subfamília	Massa (g)	Massa (g)	%	Massa (g)	%	Massa (g)	Massa (g)	Massa (g)		
T3 - 0	400,00	1.740,00	100%	-	0%	110,00	520,00	520,00	1,30	
T3 - 5	400,00	1.653,00	95%	21,00	5%	110,00	520,00	520,00	1,30	
T3 - 10	400,00	1.566,00	90%	42,00	10%	110,00	520,00	520,00	1,30	
T3 - 20	400,00	1.392,00	80%	84,00	20%	110,00	520,00	520,00	1,30	
T3 - 40	400,00	1.044,00	60%	168,00	40%	110,00	520,00	520,00	1,30	
T3 - 60	400,00	696,00	40%	252,00	60%	110,00	520,00	520,00	1,30	
TRAÇO (1:1:5)		Cimento		Agregado (Areia)		Borracha		Cal	Água	A/C
Família / Subfamília	Massa (g)	Massa (g)	%	Massa (g)	%	Massa (g)	Massa (g)	Massa (g)		
T4 - 0	250,00	1.812,50	100%	-	0%	137,50	525,00	525,00	2,10	
T4 - 5	250,00	1.721,88	95%	21,88	5%	137,50	525,00	525,00	2,10	
T4 - 10	250,00	1.631,25	90%	43,75	10%	137,50	525,00	525,00	2,10	
T4 - 20	250,00	1.450,00	80%	87,50	20%	137,50	525,00	525,00	2,10	
T4 - 40	250,00	1.087,50	60%	175,00	40%	137,50	525,00	525,00	2,10	
T4 - 60	250,00	725,00	40%	262,50	60%	137,50	525,00	525,00	2,10	

Fonte: Autora, 2022.

Para preparação dos ensaios foi utilizada a estratégia de particionar os materiais (cimento, cal, areia e borracha) em sacos plásticos já pesado na balança da marca BEL com precisão de 0,01g e com carga máxima de pesagem de 600 gramas. Como é possível observar na Figura 11.



Figura 11 - Amostras separadas para realização da confecção da argamassa



Fonte: Autora, 2022.

Com a finalização da preparação dos materiais foi possível iniciar a confecção da argamassa e para isso foi utilizada a NBR 16541 (ABNT, 2016), que determina a utilização de misturador mecânico, o equipamento disponível no laboratório para esse fim era a argamassadeira I-3010 eletromecânica para mistura de cimentos e argamassas, com cuba de capacidade de 5 litros, com duas velocidades.

Para o preparo a norma estabelece que deve ser colocado toda a argamassa anidra na cuba e deve ser acionado o misturador na velocidade baixa e adicionado 75% da água que será utilizada na mistura, nos 10 segundos iniciais, o misturador deve se manter ligado até completar 30 segundos do início do acionamento, após isso deve ser aumentada a velocidade por 60 segundos.

Após a conclusão da primeira etapa, o equipamento deve ser desligado e deve ser raspada, com auxílio de uma espátula, toda a área de contato da cuba e pá, todo esse processo deve levar 90 segundos, no máximo, mas caso leve menos tempo a argamassa precisa ficar em repouso nesse tempo. Completado o tempo de repouso inicia-se a última etapa da mistura que é a inclusão do restante da água (25%) durante o acionamento do misturador em velocidade baixa, deve se manter o misturador ligado



por 60 segundos e finalizar o processo de mistura após esse tempo. Por fim, bastou moldar os corpos de prova cilíndricos de cada traço (Figura 12).

Figura 12 - Processo de moldagem dos corpos de prova



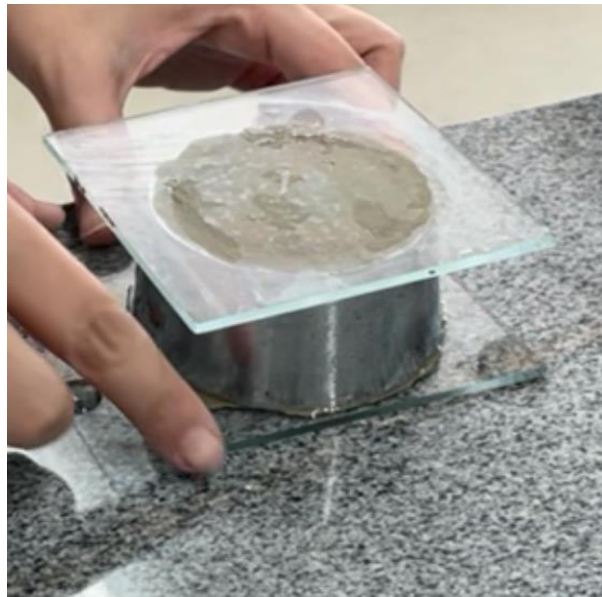
Fonte: Autora, 2022.

Os corpos de prova foram desmoldados com 72hs seguindo a orientação da NBR 13279 (ABNT, 2005) que apresenta o prazo de  $48\text{hs} \pm 24\text{hs}$ .

#### 4.3.5. Densidade de massa aparente no estado fresco e o Teor de Ar incorporado

Seguiu-se a NBR 13278 (ABNT, 2005). Os aparelhos utilizados foram uma balança de precisão de 0,01g, recipiente cilíndrico rígido, espátula e uma placa de vidro plano (Figura 13).

Figura 13 – Ensaio Densidade de massa aparente no estado fresco e o Teor de Ar incorporado



Fonte: Autora,2022.

O cálculo da densidade foi realizado através da equação 6 que consta na norma.

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \cdot 1000 \quad (6)$$

Onde:

$m_c$  – é a massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio, em grammas;

$m_v$  – é a massa do recipiente cilíndrico vazio, em grammas;

$v_r$  – é o volume do recipiente cilíndrico, em centímetros cúbicos.

A NBR 13281-1 (ABNT, 2023) classifica a densidade de massa no estado fresco em 6 categorias conforme Quadro 4.

Quadro 4 - Densidade de massa no estado fresco da NBR 13281-1:2023

CLASSE	DENSIDADE DE MASSA NO ESTADO FRESCO kg/m <sup>3</sup>	MÉTODO DE ENSAIO
DF0	≤ 1400	ABNT NBR 13278
DF1	1400 a 1600	
DF2	1600 a 1800	
DF3	1800 a 2000	
DF4	> 2000	

Fonte: NBR 13281-1:2023 (Adaptado pela autora).

Desta forma a classificação foi utilizada para verificar se as argamassas padrão e com substituição, se mantem ou não, com as mesmas propriedades e assim avaliar as mudanças que acontecem conforme a norma apresenta.

Já para o cálculo do teor de ar incorporado na argamassa a norma apresenta outras duas equações para o cálculo (equação 7 e 8) que foi utilizada para obtenção dos resultados dos ensaios.

$$A = 100 \cdot \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \quad (7)$$

Onde:

$d$  – é o valor da densidade de massa da argamassa, em gramas por centímetro cúbico;

$d_t$  – é o valor da densidade de massa teórica da argamassa, em gramas por centímetro cúbico, sem vazios

$$d_t = \frac{m_s + m_{\text{água}}}{\frac{m_s}{\gamma_s} + m_{\text{água}}} \quad (8)$$

Onde:

$m_s$  – é a massa da argamassa anidra, em gramas;

$m_{\text{água}}$  – é a massa de água que compõe a argamassa fresca;

$\gamma_s$  – é a massa específica da argamassa anidra.

A norma recomenda que o teor de ar incorporado seja expresso em porcentagem, arredondado ao número inteiro.

Quanto a classificação a NBR 13281-1, de 2023, não categoriza o teor de ar incorporado, mas antes da revisão da norma em 2001 existia uma classificação para essa propriedade da argamassa, conforme o Quadro 5. Sendo assim ela foi utilizada apenas para análise pontual das variações dentro dos mesmos parâmetros de fabricação da argamassa.

Quadro 5 - Exigências mecânicas para argamassa segundo a NBR 13281 (2001)

Características	Identificação	Limites	Método
Teor de Ar Incorporado (%)	a	< 8	NBR 13278
	b	$8 \leq 18$	
	c	> 18	

Fonte: NBR 13281:2001 (Adaptado pela autora).

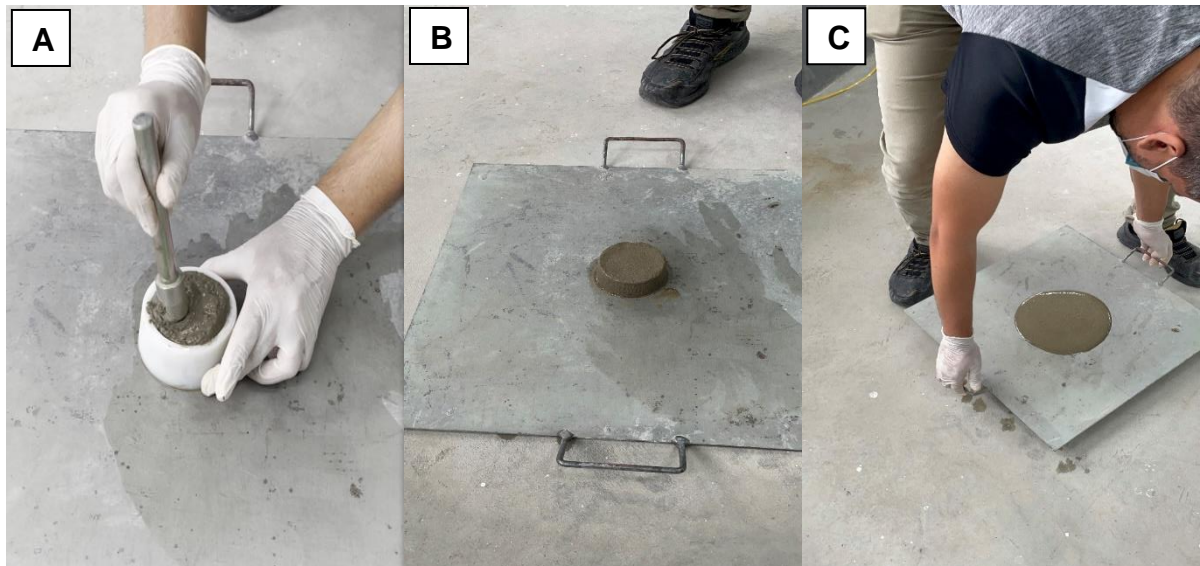
#### 4.3.6. Índice de consistência

O índice de consistência foi feito através da recomendação da NBR 13276 (ABNT, 2016). A norma sugere que seja preenchido um molde de tronco de cone centralizado mesa para índice de consistência, em três camadas de altura semelhantes e adensadas com quinze, dez e cinco golpes com o soquete, como não havia a mesa disponível no laboratório foi adaptado para realização do ensaio uma

chapa ferro. Após o arrasamento e retirada do molde, foram realizadas trinta quedas de uma altura de aproximadamente 3 cm em trinta segundos, como apresentado na Figura 14, na imagem é possível observar as três etapas.

Com a finalização da última queda eram realizadas três medições de pontos distintos e após a aferição era feito a média para poder determinar o índice de consistência. Essa média padrão deve ser de  $260 \pm 5\text{mm}$  conforme a determinação da NBR 16541 (ABNT, 2016).

Figura 14 - Ensaio de consistência da argamassa: (A) moldagem do tronco de cone com a argamassa, (B) retirada do tronco, (C) execução das 30 quedas com a altura aproximada de 3 cm



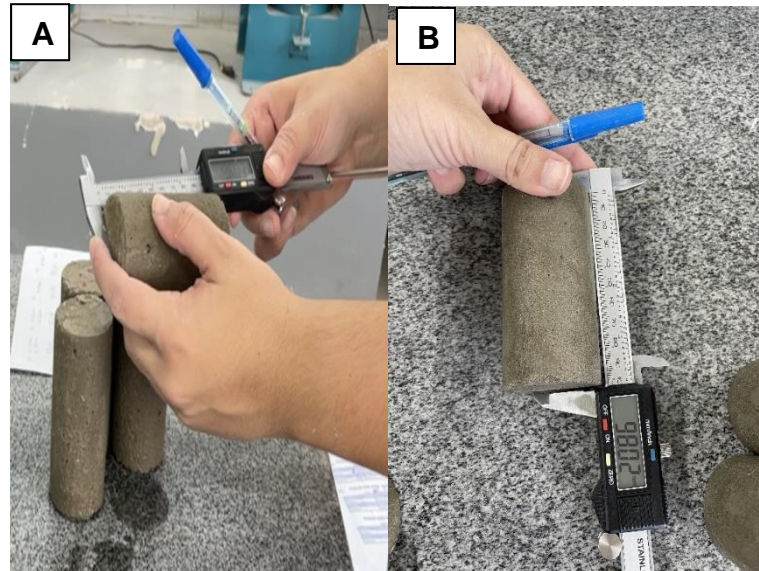
Fonte: Autora, 2022.

#### 4.3.7. Densidade de massa aparente no estado endurecido

A NBR 13280 (ABNT, 2005) tem como objetivo apresentar o método que deve ser utilizado para determinação da densidade de massa aparente de argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos, no estado endurecido, com isso foi utilizada ela para determinar os procedimentos que foram adotados durante o ensaio.

Como esse ensaio não é destrutivo foi utilizado os corpos de prova dos demais ensaios para que fosse mensurado os tamanhos antes de realizar o ensaio para qual ele havia sido moldado (Figura 15).

Figura 15 - Aferição do tamanho de todos os corpos de prova



Fonte: Autora, 2022.

Desta forma foi utilizado apenas um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm e uma balança digital com precisão de 0,01g. Todos os corpos de prova só foram medidos e pesados após os 28 dias da moldagem.

Para o cálculo da densidade foi utilizada a equação 9 apresentada na norma.

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{m}{v} \cdot 1000 \quad (9)$$

Onde:

m – massa do corpo-de-prova;

v – volume do corpo de prova



#### 4.3.8. Absorção de água por capilaridade

As especificações para o teste de capilaridade foram obtidas na NBR 15259 (ABNT, 2005), mas foi necessária uma adaptação as orientações da norma por falta de disponibilidade dos corpos de prova prismáticos. Desta forma foi utilizado os corpos de prova cilíndrico conforma as revisões anteriores da norma que determina que deve ser utilizado corpos de provas cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100mm de altura. Após 28 dias de idade do corpo de prova moldado o ensaio deve ser iniciado. O ensaio consiste em colocar os corpos de prova em um recipiente com uma lâmina d'água cuja altura deve ser constante em todos os corpos de prova, essa altura deve ser de  $5 \pm 1$ mm (Figura 16). Além disso, os corpos de prova foram apoiados sobre hastes de madeira com o intuito de proporcionar o máximo contato da base do corpo de prova com a lâmina d'água.

Figura 16 - Corpos de prova durante o ensaio de capilaridade

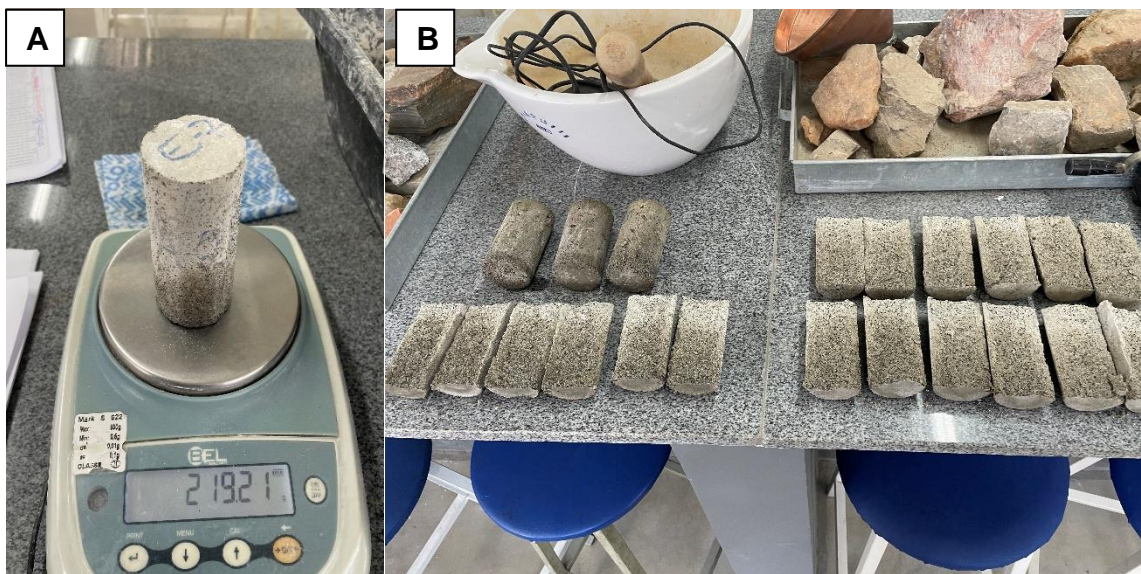


Fonte: Autora, 2022.

Antes de posicionar os corpos de prova para iniciar o ensaio ele deve ser lixado com lixa grossa e deve ser realizada a pesagem da massa do corpo de prova para

que seja registrada a massa inicial da amostra, após isso pode ser iniciado o ensaio, ou seja, posicionado os corpos de prova em contato com a água, com isso deve ser pesado o corpo de prova aos 10 minutos e 90 minutos depois do primeiro contato da amostra com a água, Figura 17 (A), após a finalização das pesagem são rompidos os corpos de prova na longitudinal para verificar internamente para saber até que altura chegou a água dentro do corpo de prova Figura 17 (B).

Figura 17 - Ensaio de Capilaridade: (A) Pesagem dos corpos de prova após a colocação na água, (B) Corpos de prova após o rompimento na longitudinal



Fonte: Autora, 2022.

Para realizar o cálculo da absorção da água é determinado através da equação 10, retirada da NBR 15259.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{S} \quad (10)$$

Onde:

$A_t$  – é a absorção de água por capilaridade, para cada tempo, aproximada ao centésimo mais próximo, em gramas por centímetro quadrado.



$m_t$  – é a massa do corpo-de-prova em cada tempo, aproximada ao centésimo mais próximo, em gramas;

$m_0$  – é a massa inicial do corpo-de-prova, em gramas;

$t$  – Corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos;

$S$  – área do corpo-de-prova, em centímetro quadrado.

A NBR 13281-1 (ABNT, 2023) classifica o coeficiente de capilaridade em 7 categorias, mas como o processo determinado para essa classificação segue a Norma Internacional EN ISSO 15148 e os ensaios de capilaridade já haviam sido realizado seguindo os parâmetros da NBR 15259:2005, foi utilizado para classificação da NBR 13281 (ABNT, 2005), conforme Quadro 6.

Quadro 6 – Coeficiente de Capilaridade da NBR 13281

CLASSE	COEFICIENTE DE CAPILARIDADE $\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$	MÉTODO DE ENSAIO
C1	$\leq 1,5$	ABNT NBR 15259
C2	1,0 a 2,5	
C3	2,0 a 4,0	
C4	3,0 a 7,0	
C5	5,0 a 12,0	
C6	$> 10,0$	

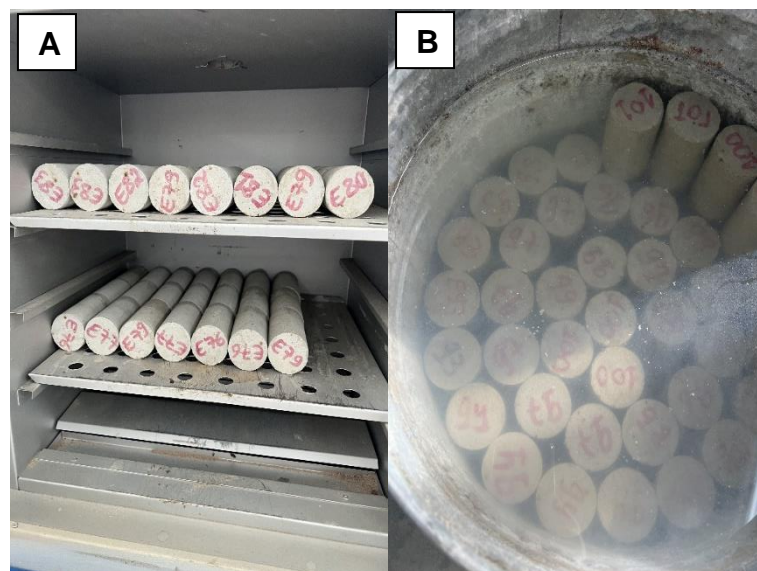
Fonte: NBR 13281:2005 (Adaptada pela autora).

Desta forma a classificação foi utilizada também para verificar se as argamassas padrão e com substituição se mantem ou não para avaliar as mudanças que acontecem conforme a norma apresenta.

#### 4.3.9. Absorção de água por imersão

A NBR 9778 (ABNT, 2005) determina as regras que devem ser adotadas para os ensaios de absorção por de água por imersão. Para realizar esse ensaio são necessários apenas 2 corpos de prova, mas como por padrão para todos os ensaios estavam sendo utilizados no mínimo 3 corpos de prova, foi adotada a mesma quantidade para esse ensaio. O ensaio só pode ser realizado depois que os corpos de prova realizam a cura de 28 dias, com isso é necessário a retirada de todo o desmoldante utilizado para a moldagem do corpo de prova, então foi utilizado lixa grossa e em seguida feita a limpeza com um pincel para retirada completa dos resíduos. Após esse procedimento o corpo de prova deve ser levado a estufa por 72hs em temperatura permanente de  $105 \pm 5$  °C (Figura 18 – A), depois da secagem completa as amostras devem ser pesadas e levadas para um recipiente com água para que elas sejam completamente submersas, por mais 72hs, com a conclusão desse prazo as amostras devem voltar a ser pesadas. Figura 18 (B)

Figura 18 - Absorção de água por imersão: (A) Corpos de prova na estufa, (B) Corpos de prova submersos durante 72hs



Fonte: Autora, 2022.

Com esses dados obtidos é possível realizar os cálculos necessários para obtenção do valor da absorção, para isso deve ser utilizada a equação 11 que é fornecida pela NBR 9778.

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

Onde:

$M_{sat}$  – é a massa da amostra saturada em água após imersão;

$M_s$  – é a massa da amostra seca em estufa.

#### 4.3.10. Resistência à Compressão Axial

Par que fosse possível a realização do ensaio de resistência à compressão axial foi utilizada a NBR 7215 (ABNT, 2019) devido ao fato dela ser referente à determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Foi usado os equipamentos sugeridos na norma, misturador mecânico de argamassa, Figura 19 (A), molde com diâmetro interno de  $50 \pm 2\text{mm}$  e altura de  $100 \pm 2\text{mm}$  Figura 19 (B), balança com resolução de 0,01g Figura 19 (C), Soquete Figura 19 (D) e Máquina de ensaio de resistência à compressão Figura 19 (E).

Figura 19 - Equipamentos utilizados para confecção da argamassa para os ensaios: (A) Misturador mecânico de argamassa, (B) Molde cilíndrico, (C) Balança, (D) Soquete, (E) Prensa para os ensaios de compressão



Fonte: Autora, 2022.

O procedimento para moldagem foi utilizado o que a norma descreve que é inicialmente preparar os moldes, então todos eles foram limpos e aplicado o desmoldante para que durante a desmoldagem do corpo de prova não se tivesse nenhum problema quanto a sua resistência (procedimento da NBR 7215). A mistura foi realizada conforme o item 4.3.2. Já para a moldagem dos corpos de prova eles foram realizados imediatamente após o preparo da argamassa e com a maior rapidez possível, para que a argamassa não entrasse em pega. A colocação da argamassa na forma foi feita com o auxílio de espátula, dividida em quatro camadas de altura

iguais e cada camada recebeu 30 golpes uniformes com o soquete. (Procedimento da NBR 7215), conforme a Figura 20 e Figura 21.

Figura 20 - Processo de colocação do desmoldante em todo o molde do corpo de prova



Fonte: Autora, 2022.

Figura 21 - Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autora, 2022.



Para a cura foi utilizado, como referência, as sugestões da NBR 13279 (ABNT, 2005), onde deve ser deixado a argamassa nos corpos de prova durante  $48h \pm 24h$  em temperatura controlada de  $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  e umidade de  $60\% \pm 5\%$  e após esse prazo deve ser retirado do molde e mantido em temperatura controlada de  $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  e umidade de  $60\% \pm 5\%$  até o prazo para realização do ensaio. Assim, foi mantido os corpos de prova dentro do molde durante 72hs, em temperatura controlada, até o 28º dia, para que fosse possível realizar o ensaio de resistência a compressão (Figura 22 e Figura 23).

Figura 22 - Corpos de prova moldados ainda em processo de cura durante as 72hs iniciais no molde



Fonte: Autora, 2022.

Figura 23 - Corpos de prova mantido em temperatura ambiente depois das 72hs iniciais e aguardando completar os 28 dias para o ensaio



Fonte: Autora, 2022.

No cálculo da resistência foi necessário utilizar a NBR 5739 (ABNT, 2018). Desta forma foi utilizada a equação 12, presente na norma, que é referente ao ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (12)$$

Onde:

$f_c$  – é a resistência à compressão, expressa em megapascal (Mpa);

$F$  – é a força máxima alcançada, expressa em newtons (N);

$D$  – é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

#### 4.3.11. Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à compressão diametral é fundamentada no rompimento dos corpos de prova horizontal para que seja determinada a força de rompimento dele e a partir disso poder ser determinado o valor da resistência.

Para referenciar o método do ensaio foi utilizada a NBR 7222 (ABNT, 2011) onde é encontrada as orientações do processo de execução. Para moldagem do corpo de prova e da cura foi utilizado o mesmo processo dos ensaios de resistência à compressão axial. Então foi deixado os corpos de prova moldados durante 72hs ainda no molde, e após esse prazo foi desmoldado e deixado em temperatura ambiente até completar os 28 dias necessários para realização do ensaio de compressão diametral.

Para o cálculo da resistência foi utilizada a equação 13, (NBR 7222).

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (13)$$

Onde:

$f_{ct,sp}$  – é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em megapascals (Mpa);

F – é a força máxima obtida no ensaio, expresso em newtons (N);

d – é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

l – é o comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

#### 4.3.12. Ensaio com Protótipo de Mini Paredes

Procurou-se realizar os ensaios em protótipos simulando o uso real do material em meio ambiente, por esse motivo apenas os traços de 1:3 (T1) e 1:0,5:3 (T3).

Durante os ensaios em laboratório foi possível observar similaridade nos resultados das famílias com substituição de 5% e 10 % das argamassas com traço



para paredes externas e também foi possível observar que existe uma certa dificuldade para utilizar o material com substituição de 60%. Usando esses resultados foram escolhidas as subfamílias que seriam utilizadas nos protótipos. Sendo assim, foram utilizadas apenas 3 subfamílias (10%, 20% e 40%) além dos traços padrões (0% de substituição). Para que fosse possível uma análise mínima de variação do comportamento foi executado 24 protótipos de alvenaria para que 3 paredes recebessem os mesmo traços e substituição de argamassa. Figura 24

Figura 24 - Assentamento da alvenaria nas argamassadeiras plásticas



Fonte: Autora, 2022.

Foi utilizada a metodologia proposta por Kurz, Brandelli, Paliga e Torres (2018) com adaptações. Para a construção da alvenaria foram utilizados tijolos furados de 9x19x29 e as juntas de 1 cm, desta forma os protótipos ficaram com dimensões 80 x 50 cm, Figura 25 (A). Os tijolos foram assentados e chapiscados com argamassa de traço 1:3, mudando apenas a relação água/cimento, todos os protótipos já foram assentados e chapiscados no próprio local da realização dos ensaios. Essa etapa do trabalho ocorreu no dia 24/04/2022, Figura 25 (B). Considerando o tempo mínimo de cura do chapisco de 3 dias, a etapa seguinte só pode ser executada no dia 27/04/2022.

Figura 25 - Protótipos assentados (A) e chapiscados (B)



Fonte: Autora, 2022.

O reboco foi realizado de forma manual para que a espessura estivesse entre 3 e 4 centímetros, sarrafeado e desempenado para que fosse mantida a superfície lisa e pudesse ser realizado os ensaios de umidade e arrancamento, Figura 26 (B). Antes do preparo da argamassa foi separado e pesado todos os materiais no laboratório e dividido em sacos para facilitar a execução no dia, conforme a Figura 26 (A).

Figura 26 - Materiais utilizados na execução do reboco (A) e os protótipos rebocados (B)



Fonte: Autora, 2022.

#### 4.3.12.1. Absorção por Capilaridade em Mini Paredes

Os protótipos foram deixados expostos em ambiente externo, onde foi deixado as duas faces de maior área voltada para o norte e o sul da residência. Todas as alvenarias foram executadas já dentro de caixas argamassadeiras de PVC que permitiam deixar a base na água com uma lâmina d'água de 15 cm de forma permanente, sendo possível aferir e observar a absorção por capilaridade dos protótipos. Para que fosse possível o monitoramento do comportamento das argamassas aplicadas nas paredes, foi utilizado o medidor de umidade digital Stanley (Figura 27).

Figura 27 - Processo de aferição da umidade



Fonte: Autora, 2022.

Para que fosse feita as aferições foi marcado nas duas faces de cada protótipo linhas demarcando as alturas de 50, 40, 30, 20 e 10 cm acima do nível da água, onde diariamente era verificada a umidade em cada altura marcada (Figura 28).



Figura 28 - Processo de demarcação das alturas para aferição da umidade



Fonte: Autora, 2022.

Foi feita essa análise durante 30 dias para que fosse possível verificar a variação da umidade em dias de sol e chuva (Figura 29).

Figura 29 - Ensaio sendo realizados em momentos de chuva e sol para avaliar as variações de umidade



Fonte: Autora, 2022.

#### 4.3.12.2. Ensaio de Resistência de Aderência

O ensaio de resistência de aderência foi realizado conforme a NBR 13528 (ABNT, 2019), essa norma ela é dividida em 3 partes e elas foram consultadas para poder realizar os ensaios. Com a finalização das aferições diárias para verificar a umidade, foi retirada toda a água das caixas para manter as paredes dos protótipos secas, com isso foi aguardado 10 dias para que toda umidade provocada pela água colocada nas caixas evaporasse.

Com isso foi dado início aos procedimentos para realização do ensaio, conforme a norma orienta o primeiro passo é verificar a distribuição dos corpos de prova, apesar da NBR 13528 solicitar que sejam realizadas no mínimo 12 amostras de mesma característica, foram realizadas 3 amostras por parede, ou seja, 9 amostras por traço realizado, isso foi devido a indisponibilidade dos recursos materiais da empresa que doou o ensaio. Após a definição da localização e distribuição dos corpos de prova que seriam testados, foi utilizada uma furadeira com serra copo acoplada para que fosse possível realizar os cortes conforme o item 7 da norma determina (Figura 30).

Figura 30 - Realização da marcação e furos dos protótipos



Fonte: Autora, 2022.



Com a finalização desse processo é possível realizar a colagem das pastilhas que serviram de apoio para que o gancho do equipamento que realizou o arrancamento pudesse ser acoplado. Essa colagem foi realizada com cola epóxi, foi aguardado 12 horas para que fosse dado início ao processo de arrancamento (Figura 31).

Figura 31 - Processo de colagem dos ganchos



Fonte: Autora, 2022.

Para o arrancamento foi utilizado o equipamento devidamente aferido conforme a norma, ele foi mantido no eixo para que a carga fosse aplicada de forma ortogonal ao plano, para que não fosse utilizado esforço diferente do que estava sendo analisado (Figura 32).

Figura 32 - Ensaio de arrancamento



Fonte: Autora, 2022.

Para os resultados foi utilizada a equação 14 que é fornecida pela norma NBR 13528.

$$R_a = \frac{F}{A} \quad (14)$$

Onde:

$R_a$  – é a resistência de aderência à tração ao substrato, expressa em megapascal (Mpa)

$F$  – é a força de ruptura, expressa em newtons (N);

$A$  – é área do corpo de prova, expressa em milímetros quadrados (mm<sup>2</sup>).

Já para que fosse possível realizar a análise das resistências que são utilizadas hoje como requisitos mínimos de argamassas de revestimento padrão foi utilizada a NBR 13749 (ABNT, 2013), nela consta os valores de referência conforme o Quadro 7.

Quadro 7 - Limites de resistência de aderência à tração (Ra) da NBR 13749

Local		Acabamento	Ra (Mpa)
Parede	Interna	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,20$
		Cerâmica ou laminado	$\geq 0,30$
	Externa	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,30$
		Cerâmica	$\geq 0,30$
Teto			$\geq 0,20$

Fonte: NBR 13749:2013 (Adaptada pela autora).



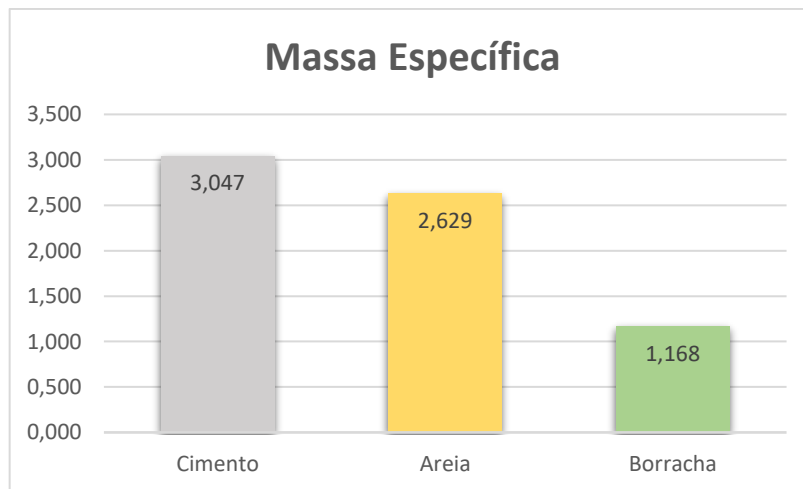
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Caracterização Dos Materiais

#### 5.1.1. Massa específica dos materiais

Na Figura 33 é possível observar o gráfico com as médias obtidas através dos ensaios de massa específica. O cimento representa o maior valor de massa específica com  $3,047 \text{ g/cm}^3$  das argamassas. Já os agregados têm a areia com  $2,629 \text{ g/cm}^3$  e a borracha com  $1,168 \text{ g/cm}^3$ . Os resultados encontrados estão condizentes com a literatura, onde estudos observaram massa específica do cimento de  $2,98 \text{ g/cm}^3$  (GIRARDI, 2016), areia natural de  $2,70 \text{ g/cm}^3$  (GIRARDI, 2016) e borracha de  $1,21 \text{ g/cm}^3$  (FERREIRA, 2009).

Figura 33 - Gráfico da Massa Específica dos Materiais.



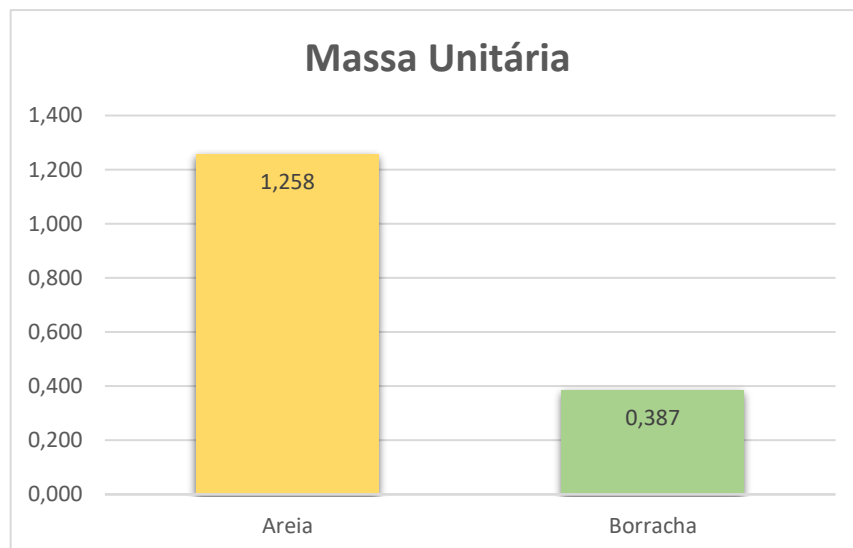
Fonte: Autora, 2023.

Pode-se inferir que a borracha, por ter uma massa específica menor que a areia em cerca de 55,57%, conforme haja a substituição da areia pela borracha, a densidade final da argamassa diminuiu conforme o aumento do percentual de substituição, tornando um composto mais leve do que os tradicionais utilizados no mercado.

### 5.1.2. Massa unitária dos materiais

Como a massa unitária dos materiais são normalmente determinada para calcular o índice de volume de vazios no material, é possível observar na Figura 34, o gráfico relativo as médias das massas unitárias obtidos através dos ensaios, sendo possível observar que os valores obtidos para areia e borracha são de  $1,258 \text{ g/cm}^3$  e  $0,387 \text{ g/cm}^3$  respectivamente. Conforme os resultados de pesquisa obtidos por Ferreira (2009), existe uma grande semelhança nos valores obtidos, quando foi obtida massa unitária da areia  $1,46 \text{ g/cm}^3$  e da borracha  $0,38 \text{ g/cm}^3$ .

Figura 34 - Gráfico da Massa Unitária dos Materiais.



Fonte: Autora, 2023.

Através da equação 04 é possível verificar que o volume de vazios da areia é de  $1,371 \text{ g/cm}^3$  e da borracha é de  $0,781 \text{ g/cm}^3$ , ou seja, a borracha utilizada para os experimentos tem 43,03% a menos de vazios, o que demonstra que o cimento precisará preencher menos vazios quando for realizadas as misturas da argamassa com substituição, gerando um material mais coeso.

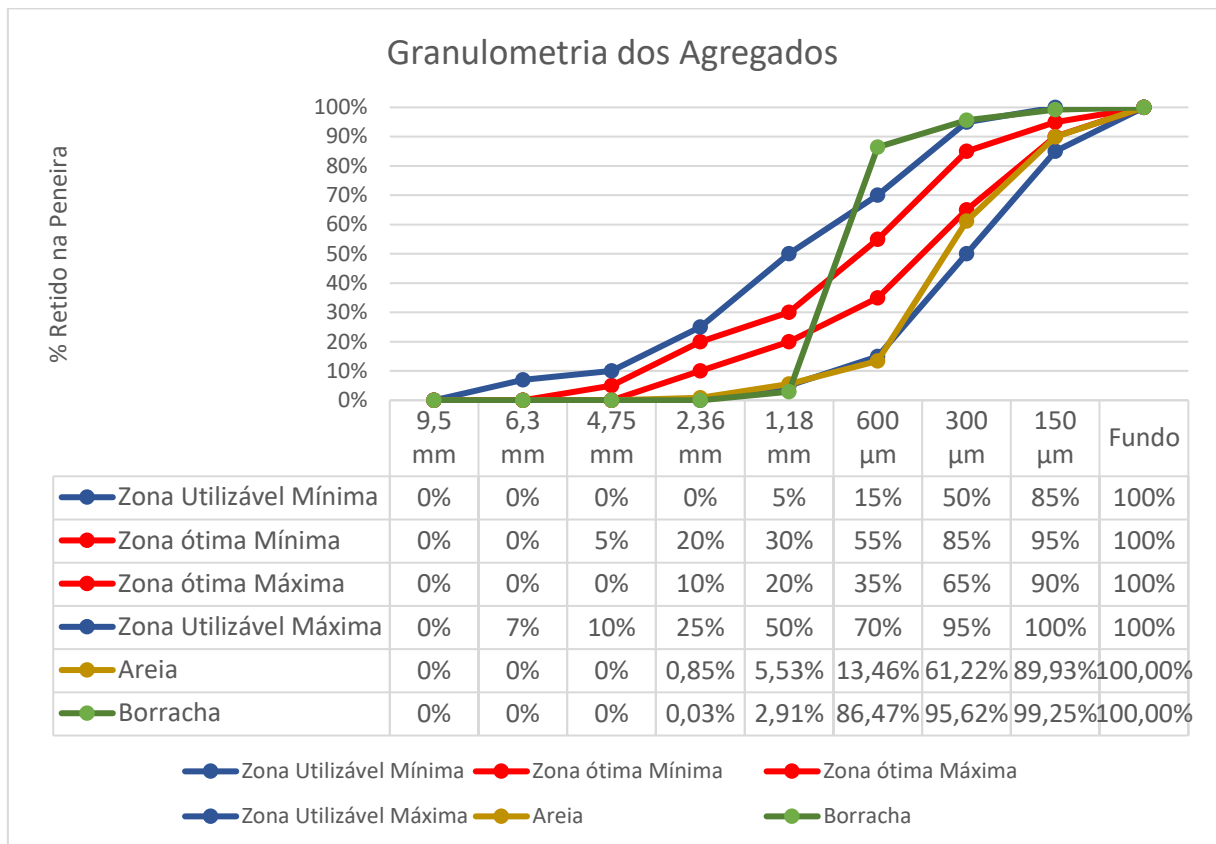
### 5.1.3. Granulometria

Na curva granulométrica, que pode ser observada na Figura 35, a média dos ensaios realizados nas amostras de areia, mostrou que elas estavam dentro da faixa de utilização, conforme a NBR 7211:2005. Já a borracha ficou fora da faixa utilizável e ótima na peneira 600  $\mu\text{m}$ , sendo que essa abertura, de acordo com a Norma NBR 7211, pode reter, no máximo, 70% das partículas, mas o resultado obtido foi de 86,47%, ficando retido um percentual de 16,47% a mais do que o orientado pela norma. Como a norma informa: “Podem ser utilizados como agregados miúdos para o concreto materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade”.

Desta forma, os estudos continuaram para verificar o que esse percentual de diferença poderia acarretar de mudança na propriedade da argamassa, já que com essa quantidade de material retido nas últimas peneiras determina uma quantidade maior de materiais finos na composição do material.

Além da distribuição granulométrica foi possível calcular através da equação 4 o módulo de finura da areia e da borracha que são respectivamente: 1,71 e 2,84.

Figura 35 - Gráfico da Granulometria dos Agregados



Fonte: Autora, 2023.

A análise dos resultados da borracha foi semelhante ao do autor Ferreira (2009), onde o material apresentou um formato irregular e ela apresentou uma amostra bastante heterogênea.

## 5.2. Ensaios Da Argamassa Em Estado Fresco

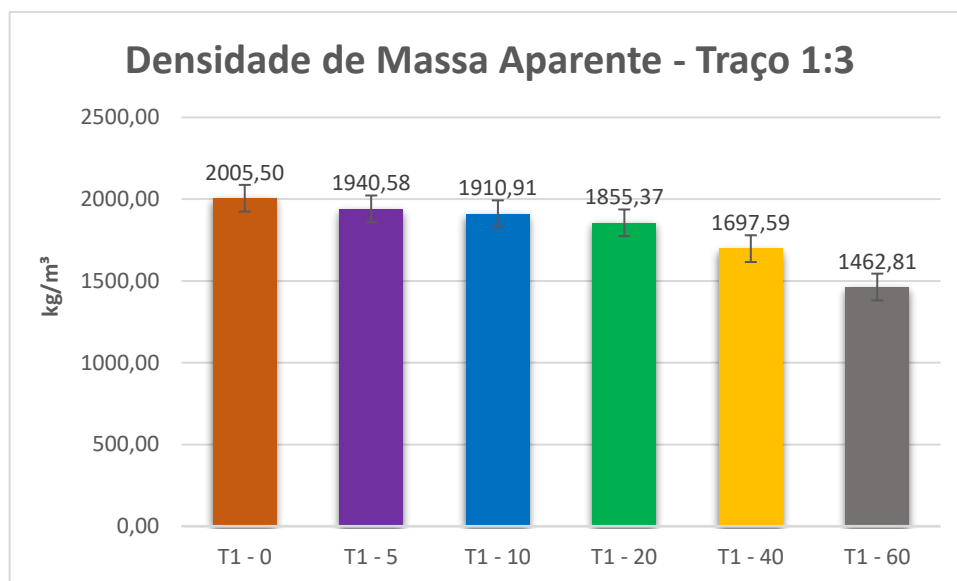
Durante o processo de moldagem dos corpos de prova foi observado algumas mudanças nas argamassas conforme a troca da areia pela borracha iria aumentando. No começo com os traços padrão sem substituição foi observado uma certa dificuldade para moldar os corpos de prova, durante o processo da mistura no equipamento foi observado que a argamassa ficava presa nas paredes do balde do misturador, mas essas características foram mudando nas misturas seguintes conforme o percentual de borracha aumentava, após a avaliação dos resultados nos ensaios foi possível entender o motivo dessas mudanças de características.

### 5.2.1. Densidade de massa aparente no estado fresco e o teor de ar incorporado

Verificando os gráficos contidos nas Figura 36 a Figura 39 é observado que conforme o percentual de borracha aumenta, o menor é a densidade da argamassa, isso acontece pelo fato de a massa específica da borracha ser menor que a da areia.

O traço de 1:3 com a substituição de 60% tem uma redução de 27,06% na densidade, o percentual de redução diminui conforme diminui o percentual de substituição, sendo 15,35%, 7,49%, 4,71% e 3,24%, para os traços com 40%, 20%, 10% e 5% de substituição respectivamente. Devido a essa diminuição as argamassas com o percentual de substituição de areia por borracha gerarão menos carga nas paredes quando for utilizada nos revestimentos. Conforme é possível observar no gráfico da Figura 36.

Figura 36 - Gráfico da Densidade de Massa Aparente no Estado Fresco no Traço 1:3

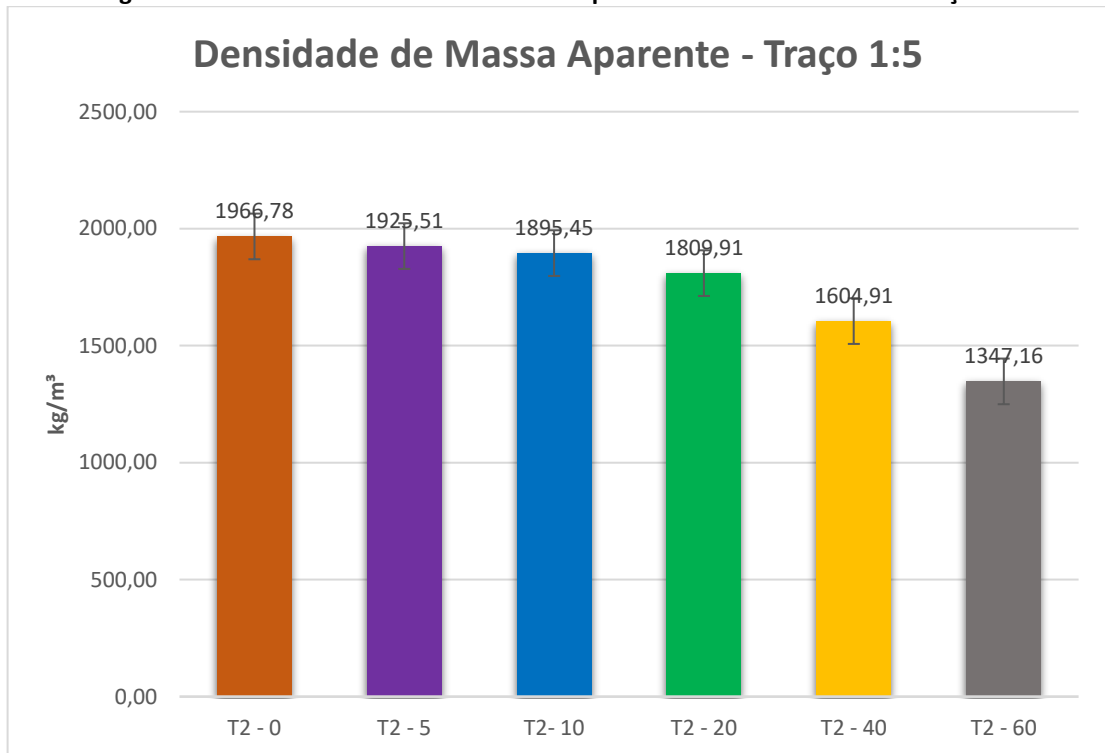


Fonte: Autora, 2023.

Com a análise do gráfico do traço 1:5 (Figura 37), o percentual de redução do traço com 60% de substituição ficou em 31,50% na densidade, o percentual de redução também diminui conforme o percentual de substituição é menor, sendo 18,40%, 7,98%, 3,63% e 2,10% para os traços com 40%, 20%, 10% e 5% de substituição respectivamente. Para o traço de 1:5 acontece o mesmo que no traço de

1:3, conforme a substituição acontece as argamassas gerarão menos carga nas paredes quando for utilizada no revestimento.

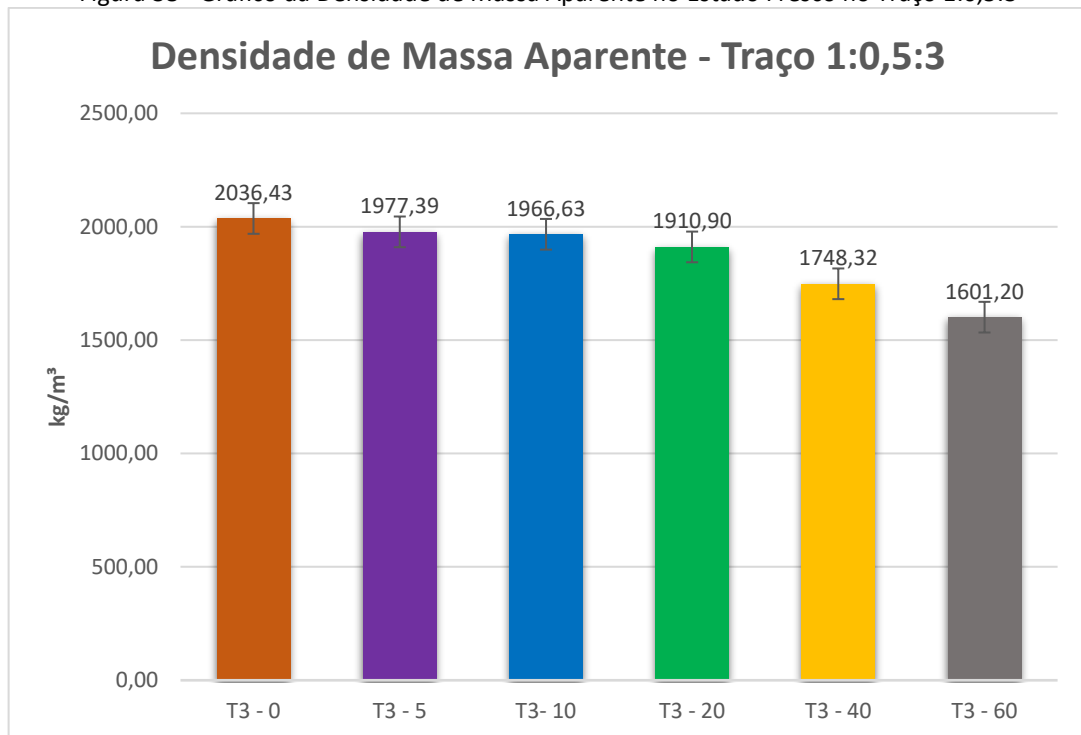
Figura 37 - Gráfico da Densidade de Massa Aparente no Estado Fresco no Traço 1:5



Fonte: Autora, 2023.

Para o traço de 1:0,5:3 é possível observar no gráfico da Figura 38 que o percentual de redução do traço com a substituição de 60% é de 21,37% na densidade, mas conforme os outros traços esse também tem uma redução menor conforme o percentual de substituição diminui, 14,15%, 6,16%, 3,43% e 2,90% para os traços com 40%, 20%, 10% e 5% de substituição respectivamente.

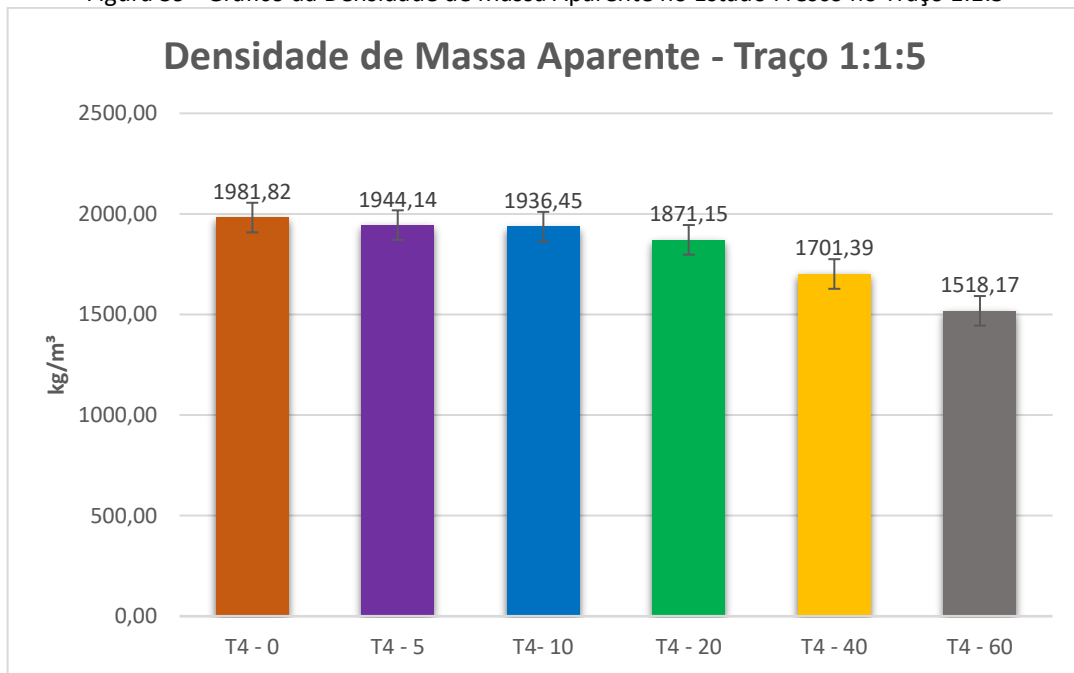
Figura 38 - Gráfico da Densidade de Massa Aparente no Estado Fresco no Traço 1:0,5:3



Fonte: Autora, 2023.

Conforme é possível observar no gráfico da Figura 39, já para o traço de 1:1:5 tem um percentual de redução da densidade de 23,40% com substituição de 60%. Quanto as demais substituições elas têm uma redução da densidade de 14,15%, 5,58%, 2,30% e 1,90% para os traços 40%, 20%, 10% e 5% de substituição respectivamente.

Figura 39 - Gráfico da Densidade de Massa Aparente no Estado Fresco no Traço 1:1:5



Fonte: Autora, 2023.

Os resultados de outros autores seguiram um padrão muito próximo, mesmo que alguns deles tenham aplicado a borracha em traços um pouco diferente, mas o resultado foi muito próximo, como por exemplo, os ensaios realizados por Sakamoto (2020) e Zainal et al. (2023). Que obteve como resultado densidades variando entre 1783,33 kg/m<sup>3</sup> e 1452,38 kg/m<sup>3</sup> conforme a variação da proporção de substituição de borracha e areia fina com grossa.

Outra questão observada após o ensaio foi sobre a classificação da densidade que é possível verificar no Quadro 8 que foi montado através das informações que estão contidas na NBR 13281. Apenas a subfamília de substituição de 60% no traço de 1:5 foi classificado como DF0, as outras ficaram distribuídas entre as outras classes. As principais argamassas industrializadas do mercado utilizam a classificação DF3 para sua fabricação, ou seja, as amostras de todos os traços com 5%, 10% e 20% de substituição se enquadram na classificação semelhante a que a indústria de argamassa utiliza para sua venda.



Quadro 8 - Classificação da Densidade de Massa Aparente pela NBR 13281

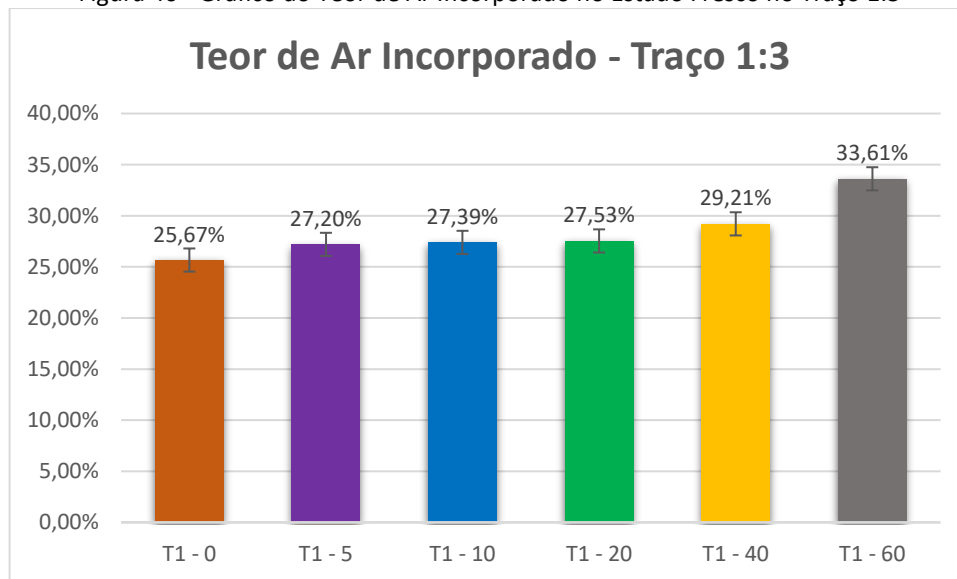
	Densidade de Massa Aparente	Classificação
<b>T1 - 0</b>	2005,50	DF4
<b>T1 - 5</b>	1940,58	DF3
<b>T1 - 10</b>	1910,91	DF3
<b>T1 - 20</b>	1855,37	DF3
<b>T1 - 40</b>	1697,59	DF2
<b>T1 - 60</b>	1462,81	DF1
<b>T2 - 0</b>	1966,78	DF3
<b>T2 - 5</b>	1925,51	DF3
<b>T2 - 10</b>	1895,45	DF3
<b>T2 - 20</b>	1809,91	DF3
<b>T2 - 40</b>	1604,91	DF2
<b>T2 - 60</b>	1347,16	DF0
<b>T3 - 0</b>	2036,43	DF4
<b>T3 - 5</b>	1977,39	DF3
<b>T3 - 10</b>	1966,63	DF3
<b>T3 - 20</b>	1910,90	DF3
<b>T3 - 40</b>	1748,32	DF2
<b>T3 - 60</b>	1601,20	DF2
<b>T4 - 0</b>	1981,82	DF3
<b>T4 - 5</b>	1944,14	DF3
<b>T4 - 10</b>	1936,45	DF3
<b>T4 - 20</b>	1871,15	DF3
<b>T4 - 40</b>	1701,39	DF2
<b>T4 - 60</b>	1518,17	DF1

Fonte: Autora, 2023.

Quando se observa os ensaios do teor de ar incorporado no estado fresco o comportamento das subfamílias de 60% é semelhante em todos os traços, ocorre um aumento significativo em comparação ao traço padrão, chegando no traço de 1:0,5:3 a ter um aumento de 10,15%. É importante observar o comportamento da argamassa em estado fresco em relação ao ar incorporado, pois apesar de ela contribuir na trabalhabilidade da argamassa, ela irá interferir de forma negativa nas resistências mecânica do produto final.

Quanto ao teor de ar incorporado, no traço 1:3, como pode ser observado na Figura 40, o aumento nas subfamílias de 5%, 10%, 20% e 40%, a variação entre as substituições ficaram muito próximo, sendo os valores de 1,53%, 1,72%, 1,86%, 3,54%, respectivamente. Ficando a maior diferença no percentual de troca de 60%, 7,94%. Vai ser possível verificar a interferência desses resultados de teor de ar incorporado quando for realizada a análise das resistências mecânica dessas argamassas.

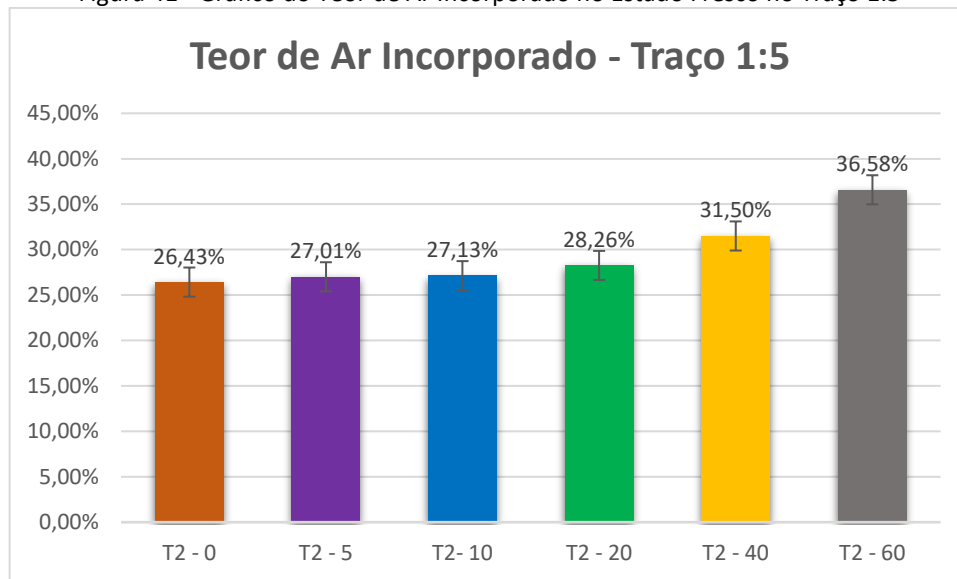
Figura 40 - Gráfico do Teor de Ar Incorporado no Estado Fresco no Traço 1:3



Fonte: Autora, 2023.

Para o traço de 1:5, o comportamento é bem semelhante ao traço de 1:3, tendo as subfamílias 5%, 10%, 20% e 40% um aumento pouca variação (0,58%, 0,70%, 1,83%, 5,07%) e a família de 60% com o maior aumento de todos os traços, 10,15%. (Figura 41)

Figura 41 - Gráfico do Teor de Ar Incorporado no Estado Fresco no Traço 1:5



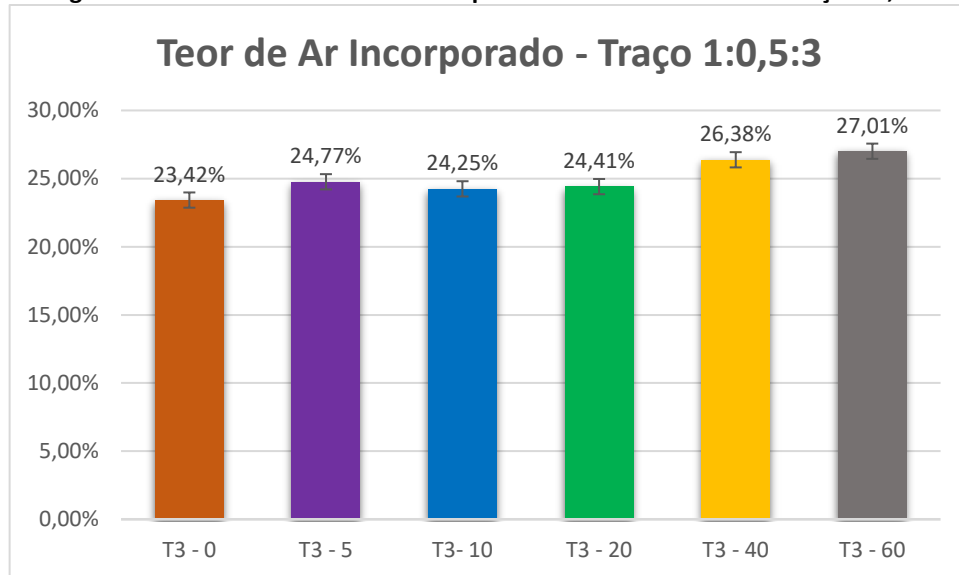
Fonte: Autora, 2023.

Os traços com a incorporação da cal na argamassa passam a ter um comportamento um pouco diferente, pois não há um aumento do teor de ar incorporado crescente a cada subfamília, na subfamília de 5% é verificado que existe um aumento maior que o da subfamília dos 10%.

O traço de 1:0,5:3 tem um aumento de 1,35%, 0,83%, 0,99%, 2,96%, 3,59%, para as subfamílias de 5%, 10%, 20%, 40% e 60%, respectivamente. Analisando os percentuais de aumento entre as mesmas subfamílias dos traços 1:3 e 1:0,5:3 é possível notar que existe uma diminuição da diferença de cada um deles. Na subfamília de 5%, houve um aumento de 1,53% no traço sem cal e 1,35% no traço com cal, originando uma diminuição de 0,18% apenas com adição de cal no processo de fabricação da argamassa, e essa diminuição também é possível ser observada nas outras subfamílias, 0,89% (Subfamília 10%), 0,87% (Subfamília 20%), 0,58% (Subfamília 40%), 4,39% (Subfamília 60%), ou seja, na subfamília houve uma redução de mais de 55% (Figura 42).

Nos dois traços (1:3 e 1:5) a subfamília de substituição de 60% tiveram características bem próximas, exatamente pelo fato de que o percentual maior de borracha aumentou a distribuição de bolhas nas misturas, exatamente devido ao motivo de que as partículas de borracha tendem a se distribuir de maneira uniforme na mistura da argamassa.

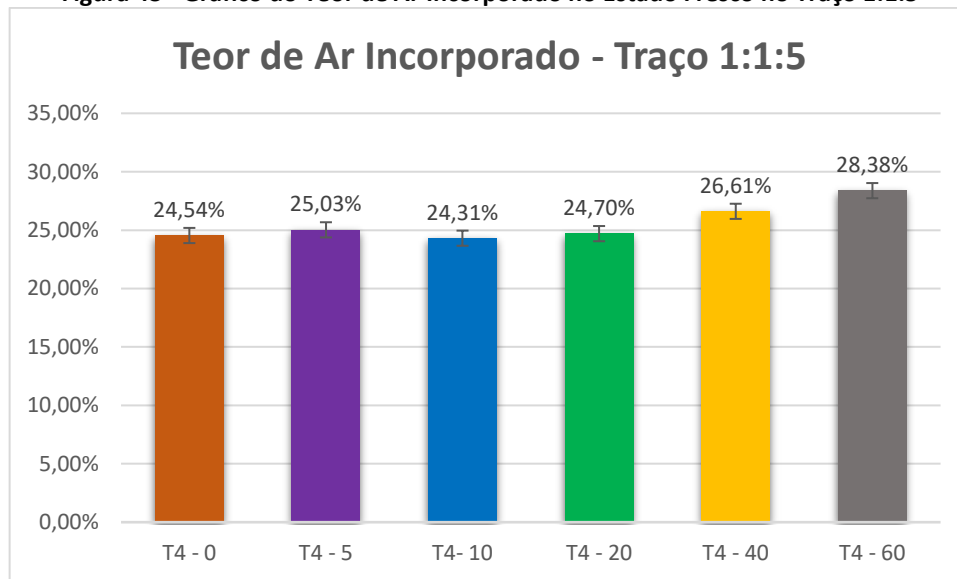
**Figura 42 - Gráfico do Teor de Ar Incorporado no Estado Fresco no Traço 1:0,5:3**



Fonte: Autora, 2023.

Já para o traço 1:1:5 é observado, conforme a Figura 43, uma semelhança com o traço 1:0,5:3, ocorre um aumento um pouco maior na subfamília de 5% em comparação a subfamília de 10%, mas existe uma diferença na subfamília 10% quanto a todos os outros traços, pois existe uma diminuição de ar incorporado em comparação ao traço padrão, no valor de 0,23%, quanto as outras subfamílias, todas elas obtiveram um aumento de: 0,49%, 0,16%, 2,07%, 3,84%, para as subfamílias 5%, 20%, 40% e 60%. Isso é devido a inclusão da cal na mistura, pois ela ajuda na trabalhabilidade do material e com isso diminui a formação de ar incorporado nas argamassas.

**Figura 43 - Gráfico do Teor de Ar Incorporado no Estado Fresco no Traço 1:1:5**



Fonte: Autora, 2023.

Fazendo a comparação dos traços com e sem cal na argamassa, também ocorre uma diminuição dos percentuais de ar incorporado nos traços 1:5 e 1:1:5: 0,09% (Subfamília 5%), 0,93% (Subfamília 10%), 1,67% (Subfamília 20%), 3,00% (Subfamília 40%), 6,31% (Subfamília 60%). A subfamília de 60% chega a uma redução de 62% apenas com a utilização da cal.

Foi possível observar características semelhantes nos resultados da autora Gomes (2020) ao encontrado nos ensaios de teor de ar incorporado nas argamassas, onde ocorre um aumento no percentual conforme aumenta a quantidade de areia substituída pelas borrachas.

A classificação por conta do teor de ar incorporado das argamassas produzidas é possível observar através do Quadro 9, todas as argamassas obtiveram resultados maiores de 18% e com isso a classificação delas é identificada como C. Como não é mais sugerido pela norma a classificação da argamassa quanto a classificação do Teor de Ar Incorporado da Argamassa, o mercado não tem mais argamassas industrializadas utilizando esse critério, mas devido a importância da análise da pesquisa quanto a essas classificações, foi realizada a análise conforme estabelecido pela norma anterior. E foi possível verificar que os resultados obtidos que ao menos não houve modificação da classificação do traço padrão para nenhum dos percentuais de substituição foi realizado.

Quadro 9 - Classificação do Teor de Ar Incorporado da Argamassa pela NBR 13281

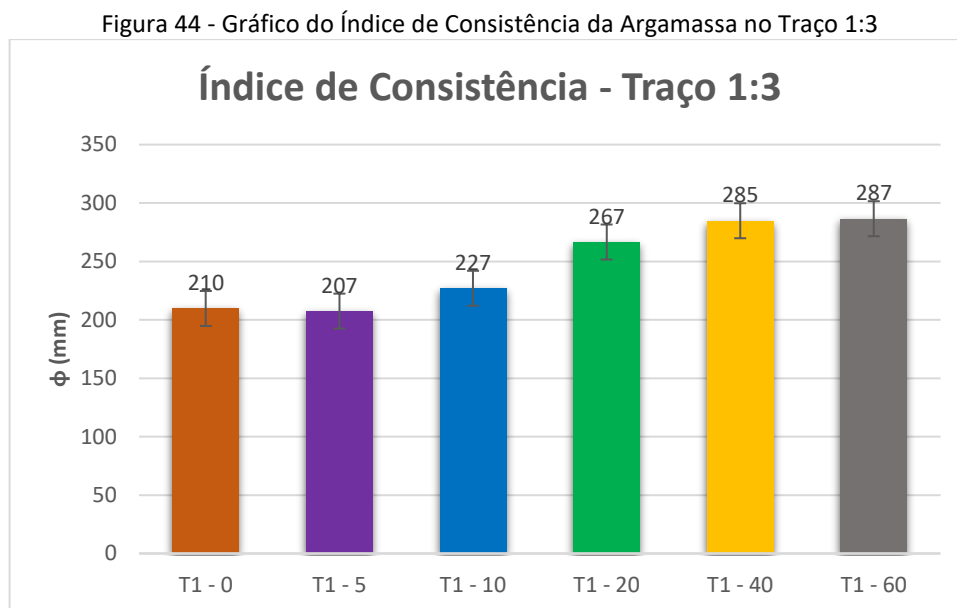
	Teor de Ar Incorporado	Classificação
<b>T1 - 0</b>	25,67%	C
<b>T1 - 5</b>	27,20%	C
<b>T1 - 10</b>	27,39%	C
<b>T1 - 20</b>	27,53%	C
<b>T1 - 40</b>	29,21%	C
<b>T1 - 60</b>	33,61%	C
<b>T2 - 0</b>	26,43%	C
<b>T2 - 5</b>	27,01%	C
<b>T2 - 10</b>	27,13%	C
<b>T2 - 20</b>	28,26%	C
<b>T2 - 40</b>	31,50%	C
<b>T2 - 60</b>	36,58%	C
<b>T3 - 0</b>	23,42%	C
<b>T3 - 5</b>	24,77%	C
<b>T3 - 10</b>	24,25%	C
<b>T3 - 20</b>	24,41%	C
<b>T3 - 40</b>	26,38%	C
<b>T3 - 60</b>	27,01%	C
<b>T4 - 0</b>	24,54%	C
<b>T4 - 5</b>	25,03%	C
<b>T4 - 10</b>	24,31%	C
<b>T4 - 20</b>	24,70%	C
<b>T4 - 40</b>	26,61%	C
<b>T4 - 60</b>	28,38%	C

Fonte: Autora, 2023.

### 5.2.2. Índice de consistência

Analisando as Figura 44 a Figura 47, é possível observar os gráficos dos índices de consistências obtidos nos traços de 1:3, 1:5, 1:0,5:3 e 1:1:5 durante os ensaios. Em todos eles a substituição com 60% provocou um aumento no índice de consistência, isso acontece devido a adição de borracha mudar as características do sistema de partículas na argamassa, isso interfere na viscosidade e coesão das misturas, afetando assim na consistência do material.

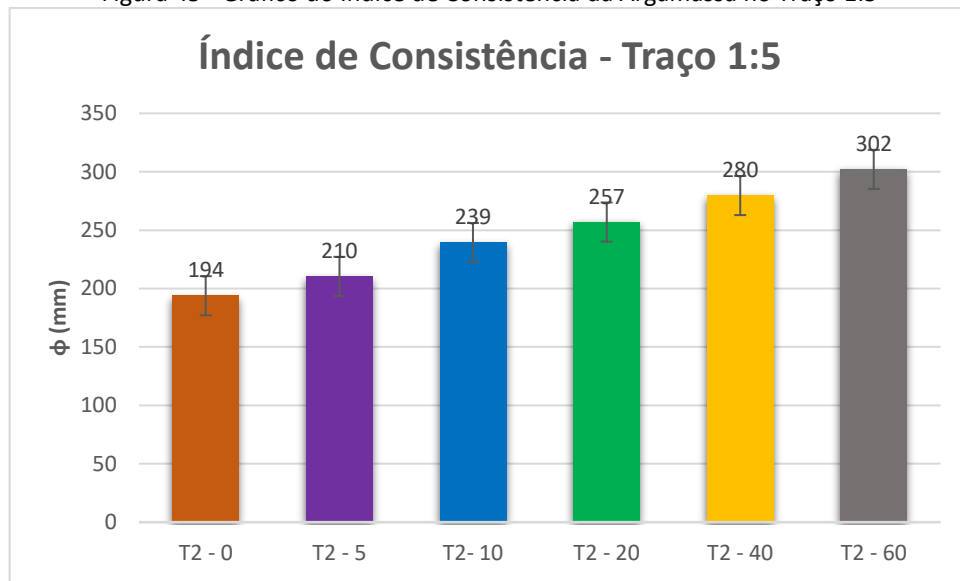
Na Figura 44 é possível observar os resultados obtidos nos ensaios de consistência para o traço de 1:3. Foi possível verificar uma pequena diminuição no índice de consistência da argamassa (1,43%) quando 5% da areia é substituída pela borracha. Essa redução foi possível observar em outros estudos com a utilização de percentuais mais baixos de substituição, como nos ensaios dos autores Conova et al (2015) e Slaiffer (2019) que obtiveram um percentual de 1,57% (Substituição de 6%) e 11,60% (5% de substituição) de redução da trabalhabilidade, respectivamente. Isso ocorreu devido ao fato da trabalhabilidade está relacionada de forma inversamente proporcional ao módulo de finura do agregado. Nos outros percentuais de substituição ocorreu um aumento no índice de consistência, sendo de 8,10%, 27,14%, 35,71% e 36,67%, para as subfamílias, 10%, 20%, 40% e 60%, respectivamente.



Fonte: Autora, 2023.

No traço de 1:5, que é possível observar na Figura 45, os índices crescem conforme se aumenta a quantidade de borracha que foram substituídas. O percentual de aumento para as substituições de 5%, 10%, 20%, 40% e 60%, foram de: 8,25%, 23,20%, 32,47%, 44,33% e 55,67%.

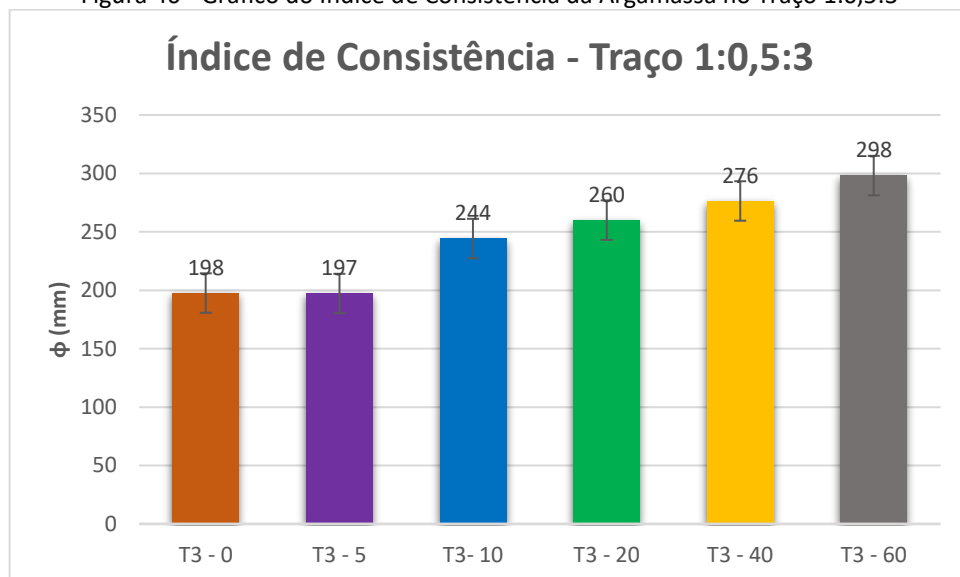
Figura 45 - Gráfico do Índice de Consistência da Argamassa no Traço 1:5



Fonte: Autora, 2023.

Da mesma forma como aconteceu no traço sem a cal, quando utilizada a cal para o traço de 1:0,5:3 foi observado uma pequena diminuição no índice de consistência na substituição de 5% da areia pela borracha, no valor de 0,51%, já para os outros percentuais de substituição ocorre, da mesma forma que o traço sem cal, um acréscimo de: 23,23%, 31,31%, 39,39% e 50,51% (Figura 46).

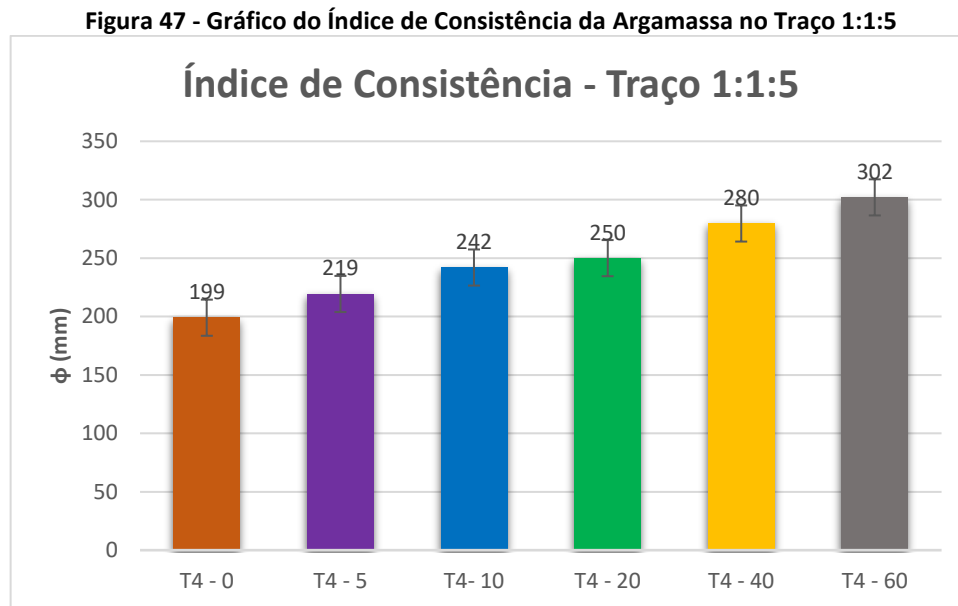
Figura 46 - Gráfico do Índice de Consistência da Argamassa no Traço 1:0,5:3



Fonte: Autora, 2023.



Para o traço de 1:1:5 o comportamento é muito semelhante ao da mesma composição sem a cal, ocorre um aumento gradativo conforme se aumenta a quantidade de borracha que é colocada na mistura da argamassa. Para as subfamílias de 5%, 10%, 20%, 40% e 60% o aumento foi de: 10,05%, 21,61%, 25,63%, 40,70% e 51,76% (Figura 47).



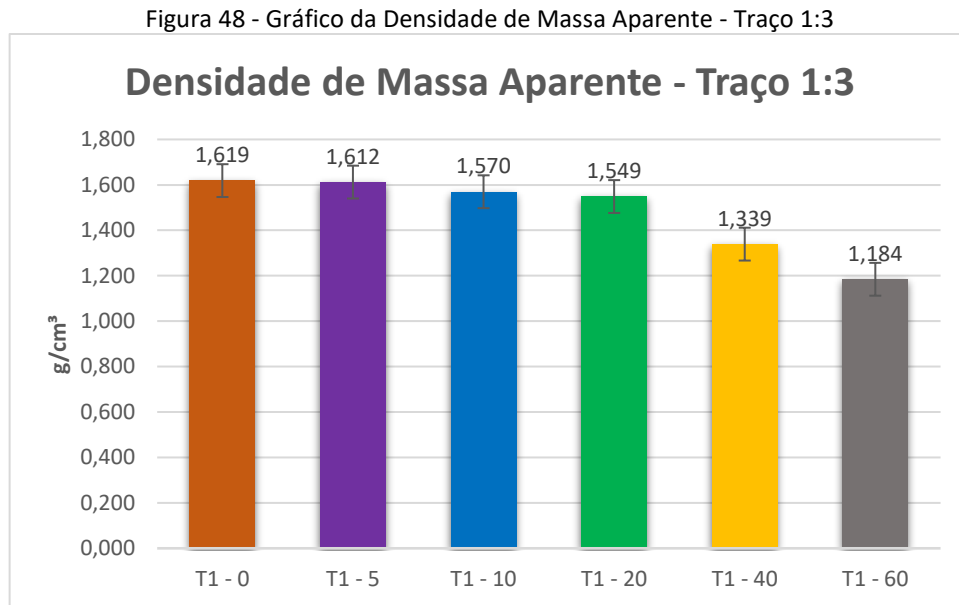
Esse aumento, que aconteceu na maioria dos casos das substituições, pode ser devido ao fato de que conforme se aumenta o percentual de borracha existe uma maior incorporação de ar. Com isso, a trabalhabilidade aumenta, o que faz o índice de consistência também sofrer um aumento. Os resultados contribuem com estudos de Meneguini (2003) e Ferreira (2009) que também observaram o mesmo comportamento do índice de consistência.

### 5.3. Ensaio Da Argamassa Em Estado Endurecido

#### 5.3.1. Densidade de massa aparente no estado endurecido

Nos ensaios da densidade de massa aparente para o traço de 1:3 sem a utilização de cal houve uma diminuição dos resultados conforme o aumento de

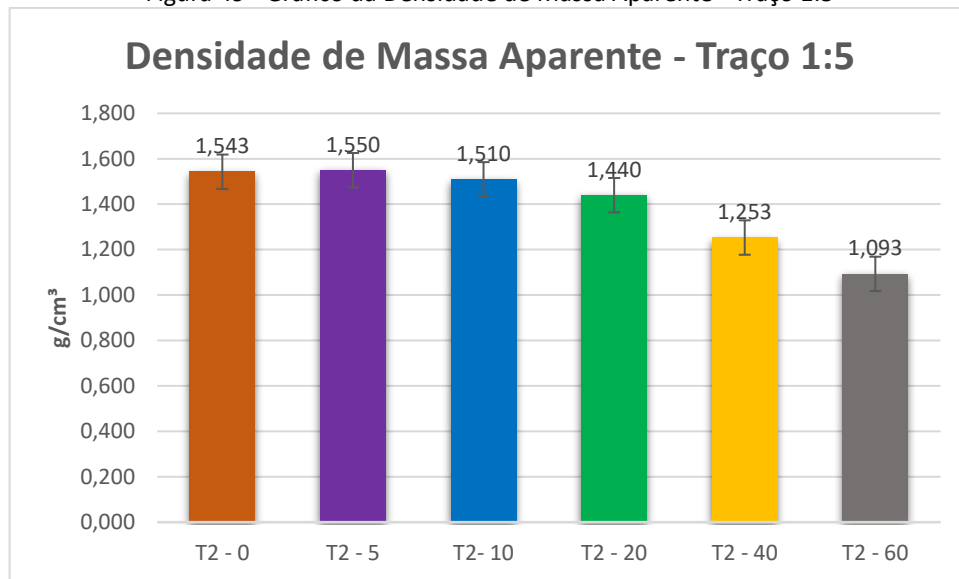
percentual da borracha incorporada à argamassa, sendo o maior valor de 26,87% de diminuição no traço com substituição de 60%. Já nas outras substituições os percentuais de redução foram de 0,43%, 3,03%, 4,32% e 17,29% para as substituições de 5%, 10%, 20% e 40%, respectivamente (Figura 48).



Fonte: Autora, 2023.

No traço de 1:5 sem cal houve um comportamento um diferente quanto à substituição de 5%, pois houve um aumento de 0,45% na média das densidades. Quanto as outras substituições o comportamento foi semelhante ao traço de 1:3, houve diminuição da densidade chegando a um valor de 29,16% no traço com maior substituição (60%), quanto às outras substituições o percentual de redução ficou em: 2,14%, 6,68% 18,79% para as substituições de 10%, 20% e 40% (Figura 49).

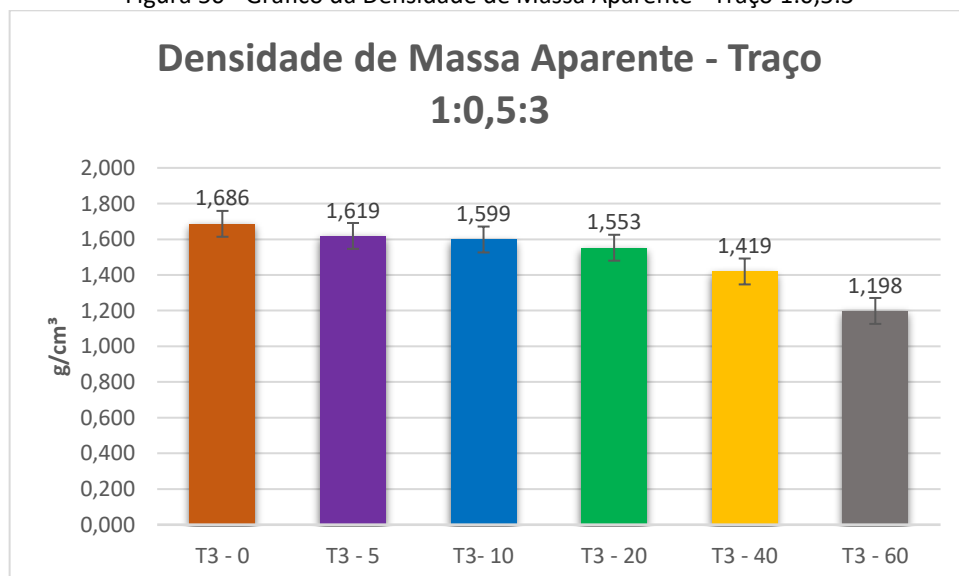
Figura 49 - Gráfico da Densidade de Massa Aparente - Traço 1:5



Fonte: Autora, 2023.

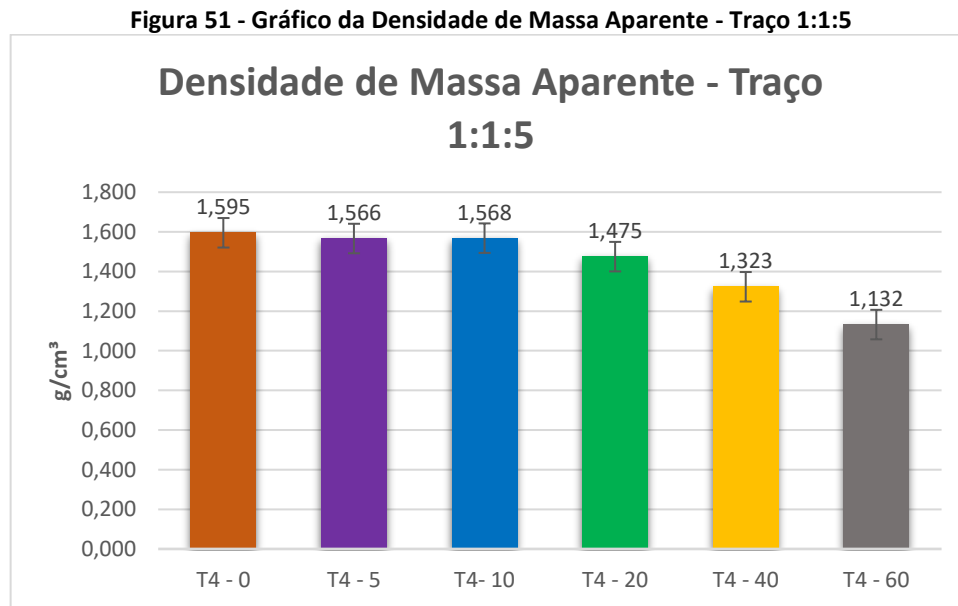
Com a inclusão da cal na argamassa a redução percentualmente aumenta em comparação ao mesmo traço sem argamassa. O percentual médio de redução no traço de 1:0,5:3 e com 60% de substituição de areia pela borracha ficou em 28,94%, ou seja, a redução aumentou em 2,07%. O mesmo aconteceu nas subfamílias de substituição das borrachas na argamassa, sendo encontrado: 3,97%, 5,16%, 7,89% e 15,84%, nas subfamílias de 5%, 10%, 20% e 40% de substituição respectivamente (Figura 50).

Figura 50 - Gráfico da Densidade de Massa Aparente - Traço 1:0,5:3



Fonte: Autora, 2023.

Já no traço de 1:1:5 não foi observado uma diferença tão grande no comportamento da argamassa em relação ao mesmo traço sem a utilização da cal. Foi encontrado um percentual médio de redução de: 1,82%, 1,69%, 7,52%, 17,05% e 29,03%, para as substituições de 5%, 10%, 20%, 40% e 60%, respectivamente (Figura 51).

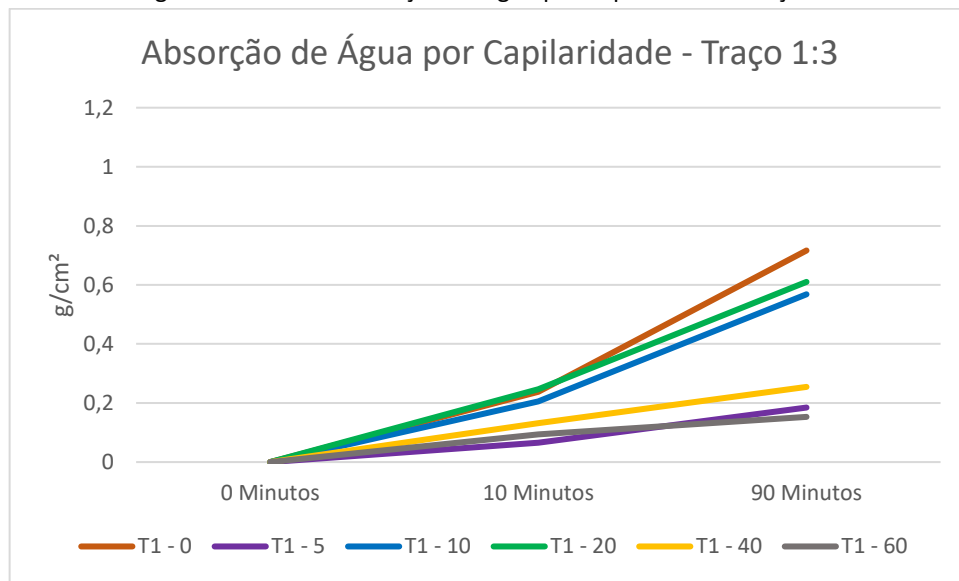


Fonte: Autora, 2023.

### 5.3.2. Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade, no traço de 1:3, foi menor nos primeiros 10 minutos, na subfamília com 5% de substituição. Nos demais tratamentos, com exceção da substituição de 20%, todas as outros ficaram abaixo do traço padrão (T1 – 0). Com o passar do tempo, transcorrido 90 minutos de ensaio, o traço padrão passou a ter a maior absorção de água, com isso houve uma redução de absorção de 75%, 21%, 15%, 64% e 79%, para as subfamílias com substituição de 5%, 10%, 20%, 40% e 60% (Figura 52).

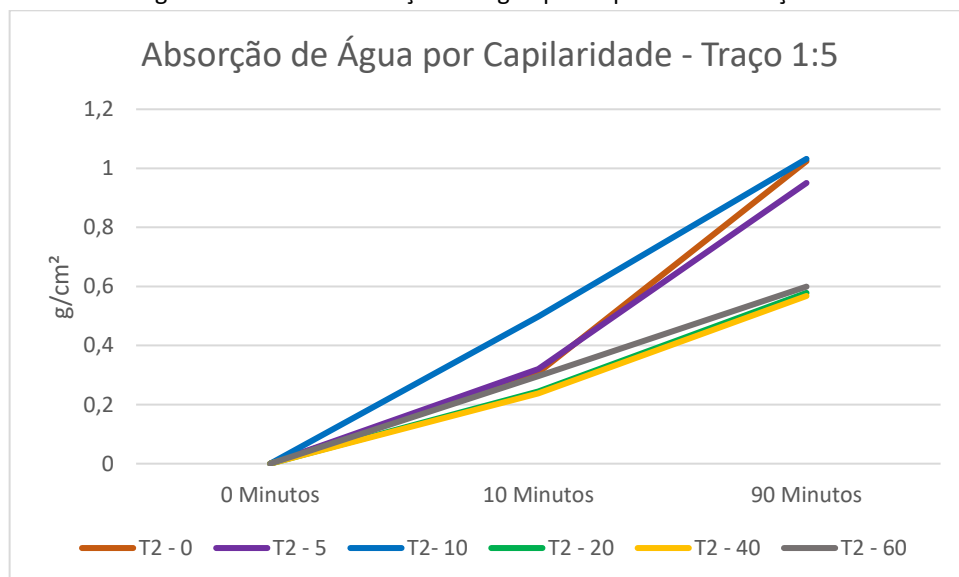
Figura 52 - Gráfico Absorção de Água por Capilaridade - Traço 1:3



Fonte: Autora,2023.

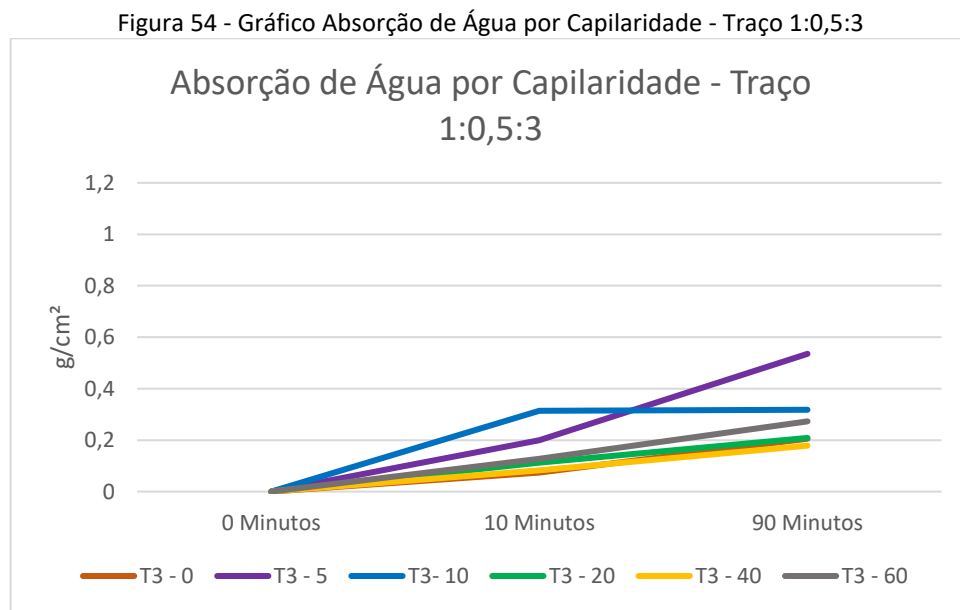
No traço de 1:5 foi possível observar um percentual de redução de 7%, 44%, 45% e 41% para as subfamílias com substituição de 5%, 20%, 40% e 60%, já a subfamília de 10% houve um pequeno aumento de 1% na massa de água absorvida. (Figura 53).

Figura 53 - Gráfico Absorção de Água por Capilaridade - Traço 1:5



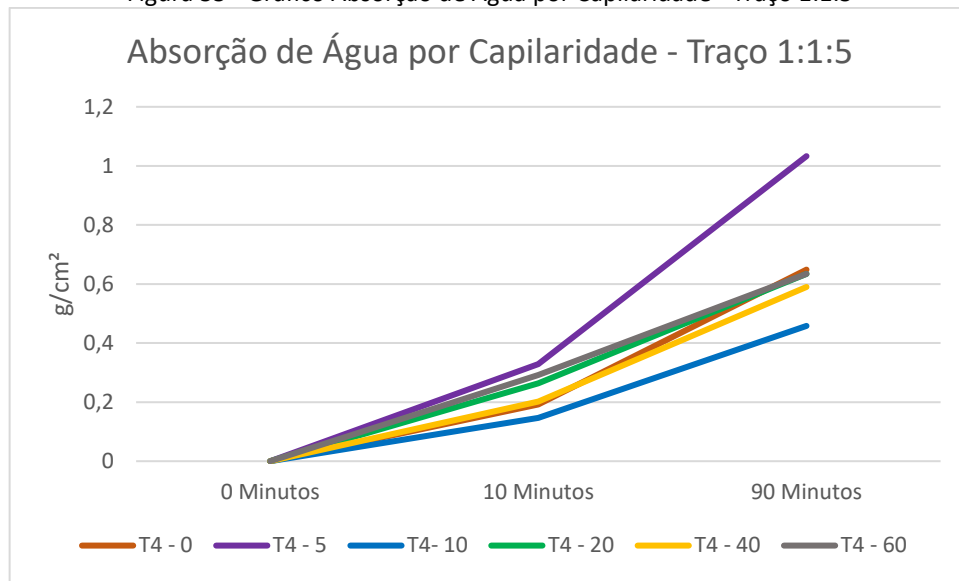
Fonte: Autora, 2023.

O ensaio para o traço de 1:0,5:3 a taxa de absorção muda em relação ao mesmo traço sem cal. Nesse traço a subfamília padrão obteve um resultado bem melhor que algumas subfamílias, como por exemplo a de 5% e 10%. Já para as outras subfamílias os resultados ficaram muito próximo e aos 90 minutos a subfamília de 40% ainda ficou abaixo da absorção do traço padrão, sendo assim apenas a subfamília de 40% houve redução (13%), já as outras subfamília obtiveram um aumento na absorção de 161%, 55%, 2% e 33%, para as subfamílias de 5%, 10%, 20% e 60% (Figura 54).



Para o traço de 1:1:5 o pior resultado da absorção da água foi da subfamília de 5%, com um aumento de 59% da absorção, já o melhor resultado ficou com a subfamília de 10% de substituição com uma redução de 29% (Figura 55).

Figura 55 - Gráfico Absorção de Água por Capilaridade - Traço 1:1:5



Fonte: Autora, 2023.

O aumento de capilaridade nas argamassas significa que elas têm uma maior capacidade de absorver e transportar água através de seus poros capilares e isso pode causar uma maior absorção de umidade, migração de sais dissolvidos, redução da resistência mecânica, influência nas propriedades estéticas e aumentam a proliferação de microrganismo.

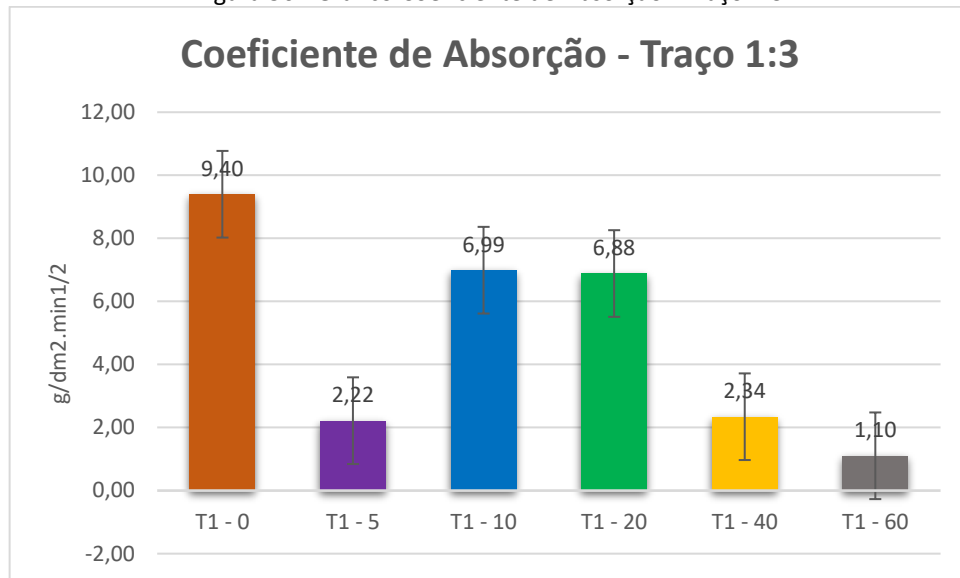
Segundo os resultados encontrados pelos autores Pagoto et al (2022) as substituições ocasionaram uma redução na absorção de água quando se utilizava a borracha na argamassa, mais uma vez deixando os resultados obtidos durante os ensaios coerentes com o que já existe de estudos em outros traços.

O coeficiente de absorção é um outro parâmetro importante para analisar a absorção da água por capilaridade.

Como o coeficiente de absorção é calculado através da diferença da massa de água que foi absorvida com 90 minutos e da massa que foi absorvida com 10 minutos, os resultados ficam muito próximos dos percentuais obtidos no ensaio de absorção. Então para o traço de 1:3 as subfamílias que obtiveram os melhores resultados foram as de 5% e 60% (Figura 56).

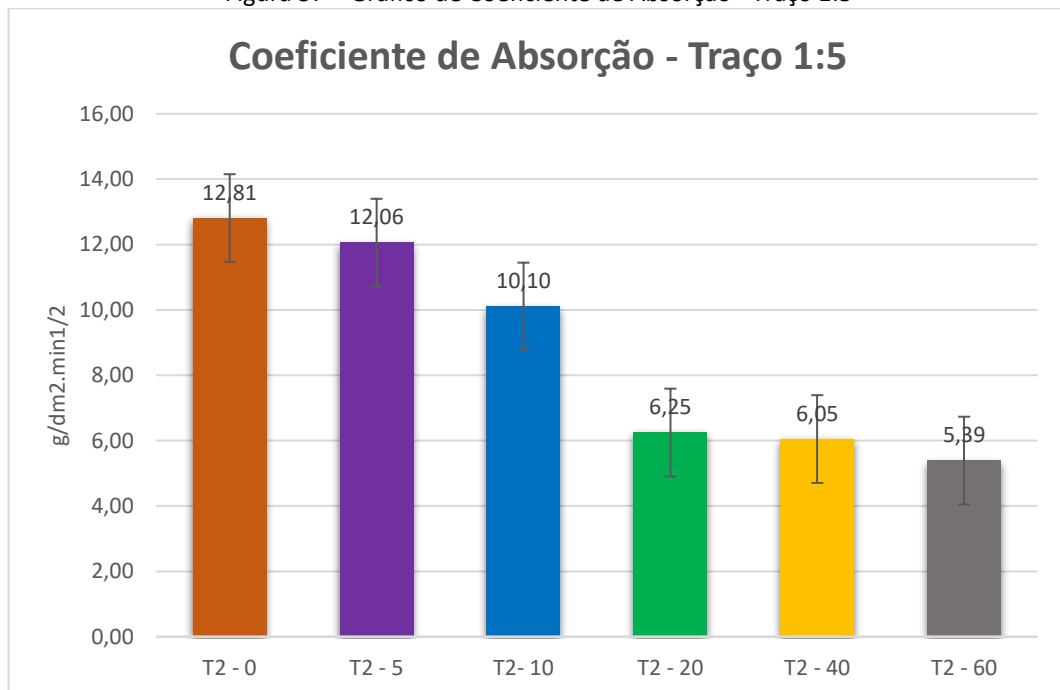
Já no traço de 1:5 existe um comportamento muito parecido das subfamílias de 20%, 40% e 60%, que acabaram ficando com coeficiente menores que as outras subfamílias, principalmente em relação ao traço padrão sem nenhuma substituição (Figura 57).

Figura 56 - Gráfico Coeficiente de Absorção - Traço 1:3



Fonte: Autora, 2023.

Figura 57 – Gráfico de Coeficiente de Absorção - Traço 1:5

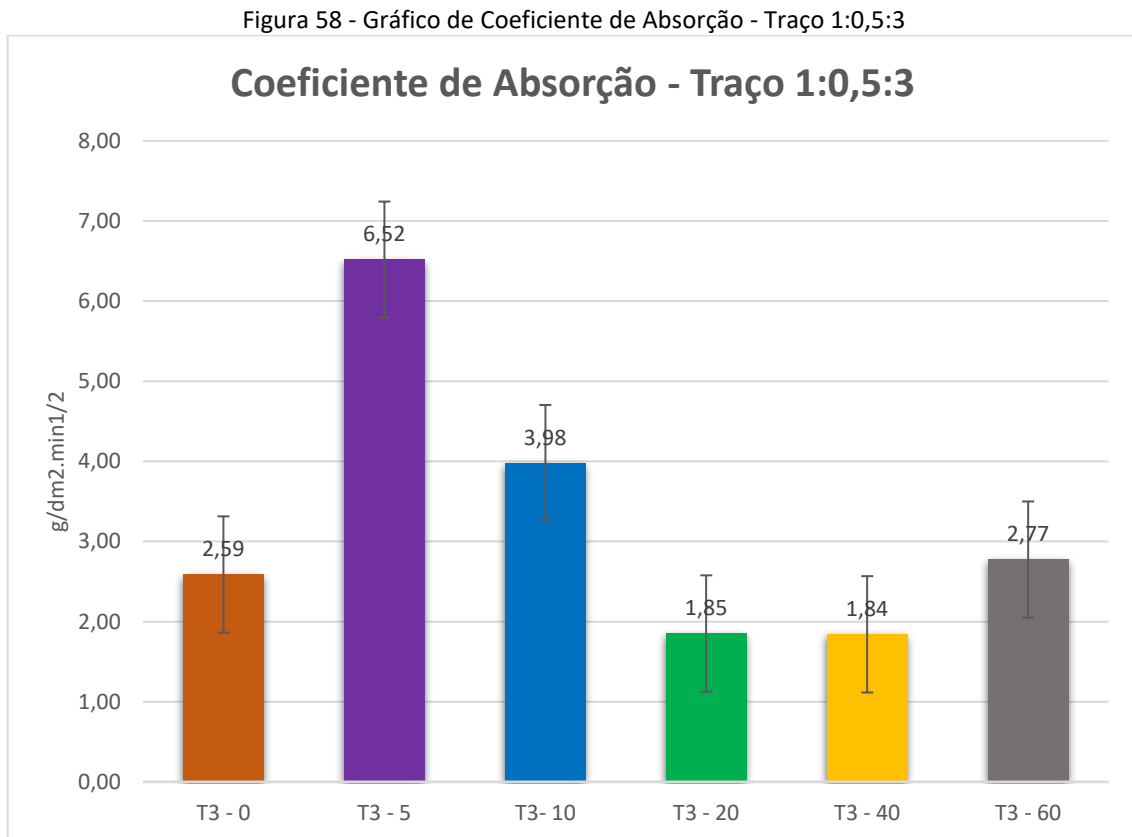


Fonte: Autora, 2023.

Com a colocação da cal na argamassa é possível observar mudanças, principalmente, em relação ao traço padrão. No traço de 1:0,5:3 o coeficiente de



absorção reduz em 72,44% no traço padrão em relação ao mesmo traço sem a utilização da cal. Já na subfamília de 5% existe um aumento bastante expressivo, em 65,95% (Figura 58).



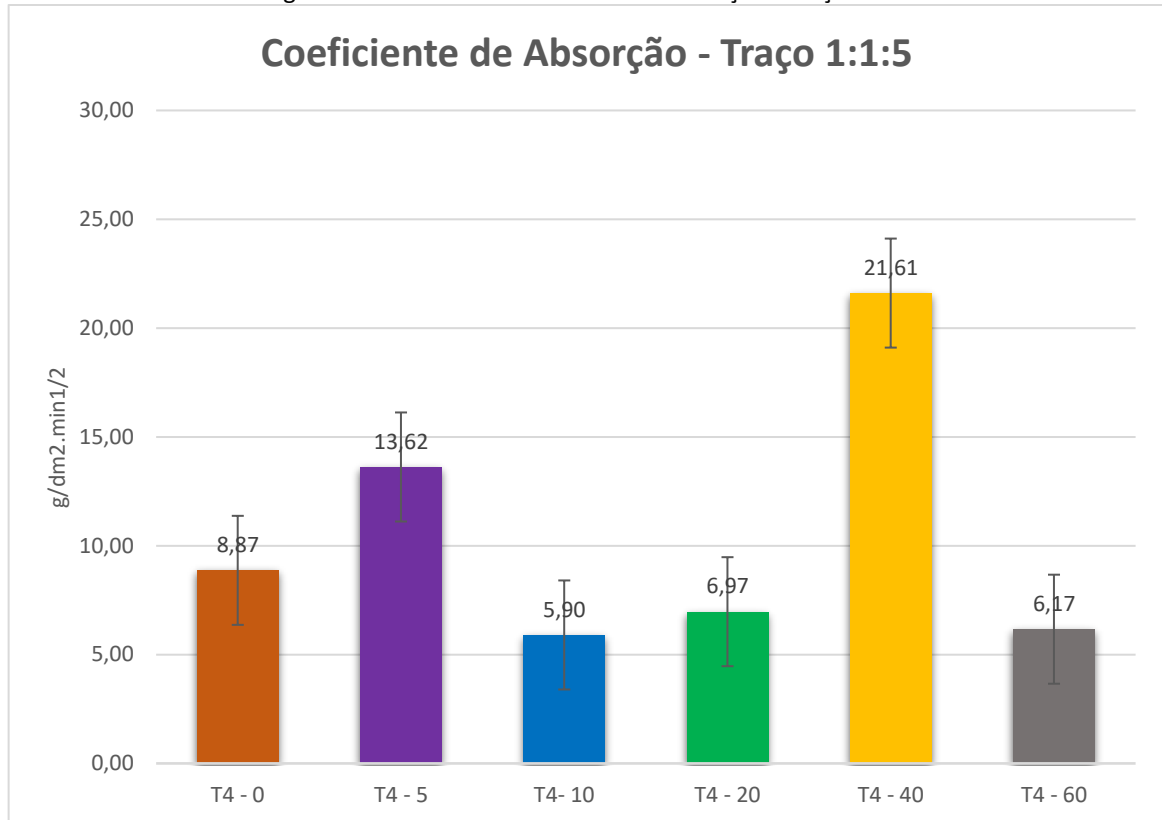
Fonte: Autora, 2023.

Por fim, no traço de 1:1:5 o comportamento das subfamílias fica muito próximo dos resultados no traço anterior com a cal. A subfamília de traço padrão ficou abaixo dos traços das subfamílias de 5% e 40%, já as subfamílias de 10%, 60% e 20% obtiveram resultados melhores que o traço padrão (Figura 59).

Analisando os resultados dos outros autores confrontando os resultados obtidos nesse estudo, foi possível observar uma diferença nos resultados, isso foi devido ao método utilizados pelos outros autores. Maneguini (2003) utilizou o tempo de absorção de 28 dias e Sakamoto (2020) utilizou 4320 minutos (3 dias). Para esse trabalho foi utilizado o padrão da norma, que estabelece tempo de absorção de 90 minutos, não sendo possível fazer uma relação direta. Mas observando o

comportamento, no geral, os resultados foram bem próximo, pois alguns traços deles obtiveram comportamentos semelhantes nos momentos iniciais.

Figura 59 - Gráfico de Coeficiente de Absorção - Traço 1:1:5



Fonte: Autora, 2023.

No Quadro 10 foi realizado para verificar a classificação da argamassa segundo o coeficiente de capilaridade da NBR 13281. As principais argamassas industrializadas do mercado utilizam a classificação C4 para sua fabricação, ou seja, as amostras dos traços 1:3 com 10% e 20% de substituição, 1:5 com 20%, 40% e 60% de substituição, 1:0,5:3 com 5% de substituição e 1:1:5 com 10%, 20%, 40% e 60%, são as amostras que se enquadram na classificação semelhante a que a indústria de argamassa utiliza para sua venda.

Quadro 10 – Classificação quanto a Capilaridade das Argamassas segundo a NBR 13281

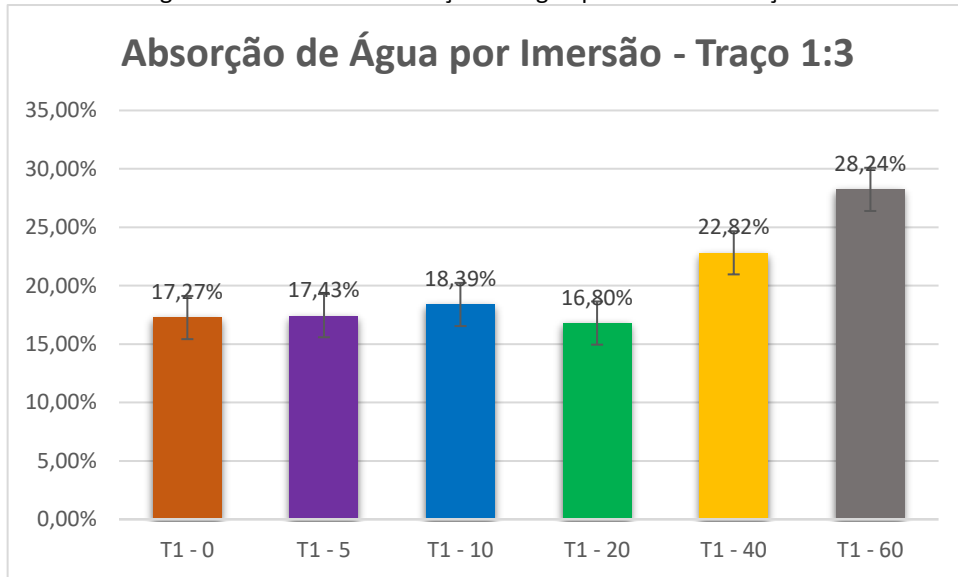
	<b>Coefficiente de Absorção</b>	<b>Classificação</b>
<b>T1 - 0</b>	9,40	C5
<b>T1 - 5</b>	2,22	C2
<b>T1 - 10</b>	6,99	C4
<b>T1 - 20</b>	6,88	C4
<b>T1 - 40</b>	2,34	C2
<b>T1 - 60</b>	1,10	C1
<b>T2 - 0</b>	12,81	C6
<b>T2 - 5</b>	12,06	C6
<b>T2 - 10</b>	10,10	C5
<b>T2 - 20</b>	6,25	C4
<b>T2 - 40</b>	6,05	C4
<b>T2 - 60</b>	5,39	C4
<b>T3 - 0</b>	2,59	C3
<b>T3 - 5</b>	6,52	C4
<b>T3 - 10</b>	3,98	C3
<b>T3 - 20</b>	1,85	C2
<b>T3 - 40</b>	1,84	C2
<b>T3 - 60</b>	2,77	C3
<b>T4 - 0</b>	8,87	C5
<b>T4 - 5</b>	13,62	C6
<b>T4 - 10</b>	5,90	C4
<b>T4 - 20</b>	6,97	C4
<b>T4 - 40</b>	6,74	C4
<b>T4 - 60</b>	6,17	C4

Fonte: Autora, 2023.

### 5.3.3. Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão mostra um comportamento muito próximo das subfamílias, ficando apenas a subfamília de 60% com o percentual muito maior que o traço padrão sem substituição, todas as outras ficam muito próxima (Figura 60).

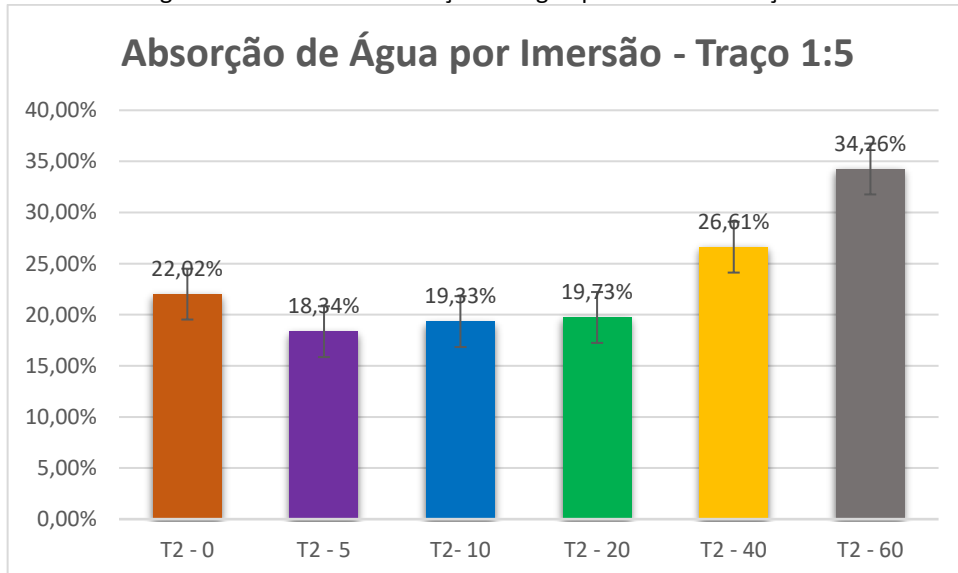
Figura 60 - Gráfico de Absorção de Água por Imersão - Traço 1:3



Fonte: Autora, 2023.

Semelhante ao traço de 1:3, no traço de 1:5 a única subfamília que se destaca de forma negativa quanto a diferença do percentual de absorção é a subfamília de 60%. Já as outras subfamílias ficaram muito próxima do traço padrão (Figura 61).

Figura 61 - Gráfico de Absorção de Água por Imersão - Traço 1:5

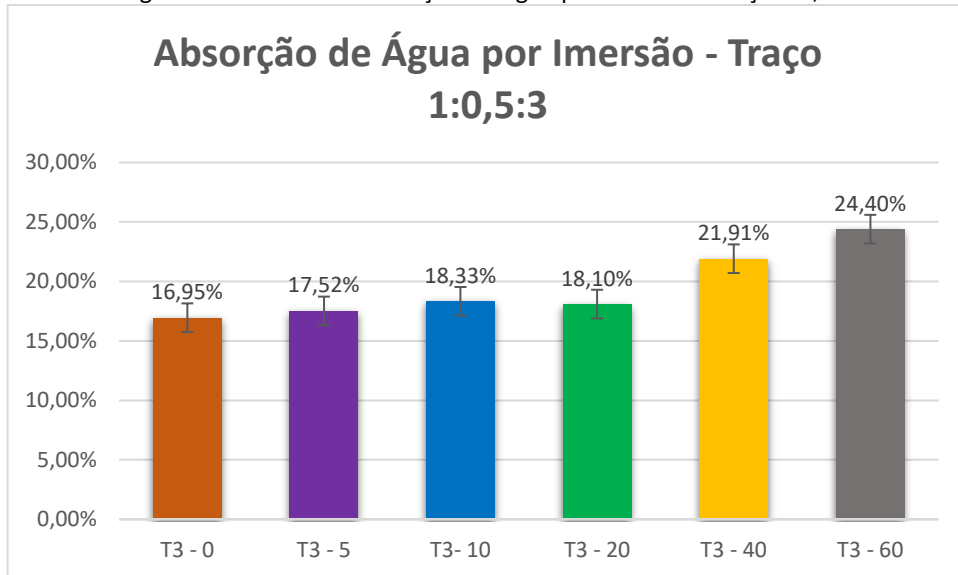


Fonte: Autora, 2023.

Os traços com uso da cal foram os traços que nenhum dos traços com substituição obteve um percentual de absorção menor que o traço padrão sem

substituição, apesar de no traço 1:0,5:3 as subfamílias com substituição terem ficado muito próximo do valor padrão (Figura 62).

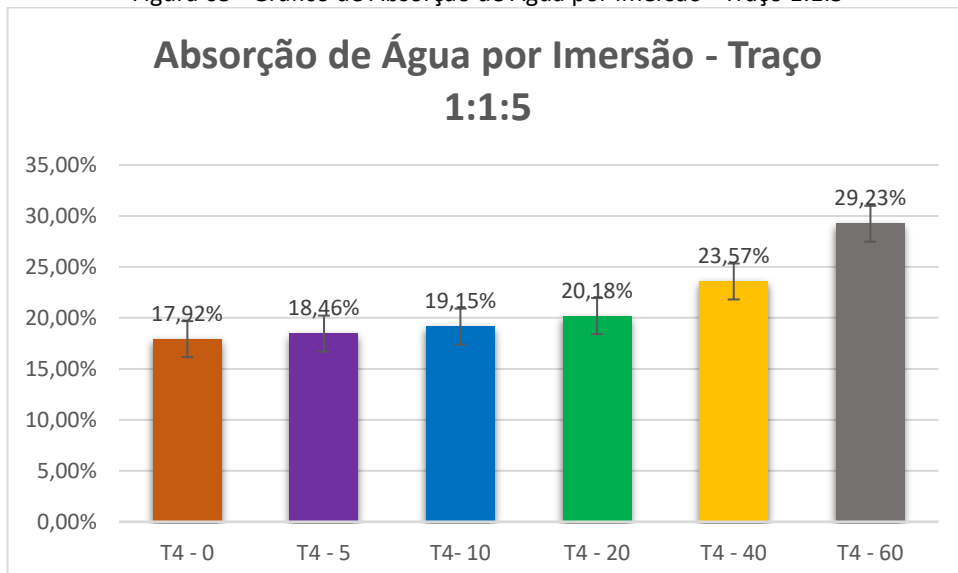
Figura 62 - Gráfico de Absorção de Água por Imersão - Traço 1:0,5:3



Fonte: Autora, 2023.

No traço de 1:1:5 é possível observar uma diferença grande entre o traço padrão sem substituição para a subfamília de 60%, chegando a 11,31% (Figura 63).

Figura 63 - Gráfico de Absorção de Água por Imersão - Traço 1:1:5



Fonte: Autora, 2023.

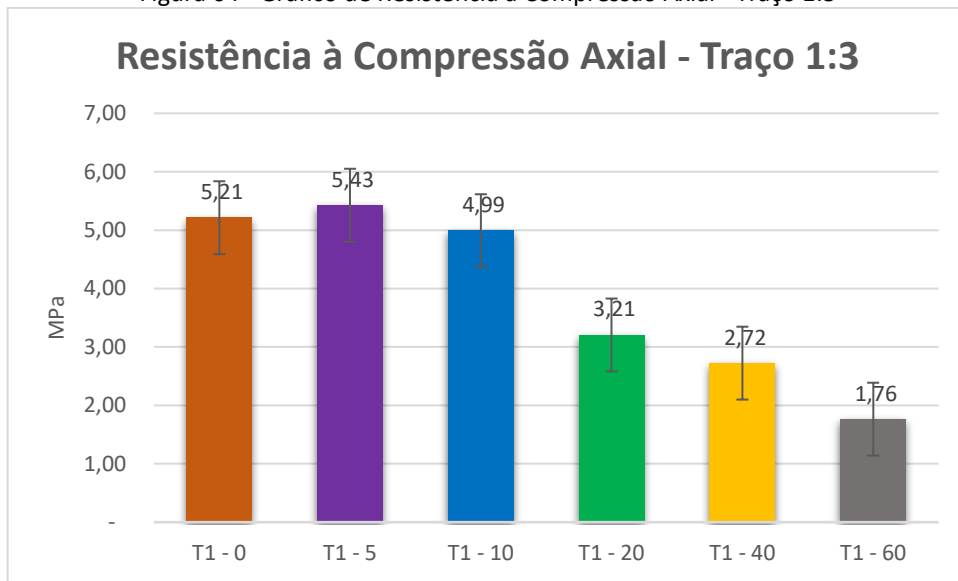
Foi utilizado como referência para comparação dos resultados desse ensaio foi o trabalho desenvolvido por Sakamoto (2020) e que utilizou também Pagoto (2018) para comparar os resultados e observando os resultados dos dois autores foi possível verificar que os valores obtidos nesses ensaios seguem o mesmo padrão que os dos outros autores. Os resultados apresentados por Sakamoto (2020) apresentaram uma variação de 13,26% a 14,49% e uma variação de 13,56 a 15,13% na de Pagoto (2018), ficando próximo dos que foram obtidos nesse trabalho, já que eles utilizaram apenas os traços com substituição de 10% e 20%.

#### 5.3.4. Resistência à compressão Axial

No ensaio de resistência a compressão axial, foi possível observar os seguintes resultados para o traço de 1:3: um aumento na resistência para a subfamília de 5% de substituição de 4,22%. O aumento da resistência obtido para substituição é importante, pois demonstra que mesmo com a colocação da borracha na composição da argamassa houve uma melhora em uma das suas principais características para utilização no dia a dia, deixando o compósito uma substância resistente para o propósito que ele é destinado.

já as outras subfamílias houve uma redução de 4,22%, 38,39%, 47,79% e 66,22% para as subfamílias de 10%, 20%, 40% e 60% de substituição de areia por borracha, respectivamente (Figura 64).

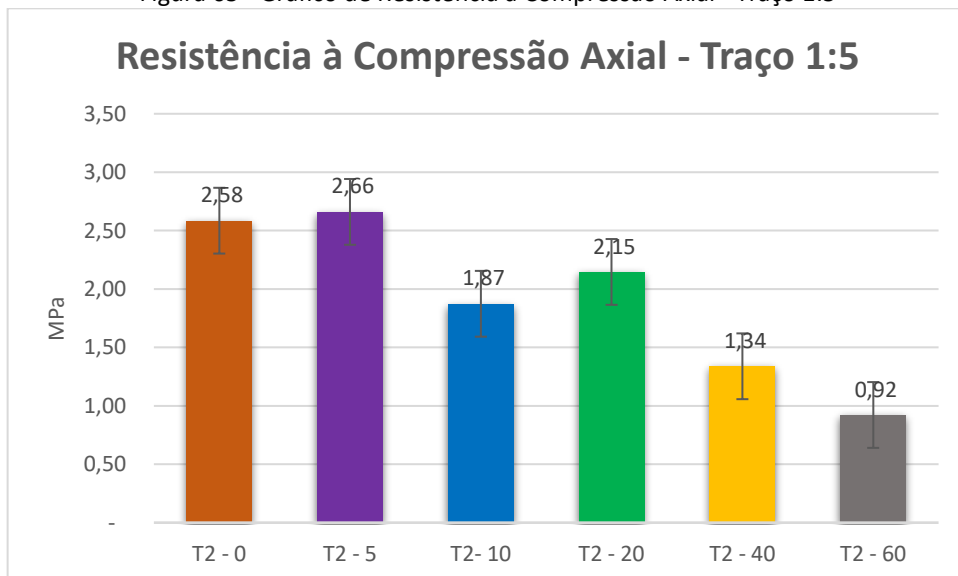
Figura 64 - Gráfico de Resistência à Compressão Axial - Traço 1:3



Fonte: Autora, 2023.

Para o traço de 1:5 o comportamento foi bem semelhante, foi observado algo semelhante na substituição da subfamília de 5% houve um pequeno aumento de 3,10%, esse dado é bastante valido para afirmação da importância da substituição da areia pela borracha. Nas outras substituições houve uma redução de 27,52%, 16,67%, 48,06% e 64,34% para as substituições de 10%, 20%, 40% e 60%, respectivamente (Figura 65).

Figura 65 - Gráfico de Resistência à Compressão Axial - Traço 1:5

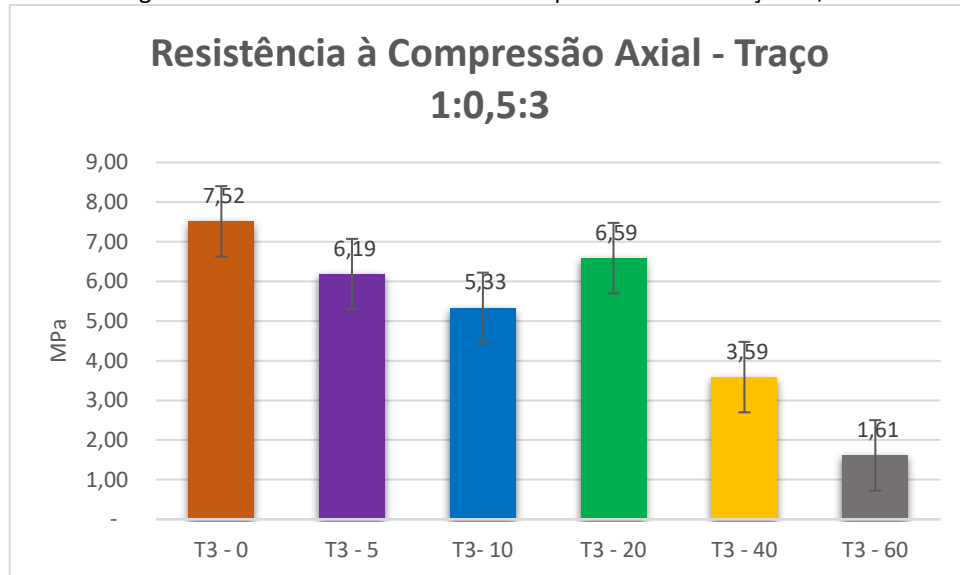


Fonte: Autora, 2023.

Já nos traços de 1:0,5: e 1:1:5 não houve nenhuma subfamília que houve aumento da resistência, todas elas ficaram abaixo da resistência do traço padrão,

sendo essa redução no percentual de 17,69%, 29,12%, 12,37%, 52,26% e 78,59%, nas substituições de 5%, 10%, 20%, 40% e 60%, respectivamente (Figura 66).

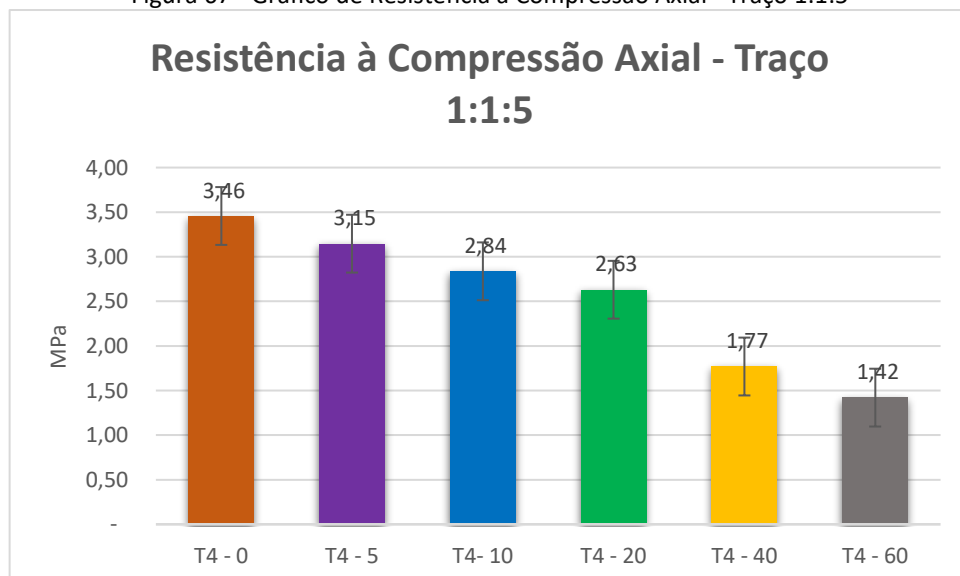
Figura 66 - Gráfico de Resistência à Compressão Axial - Traço 1:0,5:3



Fonte: Autora, 2023.

No traço de 1:1:5 foi encontrado o percentual de redução de: 8,96%, 17,92%, 23,99%, 48,84% e 58,96%, nas respectivas subfamílias de 5%, 10%, 20%, 40% e 60% (Figura 67).

Figura 67 - Gráfico de Resistência à Compressão Axial - Traço 1:1:5



Fonte: Autora, 2023.



A diminuição da resistência à compressão nas argamassas é devida principalmente pelo fato do aumento dos espaços vazios e porosidade, pois a adição de partículas de borracha costuma criar espaços vazios, esses espaços diminuem a densidade e proporcionam ponto de concentração de tensão, reduzindo assim a resistência. Além disso tem a flexibilidade da borracha que pode levar esse material a absorver mais deformações e tensões sob carga, em vez de transferir as tensões para a matriz do cimento e também a diminuição da resistência é devido a alteração da relação água/cimento, pois a adição de borracha influencia na hidratação e formação das ligações químicas que contribuem diretamente para resistência a compressão.

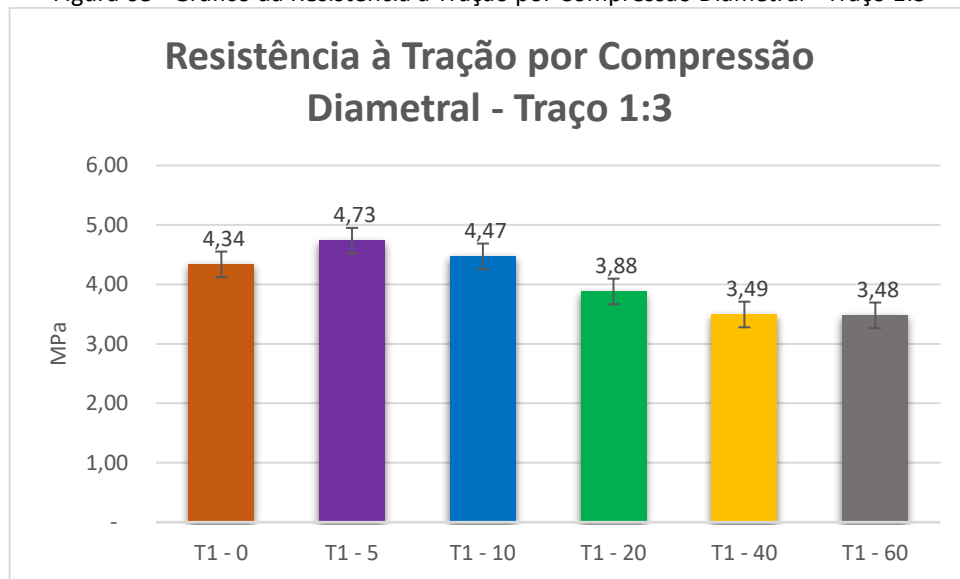
O comportamento das argamassas quanto a resistência a compressão axial dos ensaios realizados foi semelhante ao dos autores Zainal et al. (2023) onde foi observado uma redução de resistência conforme se aumenta o percentual de substituição.

#### 5.3.5. Resistência à tração por compressão diametral

A resistência a tração por compressão diametral, foi observado um comportamento semelhante ao da resistência a compressão axial, algumas poucas subfamílias tiveram aumento de resistência e todas as outras tiveram uma perda de resistência para os traços sem cal e apenas perda de resistência nos traços com cal.

Para o traço 1:3 foi observado um aumento de 8,99% e 3% para as subfamílias com substituição de 5% e 10%, já para as subfamílias de 20%, 40% e 60% foi verificado uma perda de 10,60%, 19,59% e 19,82%, respectivamente (Figura 68).

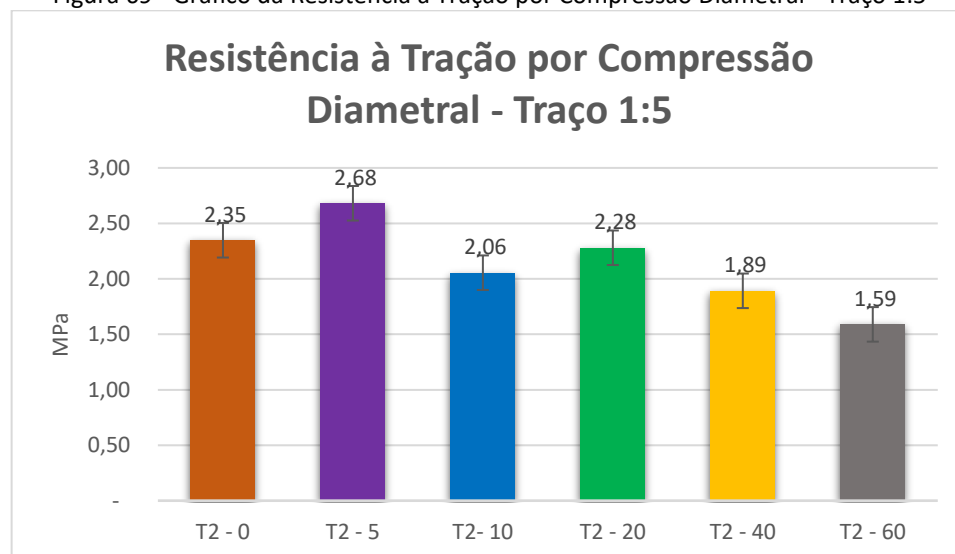
Figura 68 - Gráfico da Resistência à Tração por Compressão Diametral - Traço 1:3



Fonte: Autora, 2023.

No traço de 1:5 a única subfamília que obteve um aumento foi a de 5% de substituição, que o aumento foi de 14,04%, já nas substituições de 10%, 20%, 40% e 60% a perda foi de 12,34%, 2,98%, 19,57% e 32,34%, respectivamente (Figura 69).

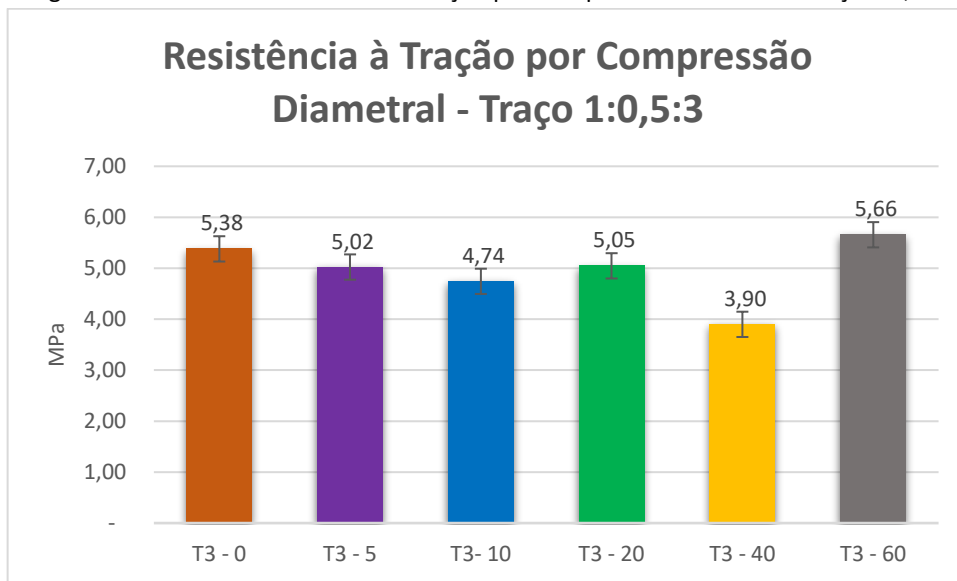
Figura 69 - Gráfico da Resistência à Tração por Compressão Diametral - Traço 1:5



Fonte: Autora, 2023.

Com a inclusão da cal foi possível verificar uma pequena mudança no comportamento da resistência, no traço de 1:0,5:3 houve uma perda nas substituições de 5%, 10%, 20% e 40% no valor de 6,69%, 11,90%, 6,13% e 27,51%, já na substituição de 60% da areia pela borracha houve um pequeno em relação ao traço padrão de 60% (Figura 70).

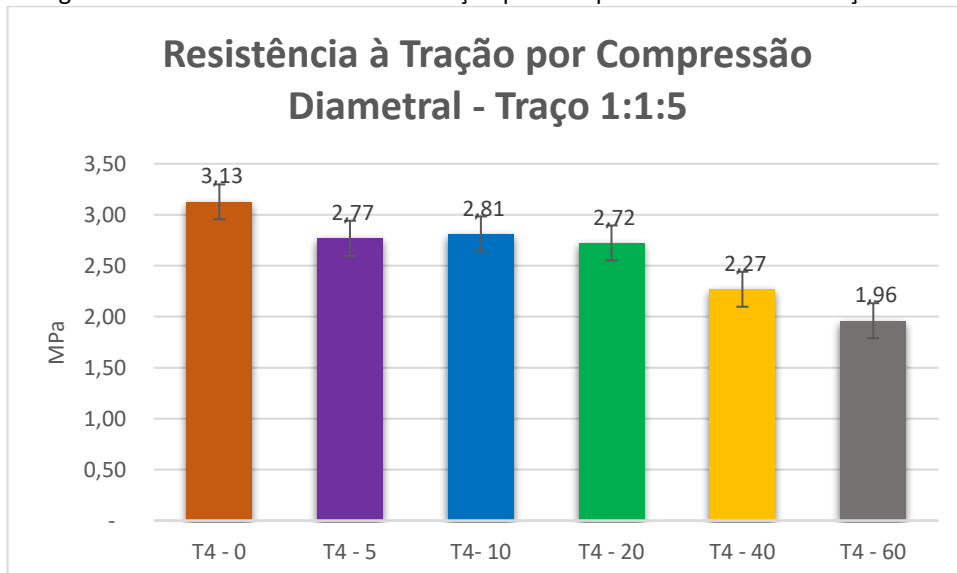
Figura 70 - Gráfico da Resistência à Tração por Compressão Diametral - Traço 1:0,5:3



Fonte: Autora, 2023.

No último traço foi observado que nenhuma substituição obteve um aumento, todas tiveram perda de resistência de 11,50%, 10,22%, 13,10%, 27,48% e 37,38%, nas substituições de 5%, 10%, 20%, 40%, 60% (Figura 71).

Figura 71 - Gráfico da Resistência à Tração por Compressão Diametral - Traço 1:1:5



Fonte: Autora, 2023.

Conforme foi observado durante os ensaios e comparando com os resultados obtidos por Ferreira (2009), as reduções na resistência a tração por compressão

diametral não foi tão grande nas substituições da areia pela borracha como foi em alguns casos da resistência por compressão axial, isso foi devido exatamente pela característica das borrachas dos ensaios do autor serem semelhantes aos desse trabalho, elas têm características mais laminar do que granular.

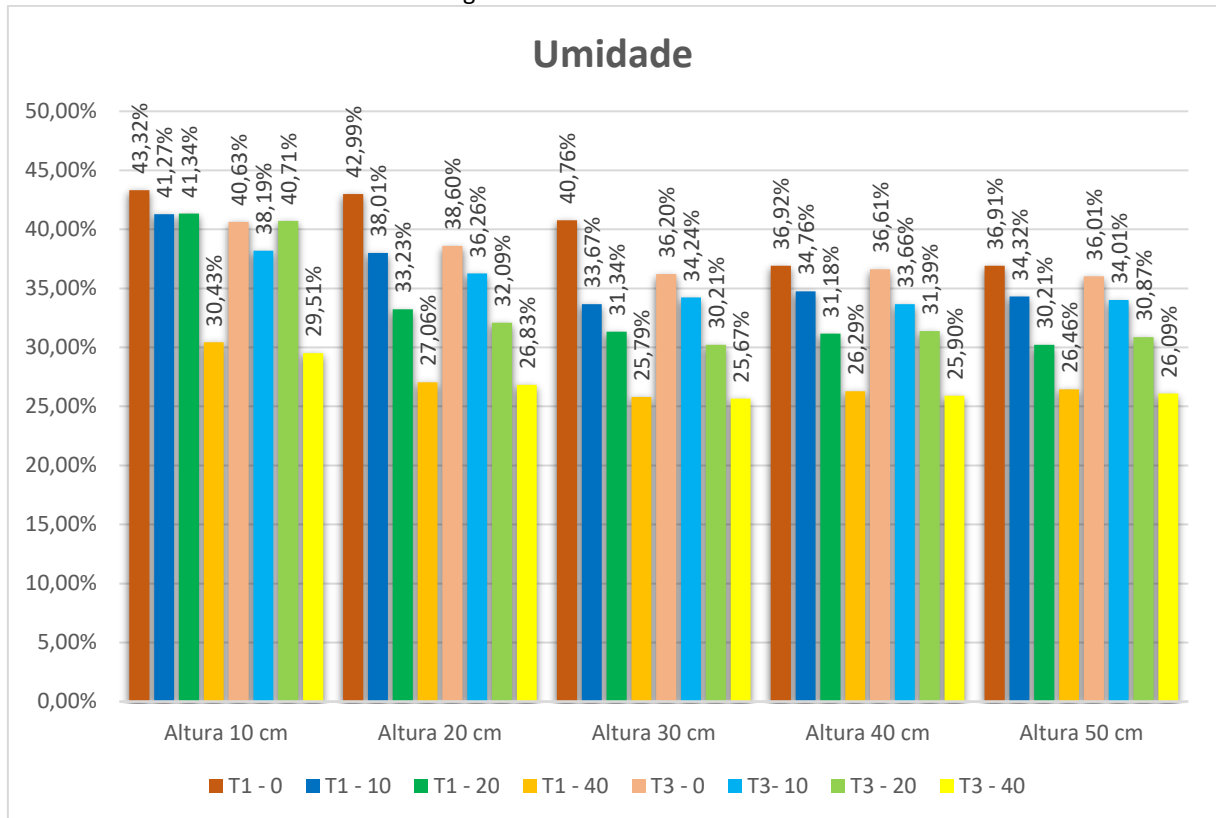
#### 5.4. Ensaio com Protótipo de Mini Paredes

Para começar a execução dos protótipos um fato muito importante foi observado, houve muita dificuldade para realizar o reboco conforme os traços tinham sua substituição de areia por borracha aumentada, era extremamente difícil seguir os parâmetros estabelecidos pelas normas de execução de revestimento argamassados para as substituição, principalmente para o traço com 40% de substituição, a massa ficou com uma consistência muito próxima da que é utilizada para chapisco, dificultando assim ser feito o reboco com a espessura necessária para uma parede tradicional (entre 3 e 4 cm).

##### 5.4.1. Absorção por Capilaridade em Mini Paredes

No ensaio de umidade realizado nos protótipos é possível observar que o traço padrão em todas as alturas é que tem o maior percentual de absorção de água, seja para o traço com cal e sem cal. Já a subfamília que tem o melhor desempenho é a de 40% de substituição, isso devido exatamente pelo fato de que a borracha diminui a pressão dos poros que absorvem água por capilaridade. (Figura 72).

Figura 72 - Gráfico da Umidade



Com isso é possível entender que a adição de borracha nas argamassas pode preencher alguns poros capilares, reduzindo assim os caminhos que a água poderia percorrer, assim como dependendo do tamanho e distribuição das partículas da borracha pode ocupar espaços vazios entre as partículas da argamassa ocasionando assim uma redução da porosidade efetiva, deixando mais difícil para a água penetrar na matriz porosa.

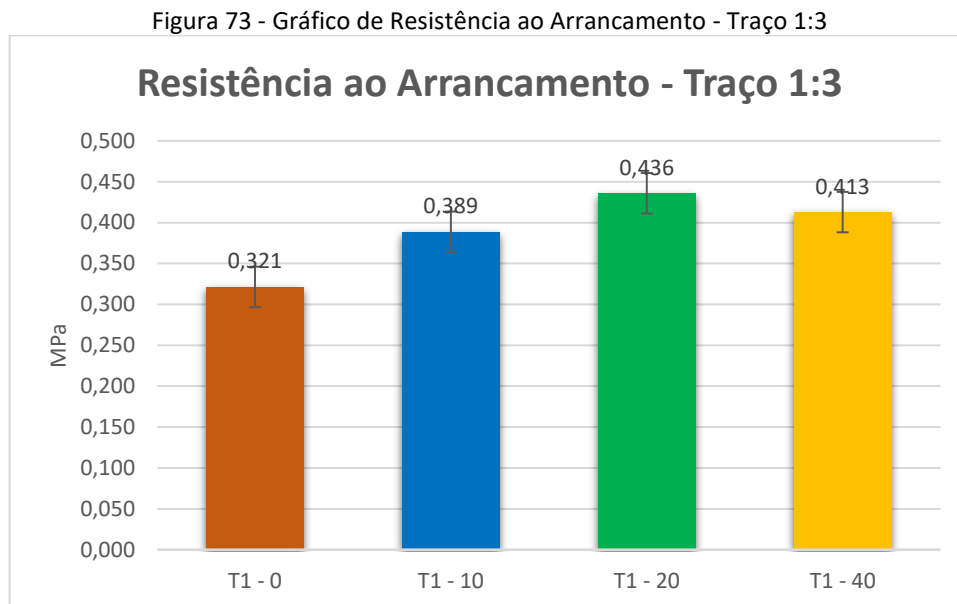
#### 5.4.2. Ensaio de Resistência de Aderência

Para o ensaio de resistência de aderência foi obtido resultados bem semelhantes para o traço padrão com e sem utilização da cal, já para os traços com substituição foram diferentes entre os traços com e sem a utilização da cal, então as análises foram feitas separadas.

As substituições de 10%, 20% e 40% no traço de 1:3 foi verificado um resultado satisfatório conforme a NBR 13749, já que o valor mínimo é 0,3 Mpa para os

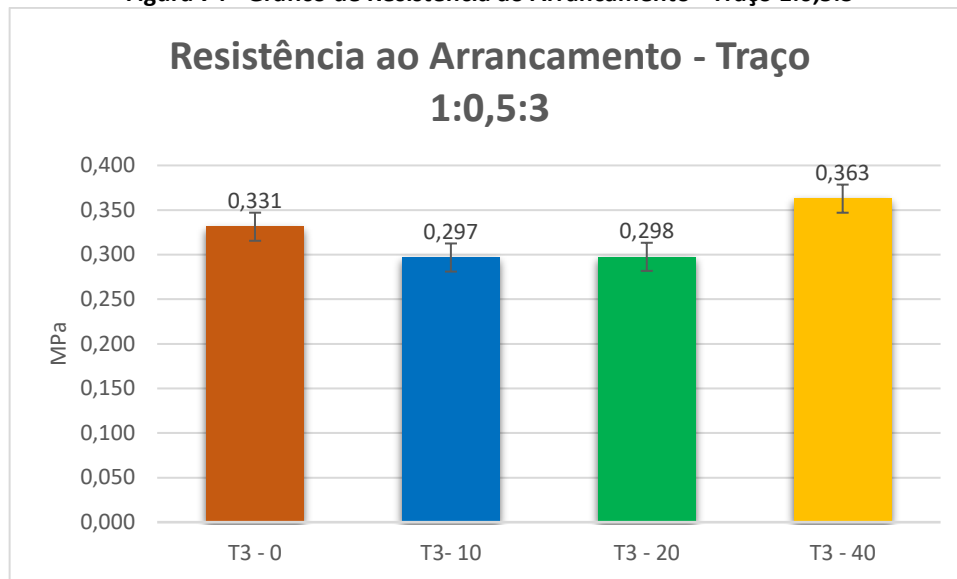
revestimentos externos seja para pintura ou aplicação de cerâmica e todas as subfamílias obtiveram resultados maior (Figura 73 e Figura 74).

Já para o traço 1:0,5:3 não foi possível observar o mesmo que o traço sem a cal, os traços com substituição de 10% e 20% ficaram abaixo do valor mínimo determinado pela norma, ficando 1% para o de 10% e 0,67% para o de 20% abaixo do que a NBR determina, mas isso não inviabiliza a utilização da argamassa já que a norma permite que seja usado argamassas com resistência maiores que 0,20 Mpa para revestimento de paredes internas quando for aplicado pintura e quando a argamassa for utilizada para revestimento em teto.



Fonte: Autora, 2023.

Figura 74 - Gráfico de Resistência ao Arrancamento - Traço 1:0,5:3



Fonte: Autora, 2023.

### 5.5. Análise Multivariada dos Ensaios

A análise multivariada que foi utilizada para fins de obtenção de análise qualitativa das covariâncias e correlações entre os dados experimentais obtidos é fundamentada técnica de análise de componentes principais (Principal Component Analysis – PCA), objetivando a redução de dimensionalidade dos dados. Essa técnica permitiu mensurar o nível de covariância e correlação de modo a melhorar a compreensão da natureza das variáveis envolvidas nos ensaios.

As componentes principais são obtidas pela rotação da matriz de dados originais de modo que haja a promoção da matriz equivalente diagonalizada (zerando os elementos de matriz não diagonais). Como resultando, temos que as componentes principais são autovalores resultante da diagonalização.

Essas diagonalizações geram os componentes principais como resultado de combinações lineares das variáveis originais que correspondem a variação dos dados. Os autovetores são compostos pelos coeficientes de componentes principais onde cada variável tem pesos que configuram sua efetiva participação na composição do autovalor. Desta forma é necessário calcular os escores desses principais

componentes e indicar os pesos relativos a cada variável no componente. A realização do relatório de resultados foi retirado do software, Minitab versão 2018, (

Figura 75) apresenta os valores dos pesos de cada variável, sendo assim, quanto maior for o valor absoluto de um coeficiente mais importante ele será nas correlações. A propriedade de compressão axial tem em valores absolutos o maior peso para a componente principal e a capilaridade tem o maior peso para componente secundária.

Figura 75 - Relatório da Análise de Componentes Principais

## Análise de Componentes Principais: CAPILARIDADE\_1; ... ; UMIDADE\_1

### Autoanálise (Autovalores e Autovetores) da Matriz de Correlação

Autovalor	2,7704	1,4149	0,4129	0,2801	0,1216
Proporção	0,554	0,283	0,083	0,056	0,024
Acumulado	0,554	0,837	0,920	0,976	1,000

### Autovetores

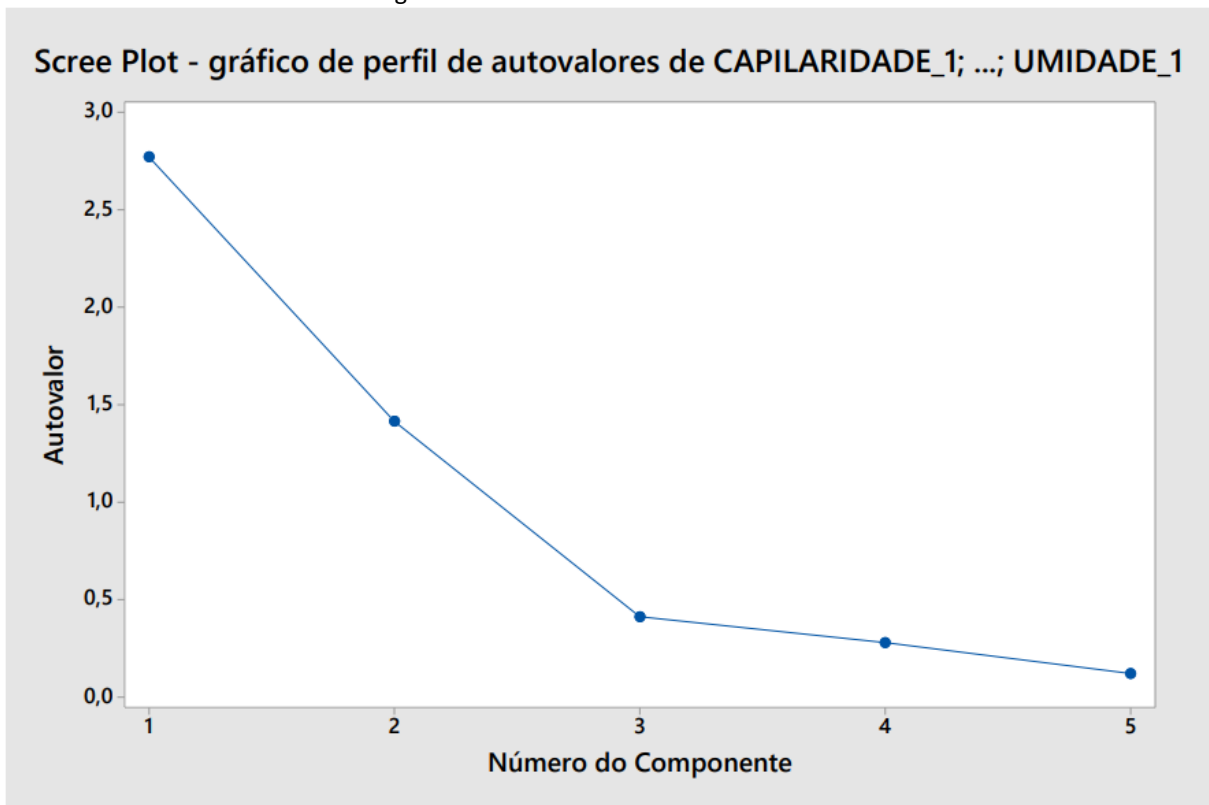
Variável	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
CAPILARIDADE_1	-0,072	-0,771	-0,522	0,318	-0,163
DENSIDADE - ENDURECIDO_1	0,513	-0,340	-0,040	-0,438	0,654
COMPRESSÃO AXIAL_1	0,550	0,132	-0,311	-0,400	-0,650
COMPRESSÃO DIAMETRAL_1	0,452	0,423	-0,386	0,631	0,264
UMIDADE_1	-0,474	0,306	-0,693	-0,386	0,230

Fonte: Autora, 2023.

Através do gráfico de perfil de autovalores, foi possível observar identificar que as duas primeiras componentes correspondem à 83,70%. É importante lembrar que os autovalores correspondem aos coeficientes de cada variável, ou seja, os pesos de cada variável utilizada para calcular os escores das componentes principais das próximas análises (Figura 76).



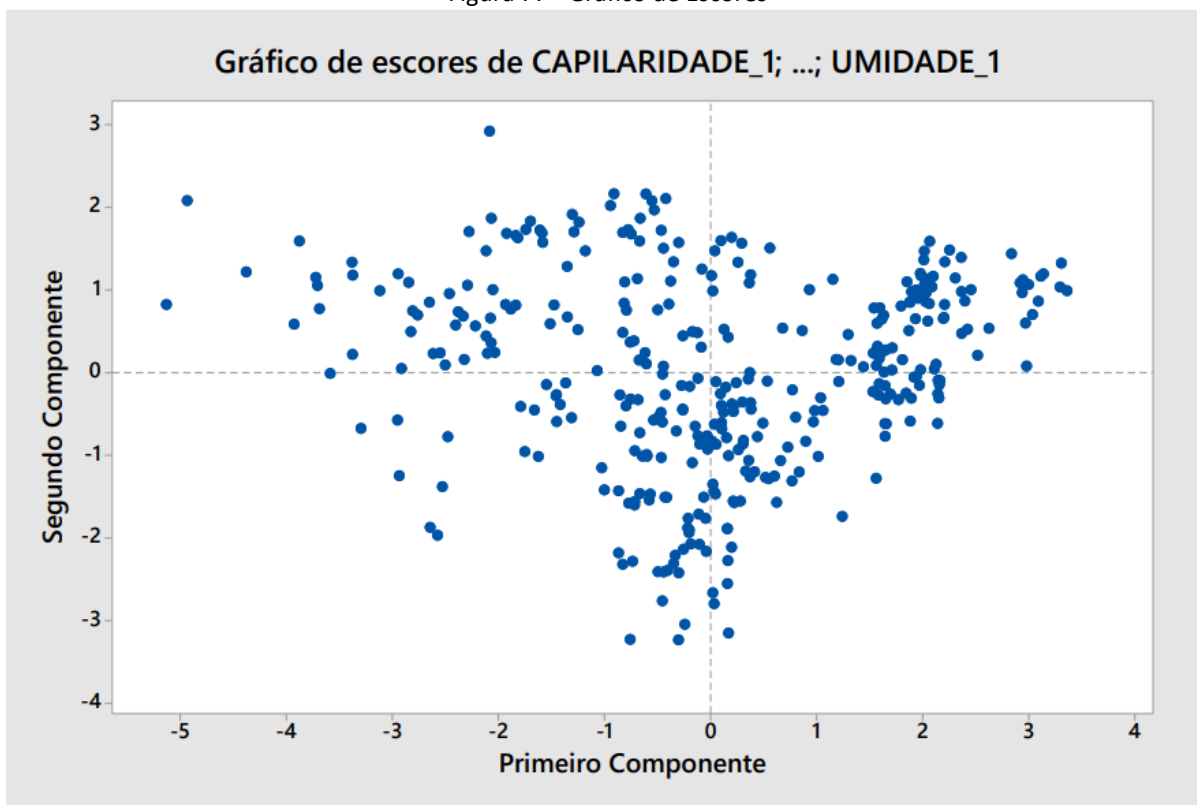
Figura 76 - Gráfico de Perfil de Autovalores



Fonte: Autora, 2023.

Como as duas primeiras componentes são responsáveis pela maior parte da variância dos dados, no gráfico de escores foi possível avaliar a estrutura dos dados e identificar os agrupamentos e tendências deles (Figura 77).

Figura 77 - Gráfico de Escores

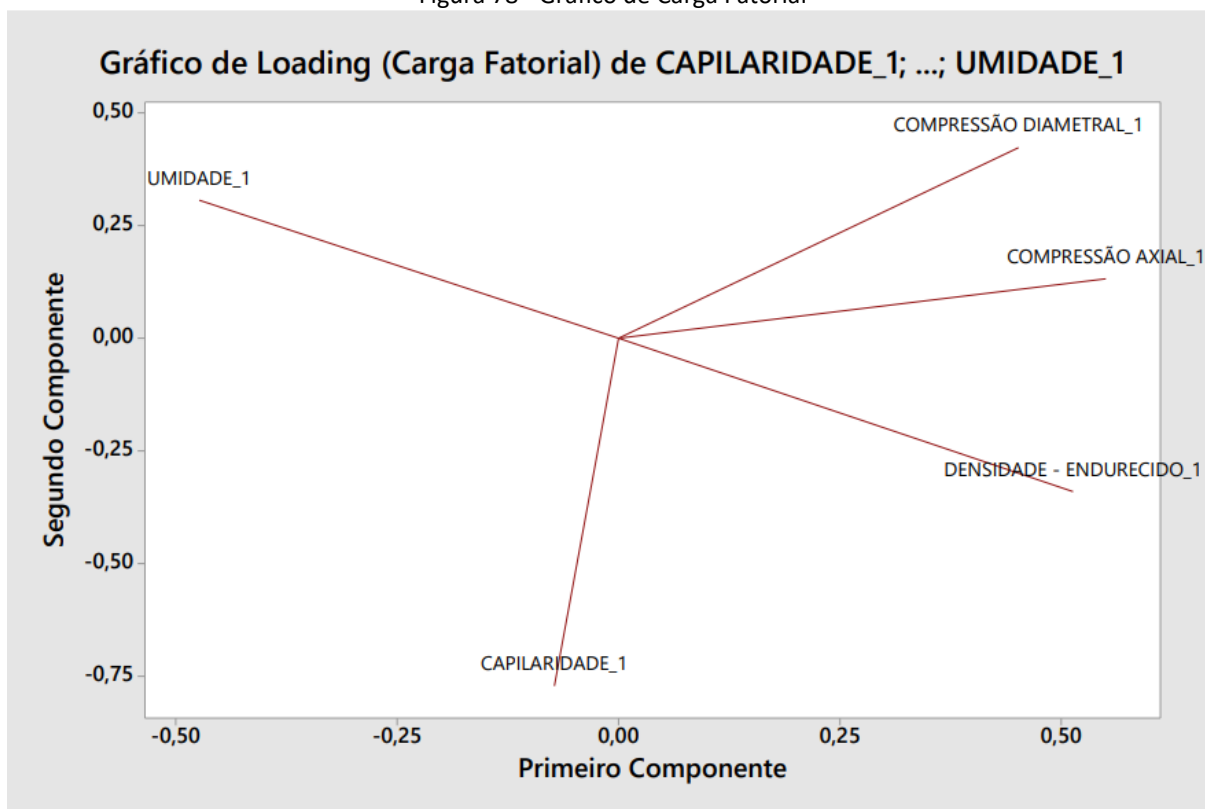


Fonte: Autora, 2023.

Já no gráfico de cargas fatoriais foi possível observar como os coeficientes de cada variável para o primeiro componente se comporta contra os coeficientes para o segunda componente. Desta forma é observado que propriedade capilaridade tem uma influência muito forte na segunda componente, exatamente pela ter ficado muito mais próxima da extremidade da escala (-1), quanto a primeira componente é possível observar que a densidade é inversamente proporcional a umidade (Figura 78).

Na Figura 78 para a primeira primeira componente principal evidencia-se que a umidade é inversamente proporcional às propriedades de densidade e compressão, resultado conhecido e esperado, demonstrando a robustez da análise qualitativa.

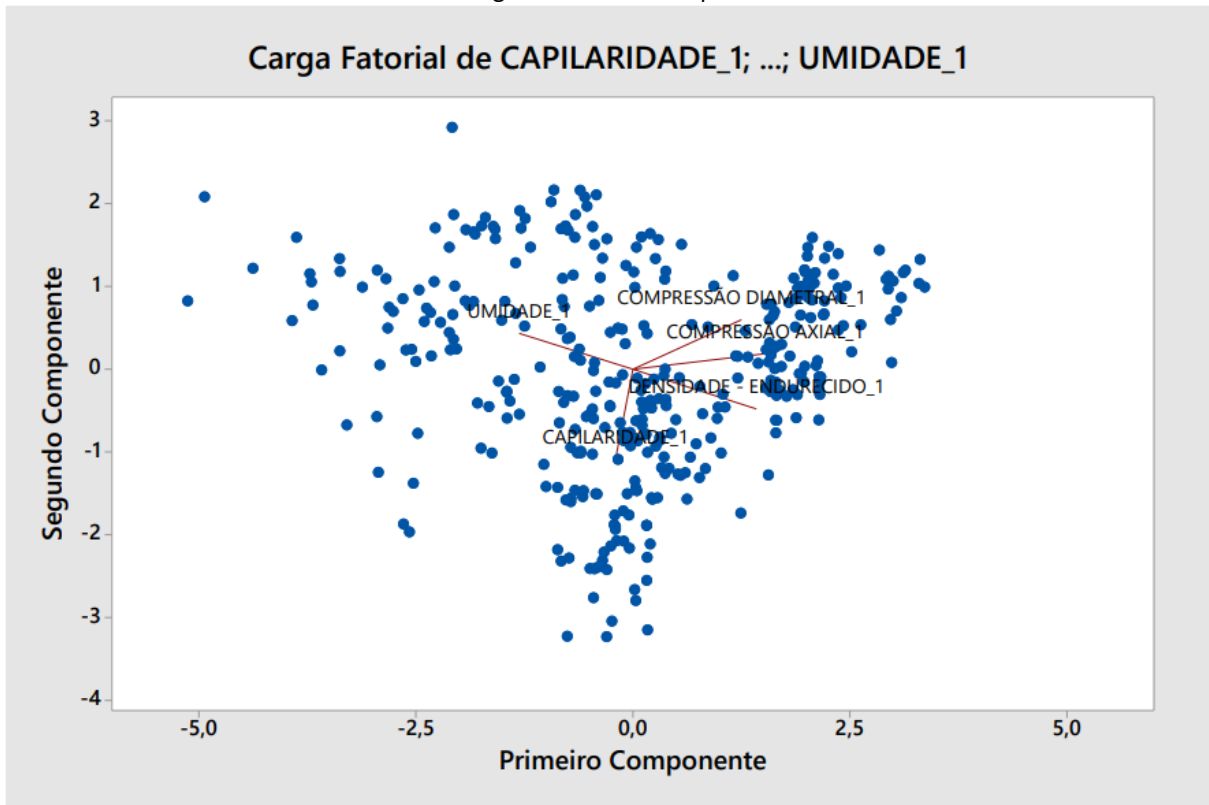
Figura 78 - Gráfico de Carga Fatorial



Fonte: Autora, 2023.

Por fim, o gráfico Biplot é a sobreposição do gráfico de escores com o de cargas fatoriais, desta forma é possível observar a dispersão dos dados conforme as cargas fatoriais indicam a influência das propriedades na distribuição do gráfico (Figura 79).

Figura 79 - Gráfico Biplot



Fonte: Autora, 2023.

## 6. CONCLUSÃO

O trabalho teve como principal objetivo estudar o comportamento da argamassa com a substituição do agregado miúdo mais utilizado hoje na construção civil que é a areia pela borracha proveniente de descarte de pneus, exatamente para avaliar a diminuição da extração da areia e conseqüentemente obter uma nova alternativa para os pneus descartados. Foram analisadas as propriedades físicas e mecânicas do material para os traços de 1:3, 1:5, 1:0,5:3 e 1:1:5 e para análise foram usadas as substituições de 5%, 10%, 20%, 40% e 60% da areia pela borracha.

Com os estudos concluídos foi possível observar que a relação entre o aumento da quantidade da substituição da borracha diminui a densidade da massa aparente e tanto no estado fresco como no estado endurecido, deixando o material mais leve e conseqüentemente diminuindo as cargas nas estruturas das edificações conforme a utilização. Além disso foi possível observar que as subfamílias de substituição de 5%, 10% e 20% se assemelham na classificação da densidade relativa as argamassas industrializadas que são vendidas no mercado.

Quanto a trabalhabilidade a argamassa ela perde um pouco dessa propriedade nas subfamílias com substituição mais baixas e aumenta conforme também se aumenta o percentual de substituição, isso é devido aos fatores de que as partículas de borracha podem atuar como lubrificantes internos na mistura, pois ela reduz o atrito entre as partículas de cimento e os agregados, além disso a borracha também ajuda na melhor distribuição de água na argamassa deixando as amostras mais homogênea e fluida.

Já nos ensaios de absorção de água por capilaridade os resultados foram bem diferentes de quanto aos traços e substituição. Para os traços utilizados as subfamílias de 40% e 60% se destacaram de forma positiva, em todos os ensaios da capilaridade os resultados foram abaixo do traço padrão, desta forma esse percentual torna-se muito interessante para combater uma das manifestações patológicas que mais ocorrem na construção de edificações. Vale destacar que a substituição de 20% na maioria dos traços esteve em patamares menores que a do traço padrão.

Nos ensaios de absorção de água por imersão as subfamílias de substituição mudam em relação aos melhores resultados, pois a utilização de borracha de 40% e

60% passam a ter uma absorção alta de água. Novamente os traços com substituição de 20% também não esteve em destaque como melhor resultado, mas esteve sempre muito próximo dos menores valores.

A propriedade de resistência à compressão sempre ganha destaque quando se estuda sobre argamassa, pois o objetivo sempre é a melhoria dessa propriedade, mas vale lembrar que para as argamassas de revestimento essa propriedade deve ser pensada como uma característica de garantia da vida útil necessária durante o uso, então desprezar a possibilidade da utilização da substituição apenas pelo motivo dela ocasionar uma diminuição da resistência sem avaliar o ganho das outras propriedades não é interessante para o avanço da construção civil. Desta forma, a substituição em todas as variedades, com exceção na de 5% para os traços sem cal, houve uma diminuição da resistência, principalmente nos traços com maior substituição, isso é devido exatamente, pela questão de que com o aumento de borracha na composição se diminui a quantidade de água absorvida pelo agregado e aumenta absorção de água pelo cimento, aumentando assim a relação a/c e conseqüentemente diminuindo a resistência. Já nos traços sem cal com 5% de substituição houve um pequeno aumento na resistência e isso deixa um resultado muito positivo para esse tipo de substituição.

A avaliação da tração através do ensaio de compressão a diametral obteve resultados bem semelhantes ao de compressão axial, mas nesse ensaio não existiu nenhum aumento representativo na resistência. Houve um leve aumento na resistência na substituição de 60% do traço 1:0,5:3, porém com o percentual baixo.

O ensaio do protótipo apresentou um resultado final importante, já que nele foi possível simular a realidade do dia a dia de uma argamassa de revestimento enfrentando as intemperes. Então foi possível chegar a conclusão que mesmo os percentuais de substituição de mais altos em algumas propriedades dando resultados mais satisfatórios no laboratório na hora de utilizar na realidade da construção eles apresentaram grande dificuldade para ser feito, principalmente quanto a sua execução e preparo, fazendo com que seja necessário o pensamento quanto a sua utilização, já que esse pode ser o grande impedimento da disseminação da solução.

Por fim foi possível fazer a análise multivariada dos ensaios das propriedades, que confirmou as análises iniciais, onde é possível observar que quanto maior a

umidade absorvida nos protótipos menor será a densidade da argamassa, deixando claro que elas são inversamente proporcionais. Já quanto as propriedades de resistência a compressão diametral, resistência a compressão axial e densidade tende a influência no aumento ou diminuição de cada uma delas, ou seja, se uma delas aumentam as outras também aumentam e o inverso também acontece, se uma delas diminuem as outras também diminuem.

Com isso é possível confirmar que mesmo com algumas perdas em certas propriedades a substituição é importante quanto aos ganhos ambientais que elas podem causar, já que essas perdas não são tão representativas, principalmente quando se trata das substituições medianas, 10% e 20%, pois elas não se destacam em nenhum ensaio positivamente, porém também não apresentam resultados ruins ou muito abaixo do padrão. Sendo assim, elas apresentam um desempenho razoável quanto aos ganhos que elas podem causar na diminuição da extração de areia dos rios e uma melhor utilização dos pneus inservíveis.

## REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. 2023. Disponível em < <https://abcp.org.br/> >. Acesso em 22 de Abril de 2023.

ANDRADE, Laís Bento de. **Análise das propriedades de argamassas no estado fresco e endurecido utilizando resíduo de caulim.** Campina Grande, 2019.

ANDRADE, Patrícia dos Santos; SOUZA, Juliane Santos; SCRAVELA, Ingrid Souza Silva; SILVA, Maghil Moreira. **Propriedades de Argamassas Produzidas com Resíduos de Construção e Demolição.** Revista Fatec de Tecnologia e Ciências.2023

ANIP. **Resultados dos fabricantes nacionais de pneus 3º trimestre de 2017.** Disponível em < [http://www.anip.com.br/arquivos/infografico\\_anip\\_3\\_trimestre.pdf](http://www.anip.com.br/arquivos/infografico_anip_3_trimestre.pdf) > . Acesso em 10 fev. 2018

ANTONIAZZI, Juliana Pippi; MOHAMAD, Gihad; CASALI, Juliana Machado; SCHMIDT, Raquel Petry Brondani. **Incorporação de Ar em Argamassas Estabilizadas:** Influência dos Aditivos, Agregados e Tempo de Mistura. 2020

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529:** Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:** Cimento portland - requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054:** Agregados – Determinação da Composição Granulométrica – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001:** Sistemas de Gestão Ambiental – Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL (ANEPAC). **Informações Gerais.** Disponível em: < <http://anepac.org.br> > Acesso em 01 de ago. 2021

Brasil. Agência Nacional de Mineração. **Sumário Mineral** / Coordenação Geral Marina Marques Dalla Costa, Karina Andrade Medeiros e Thiers Muniz Lima. Brasília: ANM, 2019.



CAMPITELI, Vicente Coney. **Concreto de Cimento Portland: Um Método de Dosagem**. Paraná. 2004

CANOVA, José Aparecido; BERGAMASCO, Rosângela; ANGELIS NETO, Generoso. **Pó de borracha de pneus inservíveis em argamassa de revestimento**. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil. Volume 10, Nº3, 41-53, 2015.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

CARNEIRO, Arnaldo Manoel Pereira; CINCOTTO, Maria Alba; JOHN, Vanderley M. **A massa unitária da areia como parâmetro de Análise das características de argamassas**. Ambiente Construir, São Paulo, V. 1, N.2, Jul/Dez 1997.

CÉSAR, J.; PAOLI, M.-A. D.; ANDRADE, J. C. de. **A determinação da densidade de sólidos e líquidos**. Revista Chemkeys, Campinas, SP, n. 7, p. 1–8, 2018. DOI: 10.20396/chemkeys.v0i7.9618. Disponível em: <https://econtents.bc.unicamp.br/inpec/index.php/chemkeys/article/view/9618>. Acesso em: 8 janeiro. 2023.

COSTA, Daniel António Caldas da. **Avaliação do Potencial de Resíduos de Fundição como Agregados para Argamassas**. 2022

COSTA, Letícia Araújo. **Influência do Tipo de Cura nas Propriedades de Resistência à Compressão Simples e Absorção de Água em Argamassas Incorporadas com a Cinza de Algaroba**. Angicos. 2019

DULTRA, Eduardo Jorge Vidal; CABALA, Guilherme Van Erven; JESUS, Leiliane Moreira de; SANTOS, Luís Henrique Souza dos; FILHO SOARES, Manoel Narciso Reis; PEDROZA, Artur Cristiano. **Avaliação das Propriedades de Resistência Mecânica e Prosidade Aparente de Matriz Cimentícia com Adição de Resíduo de Britagem de Rochas em Substituição da Areia Natural**. Ibracon. 2015

FALCÃO BAUER, L. A. **Materiais de Construção**. Ed. Livros Técnicos e Científicos Ltda., 5., V. 1, 1997

FERNANDES, Douglas Vinicius; REIS, Crisleine Zottis dos; PASSOS, Manuela Gazzoni. **Reutilização de Borracha de Pneu, como agregado, na elaboração de argamassa**. IBEAS - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. 2019

FERREIRA, Carlos Renê Gomes. **Análise de propriedade térmicas e mecânicas de compósitos de argamassa e resíduos de borracha**. Natal, 2009

FERREIRA, Ruan Landolfo da Silva; BARROS, Ilana Maria da Silva; COSTA, Túlio Cesar de Souza; MEDEIROS, Mauricéia; SÁ, Maria das Vitórias Vieira Almeida de; CARNEIRO, Arnaldo Manoel Pereira. **Efeitos do Uso de Areia de Praia nas Propriedades de Argamassas Mistas: Análise da Variação Granulométrica**. 2019

FIESP. **História do Pneu**. Disponível em < <http://www.fiesp.com.br/sinpec/sobre-o-sinpec/historia-do-pneu/> >. Acesso em 10 fev. 2018

GIRARDI, Aline Crispim Canedo. **Avaliação da substituição total de areia natural por RCD em revestimentos de Argamassa**. Goiânia, 2016.

GUIMARÃES, Tereza Cristina de Farias; REBAZA, Arles Victor Gil; PACHEKOSKI, Wagner Maurício. **Elasticidade dos Polímeros e Compósitos Forças de Van Der Wall**. Brazilian Applied Science Review. 2019

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Informações sobre a economia mineral brasileira 2020 - Ano base 2019**. Brasília. 2020

LIMA, Andréia de. **Educação Ambiental: Pneus Inservíveis e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável por Meio de Aprendizagem Baseada em Projeto**. Medianeira. 2023

OLIVEIRA, Ana Laura Berger de. **Estudo de Substituição de Agregados Miúdos por Resíduos de Borracha de Pneu, Poliestireno Expandido e Casca de Soja em Argamassa Geopolimérica à Base de Metacaulim**. Uberlândia. 2020

MANEGUINI, Eduardo César Antonelli. **Comportamento de argamassas com emprego de pó de borracha**. Campinas-SP, 2003.

MARCIEL, Luciana Leone; BARROS, Mércia M. S. Bottura; SABBATINI, Fernando Henrique. **Recomendações para a execução de revestimento de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos**. São Paulo, 1998

MORENO, Diego David Pinzón. **Compósitos compatibilizados de argamassa e borracha de pneus**. Lorena, 2019.

MOTTA, Flávia Gutierrez. **A Cadeia de Destinação dos Pneus Inservíveis – O Papel da Regulação e do Desenvolvimento Tecnológico**. Ambiente & Sociedade. Campinas, 2008.

NASCIMENTO, Éberto Roque dos Santos; SILVA, Wedson Carvalho da. **A ação da Cal hidratada na cura por imersão e sua influência no ganho de resistência à compressão em um concreto convencional**. REVISTA FATEC DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS. V.7.N.1–2022

NOGUEIRA, Geovane Rangel Ferreira. **A extração de areia em cursos d'água e seus impactos: proposição de uma matriz de interação**. Juiz de Fora. 2016

ODA, Sandra ; FERNANDES JÚNIOR, José Leomar. **Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação**. 2001

PARANHOS, A.; VECHIA, D.; BELTRAME, M. **Capilaridade: um fenômeno de superfície com aplicações cotidianas**. São José dos Campos, 2007.

PEDRO, Diogo André Gomes. **Desempenho de argamassas fabricadas com incorporação de materiais finos provenientes da trituração de pneus**. Setembro, 2011.

PINTO, Nayra Alberici; FIORITI, Cesar Fabiano. **Avaliação de Argamassas Mistas de Revestimentos Produzidas com Borracha de Pneus**. Santa Cruz do Sul. 2016

QUARCIONI, Valdecir Angelo; CHOTOLI, Fabiano Ferreira; ÂNGULO, Sergio Cirelli; GUILGE, Mario Sergio; CAVANI, Gilberto de Ranieri; CASTRO, Alessandra Lorenzetti; CINCOTTO, Maria Alba. **Estimativa da Porosidade de Argamassas de Cimento e Cal pelo Método de Cálculo de Volumes**. Porto Alegre. 2009

ROSA, Diego Silva; MORAES, Mario Henrique Moreira; QUEIROZ, Diogo Pontes; BRANDÃO, Luis Felipe Alencar; ALMEIDA, Lucas Rezende; AGUIAR NETO, Sabino Alves de; JESUS, Aedjota Matos. **Comportamento de Argamassa de Assentamento com Incorporação de Resíduo de Borracha em Pó**. Revista de Engenharia e Tecnologia. 2022

ROYCHAND, Rajeev; GRAVINA, Rebecca J.; ZHUGE, Yan; MA, Xing; YOUSSEF, Osama; MILLS, Julie E. **A Comprehensive Review on the Mechanical Properties of Waste Tire Rubber Concrete**. Construction and Building Materials. 2019

SABBATINI, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico- calcária**. São Paulo. 1984.

SANTOS, Mônica Danielle Torres. **Avaliação dos impactos socioambientais causados pela extração de areia utilizada na construção civil, no município de São Cristóvão (SE)**. São Cristóvão. 2019

SANTOS, White José dos. **Desenvolvimento de Metodologia de Dosagem de Argamassas de Revestimento e Assentamento**. Minas Gerais. 2014

SAKAMOTO, Camila Akemi. **Argamassas Mistas de Revestimento com Emprego de Borracha de Pneus: Desempenho Perante o Comportamento à Água**. Ilha Solteira. 2020

SCHILLER, A. P. S.; PALIGA, C. M.; TORRES, A. da S. **Study of the potentiality of partial replacement of cement by civil construction residues in coating mortar**. Research, Society and Development, [S. l.], v. 10, n. 8, p. e31410817342, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i8.17342. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/17342>. Acesso em: 5 abril. 2023.

SILVA, Marcelo Luiz. **Análise da Fissuração de Paredes por Meio da Ruptura com Dois Diferentes Tipos de Argamassa: Convencional e Polimérica.** Toledo. 2019

SILVA, Romário Aurélio Pereira da. **Determinação da Relação Água/Cimento Utilizando Microondas.** Belo Horizonte. 2005

SILVA, Samuel Vitor Campos. **Contribuição ao Estudo das Argamassas de Revestimento com Utilização de Agregado Natural e Agregado Industrializado.** Formiga. 2018

SILVA JÚNIOR, Francisco Alves da. **Avaliação do efeito da adição de resíduo de borracha de pneu e brita calcária na formulação de compósitos cimentícios.** Natal. 2014

SLAIFFER, Cíntia. **Influência de fibras de borracha nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas em argamassa de revestimento.** Lajeado, Junho 2019.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** Porto Alegre: PPGECC / UFRGS. 2004

TENTRIN, Priscila Ongaratto; MANICA, Jocasta; VANZETTO, Suelen Cristina; MARANGONI, Bruno; ZALESKI, Alessandra. **Substituição Parcial de Agregado Miúdo por Resíduo de Vidro Moído na Produção de Argamassa.** 2020

VIANA, Tiago Henrique C.; AGUIAR, Alyson Luís S.; MENDES, Thaline Geovana N.; BORGES, Marcelo V. **Análise de Granulometria e Densidade do Solo Coletado em Jazida, na Rodovia AC-090, em Rio Branco – Acre.** 2019

VIEIRA, Mateus; SOUZA, Lucas; LUCIA, Ivana; SALES, Victória; CUNHA, Deborah; CRUZ, Willamy; MEDEIROS, João; BRASILEIRO, Lilian. **Comparativo do Efeito Umidade no Módulo de Elasticidade Dinâmico de Argamassas.** Fortaleza. 2019

YU, Yong; ZHU, Han. **Influence of Rubber Size on Properties of Crumb Rubber Mortars.** Materials. 2016

ZAINAL, S.M.I.S.; MATTIUS, D.; BABA, Z.; RIZALMAN, A.N.; HEJAZI, F. **Improving the Performance of Lightweight Crumb Rubber Mortar Using Synthetic, Natural, and Hybrid Fiber Reinforcements.** Fibers. 2023

ZHANG, Yuxin; ZHANG, Zhen; WEMYSS, Alan M.; WAN, Chaoying; LIU, Yongtao; SONG, Pan; WANG, Shifeng. **Effective Thermal-Oxidative Reclamation of Waste Tire Rubbers for Producing High-Performance Rubber Composites.** ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2020