



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE PROCESSOS**



SOLANGE MARIA DA ROCHA PATRÍCIO

**INCORPORAÇÃO DE PET TRITURADO EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO
AGREGADO MIÚDO PARA UTILIZAÇÃO EM ARGAMASSAS**

CAMPINA GRANDE – PB

2021

SOLANGE MARIA DA ROCHA PATRÍCIO

**INCORPORAÇÃO DE PET TRITURADO EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO
AGREGADO MIÚDO PARA UTILIZAÇÃO EM ARGAMASSAS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutora.

Área de concentração: Desenvolvimento de processos

Aluna: Solange Maria da Rocha Patrício.

Orientador: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues

Co-Orientadora: Prof^a. Dra. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

2021

P314i Patrício, Solange Maria da Rocha.
 Incorporação de PET triturado em substituição parcial ao agregado miúdo para utilização em argamassas / Solange Maria da Rocha Patrício. – Campina Grande, 2021.
 137 f. : il. color.

 Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2021.
 "Orientação: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues, Profa. Dra. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça".

 Referências.

 1. Argamassas – PET Triturado. 2. PET Triturado – Materiais Alternativos. 3. Comportamento Mecânico. 4. Polietileno Tereftalato (PET). 5. Durabilidade. I. Rodrigues, John Kennedy Guedes. II. Mendonça, Ana Maria Gonçalves Duarte. III. Título.

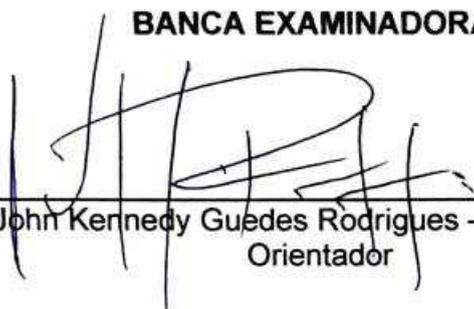
CDU 691.53:678.7(043)

SOLANGE MARIA DA ROCHA PATRÍCIO

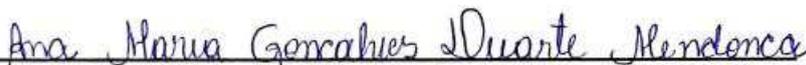
**INCORPORAÇÃO DE PET TRITURADO EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO
AGREGADO MIÚDO PARA UTILIZAÇÃO EM ARGAMASSAS**

APROVADO EM: 27/12/2021

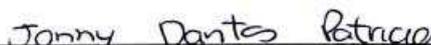
BANCA EXAMINADORA:



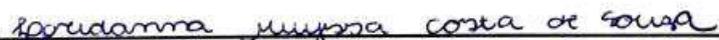
Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues – UAEC/CTRN/UFCG
Orientador



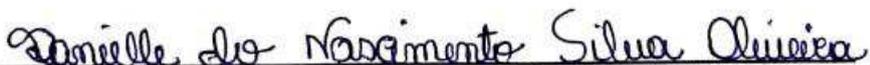
Profª. Dra. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça – UAEC/CTRN/UFCG
Orientadora



Prof. Dr. Jonny Dantas Patrício – UAEC/CTRN/UFCG
Examinador Externo



Profª. Dra. Loredanna Melyssa Costa de Souza – CCTS/UEPB
Examinadora Externa



Profª. Dra. Danielle do Nascimento Silva Oliveira – UAEMA/CCT/UFCG
Examinadora Externa

CAMPINA GRANDE – PB

2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me proporcionar a conclusão de mais uma etapa da vida em plena pandemia;

Aos meus filhos, pelo carinho e presença constante na vida;

Aos orientadores Dr. John Kennedy e Dra. Ana Maria. Gratidão pela orientação, paciência, apoio, compreensão.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, pela parceria e colaboração.

Aos colaboradores Jadilson, Edvaldo e Joselito, pela cooperação nos ensaios realizados.

A professora Dra. Crislene, pela parceria e colaboração na pesquisa.

Aos engenheiros Francisco, Mariano e Ricardo, pela colaboração nos ensaios e incentivo no decorrer do doutoramento.

RESUMO

O polietileno tereftalato (PET), devido a versatilidade e baixo custo de produção, se tornou um dos materiais plásticos mais utilizados mundialmente. Todavia, configura um problema ambiental, em decorrência da permanência prolongada no ambiente e da destinação inadequada, o que contribui para o acúmulo de grandes volumes na natureza e nos aterros sanitários. Ao encontro desta questão a indústria da construção civil possui grande potencial para incorporação de resíduos advindos de outros sistemas produtivos. Assim, este trabalho tem por objetivo avaliar as propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas, e, a durabilidade de argamassas de assentamento e revestimento, produzidas com substituição parcial do agregado miúdo por PET triturado. Para tanto, formulou-se dois traços com proporções de aglomerantes e agregado miúdo distintos, nos quais foram utilizados o cimento Portland CP II Z-32, cal, areia e PET triturado, em substituição parcial de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. A caracterização física foi realizada por meio de ensaios para determinar a massa específica e unitária e a granulometria por peneiramento e a lazer dos elementos constituintes. Para a caracterização química, empregou-se as técnicas de espectrometria de fluorescência de raios-X, análise termogravimétrica (TGA), térmica diferencial (DTA) e difração de raios-X (DRX). As propriedades físicas e mecânicas foram determinadas a partir da densidade de massa e teor de ar incorporado, no estado fresco. No estado endurecido, aferiu-se a densidade, resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração na flexão, absorção de água por capilaridade e a resistência de aderência à tração (RAT). No estudo de durabilidade utilizou-se a resistência ao ataque por sulfatos. O aumento de teor de PET em substituição parcial ao agregado miúdo reduziu a relação água/aglomerante em até 15%. Com isso, há ganhos na trabalhabilidade das argamassas em decorrência da maior disponibilidade de água livre. Constatou-se que o aumento de teor de PET reduziu a relação água/aglomerante em até 15%. Houve ganhos na trabalhabilidade das argamassas, dada a maior disponibilidade de água livre. No estado fresco, a densidade de massa reduz linearmente, a medida em que se aumenta o percentual de PET, com diferenças de até 11,48%. O teor de ar incorporado sofre elevações, contudo, tende a decrescer quando o percentual de substituição parcial ultrapassa 15%. No estado em endurecido, também ocorre a diminuição de densidade em função do aumento do teor de PET, chegando a 15,81%. Quanto à RCS e a resistência à tração na flexão, para o traço 1:2:9, houve um aumento tanto com a incorporação de PET quanto com a idade de cura, para as argamassas com teores de 10%, 15%, 20% e 25% de PET, a partir dos 14 dias. Para o traço 1:1:6, aos 28 dias cura, percebe-se que a argamassa sem adição de PET demonstrou melhor desempenho para esses parâmetros mecânicos. Todavia, aos 56 dias de cura, todas as argamassas com aditivo de PET mostraram maior resistência. A inserção de PET reduziu a absorção de água por capilaridade, contudo, ocorreu a redução da RAT. Em relação ao ataque por sulfatos, são consideradas reativas, em virtude de sofrerem expansões dimensionais quando imersos em solução de sulfato de sódio.

Palavras-chave: Materiais alternativos; Comportamento mecânico; Durabilidade.

ABSTRACT

Polyethylene terephthalate (PET), due to its versatility and low production cost, has become one of the most widely used plastic materials worldwide. However, it is an environmental problem, due to the prolonged stay in the environment and inadequate disposal, which contributes to the accumulation of large volumes in nature and in landfills. In response to this issue, the civil construction industry has great potential for incorporating waste from other production systems. Thus, this work aims to evaluate the physical, chemical, mineralogical and mechanical properties, and the durability of laying and coating mortars, produced with partial replacement of fine aggregate by crushed PET. For this purpose, two mixes were formulated with different proportions of binders and fine aggregate, in which Portland cement CP II Z-32, lime, sand and crushed PET were used, in partial replacement of 5%, 10%, 15%, 20% and 25%. The physical characterization was carried out through tests to determine the specific and unitary mass and the sieving and leisure granulometry of the constituent elements. For the chemical characterization, the techniques of X-ray fluorescence spectrometry, thermogravimetric analysis (TGA), differential thermal (DTA) and X-ray diffraction (XRD) were used. The physical and mechanical properties were determined from the mass density and incorporated air content, in the fresh state. In the hardened state, density, simple compressive strength (SCS), flexural tensile strength, capillary water absorption and tensile bond strength (TBS) were measured. In the durability study, the resistance to attack by sulfates was used. The increase in PET content in partial replacement of fine aggregate reduced the water/binder ratio by up to 15%. As a result, there are gains in the workability of mortars as a result of the greater availability of free water. It was found that the increase in PET content reduced the water/binder ratio by up to 15%. There were gains in the workability of the mortars, given the greater availability of free water. In the fresh state, the mass density decreases linearly as the percentage of PET increases, with differences of up to 11.48%. The content of incorporated air increases, however, it tends to decrease when the percentage of partial replacement exceeds 15%. In the hardened state, there is also a decrease in density due to the increase in the PET content, reaching 15.81%. As for the SCS and the flexural tensile strength, for the 1:2:9 mix, there was an increase both with the incorporation of PET and with the curing age, for the mortars with contents of 10%, 15%, 20% and 25% PET, after 14 days. For the 1:1:6 mix, after 28 days of cure, it is noticed that the mortar without the addition of PET showed better performance for these mechanical parameters. However, at 56 days of cure, all mortars with PET additive showed greater strength. The insertion of PET reduced capillary water absorption, however, there was a reduction in the TBS. Regarding the attack by sulfates, they are considered reactive, as they undergo dimensional expansion when immersed in sodium sulfate solution.

Keywords: Alternative materials; Mechanical behavior; Durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Crescimento populacional (1950 – 2020).....	19
Figura 2: Evolução da geração de resíduos sólidos no Brasil (2012 – 2018).....	21
Figura 3: Potencial de reciclagem dos resíduos sólidos (2012 – 2017).	23
Figura 4: Quantitativo de resíduos recuperados para reciclagem no Brasil (2012 – 2017).....	24
Figura 5: Montantes de PET reciclados no Brasil.....	25
Figura 6: Macromolécula formada por moléculas menores.....	28
Figura 7: Estrutura do PET.....	30
Figura 8: Consumo de PET no Brasil.....	30
Figura 9: Fluxograma de dosagem de argamassas.....	38
Figura 10: Comportamento da resistência da argamassa em função da relação água/cimento.....	45
Figura 11: Fatores que influenciam na aderência das argamassas sobre os substratos.	52
Figura 12: Fluxograma do planejamento experimental.....	56
Figura 13: Execução do ensaio da massa unitária.....	58
Figura 14: Equipamento do ensaio de granulometria por difração a laser CILAS 1064.	59
Figura 15: Equipamento EDX 720 SHIMADZU	60
Figura 16: Equipamento DTG-60H SHIMADZU.....	61
Figura 17: Difratorômetro de raios-X SHIMADZU XRD – 6000.....	62
Figura 18: Procedimentos para determinação do índice de consistência.....	65
Figura 19: Preparação, moldagem e cura das argamassas de assentamento e revestimento.....	66
Figura 20: Densidade de massa e teor de ar incorporado.....	66
Figura 21: Prensa SHIMADZU AG-IS.....	68
Figura 22: Prensa SHIMADZU AG-IS.....	69
Figura 23: Ensaio de absorção por capilaridade.....	70
Figura 24: Ensaio de aderência a tração.....	71
Figura 25: Formas de ruptura dos corpos de prova para a resistência de aderência à tração.....	72
Figura 26: Localização das linhas de referência para medições dos corpos de prova.	73

Figura 27: Corpos de prova imersos em solução de sulfatos.....	73
Figura 28: Distribuição de tamanho das partículas do cimento CP II Z-32.....	76
Figura 29: Difratoograma de raios-X do cimento Portland CPIIZ-32.....	77
Figura 30: Curva das análises TGA e DTA do cimento Portland CPIIZ-32.....	78
Figura 31: Distribuição de tamanho das partículas da cal (CH-I).....	79
Figura 32: Difração de raios-X da cal.....	80
Figura 33: Curvas das análises termogravimétrica e térmica diferencial da cal.....	81
Figura 34: Granulometria a laser do PET.....	82
Figura 35: Difratoograma de raios-X para o PET.....	82
Figura 36: TGA/DTA do PET.....	83
Figura 37: Curvas DSC do PET.....	84
Figura 38: Espectro de FTIR para o PET.....	85
Figura 39: Curva granulométrica da areia (Zona 3).....	87
Figura 40: Espalhamento e relação água/aglomerante para o traço 1:2:9.....	88
Figura 41: Espalhamento e relação água/aglomerante para o traço 1:1:6.....	88
Figura 42: Densidade de massa e teor de ar incorporados das argamassas com diferentes teores de PET – Traço 1:2:9.....	90
Figura 43: Densidade de massa e teor de ar incorporados das argamassas com diferentes teores de PET – Traço 1:1:6.....	90
Figura 44: Densidade de massa no estado endurecido - Traço 1:2:9.....	92
Figura 45: Densidade de massa no estado endurecido - Traço 1:1:6.....	93
Figura 46: Resistência à compressão simples – Traço 1:2:9.....	94
Figura 47: Resistência à compressão simples – Traço 1:1:6.....	95
Figura 48: Resistência à tração na flexão no traço 1:2:9.....	97
Figura 49: Resistência à tração na flexão no traço 1:1:6.....	97
Figura 50: Absorção por capilaridade.....	99
Figura 51: Resistência de aderência à tração, no traço 1:1:6.....	100
Figura 52: Expansão das argamassas submetidas ao sulfato – Traço 1:2:9.....	102
Figura 53: Expansão das argamassas submetidas ao sulfato – Traço 1:1:6.....	102
Figura 54: Variação de massa das argamassas submetidas ao sulfato – Traço 1:2:9.....	104
Figura 55: Variação de massa das argamassas submetidas ao sulfato – Traço 1:1:6.....	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação dos polímeros.....	28
Quadro 2: Normas brasileiras para argamassas.....	39
Quadro 3: Classificações das argamassas.....	40

LISTA DE QUADROS E TABELAS

_Toc88047651

Tabela 1: Propriedades e comportamento mecânico do PET.....	31
Tabela 2: Classificação quanto à densidade no estado fresco.....	47
Tabela 3: Classificação das argamassas de revestimento de paredes e tetos quanto à resistência à compressão.....	49
Tabela 4: Classificação das argamassas de revestimento de paredes e tetos - RTF	50
Tabela 5: Classificação das argamassas de revestimento de paredes e tetos - coeficiente de capilaridade.....	51
Tabela 6: Limites de resistência de aderência à tração (RAT) para emboço e camada única.....	51
Tabela 7: Ensaio para caracterização física dos materiais.....	57
Tabela 8: Valores dos traços em volume e em massa.....	64
Tabela 9: Cimento Portland CII Z – 32.....	75
Tabela 10: Composição química do CII Z – 32.	76
Tabela 11: Caracterização física da cal.	78
Tabela 12: Composição química da cal.	79
Tabela 13: Caracterização física do PET.....	81
Tabela 14: Caracterização física da areia	86
Tabela 15: Composição granulométrica do agregado miúdo	86

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
BHET	Tereftalato de bis(2-hidroxietileno)
CAGEPA	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CTRN	Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
DRX	Difração de Raios-X
DTA	Análise Térmica Diferencial
EG	Etileno Glicol
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
PET	Polietileno Tereftalato
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RAT	Resistência de Aderência à Tração
RCS	Resistência à Compressão Simples
TGA	Análise Termogravimétrica
TPA	Ácido Terftalático

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Objetivo Geral.....	18
1.1.2 Objetivos Específicos.....	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	19
2.1.1 Geração de resíduos no Brasil	21
2.1.2 Reciclagem.....	23
2.2 SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	25
2.3 POLÍMEROS	27
2.4 POLITEREFTALATO DE ETILENO – PET.....	29
2.4.1 Reciclagem do PET.....	32
2.4.2 Utilização do PET em argamassas	34
2.5 ARGAMASSAS	35
2.6 MATERIAIS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS	40
2.6.1 Cimento.....	40
2.6.2 Cal.....	42
2.6.3 Agregado.....	43
2.6.4 Água.....	43
2.7 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS.....	45
2.7.1 Estado fresco.....	46
2.7.1.1 Trabalhabilidade.....	46
2.7.1.2 Retenção de água	46
2.7.1.3 Consistência e Plasticidade.....	46
2.7.1.4 Densidade de massa e teor de ar incorporado	47
2.7.1.5 Adesão inicial	47
2.7.1.6 Retração.....	48
2.7.2 Estado endurecido.....	48
2.7.2.1 Resistência mecânica.....	48
2.7.2.2 Resistência a tração na flexão.....	49
2.7.3 Absorção por capilaridade	50

2.7.4 Aderência	51
2.7.5 Durabilidade	53
3 MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1 MATERIAIS	55
3.2 METODOLOGIA.....	55
3.2.1 Caracterização física	57
3.2.1.1 Massa específica	58
3.2.1.2 Massa unitária	58
3.2.1.3 Análise granulométrica por peneiramento	59
3.2.1.4 Análise granulométrica por difração a laser	59
3.2.2 Caracterização química e mineralógica.....	60
3.2.2.1 Composição química	60
3.2.2.2 Análise Termogravimétrica (TGA/TDA)	60
3.2.2.3 Difração de raios-X	61
3.2.3 Determinação da dosagem das argamassas.....	62
3.2.4 Determinação do índice de consistência das argamassas	64
3.2.5 Moldagem dos corpos de prova.....	65
2.3.6 Propriedades físicas e mecânicas	66
2.3.6.1 Densidade de massa no estado fresco.....	66
2.3.6.2 Teor de ar incorporado	67
2.3.6.3 Densidade de massa no estado endurecido.....	67
2.3.6.4 Resistência à compressão simples	68
2.3.6.5 Resistência à tração na flexão.....	68
2.3.6.6 Absorção de água por capilaridade	69
2.3.6.7 Determinação da resistência de aderência à tração	70
2.3.6.8 Durabilidade	72
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MINERALÓGICA.....	75
4.1.1 Cimento	75
4.1.2 Cal hidratada	78
4.1.3 Politereftalato de Etileno - PET.....	81
4.1.4 Agregado Miúdo	86
4.2 ENSAIOS TECNOLÓGICOS.....	88

4.2.1 Índice de consistência das argamassas	88
4.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado no estado fresco	90
4.2.3 Densidade de massa no estado endurecido.....	92
4.2.4 Resistência à compressão simples (RCS)	94
4.2.5 Resistência à tração na flexão	96
4.2.6 Absorção de água por capilaridade	99
4.2.7 Resistência de aderência à tração (RAT).....	100
4.2.8 Resistência das argamassas ao ataque por sulfatos	102
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..	106
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	106
REFERÊNCIAS.....	109
APÊNDICES	122

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, associado à elevação da urbanização e às alterações nos padrões de produção e consumo de bens, configuram os principais fatores que acarretam o aumento da geração de resíduos sólidos (ESMAEILIAN *et al.*, 2018). Esses resíduos, por sua vez, afetam a sustentabilidade em escala global, devido aos danos ambientais e sociais desencadeados pelos elevados montantes e pelo descarte inadequado (NOGUEIRA; MARTINS; SILVA, 2020).

Os materiais plásticos são na atualidade um dos principais constituintes do lixo doméstico e industrial, aspecto que se justifica pela elevada versatilidade, que permite ser empregado na confecção de embalagens e outros materiais (ASSIS; SANTOS, 2020). Estimativas indicam que até 2015 foram gerados aproximadamente 6.300 milhões de toneladas de plásticos em todo o mundo, enquanto as nações só conseguem reciclar até 5,9% da demanda (ALMESHAL *et al.*, 2020). Outro fator relevante é a durabilidade, uma vez que podem demorar séculos para se decompor no meio ambiente, culminando no acúmulo em aterros sanitários e na poluição ambiental, quando descartados de forma inadequada (FREITAS *et al.*, 2020).

Dentre os plásticos mais difundidos, dar-se destaque ao polietileno tereftalato (PET), por apresentar boas características químicas, físicas e mecânicas, e, por possuir boa reciclabilidade (PASSATORE, 2013). No Brasil, em 2020, a capacidade de produção chegou a 1 milhão de toneladas por ano, enquanto o potencial de reciclagem, corresponde a 450 mil toneladas, conforme a Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET, 2021).

De maneira análoga ao que acontece com os demais materiais plásticos, os resíduos oriundos do descarte do PET recebem destinações insustentáveis (PRATA *et al.*, 2019). Logo, afeta principalmente os organismos aquáticos e a composição do solo (STONE *et al.*, 2019) e apresenta longa permanência na natureza após o descarte, podendo superar mil anos (KOSHTI; MEHTA; SAMARTH, 2018).

Em contrapartida, nota-se que a indústria da construção civil se configura como um dos segmentos com maior demanda de recursos naturais, condição que também desperta preocupações quanto à sustentabilidade do setor, devido à escassez e ao risco de esgotamento das matérias primas (LEAL, 2021). Todavia, se caracteriza como um segmento que possui grande potencial para incorporação de resíduos advindos de outros sistemas produtivos, incluindo o PET (ŞİMŞEK; UYGUNOĞLU,

2018).

Diversos estudos versam sobre o incremento do PET como substituto parcial ou total do agregado miúdo em traços para a produção de concreto e argamassas em geral (OLIVEIRA; GOMES; CASTRO, 2011; VIDALES *et al.*, 2014; BENOSMAN *et al.*, 2017; KOCOT *et al.*, 2021). Trata-se de uma alternativa benéfica ao meio ambiente e pode melhorar determinadas propriedades dos compósitos (SILVA; BRITO; VEIGA, 2014).

Diante disso, Latroch *et al.* (2018) afirma que por se tratar de um agregado leve, o PET contribui para a produção de produtos com menor densidade, aspecto que reduz o peso da estrutura, contribuindo ainda para menores riscos de danos estruturais e redução de custos; e melhora o isolamento térmico. Também há benefícios quanto à durabilidade, especialmente devido à menor penetração de água, maior resistência a meios quimicamente agressivos e melhor trabalhabilidade (ALMESHAL *et al.*, 2020; THIAM; FALL, 2021).

Todavia, algumas condições findam por criar restrições quanto à empregabilidade desse material em produtos cimentícios, sobretudo, devido a perda de desempenho mecânico, decorrente da redução da resistência à compressão e da tração na flexão (BADACHE *et al.*, 2018; AOCHAROEM; CHOTICKAI, 2021).

Logo, as principais recomendações prescritas indicam para a necessidade de expandir a viabilidade da incorporação de PET em produtos que demandem poucos esforços compressivos, e, melhorar o desempenho mecânico destes, a fim de destinar satisfatoriamente os resíduos, a partir da incorporação na construção civil.

Assim, este trabalho se propõe a verificar a viabilidade do uso do Polietileno Tereftalato (PET) em substituição parcial do agregado miúdo de origem mineral, em argamassas de revestimento e assentamento, como uma possível alternativa para minimizar os impactos ambientais derivados do descarte desse polímero.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as propriedades físicas e mecânicas de argamassas de assentamento e revestimento produzidas com substituição parcial do agregado miúdo por Polietileno Tereftalato (PET) triturado.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar o índice de consistência adequado para as argamassas de referência e com incorporação do PET como substituto parcial do agregado miúdo;
- Analisar a influência dos teores de substituição do PET nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas;
- Avaliar a durabilidade da argamassa incorporada com PET, através da degradação por ataque de sulfatos.

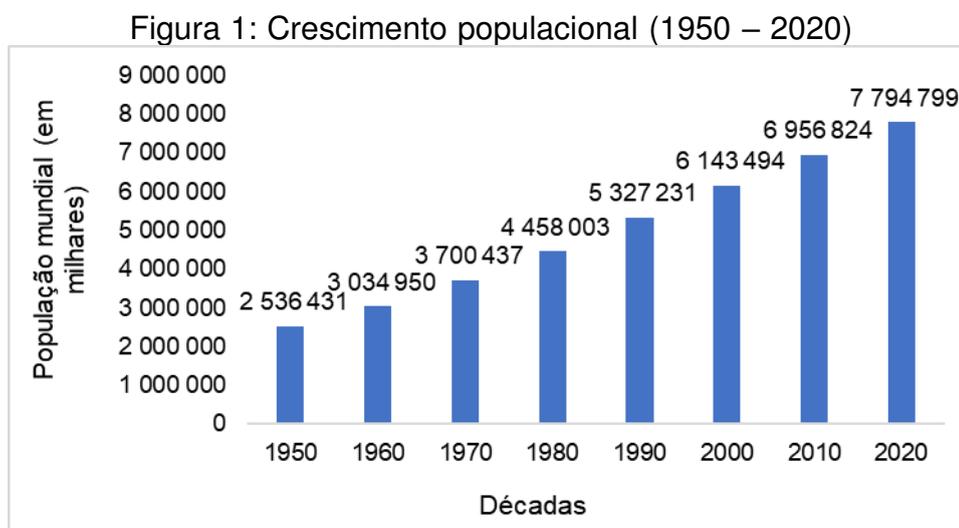
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

As modificações ocorridas no âmbito social e econômico repercutiram drasticamente no comportamento da população humana nas mais diversas regiões do planeta. Esse fenômeno, por sua vez, culmina em sérias problemáticas ambientais, dentre as quais a geração de resíduos ganha ênfase. De modo geral, é possível apontar alguns aspectos como determinantes para a geração de resíduos sólidos: a urbanização, o processo de industrialização e o crescimento demográfico (INOUE; RIBEIRO, 2016).

Face a essa realidade, Lima (2015) afirma que o crescimento demográfico, associado às modificações nos sistemas de produção e à migração populacional das áreas rurais para as cidades, contribuíram de forma expressiva para a elevação das taxas de geração de resíduos sólidos, principalmente a partir do século XX, quando se instala um modelo de consumo baseado na acumulação, substituição rápida e, por consequência, descarte rápido de produtos.

Ao analisar os aspectos demográficos de forma mais direta, a Organização das Nações Unidas — ONU (2020), revela que a população mundial está crescendo de forma progressiva (Figura 1). Esse aspecto, associado ao consumismo instaurado ao longo do século XX, amplia as dimensões de geração de lixo.



Fonte: Organização das Nações Unidas (2020). Adaptado pela autora.

Conforme dados da ONU (2020), a estimativa populacional para o ano de 2020 revela que a população mundial já se aproxima de 8 bilhões de pessoas e, nesse sentido, Inoue e Ribeiro (2016) afirmam que as expectativas quanto à geração anual de resíduos sólidos para 2020 corresponde a 2,2 bilhões de toneladas.

No tocante ao Brasil, verifica-se que muitos dos fatores que se mostram evidentes no âmbito internacional se fazem presentes. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística — IBGE (2010) mostra um crescimento gradual da população, visto que em 1960 haviam 71 milhões de habitantes e em 2010 (último censo demográfico realizado), esse variável correspondia a 190 milhões.

Associado a isso, nota-se ainda uma expressiva evolução do processo de urbanização, posto que em 1940 a taxa de urbanização era de 31,4%, chegando a 36,16% em 1950. Nas décadas seguintes, nota-se percentuais ainda mais significantes: 45,08% em 1960; 67,05% em 1980; 75,59% em 1990 e 84,4% em 2010 (IBGE, 1980; 2010).

Em relação aos quantitativos de resíduos gerados, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais — ABRELPE (2019) revela que em 2018, foram geradas 79 milhões de toneladas de resíduos, fato que mostra a necessidade de implementação de políticas e programas capazes de reduzir a geração e o descarte dos materiais.

Nesse sentido, evidencia-se que as iniciativas em prol da implementação de melhorias nesse segmento são muito recentes. Logo, cita-se a Política Nacional de Saneamento Básico, instituída pela Lei nº 11.445/2007, que estabelece as diretrizes Nacionais para o saneamento básico. Mais recentemente, enfatiza-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei nº 12.305/2010) (BRASIL, 2007; 2010).

A PNRS, define resíduos sólidos como sendo:

Art. 3º Para os efeitos desta Lei, entende-se por:
[...] XVI - resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Em consonância com Silva *et al.* (2020), essa política aborda a problemática representada pela geração de resíduos sólidos de forma inovadora, tendo em vista

que não considera unicamente as questões inerentes aos resíduos finais e, trata de forma direta todo o ciclo de vida dos produtos.

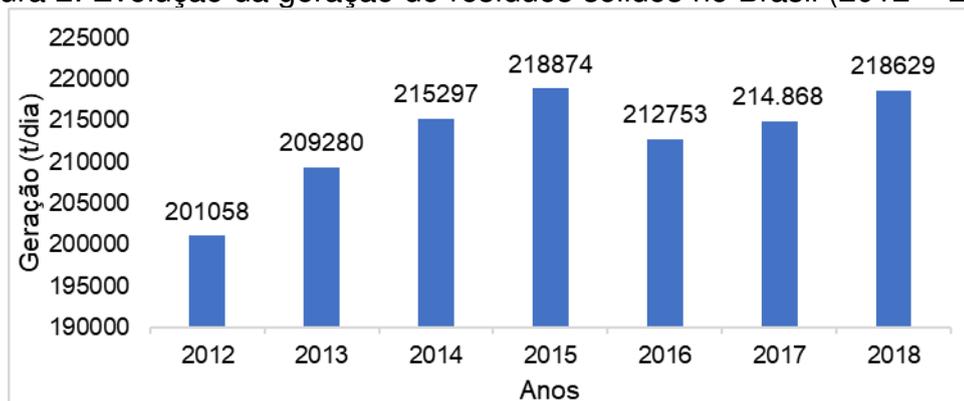
Logo, dentre os princípios apresentados na lei, cita-se como pertinentes a esse trabalho: a visão sistêmica, na gestão dos resíduos sólidos, que considera as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública; a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos; e o desenvolvimento sustentável (BRASIL, 2010).

Considerando que a produção de lixo é uma questão de grande magnitude, a próxima subseção vem tratar dessa temática, de modo a entender as características desses resíduos, além dos aspectos referentes ao gerenciamento.

2.1.1 Geração de resíduos no Brasil

Devido as transformações recentes, nota-se que o volume de resíduos gerados diariamente no Brasil tende a apresentar um comportamento ascendente (Figura 2). Conforme Batista, Carvalho e Fagundes (2020), dentre os fatores que permitem justificar o crescimento desse montante, a variação econômica ganha grande destaque, no entanto, essa relação não ocorre de forma direta e imediata.

Figura 2: Evolução da geração de resíduos sólidos no Brasil (2012 – 2018)



Fonte: ABRELPE (2019). Adaptado pela autora.

Ainda em relação aos volumes gerados, verifica-se que a relação estabelecida a nível nacional também é válida para as regiões, de modo que as localidades mais vulneráveis, em especial o Norte e Nordeste, tendem a apresentar quantitativos mais discretos, em decorrência da menor presença de atividades econômicas, menor geração de renda, redução do poder aquisitivo da população e, por consequência,

menor consumo e descarte de produtos (BATISTA; CARVALHO; FAGUNDES, 2020).

Os dados mais recentes revelam que a taxa diária *per capita* do país, no ano de 2018, correspondia a 1,039 quilogramas. Dessa maneira, estima-se que anualmente cada indivíduo produzia, aproximadamente, 380 quilogramas de lixo (ABRELPE, 2019).

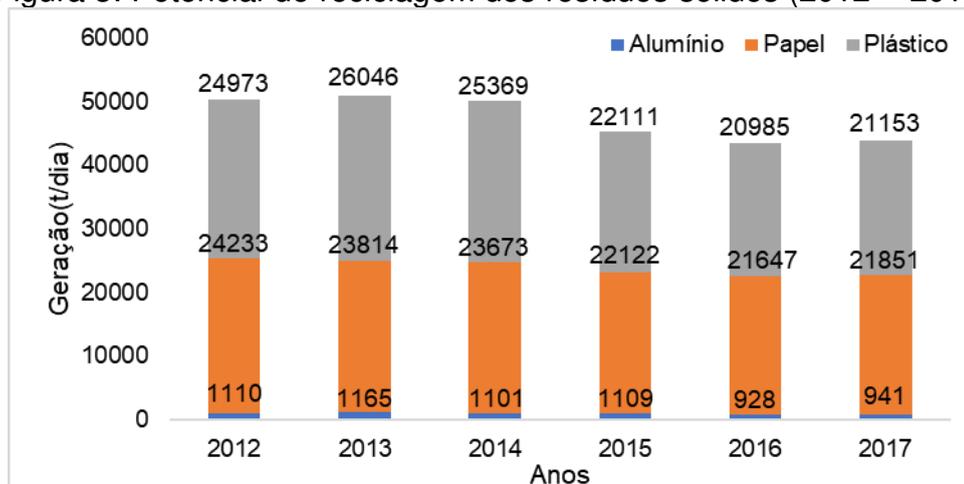
Além de atentar aos volumes, faz-se necessário também compreender a composição do resíduo. No âmbito nacional, essa questão é tratada a partir da Norma Brasileira 10.007/2004, que trata da amostragem, de modo a detalhar suas respectivas características.

Conforme Monteiro *et al.* (2001), os resíduos sólidos urbanos brasileiros possui a seguinte composição gravimétrica: 65% matéria orgânica, 3% vidro, 4% metal, 3% plástico e 25% papel. Todavia, essa composição é variável em função da região e da eficiência dos serviços de limpeza urbana, tais como a coleta seletiva, por exemplo (FEITOSA; BARDEN; KONRAD, 2018).

Mediante estudos desenvolvidos no Rio Grande do Sul, observou-se que os resíduos orgânicos correspondiam a 51% do material descartado. Estudos semelhantes mostraram percentuais que variaram entre 42% e 66% no Rio de Janeiro, enquanto em determinadas localidades do Paraná esse percentual correspondeu a 20%, aproximadamente. Todavia, nos casos em que há coleta seletiva, nota-se elevações nesses percentuais, devido a redução da contaminação dos materiais (FEITOSA; BARDEN; KONRAD, 2018).

Nessa perspectiva, a ABRELPE (2019) enfatiza que os resíduos gerados possuem elevado potencial para emprego da reciclagem, visto que uma expressiva taxa é constituída por alumínio, papel e plástico (Figura 3).

Figura 3: Potencial de reciclagem dos resíduos sólidos (2012 – 2017)



Fonte: ABRELPE (2019). Adaptado pela autora.

Como se observa, o plástico configura a maior fração do resíduo potencialmente reciclável no Brasil. Contudo, deve-se atentar que há uma grande variação quanto à caracterização dos resíduos. Em países como a China e a Rússia, o plástico corresponde a 14,3% e 15,8%, respectivamente, dos resíduos gerados, enquanto no Brasil esse percentual é de 15%. Infere-se ainda que a geração varia em função do grau de desenvolvimento da nação, a exemplo, cita-se a Índia, com uma produção de 0,5 quilogramas por habitante/dia, enquanto na China esse valor corresponde a 1,13 (FEITOSA; BARDEN; KONRAD, 2018).

Dentre as possibilidades que determinam o gerenciamento de resíduos, Monteiro *et al.* (2001) citam o tratamento e, nesse segmento, a reciclagem, a ser abordada na próxima subseção.

2.1.2 Reciclagem

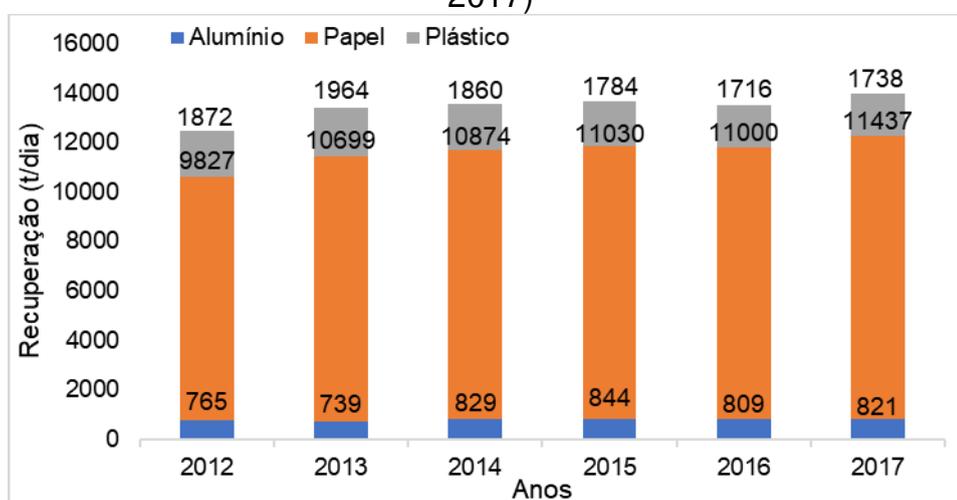
A reciclagem se apresenta como uma alternativa de tratamento de resíduos sólidos que possibilita reduzir a exploração de recursos naturais, além de minimizar o consumo de energia ao longo do processo produtivo. Nessa perspectiva, salienta-se que associado a esse ganho ambiental também ocorre a redução da quantidade de resíduos destinados aos aterros e outras destinações, contribuindo para a redução da poluição (DONATO; BARBOSA; BARBOSA, 2015).

Assim, a Política Nacional de Resíduos Sólidos define a reciclagem como sendo um “processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à

transformação em insumos ou novos produtos” (BRASIL, 2010). Já Lomasso *et al.* (2015) definem esse processo como uma série de atividades que permitem reincorporar resíduos, até então tratados como lixo, como matéria prima no processo produtivo.

Face a importância ambiental, social e econômica associada à reciclagem, deve-se enfatizar que esse é um segmento que enfrenta grandes desafios no Brasil, uma vez que os quantitativos de resíduos recuperados são consideravelmente baixos em comparação aos montantes gerados diariamente (Figura 4).

Figura 4: Quantitativo de resíduos recuperados para reciclagem no Brasil (2012 – 2017)

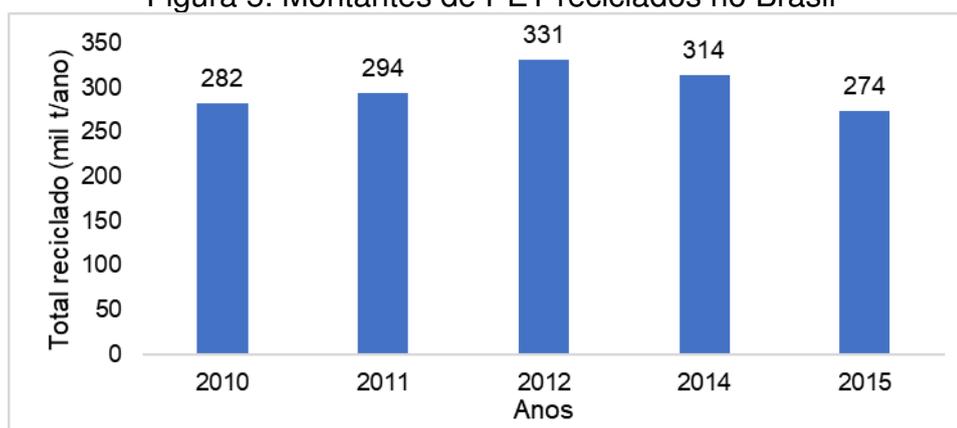


Fonte: ABRELPE (2019). Adaptado pela autora.

Dentre os materiais analisados pela ABRELPE, o alumínio é o único que apresenta um retorno expressivo. Nos demais casos, em especial os plásticos, nota-se que o volume gerado, quase que em sua totalidade, não é reciclado, fato que configura uma séria problemática.

Dentre os plásticos destinados a reciclagem, verifica-se que o Poli Tereftalato de Etileno (PET) é o que apresenta maior representatividade no tocante à reciclabilidade (ABRELPE, 2019). Nesse sentido, os montantes registrados nos últimos anos ultrapassam 270 mil toneladas por ano (Figura 5). Santos *et al.* (2015) enfatizam que os principais fatores que contribuem para que esse material ganhe destaque dentre os demais resíduos plásticos é o fato de que pode ser empregado como matéria prima em diferentes processos.

Figura 5: Montantes de PET reciclados no Brasil



Fonte: ABRELPE (2016). Adaptado pela autora.

Mesmo esse valor sendo expressivamente pequeno quando comparado à geração de plásticos, é válido salientar que o Brasil está entre os países que mais reciclam esse material, em especial as embalagens PET, alcançando um percentual de 55,6% das unidades consumidas, permitindo relevância internacional, juntamente com os Japão, Estados Unidos e Alemanha (SANTOS *et al.*, 2015).

Por se tratar de um dos principais elementos constituintes dos resíduos sólidos e, em decorrência de o PET se enquadrar enquanto um material plástico, esse será discutido no próximo tópico, de modo a indicar as principais tipologias, as questões socioambientais e os métodos de tratamento empregados.

2.2 SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A construção civil representa um dos maiores segmentos econômicos a nível mundial (RAITU; ANDERSON; SFAKIANAKI, 2015). No Brasil, é perceptível a grande relevância para a economia nacional, visto que é responsável direto pela geração de emprego e renda, além de movimentar a cadeia produtiva de outros segmentos. Diante desses aspectos, a Câmara Brasileira da Indústria da Construção — CBIC (2018) mostra que aproximadamente 60% do Produto Interno Bruto — PIB referente da construção advém especificamente das atividades de construção, havendo ainda participações da indústria (12,6%) e do comércio de materiais (10,7%), da prestação de serviços (5,7%), máquinas e equipamentos (0,8%) e outros fornecedores (10,1%).

Tais resultados só são possíveis de serem alcançados devido às tendências de

mercado e, sobretudo, em decorrência da intensa ramificação, uma vez que envolve outras áreas, como a arquitetura, comércio, contratação de mão de obra, transportes, engenharias e outras (CRUZ *et al.*, 2017).

Ainda em se tratando da magnitude alcançada por esse setor, Vieira e Nogueira (2018) relatam que nos últimos 40 anos, o crescimento alcançado correspondeu a 52,1%. Em uma análise mais atual, ressalta-se que entre 2003 e 2012 ocorreu um crescimento de 170% na quantidade de trabalhadores, caracterizando-se como uma força motriz para o desenvolvimento econômico, geração de emprego e renda no país.

Dentre os aspectos que marcam as questões discutidas no âmbito da construção civil, ressalta-se a sustentabilidade (CÔRTEZ *et al.*, 2012). Nesse sentido, o conceito de sustentabilidade adotado para esse trabalho parte do relatório “Nosso Futuro Comum”, elaborado após a Conferência de Brundtland, na década de 1980, no qual afirma-se que “o desenvolvimento sustentável é aquele que busca atender às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades” (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1987, p. 46).

Mesmo sendo uma questão latente, Raitu, Anderson e Sfakianaki (2015) ressaltam que alcançar a sustentabilidade na indústria da construção civil é um grande desafio para as empresas atuantes no segmento, visto que configura o setor responsável por um terço de todo o resíduo produzido, consome metade dos materiais extraídos e um terço da água.

Logo, a *Working Together for a World without Waste* (2015) aponta como prioridades para esse setor: a redução do consumo e desperdício de materiais, aumentar os consumos de materiais reciclados e reutilizados, usar produtos com baixo carbono incorporado, utilizar produtos com elevada durabilidade, e reduzir o consumo de energia e água.

Diante dos pontos citados, esse trabalho se volta especificamente à incorporação de material reciclado, especificamente o PET, que por sua vez, possibilita alcançar de forma indireta outros aspectos citados, como o uso de materiais com baixo carbono incorporado, por exemplo.

No tocante a incorporação de materiais reciclados na construção, em especial em argamassas, Xargay *et al.* (2019) afirmam que é uma prática que se torna gradualmente mais comum nos últimos anos. Pontua-se ainda que tal medida favorece ganhos ambientais diversos: ajuda a preservar as fontes de agregados

naturais e reduz a quantidade de resíduos a serem tratados e destinados aos aterros sanitários.

Assim, Agyekum (2018) afirma que as pesquisas voltadas ao alcance de viabilidade quanto a incorporação desses materiais nos materiais utilizados pela construção civil, constitui um forte segmento internacional, com destaque, principalmente, aos países desenvolvidos. Quanto aos principais substitutos adotados, o autor cita o emprego de cinzas volantes, vidro, aço, materiais poliméricos e outros.

Para além dos Ganhos Ambientais, Côrtes *et al.* (2012) citam que tais medidas somam positivamente quanto aos avanços e comportamento das empresas do setor e da indústria de materiais de construção, em relação às políticas ambientais, visto que permite promover a logística reversa, reforça a importância da reciclagem e minimiza o descarte de resíduos sólidos.

2.3 POLÍMEROS

Em conformidade com Pitt, Boing e Barros (2011), os polímeros são materiais que marcam fortemente o desenvolvimento tecnológico da humanidade. Quanto ao surgimento e às aplicações, os autores enfatizam que os primeiros registros datam da antiguidade, há aproximadamente 3000 anos, na China, quando seivas de árvores eram utilizadas como verniz. Posteriormente, nota-se que a evolução quanto ao uso e aprimoramento das técnicas de manuseio ocorreram de forma muito lenta nos anos seguintes.

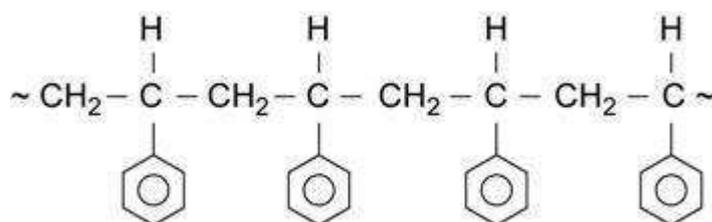
Outros avanços significativos só vieram ocorrer a partir do século XVI, uma vez que na década de 1550, aconteceu o descobrimento da borracha, obtida pela síntese do látex; no início do século XX surgiram os primeiros polímeros sintéticos, dentre eles, os poliésteres e as poliamidas; e mais recentemente, por volta de 1940, durante às guerras mundiais, muitas descobertas e usos foram implementados, em especial à borracha sintética (CANEVAROLO JÚNIOR, 2002).

Na atualidade, os plásticos constituem um grupo de produtos amplamente consumidos em escala global. A produção brasileira corresponde a aproximadamente 4 milhões de toneladas, sendo os setores da construção civil, embalagens e descartáveis os que possuem maior representatividade face ao consumo (HEMAIS, 2003; CANEVAROLO JÚNIOR, 2002).

De acordo com Piatti e Rodrigues (2005), os inúmeros avanços ocorridos no decorrer do século XX quanto às técnicas de polimerização e desenvolvimento de novos polímeros revolucionou a indústria e a forma de consumo. Nesse sentido, admite-se que esse material se popularizou mundialmente como “plástico”, tornando-se indispensável devido aos usos possíveis, baixo custo e características físicas, como densidade, resistência, plasticidade e elasticidade.

Assim, Manrich (2005, p. 19) define esse material como sendo “qualquer material orgânico ou inorgânico, sintético ou natural, que tenha um alto peso molecular e que tenha variedades estruturais repetidas”. A partir dessa definição, Rudin e Choi (2016) afirmam que dentre os fatores que conferem tal peso molecular, destaca-se o fato de que a macromolécula é formada por moléculas menores que se repetem (Figura 6). Logo, o termo polímero significa muitas partes, onde *poli* corresponde a “muitas” e *mero* a “parte”.

Figura 6: Macromolécula formada por moléculas menores



Fonte: Rudin e Choi (2016).

Quanto à classificação desse grande grupo de materiais, Passatore (2013) afirma que diariamente surgem novos compostos, de maneira que as métricas utilizadas para classificação consideram características físicas, químicas e mecânicas (Quadro 1).

Quadro 1: Classificação dos polímeros

Critério	Casse do polímero
Origem	Natural
	Sintético
Número de monômeros	Homopolímero
	Copolímero
Estrutura química da cadeia polimérica	Poli-hidrocarboneto
	Poliamida
	Poliéster
	Outros

Fusibilidade e solubilidade	Termoplástico
	Termorrígido
Comportamento mecânico	Borracha/elastômero
	Plástico
	Fibra

Fonte: Passatore (2013). Adaptado pela autora.

No caso dos polímeros naturais, são comumente obtidos de fontes vegetais, sendo fortemente representados pelos látex, polissacarídeos e proteínas. Já os sintéticos, são resultantes de processos químicos e, geralmente, apresentam como principal matéria prima o petróleo (PASSATORE, 2013).

Em se tratando do número de monômeros, compreendidos como pequenas moléculas que representam a unidade de repetição (CANEVAROLO JÚNIOR, 2002), afirma-se que os homopolímeros são constituídos por unidades idênticas de moléculas, enquanto os copolímeros consistem em arranjos de moléculas distintas (RUDIN; CHOI, 2016).

Os termoplásticos são polímeros que podem ser fundidos e moldados repetidas vezes. Já os termorrígidos, também denominados termofixos, sofrem degradação da estrutura química, inviabilizando a reincorporação em processos térmicos que alcancem o ponto de fusão (MANRICH, 2005).

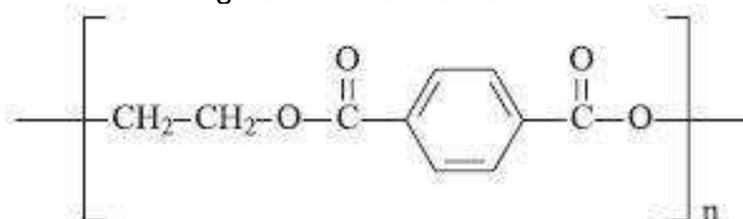
Discute-se também as características mecânicas. Nesse sentido, as fibras são caracterizadas por apresentarem as moléculas organizadas no sentido longitudinal, favorecendo aumento de resistência a deformação. Os plásticos, comumente apresentam como característica a rigidez, porém são moldáveis sob pressão, enquanto as borrachas caracterizam-se pela presença de cadeias flexíveis que propiciam elasticidade reversível (PIATTI; RODRIGUES, 2005).

2.4 POLITEREFTALATO DE ETILENO – PET

O PET (Figura 7) se caracteriza como um copolímero de poliéster, classificado como termoplástico (BANNACH *et al.*, 2011). De acordo com Ravidranath e Mashelkar (1986), esse material foi desenvolvido em 1941 na Inglaterra e, inicialmente, se destinava à produção de fibras que permitiam a confecção têxtil. Posteriormente, na década de 1960, teve a produção expandida, abrangendo outros países da Europa e os Estados Unidos. No Brasil, só chegou na década de 1960, sendo também

destinado à confecção de tecidos, mas a partir de 1990, seguindo uma tendência mundial, passou a ser empregado na produção de embalagens (PEREIRA; MACHADO; SILVA, 2002).

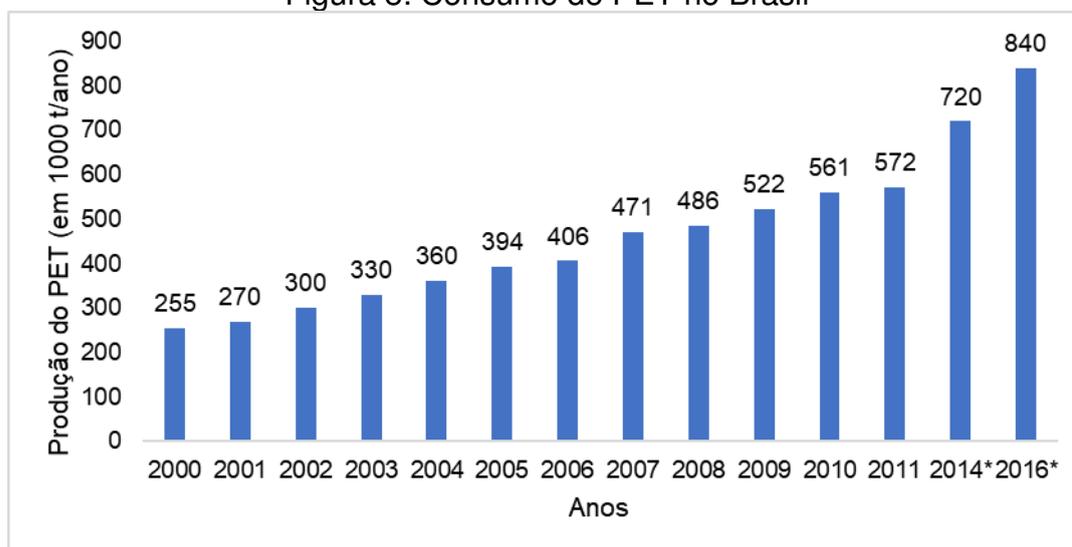
Figura 7: Estrutura do PET



Fonte: BANNACH *et al.* (2011).

Na atualidade, o PET possui usos mais diversos, tais como as fibras têxteis, embalagens, filmes biorientados e materiais para as mais diversas áreas da engenharia (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009). Conforme a Associação Brasileira da Indústria do PET — ABIPET (2013), o consumo desse material apresenta crescimento progressivo, de modo que as estimativas para o ano de 2014 e 2016 correspondiam a 720 e 840 mil toneladas/ano (Figura 8), dos quais, 90% seriam consumidos pelo setor de embalagens para bebidas e alimentos.

Figura 8: Consumo de PET no Brasil



* Valores estimados.

Fonte: ABIPET (2013). Adaptado pela autora.

No tocante à síntese do PET, esse processo se organiza em duas ou três etapas, a depender do uso a ser atribuído ao material. Logo, as etapas são: pré-polimerização, policondensação e polimerização no estado sólido. Na primeira fase,

ocorre a produção do tereftalato de bis(2-hidroxietileno) — BHET. Posteriormente, na policondensação, o BHET é aquecido a 280 °C enquanto a pressão é reduzida para valores inferiores a $1,3 \times 10^2$ Pa, por um período de 5 a 10 horas, aproximadamente, elevando o grau de polimerização para 100, o que permite formar o Etileno Glicol, utilizado para fins menos nobres, como a produção de fibras têxteis. (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009)

Já a polimerização em estado sólido, conforme Romão, Spinacé e Paoli (2009), ocorre em intervalo de temperatura entre o ponto de fusão e transição vítrea (220 a 230 °C), durante 10 a 30 horas. Essa última etapa é necessária para o PET destinado a usos mais exigentes, visto que alcança massa molecular superior a 3.000 g/mol.

Em relação as propriedades e comportamento mecânico desse material, é pertinente destacar a massa molar, densidade, índice de refração, temperaturas de fusão e de transição vítrea, módulo de elasticidade, resistência a tração e compressão e permeabilidade ao oxigênio (Tabela 1).

Tabela 1: Propriedades e comportamento mecânico do PET

Propriedades	Valores
Densidade (g/mL)	1,33 – 1,45
Massa Molar (g/mol)	15000 – 42000
Índice de Refração	1,65 – 1,66
Temperatura de fusão (°C)	250 – 270
Temperatura de transição vítrea (°C)	70 - 74
Módulo de elasticidade (GPa)	$2,61 \pm 0,04$
Módulo de Flexão (Kg/mm ²)	1200
Permeabilidade ao O ₂ (cc mm/m ² dia atm)	4,9
Resistência ao impacto (J/m)	$20,5 \pm 4,05$
Resistência a tração (Mpa)	$58,7 \pm 1,34$

Fonte: Scheirs; Guardette (1997); Trombini; Agnelli; Tafuri (2000); Carvalho; Sousa (2009). Adaptado pela autora.

Em conformidade com Passatore (2013), essas características conferem ao PET elevadas resistência mecânica, térmica e química; boas propriedades de barreira, além de fácil reciclabilidade. Com isso, tornou-se um polímero de engenharia em contínuo aperfeiçoamento, permitindo-lhe ser inserido nos mais diversos processos.

Contudo, compreende-se que a produção desse plástico em larga escala, bem como a intensificação dos usos atribuídos, proporcionam impactos ambientais uma vez que os resíduos oriundos do descarte comumente recebem como destinação os aterros sanitários ou outros fins caracterizados como insustentáveis (PRATA *et al.*, 2019).

Ao analisar o ciclo de vida de produtos confeccionados a partir do PET, Gomes, Visconte e Pacheco (2019) relatam que os principais impactos propiciados ao longo de todo o ciclo de vida do material, isto é, do processo de fabricação, uso e descarte, os que mais se destacam são a ecotoxicidade; a poluição atmosférica; depleção da camada de ozônio; eutrofização; agravamento dos quadros de doenças respiratórias; correlação com patologias carcinogênicas e não carcinogênicas; e aumento do potencial de aquecimento global.

Dentre as etapas do ciclo de vida do PET, enfatiza-se na literatura que a etapa de produção é a mais danosa, devido aos elevados quantitativos de CO₂ lançados na atmosfera, aplicação de corantes que, por consequência geram resíduos, além do consumo de energia (KANG; AURAS; SINGH, 2017). Diante disso, a quantidade de dióxido de carbono emitido é quantificado para os mais variados produtos: 0,1 kg por bandeja com capacidade volumétrica de 1L e 4,7 kg por garrafa utilizada para embalagem de bebida não alcoólica (CHEN; PELTON; SMITH, 2016; MAGA; HEIBEL; ARYAN, 2019).

Ademais, Stone *et al.* (2019) cita a ingestão de microfibras de PET por organismos aquáticos; Koschevic e Bittencourt (2016), Koshti, Mehta e Samarth (2018) relatam a longa permanência na natureza após o descarte, podendo superar mil anos, devido ao fato de o processo de degradação ocorrer de forma lenta. Assim, as medidas amplamente citadas na literatura dizem respeito ao uso de fontes biodegradáveis para a síntese do material, adequação das tecnologias que constituem o processo produtivo e a reciclagem, sendo tratadas a seguir.

2.4.1 Reciclagem do PET

Os resíduos plásticos são gerados em diferentes fontes: indústrias, atividades domésticas e comerciais. Nesse contexto, relata-se que há uma grande variedade de materiais que constitui essa classe residual, fato que associado à ocorrência de contaminação, interfere diretamente na escolha do tratamento e destinação final a

serem empregados (MEKHZOUM *et al.*, 2017).

Ainda em consonância com Mekhzoum *et al.* (2017), as principais técnicas de tratamento adotadas são a incineração e a destinação para aterros sanitários. No entanto, essas alternativas impactam negativamente o ambiente, de modo que a reciclagem consiste na forma mais viável de tratar os materiais plásticos descartados.

Ao analisar o PET, especificamente, Geyer, Lorenz e Kandelbauer (2016) citam que as classes de reciclagem mais empregadas são a química e mecânica. Todavia, admite-se outras possibilidades menos usuais, como a reciclagem energética, que ocorre mediante a pirólise ou carbonização do material e aproveitamento do calor.

De acordo com Raheem *et al.* (2019), o processo de reciclagem química permite realizar a degradação total do PET, de modo que são produzidos monômeros de ácido tereftalático (TPA), dimetil tereftalato (DMT), tereftalato de bis(2-hidroxietileno) – BHET e etileno glicol (EG). Outra possibilidade é a ocorrência de degradação parcial, que resulta na produção de oligômeros e outros subprodutos.

Ressalta-se ainda que essa técnica foi implementada, inicialmente, para propiciar o aproveitamento dos resíduos emergentes oriundos dos processos industriais de beneficiamento do material e, na atualidade, devido ao elevado consumo, aplica-se na reciclagem de embalagens e outros resíduos (RAHEEM *et al.*, 2019).

Khoonkari *et al.* (2015) ressaltam que o processo químico permite a produção de novos produtos, a partir do material utilizado anteriormente, visto que permite a obtenção dos constituintes iniciais que integram a composição do PET. Todavia, nota-se que a repetição do processo de reciclagem afeta as características e o comportamento mecânico do material, uma vez que reduz a resistência ao impacto e o peso molecular, devido às modificações sofridas pelas macromoléculas.

No tocante ao processo pelas vias mecânicas, Ragaert, Delva e Geem (2017) afirmam que é dividido em etapas: coleta, classificação, lavagem e trituração. Nesse sentido, o subprocesso mais relevante consiste na moagem que permite gerar flocos, sendo as dimensões definidas de acordo com a empregabilidade desejada. Destaca-se também a produção de fibras e filamentos, que permite a incorporação em processos diversos, como a produção têxtil, por exemplo (PARK; KIM, 2014).

Um método menos convencional, mas discutido na literatura, é a biodegradação, que consiste no uso de bactérias para produção de enzimas e assim,

realiza-se a catalisação da clivagem, quebrando as ligações e tornando os monômeros disponíveis para a incorporação em outros ciclos. Dentre os fatores citados como positivos, destaca-se os aspectos ecológicos. Entretanto, há limitações técnicas, como a elevada quantidade de tempo e a necessidade da exposição prévia do material a processos mecânicos, como a moagem.

2.4.2 Utilização do PET em argamassas

Dentre as alternativas para o emprego do PET, em especial quando se trata de um material que passou por repetidos processos de reciclagem, cita-se a incorporação desse na cadeia produtiva da construção civil (ŞİMŞEK; UYGUNOĞLU, 2018). Nesse sentido, diversos estudos versam sobre o incremento do PET em traços para a produção de concreto e argamassas em geral (OLIVEIRA; GOMES; CASTRO, 2011; VIDALES *et al.*, 2014; BENOSMAN *et al.*, 2017).

Ao estudar as propriedades mecânicas de argamassas plásticas produzidas com incorporação de PET reciclado, Ge *et al.* (2013) constataram que a amostra com 15% de partículas finas foi a que proporcionou os melhores resultados, de modo que à medida que esse percentual era aumentado, notava-se oscilações em relação à resistência, posto que no primeiro momento ocorre um aumento e, posteriormente, o declínio da propriedade em questão.

Ressalta-se também a obtenção de excelente estabilidade à temperatura e a resistência a compressão se mostrou estável em um intervalo de 30°C a 90°C; baixa absorção de água, aproximadamente 0,47%; elevada resistência à corrosão; e a Microscopia Eletrônica de Varredura revelou que a argamassa possuía estrutura uniforme e densa (GE *et al.*, 2014).

Ao analisar a aplicabilidade de fibras de PET reciclado em argamassas, Oliveira, Gomes e Castro (2011) afirmam que não ocorreu modificações relevantes na densidade para os volumes empregados. Também não houve ganhos significativos quanto à resistência à compressão; o volume de PET de 50% proporcionou uma melhoria na resistência a flexão de aproximadamente 100% em 7 dias, 30% em 28 dias e a ordem de 50% em 63 dias.

Ao comparar os efeitos do PET e outros materiais plásticos em argamassas, Silva, Brito e Veiga (2014), pontuam que a inserção de PET como substituto parcial da areia favoreceu a redução da densidade, resistência a compressão e a flexão.

Resultados similares foram obtidos por Reis e Carneiro (2012) e Reis *et al.* (2011), mostrando-se contrário ao que foi descrito por Oliveira, Gomes e Castro (2011).

A absorção de água foi outro parâmetro que se mostrou desfavorável, fato que foi justificado pela fraca ligação entre as matrizes, favorecendo a ocorrência de variações de porosidade e aumento da absorção por capilaridade. Os resultados positivos dizem respeito ao aumento da resistência ao impacto e o ganho de permeabilidade ao vapor de água (SILVA; BRITO; VEIGA, 2014).

Em estudos que analisavam os efeitos da gradação agregada, da razão areia/PET e das condições de cura nas propriedades físicas e mecânicas da argamassa PET reciclada, revelaram que a medida em que se aumenta a relação areia/PET, ocorre também o aumento da densidade, da absorção de água e da resistência à compressão (GE *et al.*, 2013).

Ge *et al.* (2013) realizaram uma pesquisa em que as garrafas PET foram derretidas e misturadas com areia para produzir argamassa com PET reciclado. Foi possível perceber que a medida que se elevou a relação areia/PET, a densidade e a absorção de água da argamassa com PET reciclado aumentou, porém, de modo geral elas apresentaram um nível relativamente baixo de absorção de água. A argamassa com PET reciclado que possuía uma areia com gradação contínua exibiu uma resistência à compressão maior do que a que era constituída com areia de tamanho único. Ademais, observou-se que a medida que foi aumentada a quantidade de areia em relação ao PET, as resistências à compressão e à flexão aumentaram.

Por fim, Benosman *et al.* (2017) mostram que a presença do PET em substituição ao cimento proporcionou maior resistência à argamassa em relação ao ataque de sulfato. Constatou-se também que os coeficientes térmicos, em especial difusividade térmica, condutividade, efusividade térmica e capacidade calorífica são melhorados, permitindo a recomendação desse compósito para fins de isolamento térmico.

2.5 ARGAMASSAS

Para melhor fundamentar esse trabalho, o conceito de argamassa adotado parte de Lara (2013, p. 45), que a define como sendo “um material resultante da mistura de aglomerante, água e agregado miúdo”. Diante disso, a autora apresenta também o conceito de aglomerante: um material que quando adicionado à água, forma

uma pasta capaz de endurecer mediante reações químicas. No caso do agregado, é tratado como sendo um material inerte.

Conforme Recena (2011), os primeiros indícios do uso de rochas calcárias para o processo de calcinação datam de 5000 a 6000 anos antes de Cristo (a. C.), todavia, os registros que revelam o emprego de argamassas datam de, aproximadamente, 3000 anos a. C., no Antigo Egito. Ressalta-se ainda que os primeiros traços eram compostos, basicamente, por areia e cal, visto que os povos egípcios possuíam um bom domínio desses materiais.

Face tal aspecto histórico, Santiago (2007) mostra que por muito tempo, para diversos autores o conceito de argamassa esteve restrito à tal composição, uma vez que muitos livros e outros documentos que tratavam dos materiais de construção, definiam como sendo uma mistura de água, areia e cal.

Outros períodos históricos que mostram o aperfeiçoamento do emprego desse material são citados por Margalha (2011), que discute o uso das argamassas por gregos e romanos, por volta do século II a. C. Ainda em conformidade com a autora, foram conferidos usos aprimorados ainda não realizados por outros povos, como o revestimento de superfícies, por exemplo.

Dentre os principais fatores que caracterizam as argamassas nesse período, cita-se a durabilidade e resistência. Entretanto, é enfatizado que não haviam tecnologias que propiciassem um conhecimento aprofundado acerca das características mineralógicas dos constituintes e das argamassas utilizadas (MARGALHA, 2011).

Em relação às descobertas mais recentes, cita-se o desenvolvimento de ligantes hidráulicos, no século XVIII e, o surgimento do cimento no século XIX. No século XX e início do século XXI, nota-se que os principais avanços ocorrem no sentido de melhorar as propriedades dos produtos já utilizados. Nesse sentido, verifica-se ao longo do tempo e, especialmente nesse período, mudanças expressivas quanto à constituição básica, bem como usos distintos, dentre eles, assentamento, revestimento, sendo esse último impulsionado por questões estéticas (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005).

Ao estudar o caso do Brasil, especificamente, nota-se que o uso de argamassas ocorre de forma concomitante ao processo de colonização, visto que o surgimento das primeiras caineiras se deu por volta de 1540, favorecendo a produção

de cal e o emprego da alvenaria nas edificações. Na atualidade, nota-se que o país segue uma tendência mundial quanto ao emprego de diferentes agregados e outros constituintes em substituição à cal, como o caulim (RECENA, 2011).

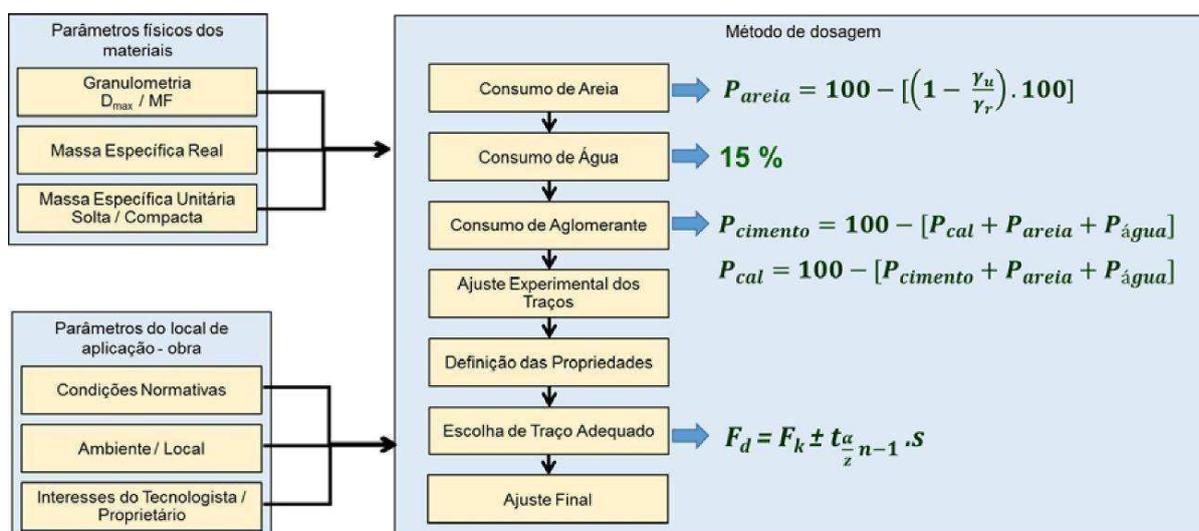
No tocante aos materiais utilizados para a produção das argamassas, Fiorito (2010) destaca o cimento Portland, que possui propriedade aglomerante e confere resistência mecânica; a cal também adotada como aglomerante, no entanto, com propriedades mecânicas e aderência menos favoráveis; água, necessária para que ocorram as reações ao longo do traço; areia, que caracteriza o agregado miúdo e, interfere diretamente na quantidade de água a ser consumida na produção da argamassa, de maneira que quanto mais fino o material maiores os volumes de água demandados.

Aponta-se o uso de outros produtos tidos como aditivos, que favorecem a melhoria das características da argamassa em seu estado fresco e endurecido. Dentre eles, os mais comuns são: plastificantes, que melhoram a trabalhabilidade da argamassa; retentores de água, responsáveis por reduzir a evaporação; incorporadores de ar; retardadores de pega, que aumentam o tempo de utilização; aumentadores de aderência; e hidrofungantes, que reduzem a retenção de água das argamassas (FIORITO, 2010).

Além de discutir os principais elementos constituintes das argamassas, é de extrema relevância enfatizar os métodos de dosagem, visto que a dosagem, quando realizada de forma adequada, melhora as condições de trabalhabilidade, reduz custos, consumo de insumos e minimiza as ocorrências de problemas futuros, tais como fissuras, esfarelamento e outros (RECENA, 2012).

Dessa maneira, Santos *et al.* (2018) afirma que a dosagem das argamassas (Figura 9) consiste em definir as proporções dos elementos constituintes de acordo com os princípios técnicos e com as características desses elementos.

Figura 9: Fluxograma de dosagem de argamassas



Fonte: Santos *et al.* (2018).

Os elementos constituintes e o emprego de uma dosagem adequada são fatores indispensáveis para alcançar as características desejáveis para a argamassa. Santiago (2007) cita que as principais condições a serem observadas são: compacidade, que está intimamente relacionada à resistência, de modo que quanto mais compacta e densa, mais resistente; e impermeabilidade, visto que reduz a penetração de água e outras substâncias de comportamento agressivo, responsáveis pela deterioração das edificações.

Enfatiza-se também a aderência, necessária para que ocorra a união satisfatória entre as partes ou a cola superficial, nos casos de argamassas para revestimento; e a constância de volume, de modo a evitar a ocorrência de esfoliação, retração, inchaço e outros comportamentos indesejáveis, que afetam a resistência e durabilidade do material (SANTIAGO, 2007).

Dentre os aprimoramentos recentes, destaca-se a normalização das argamassas (Quadro 2), que tem como principal finalidade conferir as características necessárias em conformidade com as aplicações pretendidas. Nesse sentido, enfatiza-se que no Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas é o órgão responsável por implementar as normas a serem atendidas.

Quadro 2: Normas brasileiras para argamassas

Normas	Descrição
NBR 6474/1998	Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica.
NBR 9778/2005	Argamassa e concreto endurecido: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.
NBR 11578/1991	Cimento Portland Composto.
NBR 16372/2015	Cimento Portland e outros materiais em pó.
NBR 7200/1998	Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: procedimento.
NBR 7211/2009	Agregados para concreto: especificação.
NBR 7215/2019	Cimento Portland: determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.
NBR NM 248/2003	Agregados: determinação da composição granulométrica.
NBR NM 46/2003	Agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem.
NBR NM 45/2006	Agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios.
NBR NM 52/2009	Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente.
NBR 9778/2005	Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.
NBR 11579/2012	Cimento Portland: determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).
NBR 13276/2016	Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do índice de consistência.
NBR 13277/2005	Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da retenção de água.
NBR 13278/2005	Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.
NBR 13279/2005	Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.
NBR 13280/2005	Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.
NBR 13281/2005	Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: requisitos.

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Quanto à classificação das argamassas Isaia (2017) cita diversos fatores que

podem ser considerados, tais como: natureza, tipos e número de aglomerantes; consistência, plasticidade e densidade; e as funções associadas (Quadro 3).

Quadro 3: Classificações das argamassas

Critério	Tipos
Plasticidade	Argamassa pobre/magra; Argamassa média/cheia; Argamassa rica/cheia.
Densidade	Argamassa leve; Argamassa normal; Argamassa pesada.
Tipo de preparo	Preparada em obra; Mistura semipronta para argamassa; Argamassa industrializada; Argamassa dosada em central.
Função	Construção de alvenarias; Revestimento de paredes e tetos; Revestimento de pisos; Revestimento cerâmico; Recuperação de estruturas.

Fonte: Isaia (2017). Adaptado pela autora.

2.6 MATERIAIS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS

De acordo com Fiorito (2010), as argamassas utilizadas em obras são comumente compostas de areia natural lavada, e os aglomerantes são em geral cimento Portland e cal hidratada. Dessa maneira, sua denominação é função do aglomerante utilizado, sendo chamadas de argamassa de cal, de cimento ou mista de cal e cimento. Ademais, o tipo de aglomerante ou mistura de tipos diferentes de aglomerantes constituintes da argamassa, é determinado pela função a qual se destina. Dessa maneira, para melhor compreender a constituição da argamassa e sua destinação, que será posteriormente apresentada neste trabalho, é importante analisar os materiais que as compõem.

2.6.1 Cimento

Na antiguidade, os romanos moíam a cal em conjunto com cinza vulcânica ou

telhas de barro cozido finamente moídas. A sílica e a alumina contidas na cinza e os fragmentos de telha reagiam com a cal e produziam um material, que ficou conhecido por cimento pozolânico, em homenagem a região de Pozzuoli, onde as cinzas foram encontradas primeiramente. A nomenclatura “cimento pozolânico” é usado até os dias atuais para cimentos obtidos pela simples moagem de materiais naturais em temperaturas ambientes. (NEVILLE, 2016).

Assim, o nome “cimento Portland” é usado hoje em dia em todo o mundo para descrever o cimento obtido pela queima, à temperatura de clínquerização, de uma mistura íntima de materiais calcários e argilosos ou de outros materiais que contenham sílica, alumina e óxidos de ferro.

Segundo Bauer (2019), a cal (CaO), a alumina (Al_2O_3), a sílica (SiO_2), o óxido de ferro (Fe_2O_3), determinada proporção de magnésia (MgO) e uma pequena parcela de anidrido sulfúrico (SO_3), adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega, são os constituintes fundamentais do cimento Portland. Este também possui algumas impurezas, como os óxidos de sódio e potássio (Na_2O e K_2O), que são os denominados álcalis do cimento e o óxido de titânio (TiO_2), além de outras substâncias de menor relevância.

Bauer (2019) apresenta os três aspectos das propriedades físicas do cimento: a propriedade do produto em sua condição natural (em pó), a mistura de cimento e água (originando a pasta) e a mistura da pasta com agregados normalizados, formando a argamassa.

As propriedades químicas estão diretamente ligadas ao processo de endurecimento por hidratação, que é um procedimento complexo, admitindo-se, atualmente, que se desenvolve em desenvolvimentos que compreendem a dissolução na água, precipitações de cristais e gel com hidrólises e hidratações dos componentes do cimento. A estabilidade, o calor de hidratação, a resistência aos agentes agressivos e a reação álcali-agregado caracterizam essas propriedades químicas (BAUER, 2019).

Segundo Recena (2012), o cimento Portland proporciona melhor trabalhabilidade e é quem determina as propriedades das argamassas no estado endurecido, lhe conferindo boa resistência mecânica e elevada durabilidade. Dessa forma, percebe-se que o desempenho e as características do cimento implicam diretamente nas propriedades das argamassas.

2.6.2 Cal

A queima do calcário foi uma prática adotada pelos antigos gregos e pela civilização romana para obtenção de um ligante. Foi utilizada, por exemplo, uma mistura de cal e pozolana na pavimentação da Via Ápia, em Roma, que permitiu a obtenção de uma base de pavimentação em que alguns trechos resistem até os dias atuais, com cerca de 2000 anos de solicitações de uso, comprovando o quão durável é o material (BAUER, 2019).

Santiago (2007) explica que o uso da cal reduziu consideravelmente devido à grande difusão do Cimento Portland, mas que, até o século XIX, era o aglomerante utilizado, tanto em assentamentos como revestimentos, nas construções. No Brasil, mesmo com essa diminuição do emprego, seu uso pode ser conferido em várias regiões de baixa renda, justamente devido ao fato de que atualmente, segundo informações de Santiago, existe a tentativa de recuperação da empregabilidade da cal, principalmente nas habitações de baixo custo.

Segundo Vaz (2016), a Cal passou, ao longo dos anos, por muitas adaptações para melhor aproveitamento de suas propriedades, e hoje existe a cal virgem ou viva, extinta, hidratada, aérea e a cal hidráulica. Bauer (2019) mostra que, nas últimas décadas, o mercado da construção civil tem preferido a cal hidratada comercial no lugar da cal virgem, pois enquanto esta é um produto cáustico, de elevada reatividade química e liberação de calor ao reagir com a água, exigindo, portanto, cuidados especiais no seu manuseio e na etapa de hidratação, a cal hidratada comercial é um produto mais otimizado para o uso do varejo e das grandes obras.

O principal uso da cal na construção civil é como ligante em argamassas mistas de cimento, cal e areia. De acordo com Cincotto *et al.* (2017), dentre as principais influências da cal nas argamassas, pode-se observar: atribuição de plasticidade, aumento da capacidade de incorporação de areia, retenção maior da quantidade de água, atribuição de certa isolação térmica, contribuição com a resistência mecânica à compressão e à tração, proporcionamento de maior economia na obra, melhor acabamento ao se empregar a areia fina, aumento da resistência à penetração de água, entre outras.

2.6.3 Agregado

Lopes (2019) afirma que agregado é qualquer material granular natural ou sintético, sem forma ou volume definidos. Ele destaca que os agregados de origem natural são encontrados de forma particularizada na natureza, enquanto que os artificiais são produzidos por algum processo industrial. Ainda segundo Lopes (2019), por muito tempo se considerou esse material inerte, entretanto, percebeu-se que a composição mineralógica dos agregados poderia conter substâncias deletérias, prejudiciais à durabilidade do concreto.

Pode-se estender esse entendimento, portanto, para as argamassas. Logo, os agregados devem ser o mais inerte possível, para que não gerem patologias no revestimento ou assentamento de blocos feito com a argamassa.

A NBR 7.211/2009 classifica os agregados miúdos, quanto às dimensões, como aqueles que passam na peneira com abertura de malha de 4,75mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m (ABNT, 2009).

É indubitável que a forma das partículas do agregado miúdo influencia as propriedades da mistura, pois as partículas angulosas exigem maior quantidade de água para uma determinada trabalhabilidade. Entretanto, ainda não existe um método objetivo de medir e expressar a forma dessas partículas, apesar de terem sido feitas tentativas utilizando medições da área superficial projetada e outras aproximações geométricas (NEVILLE, 2016).

Uma forma de análise das partículas dos agregados é através da sua granulometria, uma operação simples de classificar uma amostra de agregado em frações, cada uma constituída por partículas de mesma dimensão (NEVILLE, 2016). A ABNT NBR 7.211/2009 rege o ensaio para a determinação da granulometria, realizado com peneiras de aberturas nominais predeterminadas pela norma (ABNT, 2009). A curva granulométrica é a representação gráfica das proporções de material passante em cada uma das peneiras, o que facilita a interpretação dos dados.

2.6.4 Água

Quanto à água, Recena (2012) diz que, em pastas de cal, ela viabiliza a reação de carbonatação que ocorre com a liberação de água para o meio ambiente com redução de volume na formação do carbonato de cálcio. Quando as pastas são de

cimento Portland, o mesmo autor afirma que a água se apresenta de forma diferente, classificando-a em água não evaporável, água evaporável e água capilar.

A água não evaporável é representada pela água quimicamente combinada a partir da ocorrência das reações de hidratação do cimento Portland e integra a estrutura dos cristais hidratados. É a quantidade mínima de água necessária para que ocorra a hidratação do cimento, o que corresponde, dependendo das características do cimento, a relações água/cimento entre 0,23 e 0,28. Considera-se não evaporável porque esta água não pode ser removida por simples secagem (RECENA, 2012).

A água evaporável é, ainda segundo Recena (2012, p. 104), a que proporciona a trabalhabilidade. De acordo com ele,

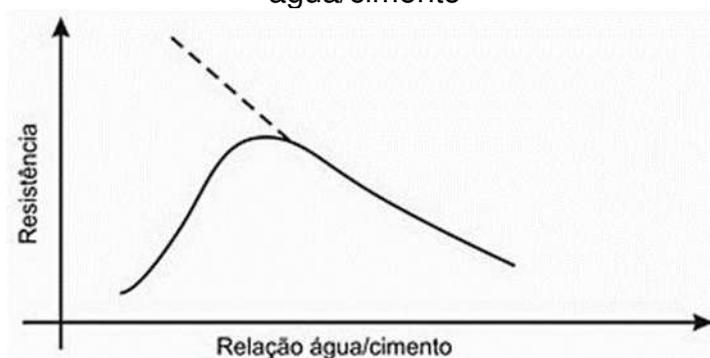
[...] a água encontra-se fixada à superfície sólida do aglomerante pela ligação hidrogênio, servindo como meio de ligação e transporte dos íons liberados durante a dissolução das partículas do cimento ou disponibilizando o hidróxido de cálcio solubilizado à reação de carbonatação. A água, nesta condição, somente poderá ser removida por forte secagem a uma umidade relativa de 10 a 15%, determinando forte retração na pasta.

No que diz respeito à água capilar,

[...] durante o processo de evaporação, ou quando pressionada por efeito da sedimentação, por ser o constituinte de menor densidade, ocorre sua movimentação no sentido de encontrar uma região de menor pressão, a superfície da peça. Essa movimentação ocorre pela formação de uma rede de canais capilares durante o estabelecimento de um fluxo hidráulico. A movimentação desta água será tão mais intensa quanto menor a capacidade do aglomerado, argamassa ou concreto, em retê-la no seu interior e quanto maior a quantidade de água empregada (RECENA, 2012, p. 104).

É por esta razão que Fiorito (2010) comenta que a resistência da pasta de cimento, definida por Recena (2012) como a mistura de aglomerante, água e ar aprisionado, está intimamente ligada à relação água/cimento, segundo o gráfico da Figura 10. Dessa forma, percebe-se que deve haver um cuidado na dosagem da argamassa, de modo a se obter um equilíbrio entre a trabalhabilidade e a resistência.

Figura 10: Comportamento da resistência da argamassa em função da relação água/cimento



Quando o cimento é disperso em água, o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio formados a alta temperatura tendem a entrar em solução, e a fase líquida torna-se rapidamente saturada em várias espécies de íons. Como resultado da interação entre cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxila, dentro de poucos minutos da hidratação do cimento, começam a aparecer cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, conhecido como etringita. Poucas horas mais tarde, grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio e pequenos cristais fibrosos de silicatos de cálcio hidratado começam a preencher os espaços vazios antes ocupados por água e as partículas de cimento em dissolução (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.7 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

De maneira geral, para que as argamassas possam atingir a qualidade final almejada e atender aos objetivos para os quais foi designada, determinados parâmetros devem ser atingidos. De acordo com Carasek (2017), as principais propriedades no estado fresco são trabalhabilidade, retenção de água, consistência e plasticidade, densidade, adesão inicial e retração por secagem. No estado endurecido dar-se relevância a aderência, capacidade de absorver deformações, durabilidade, conforto térmico e resistência mecânica (CARASEK, 2017).

2.7.1 Estado fresco

2.7.1.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma propriedade que deve ser entendida como a maior ou menor facilidade de dispor a argamassa em sua posição final sem comprometer o bom andamento da tarefa em termos de rendimento e custo. De forma prática, é uma propriedade que está diretamente ligada com a tarefa a ser executada, de tal forma que suas características estão diretamente relacionadas com as funções que devem ser desempenhadas, ou seja, uma mesma argamassa ao ser utilizada em revestimento deverá apresentar trabalhabilidade diferente do que quando utilizada em assentamento (RECENA, 2012).

2.7.1.2 Retenção de água

Esta propriedade se torna mais relevante quando a argamassa é aplicada sobre substratos com alta sucção de água ou quando as condições climáticas, como alta temperatura ou ventos fortes, estão mais desfavoráveis, pois a retenção de água está diretamente relacionada com a capacidade que a argamassa no estado fresco possui de manter a sua trabalhabilidade quando é submetida à perda de água de amassamento (CARASEK, 2017).

2.7.1.3 Consistência e Plasticidade

A Consistência da argamassa se caracteriza pela capacidade da mesma de manter a sua fluidez ao longo do tempo de aplicação, sendo influenciada pela quantidade de água que se introduz na mistura. Já a plasticidade se caracteriza pelo poder que a argamassa tem de manter a deformação após a diminuição das solicitações (LOURENCI, 2003). Ainda nesse aspecto, Guimarães (2002) fala que a plasticidade é sua característica de se espalhar com facilidade sem que haja separação dos materiais ou da água.

Para Cincotto *et al.* (2017), a plasticidade e a consistência são influenciadas pelo processo da mistura, o teor de água e o teor de ar incorporado, e são as propriedades que de fato caracterizam a trabalhabilidade.

2.7.1.4 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa corresponde à relação entre a massa e o volume de material, sendo importante por ser um dos fatores que afetam a trabalhabilidade do material, pois à medida que a densidade diminui, a argamassa se torna mais leve e com melhor trabalhabilidade.

A densidade, também conhecida como massa específica, representa a relação massa/volume, levando em consideração a água e o ar incorporado na argamassa. Essa propriedade varia com o teor de ar incorporado (porção de ar contida na argamassa), principalmente se for incorporado por meio de aditivos, e com a densidade dos materiais constituintes, principalmente o agregado. Quanto menor for a densidade, mais leve será argamassa e será mais trabalhável durante mais tempo. As argamassas podem ser classificadas quanto a massa específica conforme demonstrada na Tabela 2 a seguir (CARASEK, 2017).

Tabela 2: Classificação quanto à densidade no estado fresco

Argamassa	Massa Específica $\rho = (\text{g/cm}^3)$	Emprego
Leve	< 1,40	Isolamento térmico e acústico
Normal	$2,30 \leq \rho \leq 1,40$	Aplicações convencionais
Pesada	> 2,30	Blindagem de radiação

Fonte: Carasek (2017).

O teor de ar é a quantidade de ar existente ou incorporado na mistura, é uma propriedade inversamente proporcional quando comparada com a massa específica da argamassa, ou seja, quanto maior a porcentagem de teor de ar incorporado, menor será a massa unitária da argamassa. De acordo com Carasek (2010), a medida com que aumenta-se o teor de ar incorporado na mistura diminui-se a densidade de massa de maneira linear.

2.7.1.5 Adesão inicial

Essa propriedade também é chamada de “pegajosidade”, está ligada às

características reológicas da pasta aglomerante, especificamente a sua tensão superficial. É a capacidade que a argamassa, no estado fresco, possui de aderir a um substrato, e é propiciada pela penetração da pasta nas saliências e poros do mesmo, nos quais há a formação de uma espécie de ancoragem a partir das reações de hidratação dos silicatos e hidróxidos (SOARES; MARMORE, 2016).

2.7.1.6 Retração

De acordo com Carasek (2017), é resultado de um mecanismo complexo relacionado com a variação do volume da pasta aglomerante e é a propriedade mais influenciável no aparecimento de fissuras, interferindo na estanqueidade e durabilidade. Parte da retração é devida as reações de hidratação e a maior parcela se dá por conta da secagem. Se a pasta possuir uma relação água/aglomerante elevada, por exemplo, irá retrair quando perder a água que está em excesso na sua composição.

2.7.2 Estado endurecido

2.7.2.1 Resistência mecânica

A resistência mecânica é de grande importância, pois é a propriedade que determina o sucesso das argamassas, tendo em vista que é a capacidade de suportar as cargas de flexão, cisalhamento e tração as quais estão sujeitas (SOARES; MARMORE, 2016).

Recena (2012) afirma que é fácil perceber que uma argamassa destinada à recuperação de uma peça estrutural terá a resistência mecânica como um fator importante, da mesma forma quando a argamassa tem função de alvenaria estrutural. Porém, no caso de argamassa de assentamento e revestimento, essa propriedade sempre foi colocada em segundo grau de importância, mas é de suma importância, pelo menos para o controle na avaliação da qualidade, pela verificação da homogeneidade das operações de produção.

A ABNT NBR 13.279/2005 estabelece o método para a determinação da resistência à tração na flexão e à compressão de argamassas para assentamento e

revestimento de paredes e tetos, no estado endurecido (ABNT, 2005a).

Na Tabela 3 são encontradas as classificações dadas pela NBR 13.281/2005, para as argamassas de revestimento de paredes e tetos no que diz respeito à resistência à compressão.

Tabela 3: Classificação das argamassas de revestimento de paredes e tetos quanto à resistência à compressão

Classe	Resistência à compressão (MPa)	Método de ensaio
P1	≤ 2,0	ABNT NBR 13.281/2005
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	> 8,0	

Fonte: ABNT (2005b).

As argamassas precisam apresentar resistências mecânicas adequadas à sua utilização, com destaque para a resistência à compressão e à tração na flexão. Com relação às argamassas de assentamento, Carasek (2010) afirma que estas devem adquirir rapidamente alguma resistência, bem como desenvolver resistência adequada ao longo do tempo. Todavia, não são necessários altos valores para garantir um bom desempenho da parede, pois as argamassas influem pouco na resistência à compressão da alvenaria, devido ao estado multiaxial de tensões ao qual a junta da argamassa está submetida, em função das restrições de deformações laterais que os blocos impõem às juntas (CARASEK, 2010).

Já em argamassas de revestimento, as propriedades de resistência à compressão, tração e cisalhamento se tornam importantes para evitar fissuras, que comprometem a permeabilidade e a estabilidade dos revestimentos. Quando a resistência à tração da argamassa for superior ao esforço de tração determinado pela retração do material, não haverá ruptura ou fissuração (RECENA, 2012).

2.7.2.2 Resistência a tração na flexão

Na Tabela 4 são encontradas as classificações dadas pela NBR 13.281/2005, para as argamassas de revestimento de paredes e tetos no que diz respeito à resistência à tração na flexão.

Tabela 4: Classificação das argamassas de revestimento de paredes e tetos - RTF

Classe	Resistência à tração a flexão (MPa)	Método de ensaio
R1	≤ 1,5	NBR 13.281/2005
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	> 3,5	

Fonte: ABNT (2005b).

2.7.3 Absorção por capilaridade

Esta propriedade é de grande importância para a avaliação da durabilidade dos rebocos, pesando bastante para definição da qualidade da argamassa, uma vez que a água absorvida por capilaridade contribui para um mau desempenho, nomeadamente em relação à durabilidade, que é muito reduzida com o aumento da capilaridade, e à capacidade de proteção do suporte, que também se reduz (SILVA, 2006).

A absorção de água por capilaridade é caracterizada pela passagem de água através da argamassa endurecida, por meio de percolação sob pressão. A permeabilidade é influenciada, essencialmente, pela granulometria da areia, características e proporcionalidades dos materiais constituintes da argamassa, quantidade de água utilizada na mistura e, também, pela utilização de aditivos químicos (PINTO; FIORITI, 2016).

A capilaridade está relacionada diretamente com a porosidade da argamassa. A porosidade é definida como o volume total de espaços abertos dentro da argamassa, que incluem poros e fissuras. Fatores como condições de cura, idade e relação água/ligante têm influência na porosidade, principalmente em argamassas a base de cal-pozolana, cujo endurecimento envolve dois tipos mecanismos, reação pozolânica e carbonatação. Essa propriedade influencia diretamente nas resistências mecânicas.

Na Tabela 5 são encontradas as classificações dadas pela NBR 15.259/2005, para as argamassas de revestimento de paredes e tetos no que diz respeito ao coeficiente de capilaridade.

Tabela 5: Classificação das argamassas de revestimento de paredes e tetos - coeficiente de capilaridade

Classe	Coeficiente de capilaridade g/dm ² .min ^{1/2}	Método de ensaio
C1	≤ 1,5	NBR 15.259/2005
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	

Fonte: ABNT (2005c).

2.7.4 Aderência

De acordo com Carasek (2010), a aderência é a propriedade fundamental, no estado endurecido, para as argamassas de revestimento, sem a qual o mesmo não atenderá a nenhuma de suas funções. A aderência deriva da conjunção de três propriedades na interface argamassa-substrato, são eles: a resistência de aderência à tração, a resistência de aderência ao cisalhamento e a extensão de aderência, ou seja, a proporção entre a área de contato efetivo e a área total possível de ser unida.

A NBR 13.749/2013, que trata das especificações para revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas, estabelece limites de resistência de aderência à tração em função de sua aplicação, apresentadas, juntamente com seus respectivos valores limites, na Tabela 6, a seguir.

Tabela 6: Limites de resistência de aderência à tração (RAT) para emboço e camada única

Local	Acabamento	Ra (MPa)	
Parede	Interna	Pintura ou base para reboco	≥ 0,20
		Cerâmica ou laminado	≥ 0,30
	Externa	Pintura ou base para reboco	≥ 0,30
		Cerâmica	≥ 0,30
Teto	-	≥ 0,20	

Fonte: ABNT (2013)

Destacando-se a resistência de aderência à tração (RAT), pode-se defini-la, segundo a NBR 13.528/2019, como a máxima tensão que pode ser suportada por uma área limitada de revestimento, na interface que está sendo avaliada, quando submetido a um esforço normal de tração. Em todos os casos, para determinação da

classificação na sobreposição entre as faixas, deve ser considerado o desvio de cada ensaio. Caso o valor fique no meio de duas faixas, adota-se a maior como classificação (ABNT, 2005c).

Carasek *et al.* (2014) comentam que a aderência se relaciona com as características e propriedades da argamassa e do substrato, características e qualidade da execução, idade do revestimento, e das condições climáticas durante a aplicação e ao longo da vida útil da argamassa. Na Figura 11 pode ser visto um esquema que representa as propriedades de cada um dos elementos acima citados na influência da aderência da argamassa.

Figura 11: Fatores que influenciam na aderência das argamassas sobre os substratos



Fonte: CARASEK *et al.* (2014).

Superfícies muito lisas definirão certamente sistemas de baixa resistência de aderência, por melhor que possa ser a argamassa empregada (RECENA, 2012). Por esse motivo se faz importante que o substrato apresente certo grau de rugosidade e porosidade. O preenchimento dos poros, com a pasta, garante a formação de pequenos insertos, como raízes ou como pregos, fixando mecanicamente a porção de argamassa projetada ao substrato (RECENA, 2012).

Segundo Forti (2017), uma argamassa possui um aumento gradual na resistência mecânica quando possui uma maior retenção de água. Essa propriedade permite ao substrato uma boa aderência que contribui para impedir que parte da argamassa absorva mais água do que outra, causando assim deslocamento da

mesma.

Como já mencionado, a capacidade de retenção de água também contribui para que a argamassa apresente boa aderência. Nesse ponto, pode-se citar a temperatura como um fator importante na resistência final de aderência. Para Gasperin (2011), a temperatura, além de acelerar o processo de endurecimento da argamassa; influencia na quantidade de água presente nas reações, pois, em função da evaporação ocasionada pelo calor; e acelera a perda de água podendo causar hidratação incompleta, mantendo os grãos de cimento anidros.

Além da temperatura, outro fator climático que também influencia na evaporação, e conseqüentemente na capacidade de aderência da argamassa, é a umidade relativa do ar, pois considerando a argamassa em seu estado fresco estar saturada, a evaporação ocorre quando há um desequilíbrio de umidade entre a argamassa e o meio ambiente (CAMPOS, 2014). Dessa forma, pode-se concluir que quanto maior for o desequilíbrio, como no caso de baixa umidade relativa do ar, maior será a taxa de evaporação da água contida na argamassa.

Deve ser chamada atenção para a cal como um importante constituinte da argamassa que proporciona um bom ganho na resistência de aderência.

2.7.5 Durabilidade

A durabilidade, de acordo com a ABNT NBR 15.575/2013, é a capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções ao longo do tempo, considerando as condições de uso e manutenção específicas (ABNT, 2013). A durabilidade das argamassas está condicionada por suas características intrínsecas, pelas condições de agressividade do meio ao qual está exposta e pelo tipo de solicitações de natureza física e mecânica a que estará submetida (RECENA, 2012).

Ainda segundo Recena (2012), em condições normais a durabilidade de uma argamassa de assentamento, e, principalmente de revestimento, estará intimamente ligada à presença de umidade e de sais solúveis passíveis de serem lixiviados. O autor pontua que a durabilidade como sendo a capacidade da argamassa de atender às necessidades esperadas, sem causar problemas à estrutura, mantendo a estabilidade química e física ao longo do tempo, cumprindo as funções para as quais foi projetada.

Segundo Lourenci (2013), é a resistência da argamassa a condições químicas,

mecânicas e climáticas, que se mantêm ao longo da vida útil. Ademais, a durabilidade está condicionada por suas características intrínsecas, pelas condições de agressividade do meio e pelo tipo de solicitações de natureza física e mecânica a que estará submetida.

Cintra (2013) explica que é a capacidade das argamassas de absorver deformações inerentes e pequenas deformações da base, sem a ocorrência de desagregação e sem formação de fissuras que interfiram nas propriedades de estanqueidade e durabilidade da argamassa.

A durabilidade de um revestimento pode ser comprometida por uma série de fatores e está essencialmente relacionada com algumas anomalias que a podem afetar, nomeadamente: a penetração de água por capilaridade; as perdas de aderência, ainda que localizadas; o corte do suporte; o ataque de sais, nomeadamente sulfatos existentes nos materiais que constituem as alvenarias, no ar ou na água; a cultura e proliferação de microrganismos (VEIGA, 1997).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para realização desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- *Cimento*: Foi utilizado o cimento Portland pozolânico (CP II Z-32) da marca Elizabeth, que contém adição de material pozolânico variando de 6% a 14% em massa, dando-lhe maior impermeabilidade, melhor desempenho em ambientes agressivos e menor calor de hidratação.

- *Cal*: Utilizou-se uma cal calcítica hidratada conhecida comercialmente como Carbomil, fabricada no Município de Limoeiro do Norte, Ceará. Segundo Farias Filho (2007) esta cal é a que possui maior teor de hidróxido de cálcio dentre as cals encontradas no Nordeste do Brasil.

A cal Carbomil é comercializada em sacos de papel “Kraft”, 3 camadas, de 20 kg. No laboratório foi acondicionada em sacos plásticos, lacrada e etiquetada para evitar a hidratação.

- *Areia*: Foi utilizado o agregado miúdo do tipo natural, areia quartzosa, proveniente de jazida do leito do Rio Paraíba.

- *PET*: Polímero obtido da reciclagem de garrafas PET, classificado como plastômero, e com a denominação de PET. O PET foi adquirido na Indústria de DEPET Reciclagem localizada no município de Campina Grande, Paraíba.

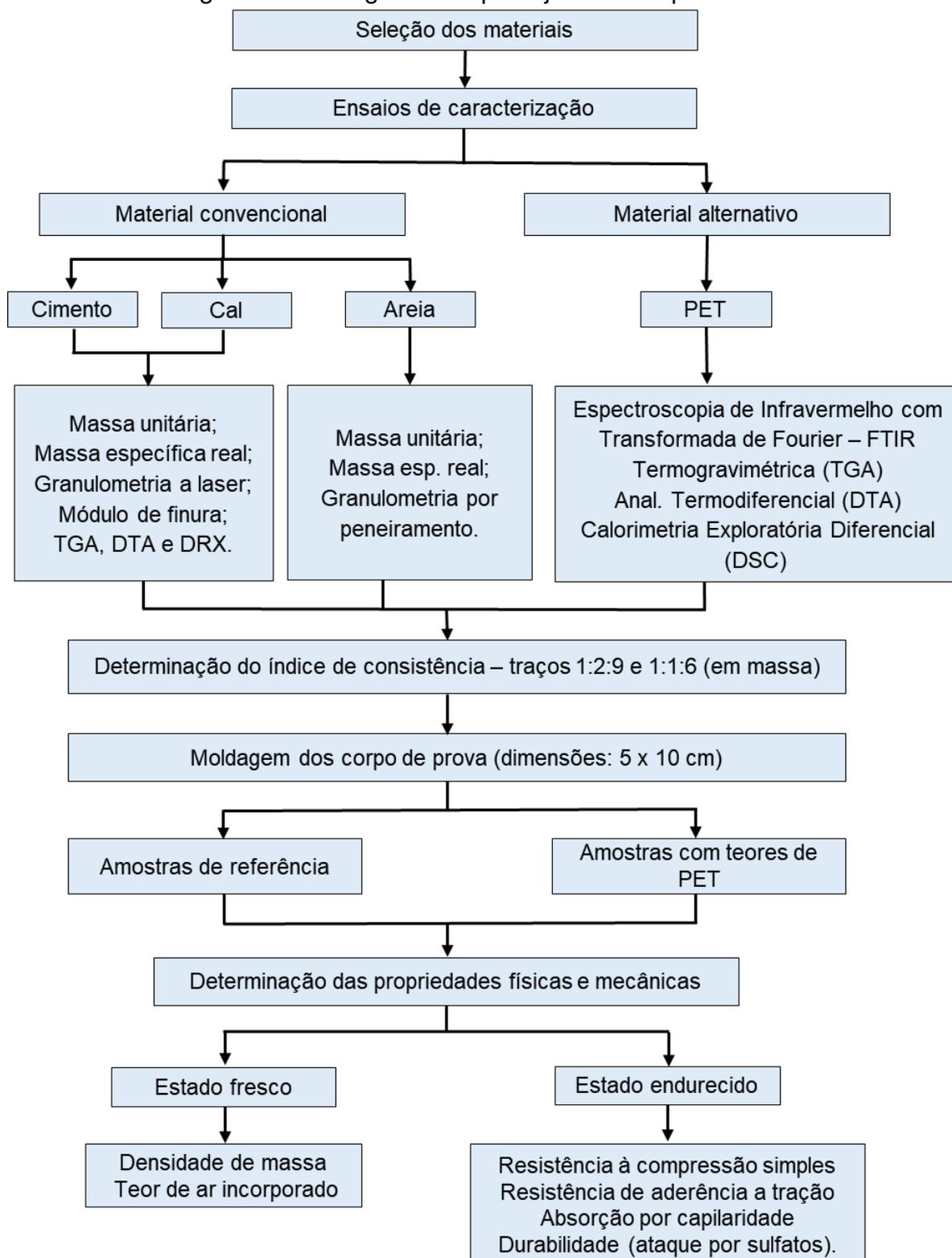
- *Água*: Utilizou-se água potável fornecida pela CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos da Paraíba).

3.2 METODOLOGIA

A fim de avaliar o desempenho de argamassas para assentamento e revestimento utilizando o PET triturado em substituição ao agregado miúdo

convencional, foram produzidos corpos de prova com teores de PET de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. O fluxograma da Figura 12 ilustra as etapas propostas para efetivação desta pesquisa.

Figura 12: Fluxograma do planejamento experimental



Primeira Etapa - Coleta e seleção dos materiais: descrição dos materiais e critérios adotados para escolha.

Segunda Etapa - Caracterização química, física e mineralógica: realização de ensaios para determinação das propriedades químicas, físicas e mineralógicas do cimento, cal, politereftalato de etileno (PET), e agregado miúdo (areia).

Terceira Etapa - Determinação do índice de consistência dos seguintes traços: 1:1:6 (cimento:cal:areia) e 1:2:9 (cimento:cal:areia); e nos percentuais de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, do PET triturado em substituição parcial ao agregado miúdo (areia).

Quarta Etapa - Determinação das propriedades das argamassas no estado fresco.

Quinta Etapa - Produção de corpos de prova de argamassas nas dimensões de 5cm x 10 cm, que passaram pelos seguintes tempos de cura 7, 14, 28 e 56 dias, em cura úmida.

Sexta Etapa - Determinação das propriedades físicas e mecânicas das argamassas no estado endurecido: absorção de água por capilaridade, resistência à compressão simples, resistência de aderência à tração e durabilidade, por meio dos ensaios de ataque por sulfatos.

3.2.1 Caracterização física

A caracterização física foi realizada através de ensaios de massa específica, massa unitária, massa específica e granulometria, conforme apresenta a Tabela 7.

Tabela 7: Ensaios para caracterização física dos materiais

Materiais	Ensaio
Cimento Portland (CP II-Z)	- Massa específica (NBR NM 23/2001); - Massa unitária (NBR NM 45/2006); - Granulometria a laser.
Cal (CH I)	- Massa específica (NBR NM 23/2001); - Massa unitária (NBR NM 45/2006); - Granulometria a laser.
Agregado Miúdo (Areia)	- Massa específica (NBR NM 52/2009); - Massa unitária (NBR NM 45/2006); - Granulometria (NBR NM 248/2003).
Politereftalato de etileno (PET)	- Massa específica (NBR NM 52/2009); - Massa unitária (NBR NM 45/2006); - Granulometria a laser.

3.2.1.1 Massa específica

Massa específica é a relação da massa e o seu volume, excluindo os poros permeáveis. Este valor tem importância no cálculo do consumo dos materiais a serem determinados no traço.

A determinação da massa específica do cimento, cal e PET, foram realizadas, segundo a norma NBR NM 23/2001 – Cimento Portland e outros materiais em pó (ABNT, 2001). Já a massa específica do agregado (areia), foi realizada segundo a norma NBR NM 52/2009 (ABNT, 2009).

3.2.1.2 Massa unitária

A massa unitária no estado solto corresponde ao quociente da massa do agregado ou aglomerante, lançado no recipiente e o volume desse recipiente. Este ensaio tem como objetivo principal verificar a massa unitária dos materiais, incluindo os vazios, e umidade que existem entre os grãos. Com essa determinação podem ser feitas transformações dos traços de massa pra volume e vice-versa, durante o procedimento de dosagem.

O ensaio foi realizado com o cimento, cal, PET e areia, segundo o método de ensaio NBR NM 45/2006 (ABNT, 2006), conforme ilustra a Figura 13.

Figura 13: Execução do ensaio da massa unitária



3.2.1.3 Análise granulométrica por peneiramento

A granulometria é a distribuição dos diâmetros dos grãos do agregado, e foi determinada segundo a NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003).

3.2.1.4 Análise granulométrica por difração a laser

As análises granulométricas das matérias primas por difração à laser, baseiam-se na dispersão das partículas do material em fase líquida utilizando-se um processo de medida ótica utilizando difração de laser, fazendo-se uma relação entre a difração do laser e a concentração e tamanho das partículas. Inicialmente as amostras dos materiais foram beneficiadas em peneira nº 200 (0,074mm) – NBR 11.759/2012 (ABNT, 2012), e em seguida dispersas em 250 ml de água destilada em agitador Hamilton Beach N5000a com velocidade de 17.000 RPM (revoluções por minuto) por 10 min, utilizando como defloculante o hexametáfosfato de sódio.

Após agitação a amostra foi colocada em um equipamento modelo 1064 da CILAS (Figura 14), em modo úmido, até atingir a concentração ideal que é de 150 unidades de difração/área de incidência.

Figura 14: Equipamento do ensaio de granulometria por difração a laser CILAS-1064



3.2 Caracterização química e mineralógica

3.2.2.1 Composição química

Para a determinação da composição química dos materiais, as amostras foram beneficiadas em peneira nº 200 (0,074mm), conforme recomendações da NBR 11.579/2012 (ABNT, 2012). A técnica utilizada nesta análise foi a espectrometria de fluorescência de raios-X, em equipamento EDX 720 da marca Shimadzu (Figura 15). O espectrômetro de fluorescência de raios-X determina os elementos presentes em uma determinada amostra. Esta técnica consiste na aplicação de raios-X na superfície de amostras que possam absorver fótons do feixe do raio X e que no processo inverso da excitação emitam raios-X característicos. Nesta análise são obtidos os óxidos presentes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Ti_2O , entre outros).

Figura 15: Equipamento EDX 720 SHIMADZU



3.2.2.2 Análise Termogravimétrica (TGA/TDA)

Esta análise foi realizada para os materiais com caráter aglomerante nas argamassas, como cimento, cal e PET, sendo beneficiadas em peneira ABNT Nº200 (0,074 mm), objetivando a verificação do comportamento térmico (estabilidade e decomposição), ou seja, as faixas de temperaturas em que ocorrem as transformações endotérmicas e exotérmicas.

Os ensaios que determinam tal comportamento são as análises termogravimétricas (TGA) e as térmicas diferenciais (DTA). As curvas termogravimétricas foram obtidas em uma termobalança, marca shimadzu, modelo DTG-60H - Simultaneous DTA-TGA Apparatus (Figura 16), em atmosfera de nitrogênio com cadinho de alumina, fluxo de $50\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e razão de aquecimento de $5,10$ e $15^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, numa faixa de temperatura que varia de ambiente até 900°C . A massa utilizada foi em torno de 3.0 ± 0.5 gramas.

Figura 16: Equipamento DTG-60H SHIMADZU



3.2.2.3 Difração de raios – X

A difração de raios-X (DRX) consiste em uma análise qualitativa que tem por objetivo identificar as fases mineralógicas presentes na amostra. Na execução do ensaio utilizaram-se as amostras passadas em peneira ABNT nº 200, correspondendo ao método conhecido como método do pó. O equipamento utilizado para a realização deste ensaio foi o Difratorômetro SHIMADZU XRD-6000. (Figura 17) com radiação $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40kV , corrente de 30 mA , modo fixo time, com passo de $0,02$ e tempo de contagem de $0,6\text{ s}$, com ângulo 2θ percorrido de 10° a 60° .

Figura 17: Difratorômetro de raios-X SHIMADZU XRD – 6000



A realização deste ensaio se faz importante devido esta análise ter caráter qualitativo, pois promove a identificação das fases cristalinas presentes nas pastas, sendo realizada por análise dos picos presentes no difratograma e pela comparação com bancos de dados específicos. Com este ensaio é possível determinar quanto uma amostra é amorfa ou cristalina.

3.2.3 Determinação da dosagem das argamassas

Nesta pesquisa foram utilizados dois traços de argamassas, as de assentamento e revestimento, nas proporções 1:2:9 (cimento:cal:areia/PET) e 1:1:6 (cimento:cal:areia/PET) em massa, respectivamente. Para os dois traços, têm-se as argamassas de referência (0%) de PET, e as argamassas nos percentuais de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de PET, em substituição parcial do agregado miúdo (areia).

Após determinação das proporções fez-se necessário a transformação das medidas de volume para massa, ou seja, transformar as medidas de m^3 para kg. Para tanto, as proporções dos materiais, em massa, foram definidos de acordo com a massa unitária de cada material utilizado na produção das argamassas.

Para as argamassas de referência observa-se através da Equação 1, como sendo uma unidade de volume de cimento, “a” unidades de volume da cal e “b” unidades de volume da areia. Para os traços com PET têm-se na Equação 2, “a” unidades de volume de cimento, “b” unidades de volume da cal, “c” unidades de

volume da areia e “d” unidades de volume de PET.

$$1 : a : b \text{ (Equação 1)}$$

$$a : b : c : d \text{ (Equação 2)}$$

De acordo com a NBR NM 45/2006, a massa unitária de um agregado no estado solto corresponde à relação entre a massa do material colocado em um recipiente e o volume deste recipiente. Então para facilitar a transformação dos materiais de volume para massa, faz-se a multiplicação das unidades de volume de cada material do traço por suas respectivas massas unitárias. Este procedimento está apresentado nas Equações 3 e 4.

$$1 \cdot m_{ucim} : a \cdot m_{ucal} : b \cdot m_{uareia} \text{ (Equação 3)}$$

$$a \cdot m_{ucim} : b \cdot m_{ucal} : c \cdot m_{uareia} : d \cdot m_{upet} \text{ (Equação 4)}$$

Onde:

m_{ucim} : massa unitária do cimento (g/cm^3);

m_{ucal} : massa unitária da cal (g/cm^3);

m_{uareia} : massa unitária da areia (g/cm^3);

m_{upet} : massa unitária do pet (g/cm^3).

Ao transformar cada unidade de volume em unidade de massa que corresponde as Equações 3 e 4, divide-se estas pela massa unitária do cimento de forma que se obtenha uma unidade de massa de cimento para os traços de referência e para as com PET o valor correspondente ao percentual de substituição da areia, logo a Equações 5 e 6, demonstram tal procedimento respectivamente.

$$\frac{m_{ucim}}{m_{ucim}} \cdot \frac{m_{ucal}}{m_{ucim}} \cdot \frac{m_{uareia}}{m_{ucim}} \text{ (Equação 5)}$$

$$\frac{m_{ucim}}{m_{ucim}} \cdot \frac{m_{ucal}}{m_{ucim}} \cdot \frac{m_{upet}}{m_{ucim}} \text{ (Equação 6)}$$

Os valores desta transformação podem ser conferidos na Tabela 8, onde estão os traços em volume e em massa.

Tabela 8: Valores dos traços em volume e em massa

Traços	PET (%)	cimento:cal:areia:PET (m ³)	cimento:cal:areia:PET (kg)
1:2:9 cim:cal: areia/ PET	0%	1:2:9:0	1:0,73:10,96:0
	5%	1:2:8,55:0,45	1:0,73:10,412:0,548
	10%	1:2:8,10:0,90	1:0,73:9,864:1,096
	15%	1:2:7,65:1,35	1:0,73:9,316:1,644
	20%	1:2:7,20:1,80	1:0,73:8,768:2,192
	25%	1:2:6,75:2,25	1:0,73:8,220:2,740
1:1:6 cim:cal: areia: PET	0%	1:1:6:0	1:0,36:7,30:0
	5%	1:1:5,70:0,30	1:0,36:6,935:0,365
	10%	1:1:5,40:0,60	1:0,36:6,570:0,730
	15%	1:1:5,10:0,90	1:0,36:6,205:1,095
	20%	1:1:4,80:1,20	1:0,36:5,840:1,460
	25%	1:1:4,50:1,50	1:0,36:5,475:1,825

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

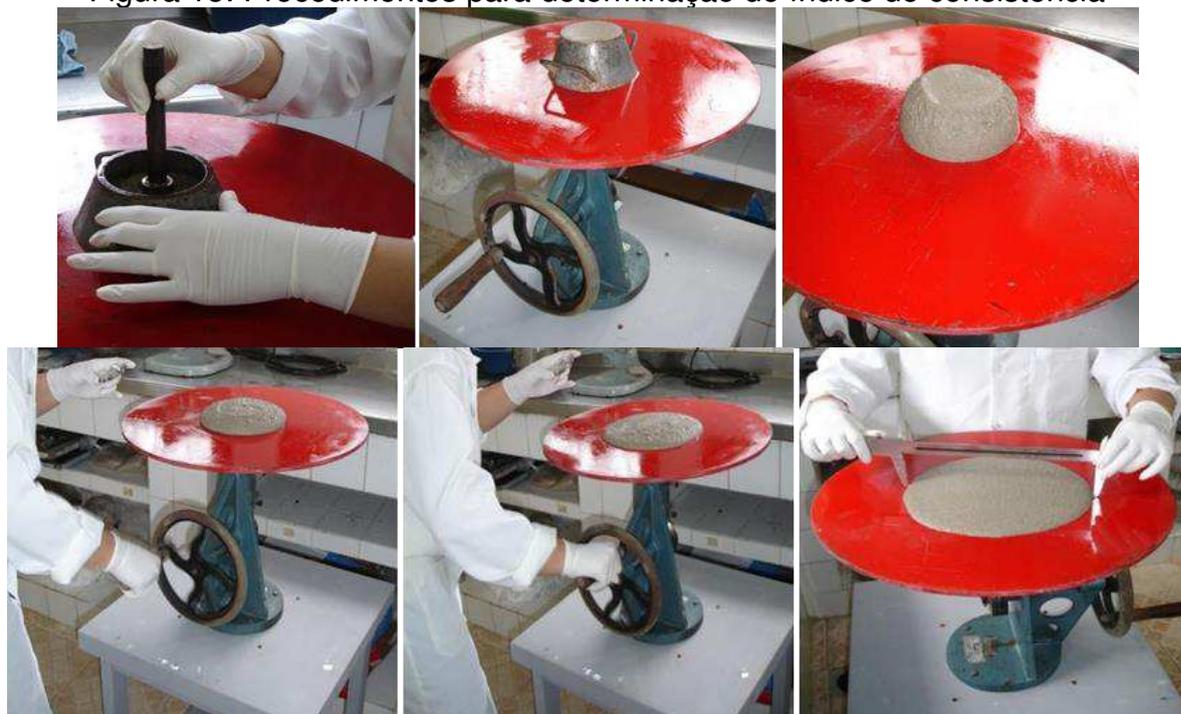
Após a transformação dos traços em massa, determinou-se o índice de consistência das argamassas seguindo os critérios estabelecidos pela NBR 13276/2016 para se obter um espalhamento de 255 mm \pm 10 mm. E então foram moldados em cada traço 3 corpos de prova para utilização nos ensaios, para os períodos de cura de 7, 14, 28 e 56 dias.

3.2.4 Determinação do índice de consistência das argamassas

Para confecção das argamassas determinou-se inicialmente o índice de consistência utilizando os procedimentos prescritos pela NBR 13.276/2016, com a utilização da mesa de consistência, também conhecida como “*Flow Table*”. O índice de consistência padrão proposto pela norma é de 255 mm \pm 10 mm, sendo este o valor utilizado.

O ensaio consiste na medida do espalhamento, obtido através de uma quantidade de argamassa inicialmente moldada em fôrma tronco-cônico sobre a mesa de consistência (Figura 18).

Figura 18: Procedimentos para determinação do índice de consistência



Fonte: Bezerra (2010)

A argamassa é moldada em três camadas, sendo a primeira com 15 golpes, a segunda com 10 golpes, a terceira com 5 golpes e por fim é retirado o excesso. Em seguida retira-se o molde tronco-cônico e inicia-se o processo de espalhamento através de 30 golpes em 30s e logo em seguida mede-se os diâmetros ortogonais da argamassa após a deformação, sendo a média dessas medidas o índice de consistência padrão.

3.2.5 Moldagem dos corpos de prova

Para a preparação das argamassas estudadas, os materiais foram homogeneizados em um misturador mecânico com capacidade de 5 litros e em seguida os corpos de prova foram moldados utilizando moldes cilíndricos com dimensões 5 cm x 10 cm, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 7.215/2019 (ABNT,2019).

Após o desmolde, os corpos de prova foram identificados e em seguida acondicionados em sacos plásticos e etiquetados. Utilizou-se o processo de cura úmida, onde os corpos de prova ensacados foram colocados em tanques, cobertos com areia úmida e submetidos a períodos de cura de 7, 14, 28 e 56 dias (Figura 19).

Figura 19: Preparação, moldagem e cura das argamassas de assentamento e revestimento



2.3.6 Propriedades físicas e mecânicas

2.3.6.1 Densidade de massa no estado fresco

O ensaio consiste em introduzir suavemente, com colher ou concha, porções de argamassa no recipiente cilíndrico calibrado, formando três camadas de alturas aproximadamente iguais. Em cada camada, aplica-se 20 golpes ao longo do perímetro da argamassa. Após a execução dos golpes de cada camada, efetua-se três quedas do recipiente com altura aproximada de 3 cm, para que não fiquem vazios entre a argamassa e a parede do recipiente.

Finalmente, raspa-se o recipiente com a espátula, em duas passadas ortogonais entre si, fazendo movimentos de vai-e-vem, com inclinação de 45° em relação à superfície da argamassa, e em seguida pesa e registra a massa do molde com a argamassa (M_c) (Figura 20).

Figura 20: Densidade de massa e teor de ar incorporado



A densidade de massa da argamassa (d) no estado fresco, em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3), através da equação:

$$d = \frac{M_c - M_v}{V_r} \times 1000 \text{ (Equação 7)}$$

Onde:

M_c - massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio, em g;

M_v - massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas;

V_r - volume do recipiente cilíndrico, em centímetros cúbicos.

2.3.6.2 Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado na argamassa (A) no estado fresco, deve ser expresso em porcentagem, arredondando para um número inteiro (Equação 8), conforme indica a NBR 13.278/2005 (ABNT, 2005).

$$A = 100 \left(1 - \frac{d}{d_t} \right) \text{ (Equação 8)}$$

Onde:

d - valor de densidade de massa da argamassa, em gramas por centímetro cúbico;

d_t - valor de densidade de massa teórica da argamassa, em gramas por centímetro cúbico, sem vazios.

2.3.6.3 Densidade de massa no estado endurecido

A densidade de massa no estado endurecido foi determinada para as idades de 7, 14, 28 e 56 dias, em 04 corpos de prova (5×10) cm, para cada idade de cura, nos percentuais de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de PET triturado, para os traços 1:2:9 e 1:1:6 respectivamente. Esta propriedade foi verificada através de ensaio realizado conforme a NBR 13.280/2005 (ABNT, 2005).

Os corpos de prova foram colocados em estufa por 72 horas, à $105 \pm 5^\circ\text{C}$, até que esses atinjam massa constante. Em seguida foi utilizado um paquímetro para obtenção das medidas: altura, largura e comprimento dos corpos de prova, que posteriormente foram pesados, para determinar as densidades de massa individuais

e médias.

2.3.6.4 Resistência à compressão simples

O ensaio para determinar a resistência à compressão simples foi realizado em corpos de prova com dimensões 5 cm x 10 cm (diâmetro x altura), para os períodos de 7, 14, 28, e 56 dias de cura, seguindo todas as prescrições indicadas pela NBR 13279/2005. Utilizou-se 04 corpos de prova de cada argamassa moldada (traços 1:2:9 e 1:1:6 em massa) e determinou-se o valor médio. A prensa utilizada foi a SHIMADZU AG-IS com célula de 100 KN, com a carga aplicada à velocidade de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s definida por esta Norma, apresentada na Figura 21.

Figura 21: Prensa SHIMADZU AG-IS



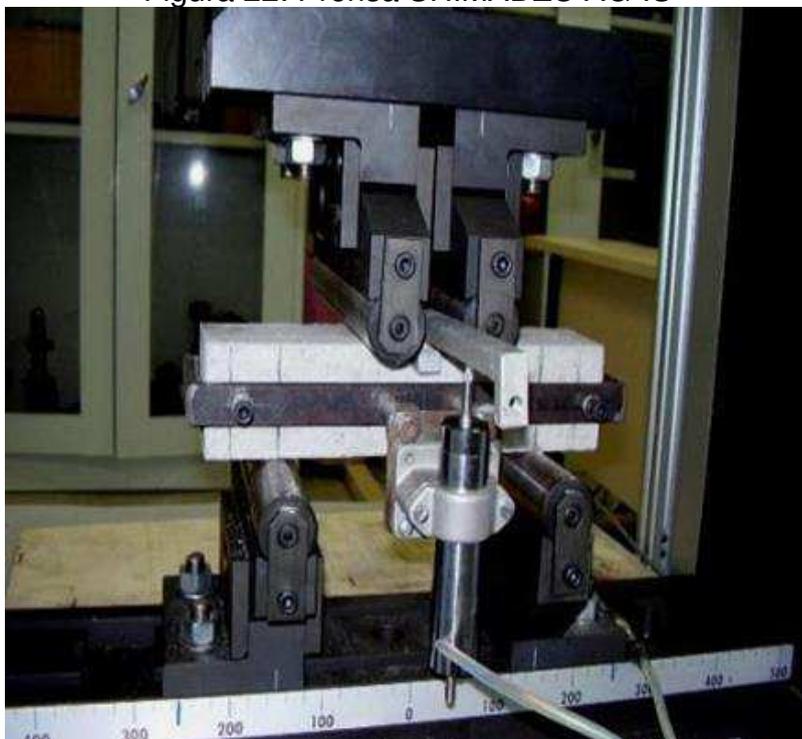
2.3.6.5 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado conforme a norma da ABNT NBR 13.279/2005 (ABNT, 2005). As amostras, compostas por quatro corpos de prova prismáticos com dimensões 50x50x230 mm, foram ensaiadas com 7, 14, 28 e 56 dias de idade, sendo submetidas a um carregamento aplicado em dois pontos até a ruptura.

O avanço da célula de carga foi constante em 0,1 mm/min, na prensa da marca

Shimadzu, modelo AG-X 100 kN (Figura 22). Um transdutor foi instalado no centro do corpo de prova para as leituras dos deslocamentos durante o carregamento.

Figura 22: Prensa SHIMADZU AG-IS



2.3.6.6 Absorção de água por capilaridade

Foram consideradas a argamassa de referência e as 05 argamassas alternativas para os traços: 1:2:9 e 1:1:6, confeccionadas a partir dos percentuais de (0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%) de PET triturado em substituição a areia natural. O trabalho experimental foi realizado aos 28 e 56 dias de cura.

O ensaio para determinar a absorção de água por capilaridade, foi realizado conforme descrito na norma NBR 15.259/2005 (ABNT, 2005). Foi utilizado um recipiente plástico com água, e uma grade metálica que permitiu que os corpos de prova não entrassem em contato direto com o fundo do recipiente (Figura 23). O nível de água permaneceu constante a 5 ± 1 mm acima da face em contato com a água. Para se obter a absorção de água e o coeficiente de capilaridade, os corpos de prova foram pesados nos tempos de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 70, 90, 120 e 180 minutos de ensaio.

Figura 23: Ensaio de absorção por capilaridade.



2.3.6.7 Determinação da resistência de aderência à tração

O ensaio da resistência de aderência à tração das argamassas foi realizado conforme instruções da NBR 13.528/2019 (ABNT, 2019). O equipamento de tração utilizado para este ensaio foi um dinamômetro manual digital da marca Solotest, que permite aplicação contínua de carga, fácil manuseio e baixo peso. Foram usadas pastilhas com diâmetro de 50 mm e cola à base de resina epóxi de alta aderência com espessura de 2 mm aproximadamente.

Para este ensaio, foram utilizadas duas paredes de alvenaria já construídas, sendo a área aproximada de cada parede de 1,00 m². A argamassa para o chapisco foi preparada manualmente na proporção 1:2 (cimento:areia média). As paredes foram revestidas com a argamassa, no traço 1:1:6 (cimento:cal:areia), tendo o PET em substituição a areia nos teores de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, sendo que a espessura do revestimento foi de 15mm.

O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado nos revestimentos com 28 dias de idade. Cada ensaio deve ser composto por 12 corpos de prova espaçados entre si, além dos cantos e das quinas, em 50 mm no mínimo.

O corte do substrato foi executado a seco com auxílio de serra-copo e furadeira. Inicialmente, a velocidade de corte foi baixa, sendo aumentada conforme foi atingindo

profundidade. O corte foi estendido de 1 mm a 5 mm dentro do substrato. Para evitar trepidações durante o corte e assegurar a ortogonalidade do equipamento, foi utilizado um dispositivo para apioar o equipamento de corte.

O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado com o revestimento seco, pois a umidade no revestimento durante o ensaio tem influência nos valores de aderência e nos coeficientes de variação. O equipamento utilizado durante o ensaio permaneceu com seu eixo de aplicação da carga ortogonal ao plano de revestimento, sem sofrer qualquer tipo de impacto ou esforços indesejáveis, como vibrações e movimentos bruscos. Aplicou-se, então, o esforço de tração perpendicularmente ao corpo de prova com taxa de carregamento constante até a ruptura.

Em seguida, registrou-se o valor da resistência em (MPa), obtido no equipamento de tração. Na Figura 24 estão representadas as etapas do ensaio da resistência de aderência à tração.

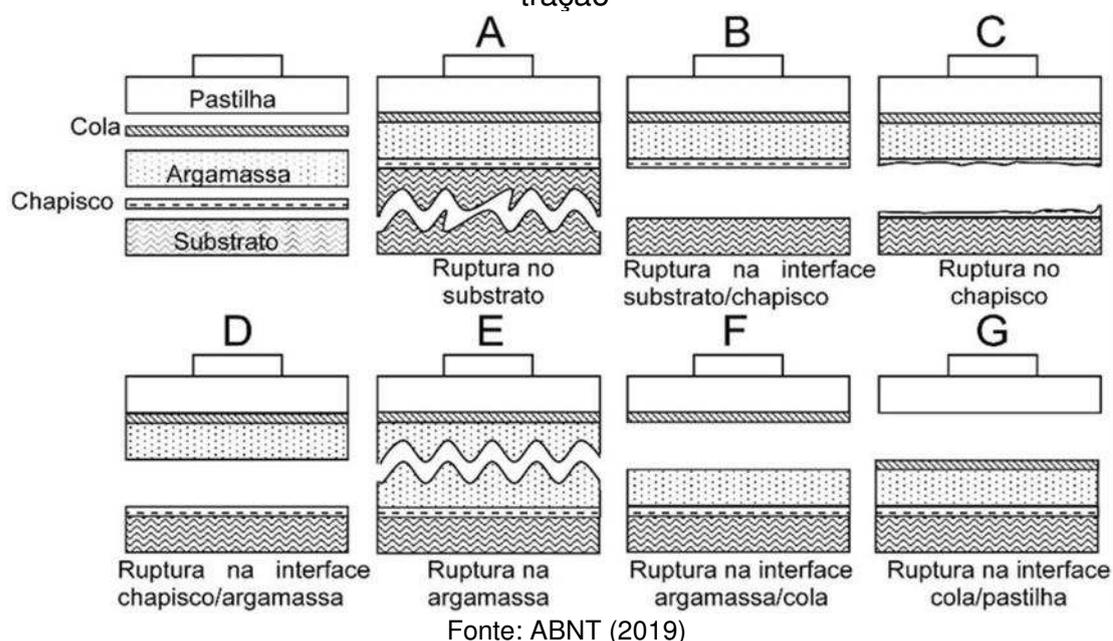
Figura 24: Ensaio de aderência a tração



Fonte: Pczieczek (2017)

A forma de ruptura dos corpos de prova para um sistema de revestimento com chapisco foi avaliada conforme a Figura 25.

Figura 25: Formas de ruptura dos corpos de prova para a resistência de aderência à tração



2.3.6.8 Durabilidade

Para a avaliação da durabilidade foi realizado o ensaio de ataque por sulfatos em corpos de provas de argamassa, conforme a metodologia proposta pela norma NBR 13.583/2014, que prescreve o método para avaliação em corpos de prova de argamassas (ABNT, 2014).

As recomendações quanto ao período de exposição e teor da solução de sulfato de sódio (10%) foram mantidas, porém, foram moldados corpos de prova cilíndricos (50 mm x 100 mm) de argamassa com e sem incorporação de PET, sendo feitas três medições (mm) de altura para cada corpo de prova, utilizando-se paquímetro, sendo utilizados 3 corpos de prova para cada composição.

A localização das alturas e dos diâmetros foi marcada com tinta permanente no início do ensaio, para que as medições fossem efetuadas sempre nos mesmos pontos, conforme ilustrado na Figura 26, sendo também registrados os quantitativos de massa úmida dos corpos de prova a cada leitura de dimensões.

As medições foram efetuadas no início do ensaio e a cada sete dias durante seis semanas, ou seja, até 42 dias após a imersão, sendo a expansão individual calculada por meio da equação 9:

$$Eid = \frac{(Midade - Minicial)}{Minicial} \times 100 \text{ (Equação 9)}$$

Onde:

Eid - expansão individual (%);

Minicial - média das medições iniciais em cada corpo de prova (mm);

Midade - média das medições efetuadas na idade correspondente em cada corpo de prova (mm);

A expansão resultante é a diferença entre a expansão dos corpos de prova imersos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MINERALÓGICA

4.1.1 Cimento

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para caracterização física do cimento Portland CII Z – 32, utilizado nesta pesquisa.

Tabela 9: Cimento Portland CII Z – 32

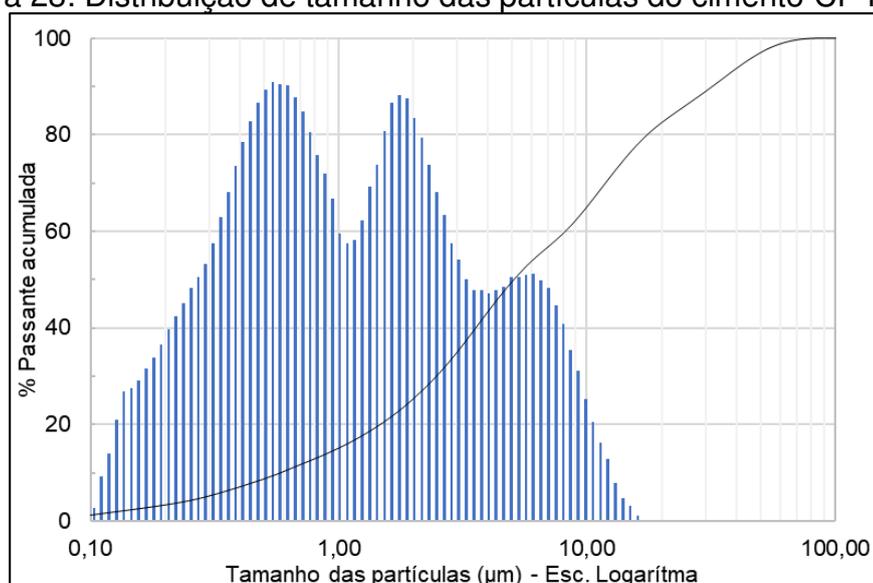
Parâmetro	Valor obtido
Massa específica (NM 23/2001)	3,15 g/cm ³
Massa unitária (NBR NM 45/2006)	1,15 g/cm ³
Finura (NBR 11.579/2012)	2,84%

Analisando os resultados apresentados na Tabela 9, verifica-se que todos os valores obtidos atenderam as exigências estabelecidas pelas normas da ABNT. O módulo de finura obtido foi de 2,84%, estando este valor inferior ao estabelecido pela NBR 11.579 (ABNT, 2012) que define valor máximo de 12%. Quanto à massa unitária, utilizada na transformação de traços em volume para traços em massa, o valor obtido foi de 1,15 g/cm³ e para massa específica real o valor obtido foi de 3,15 g/cm³.

Segundo Recena (2012), a massa específica real e unitária do cimento é aproximadamente 2,70 g/cm³ e 1 g/cm³, respectivamente. Desse modo, os valores obtidos neste trabalho se aproximam dos valores citados anteriormente. Ademais, percebe-se que a massa específica, 3,15 g/cm³, apresenta valor dentro do limite estabelecido para os cimentos, de acordo com especificações técnicas da empresa CIMPOR, que variam de 2,7 g/cm³ a 3,2 g/cm³.

A Figura 28, apresenta a curva granulométrica por difração a laser do cimento Portland CII Z – 32.

Figura 28: Distribuição de tamanho das partículas do cimento CP II Z-32



Analisando a Figura 28, observa-se que a curva de distribuição granulométrica apresentou comportamento modal com diâmetro médio de 11,10 μm , com D10 de 0,58 μm , D50 de 5,07 μm e D90 de 31,96 μm . A fração de 2 μm corresponde a 25,35%, indicando um elevado teor de aglomerantes, e confirmando suas características de aglomeração. Souza (2012) obteve uma curva de distribuição granulométrica com comportamento similar.

A Tabela 10 apresenta a composição química do cimento CPIIZ – 32.

Tabela 10: Composição química do CPIIZ – 32

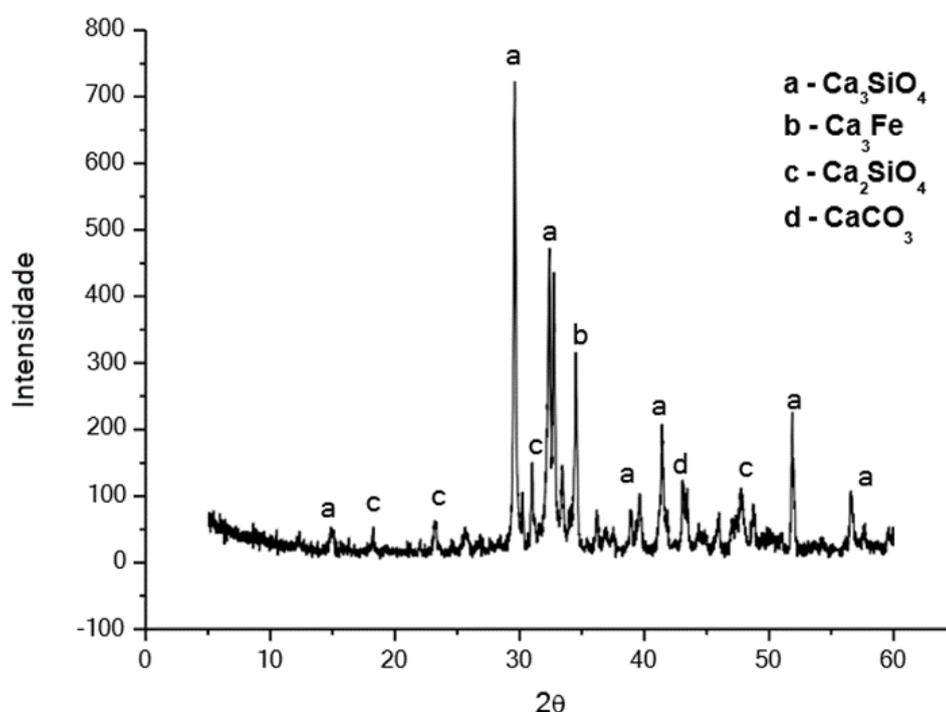
Composição química	Porcentagens (%)
Óxido de cálcio (CaO)	74,85
Dióxido de silício (SiO ₂)	16,59
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	3,60
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	3,43
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,98
Dióxido de titânio (TiO ₂)	0,24
Óxido de estrôncio (SrO)	0,21
Óxido de manganês (MnO)	0,05
Outros	0,05

Analisando os resultados obtidos na Tabela 10, pode-se observar que o cimento apresenta maiores teores de óxido de cálcio e de dióxido de silício,

correspondendo a 74,85% e 16,59%, respectivamente, estando os demais óxidos com valores inferiores a 5%. De acordo com os resultados da composição química é possível recomendar a utilização deste cimento, por apresentar grande percentual de óxido de cálcio, para produção de argamassas de assentamento e revestimento, concretos simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento, dentre outros (POUEY, 2006).

A Figura 29 apresenta o difratograma de raios-X do cimento Portland CPIIZ-32.

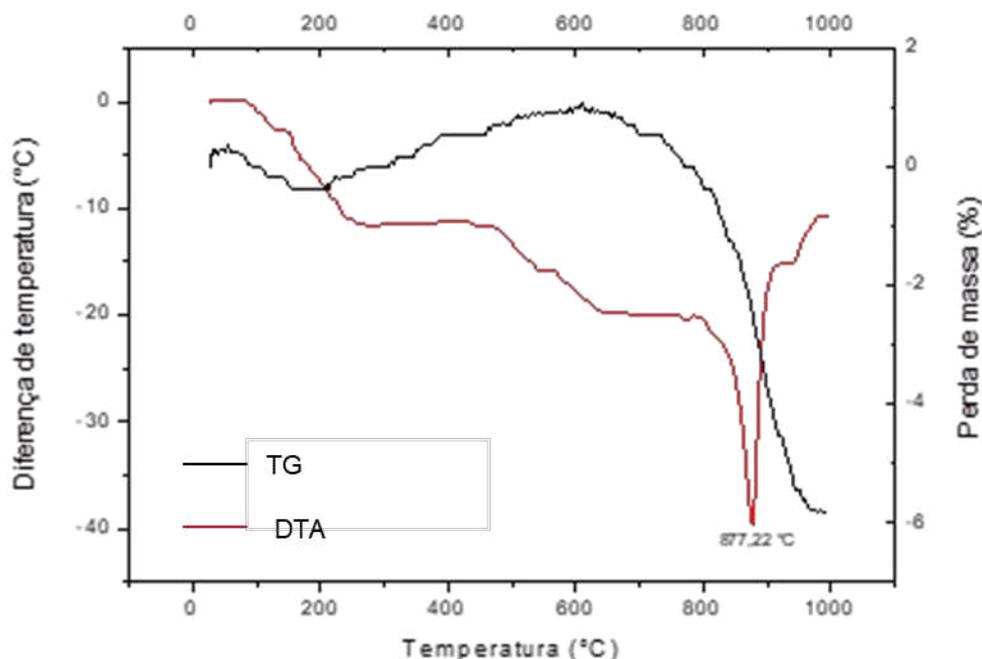
Figura 29: Difratograma de raios-X do cimento Portland CPIIZ-32



Observa-se a presença de vários materiais cristalinos, com picos referentes ao Ca_3SiO_4 , Ca_3Fe , Ca_2SiO_4 e CaCO_3 .

A Figura 30 apresenta as curvas das análises térmica diferencial e termogravimétrica do cimento Portland CPIIZ-32.

Figura 30: Curva das análises DTA e TGA do cimento Portland CPIIZ-32



Observa-se que a curva da análise térmica diferencial apresentou pico endotérmico de grande intensidade, a temperatura de 877,22 °C, provavelmente relacionado à desidroxilação do silicato de cálcio hidratado, isto é, a perda de água estrutural.

Souza (2014) observou comportamento semelhante ao da curva da análise térmica diferencial para o cimento empregado em sua pesquisa. Na curva da análise termogravimétrica percebe-se que houve perda de massa a 200 °C, correspondendo possivelmente à perda de água livre, e uma perda de massa de 5,83%, correspondendo à perda de massa do silicato de cálcio.

4.1.2 Cal hidratada

A Tabela 11 apresenta a caracterização física da cal hidratada (CH-I) utilizada nesta pesquisa.

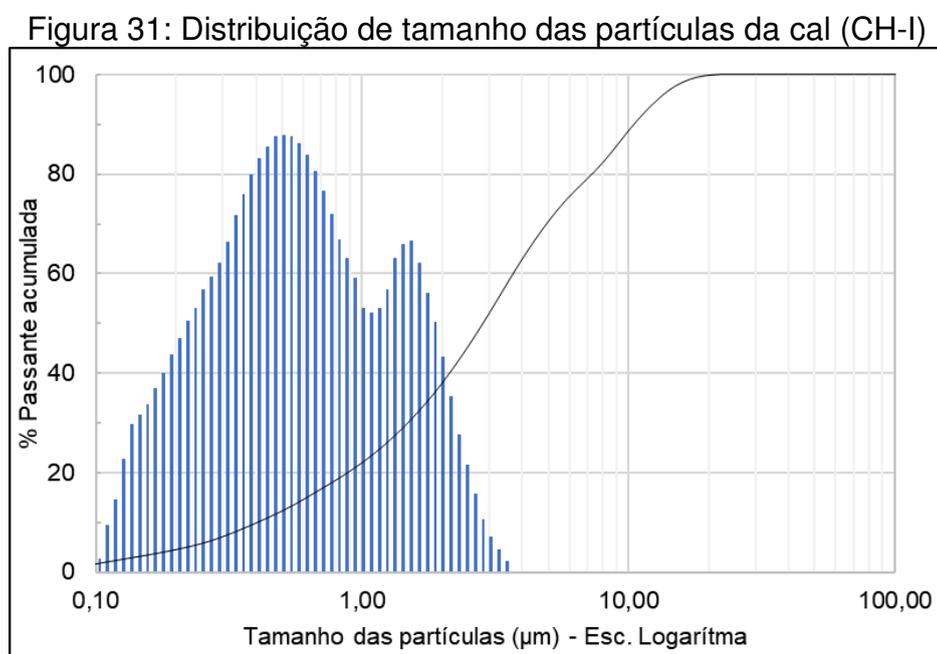
Tabela 11: Caracterização física da cal.

Parâmetro	Valor obtido
Massa unitária (NBR NM 45/2006)	0,42 g/cm ³
Massa específica (NBR 23/2001)	2,63 g/cm ³

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Verifica-se que os valores obtidos para massa unitária foram de $0,42 \text{ g/cm}^3$, e massa específica real de $2,63 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

A Figura 31, apresenta a curva granulométrica por difração a laser da cal.



Observa-se que a curva apresentou comportamento na faixa monomodal com larga distribuição de tamanho de partículas acumuladas entre $0,10 \mu\text{m}$ — $100 \mu\text{m}$, com diâmetro médio de $5,85 \mu\text{m}$ e D_{10} de $1,49 \mu\text{m}$, D_{50} de $5,10 \mu\text{m}$ e D_{90} de $11,12 \mu\text{m}$. A cal apresentou uma grande concentração de partículas na faixa entre $2 \mu\text{m}$ - $60 \mu\text{m}$.

A Tabela 12 apresenta os resultados da composição química da cal.

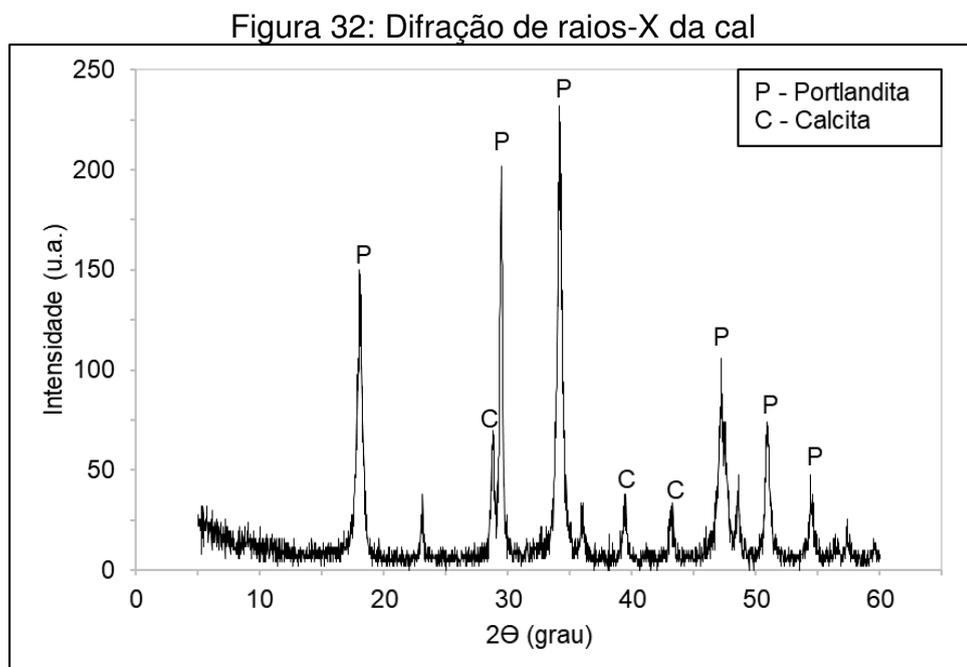
Tabela 12: Composição química do cal

Composição química	Porcentagens (%)
Óxido de cálcio (CaO)	92,35
Óxido de magnésio (MgO)	0,89
Dióxido de silício (SiO ₂)	0,62
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,04
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0,32
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,16
Outros óxidos	0,02
Perda ao fogo	5,60

Verifica-se um elevado teor (92,35%) de óxido de cálcio (CaO) e baixo teor de óxido de magnésio (MgO), correspondente a 0,89%. Desconsiderando a perda ao fogo, a cal hidratada é constituída por cerca de 93% de óxido de cálcio (CaO) e cerca de 1% de óxido de magnésio (MgO).

A soma da porcentagem desses dois óxidos corresponde a 94,4%, e os demais componentes representam 1,17% na composição da cal, equivalente às impurezas. De acordo com essa composição, a cal estudada pode ser classificada como cal calcítica, seguindo os critérios da NBR 7.175/2002 e pode ser classificada como CH I (ABNT, 2002).

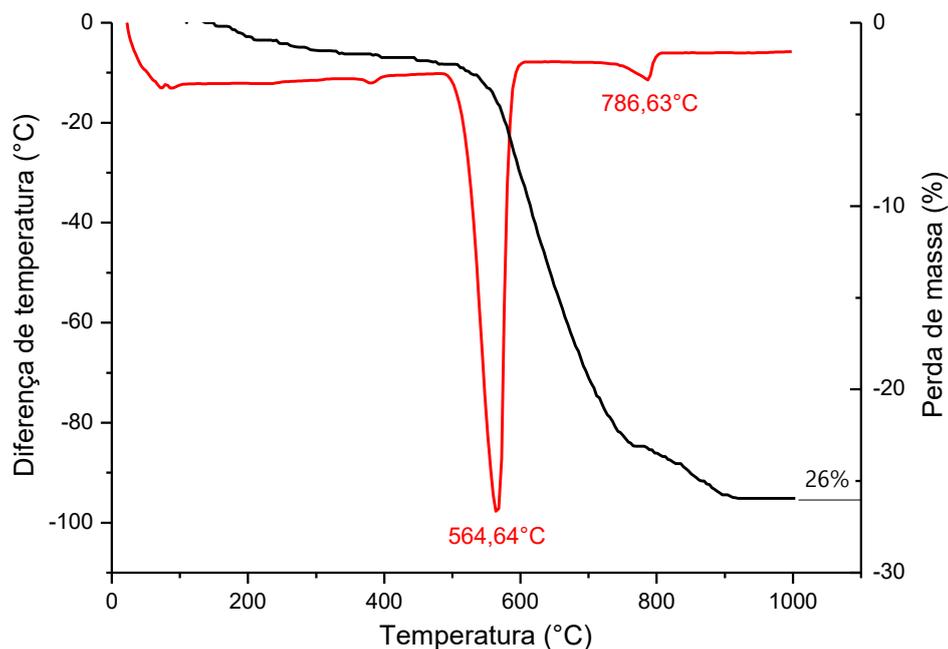
A Figura 32 apresenta os resultados obtidos para a análise por difração de raios-X da cal.



Analisando a Figura 32, observa-se que esta é composta majoritariamente por portlandita (CaOH_2) e calcita (CaCO_3).

A Figura 33 apresenta as curvas das análises térmica diferencial e termogravimétrica da cal.

Figura 33: Curvas das análises térmica diferencial e termogravimétrica da cal



Analisando a curva da análise termodiferencial da cal, verifica-se a presença de pico endotérmico de grande intensidade a 564,64°C, correspondente a presença do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e pico de pequena intensidade a 786,63°C correspondente a presença do carbonato de cálcio (CaCO_3 , calcita). Na curva da análise termogravimétrica observa-se que houve uma perda de massa total de 26% correspondendo as perdas de massa do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e da calcita (CaCO_3).

4.1.3 Politereftalato de Etileno - PET

A Tabela 13, apresenta os resultados obtidos para caracterização física do PET utilizado nesta pesquisa.

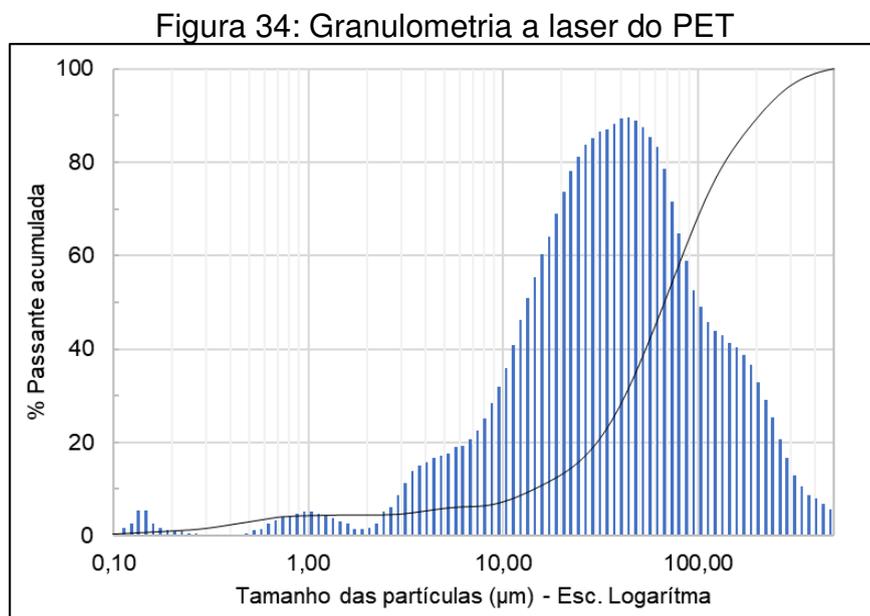
Tabela 13: Caracterização física do PET

Ensaio	Média dos valores (g/cm^3)
Massa unitária (NBR NM 45/2006)	0,54
Massa específica real (NBR NM 23/2001)	1,45

Conforme observado na Tabela 13, observa-se que foram obtidos os valores de 0,54 g/cm^3 e 1,45 g/cm^3 para a massa unitária e massa específica real do PET,

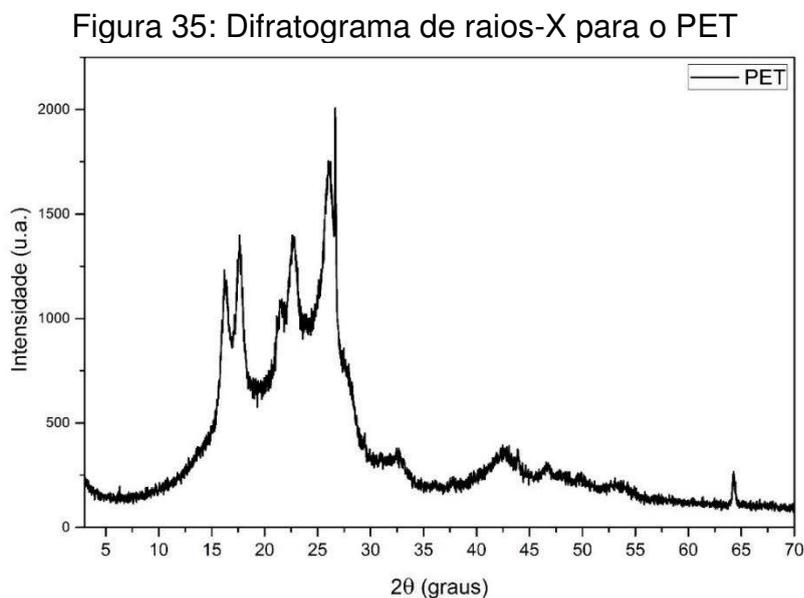
respectivamente.

A Figura 34 apresenta a curva granulométrica por difração a laser do PET.



Observa-se que a curva apresentou comportamento na faixa monomodal com larga distribuição de tamanho de partículas acumuladas entre $0,10\mu\text{m}$ — $100\mu\text{m}$, com diâmetro médio de $91,84\mu\text{m}$ e D10 de $14,5\mu\text{m}$, D50 de $67,26\mu\text{m}$ e D90 de $206,29\mu\text{m}$.

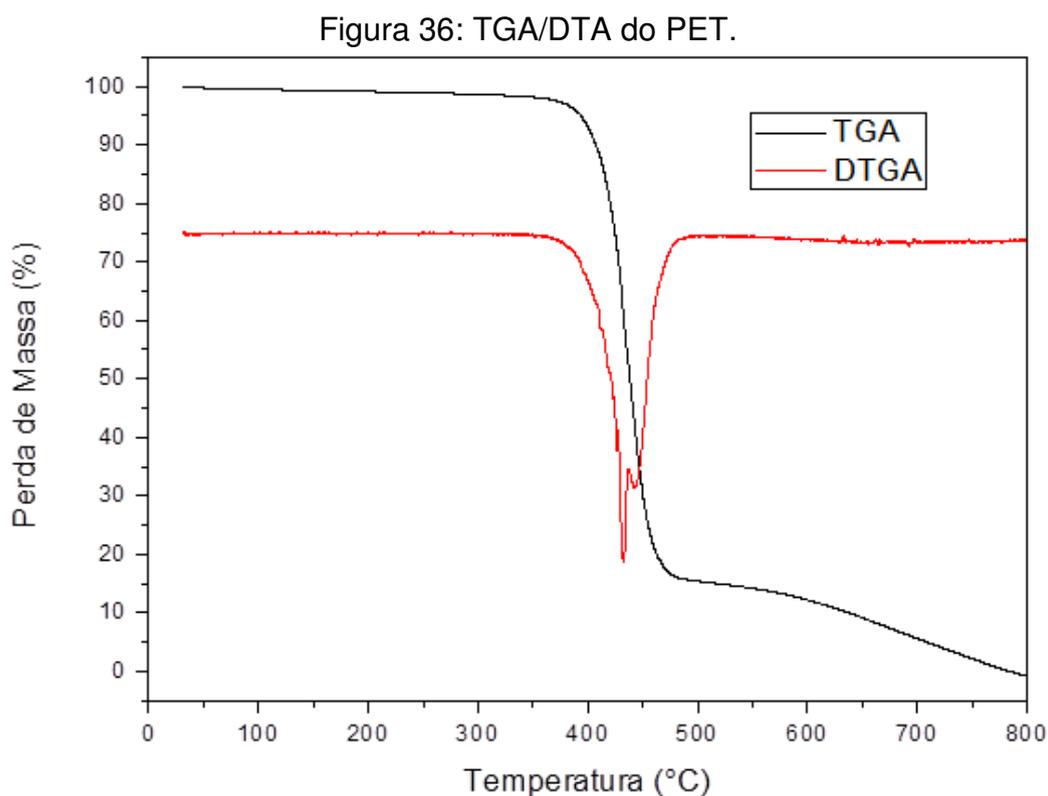
A Figura 35 apresenta o difratograma de raios - X (DRX) do PET triturado pós consumo.



Foram encontrados picos em 16,25°, 17,62°, 21,48°, 22,71°, 26,10°, 32,66°, 42,65° e 46,70°. Este conjunto de picos, bem como o perfil do difratograma, indicam que a estrutura do PET estudado, é similar ao encontrado na ficha 00-060-0989 (DP3), do banco de dados *International Centre of Diffraction Data* (ICDD).

O DRX indica que o PET está parcialmente cristalizado, pois são visíveis os picos de difração dos planos cristalinos identificados em cada ângulo. Também foi encontrado um pico em 26,67°, que se trata de um PET cristalizado por deformação. No entanto, esta estrutura secundária não pôde ser confirmada, devido uma parte significativa do seu difratograma estar sobreposta pelo da fase primária, sendo uma hipótese dentro das possibilidades.

A Figura 36 apresenta as Curvas DTA/TGA do PET, obtidas por meio da razão de aquecimento de 10°C/min, em atmosfera de nitrogênio.



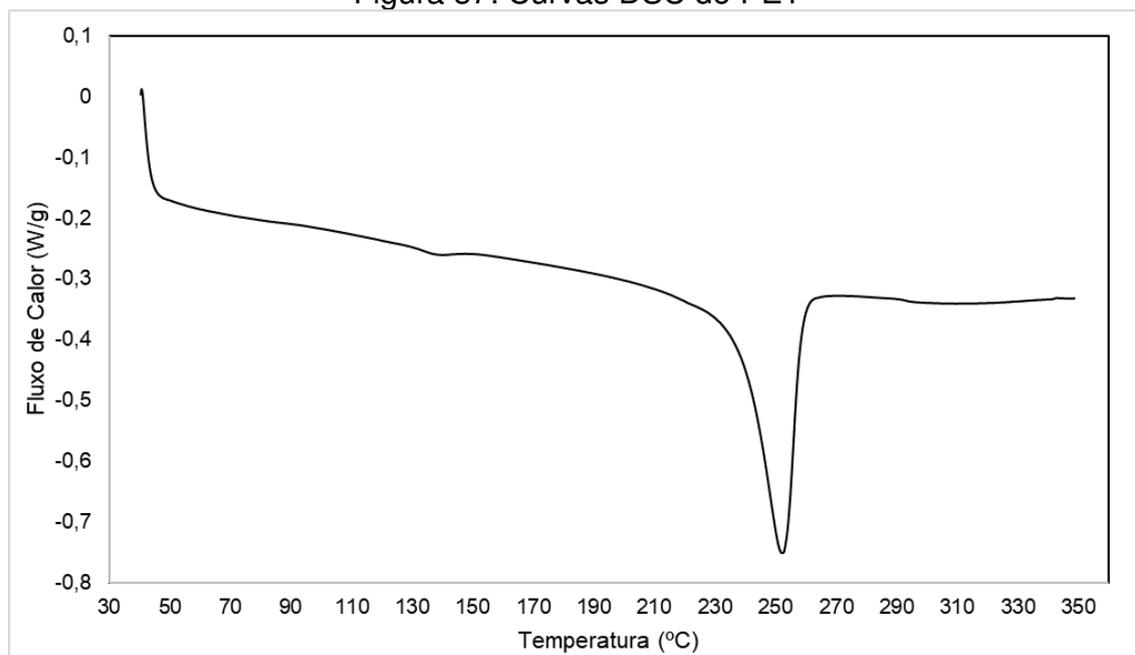
A curva TGA apresenta perda de massa em duas etapas: a primeira, entre 360°C e 481°C, referente a decomposição do PET, na qual 82% da massa inicial é perdida; e a segunda, entre 481°C e 780°C, quando ocorre a queima dos resíduos carbonizados na primeira etapa, não restando resíduos ao término da prática

experimental.

Resultados semelhantes foram descritos por Bannach *et al.* (2011), que também identificaram duas perdas de massa, sendo que para a primeira o percentual de perda correspondeu a 88% e, na segunda não restou resíduos. Singh *et al.* (2020) corroboram com os resultados descritos no presente estudo, uma vez que afirmam que a degradação do PET tende a ocorrer em um estágio que se inicia entre 450°C e 550°C. Os autores também confirmam que os resíduos oriundos dessa primeira etapa variam entre 15% e 18%, sendo este último valor encontrado na análise desenvolvida.

A Figura 37 ilustra a curva DSC do PET, obtida a razão de aquecimento de 10°C/min, em atmosfera de nitrogênio. A curva calorimétrica apresenta um pico endotérmico a aproximadamente 250°C.

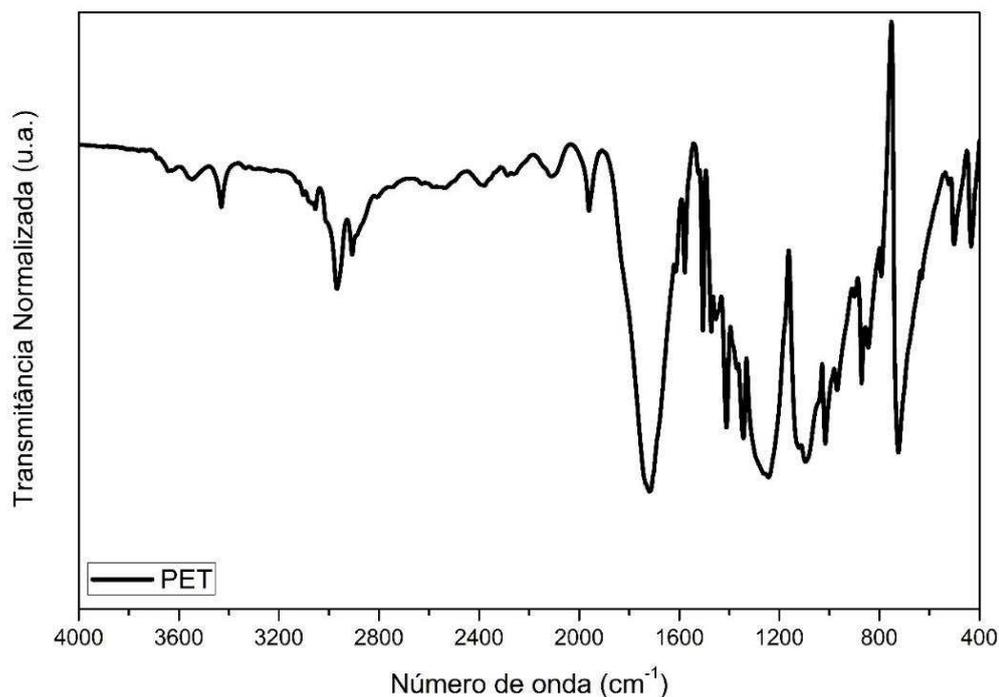
Figura 37: Curvas DSC do PET



O pico endotérmico, referente à fusão, é bem definido. No que se refere a cristalização do PET apresenta esse comportamento de cristalização a frio, essa informação pode ser visualizada no DRX.

A Figura 38 apresenta o Espectro de Infravermelho (FTIR) para o PET.

Figura 38: Espectro de FTIR para o PET.



Os principais sinais indicativos da sua composição estão presentes em regiões comuns a compostos hidrocarbonetos e ligações carbono-oxigênio. Os picos de baixa intensidade, referentes a estiramentos (ou deformações axiais) para grupos alifáticos saturados estão contidos entre 3000 e 2800 cm^{-1} . Nesta faixa, foram encontrados picos em 2919 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} , para estiramentos assimétrico e simétrico em grupos metileno ($-\text{CH}_2-$).

Picos com baixa intensidade foram encontrados em torno de 2000 cm^{-1} , indicando bandas harmônicas para aromáticos substituídos. O pico de maior intensidade, encontrado em torno de 1720 cm^{-1} , é indicativo para grupos carbonilas ($\text{C}=\text{O}$), referente a carbonila do grupo éster do polímero, ligado ao núcleo aromático. A presença de um pico em torno de 1590 cm^{-1} é indicativa de insaturações ($\text{C}=\text{C}$) em anéis, juntamente com picos em torno de 1475 cm^{-1} , sendo este último geralmente obscurecido pelo pico de deformação angular de grupos metileno ($-\text{CH}_2-$) em 1455 cm^{-1} .

O aparecimento dos picos em 1344 cm^{-1} , 1251 cm^{-1} , 1118 cm^{-1} e 1091 cm^{-1} para estiramento da ligação $\text{C}-\text{O}$, são o indicativo da presença de grupos ésteres na amostra. O aparecimento deste último está em conformidade com os picos este grupo para deformação axial (2919 cm^{-1} e 2850 cm^{-1}). Por fim, o pico em torno de

720 cm^{-1} é referente a vibração do tipo “*rocking*” para cadeias saturadas, $-(\text{CH}_2)_n-$, referente as cadeias do precursor etilenoglicol. Muitas das bandas de intensidade média e fraca são atribuídas às configurações da cadeia do polímero (GOMEZ, 2013).

4.1.4 Agregado Miúdo

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos para caracterização física do agregado miúdo.

Tabela 14: Caracterização física da areia

Ensaio	Média dos valores (g/cm^3)
Massa unitária (NBR NM 45/2006)	1,40
Massa específica real (NBR NM 52/2009)	2,56

Foram obtidos os valores de $1,40 \text{ g}/\text{cm}^3$ e $2,56 \text{ g}/\text{cm}^3$ para a massa unitária e massa específica real da areia, respectivamente.

Segundo Racena (2012), a massa unitária e a massa específica real do agregado miúdo são de aproximadamente $1,50 \text{ g}/\text{cm}^3$ e $2,63 \text{ g}/\text{cm}^3$, respectivamente. Os resultados obtidos são similares aos do autor e atendem os parâmetros para uso.

A distribuição granulométrica do agregado miúdo está apresentada na Tabela 15.

Tabela 15: Composição granulométrica do agregado miúdo

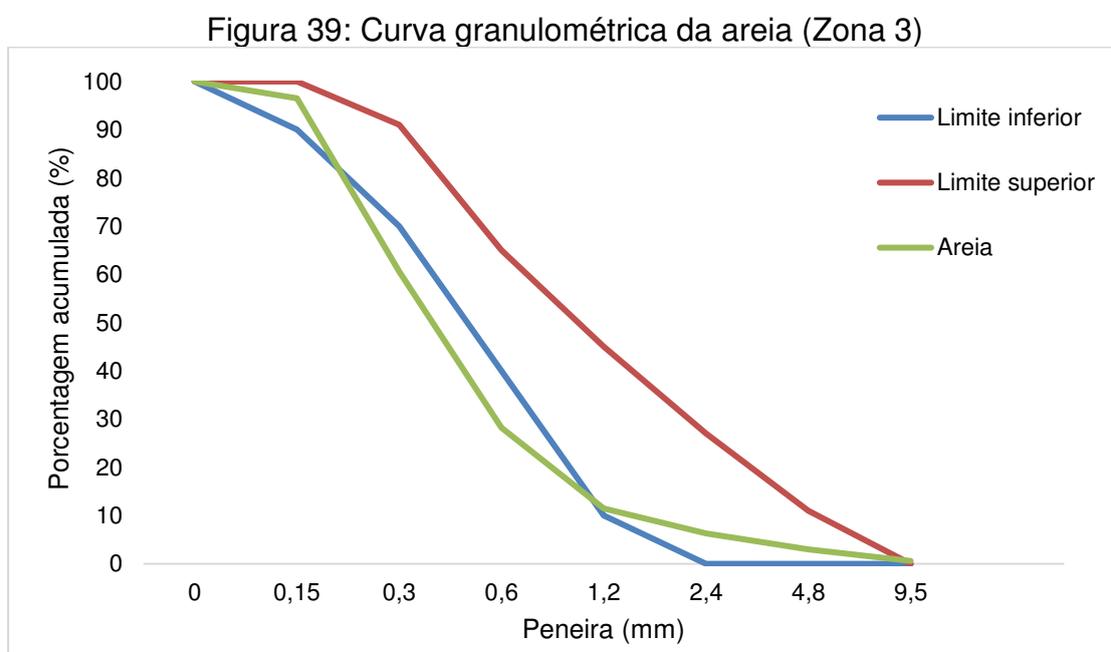
Peneiras (mm)	Material Retido (g)	Retida (%)	Acumulada (%)
4,8	0,0	0,0	0,0
2,4	45,22	4,52	4,52
1,2	65,73	6,57	11,09
0,6	208,82	20,88	31,97
0,3	476,28	47,63	79,60
0,15	184,77	18,48	98,08
>0,15	19,18	1,92	100
Módulo de finura		2,25	
Diâmetro máximo		2,4 mm	

O módulo de finura é 2,25 e o diâmetro máximo característico de 2,4 mm, tendo a maior parte do material retido nas peneiras de 0,6 e 0,3 mm.

Tendo em vista os dados apresentados na Tabela 15, que ilustra a curva granulométrica obtida para o agregado miúdo utilizado no estudo, observa-se que o mesmo se enquadra dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7.211/2005, podendo ser considerado como pertencente à zona ótima de utilização, levando em consideração também que para esta zona o módulo de finura pode variar de 2,20 a 2,90 e para a areia utilizada é 2,25 (ABNT, 2005).

De acordo com os valores obtidos, essa areia é considerada bem graduada, não apresentando uma grande deficiência ou excesso de qualquer tamanho, promovendo assim uma argamassa com uma melhor trabalhabilidade e uma pequena quantidade de vazios entre os grãos.

Analisando a Figura 39 verifica-se que a curva granulométrica da areia está dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7.211 (ABNT, 1982), sendo classificada como tipo média e zona 3. Através do comportamento da curva granulométrica observa-se que pela distribuição dos grãos esta areia pode ser utilizada na confecção de argamassas, pois apresenta grãos mistos e bem graduados.



4.2 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

4.2.1 Índice de consistência das argamassas

As Figuras 40 e 41 apresentam os resultados referentes ao espalhamento e à relação água/aglomerante para os traços 1:2:9 e 1:1:6, respectivamente.

Figura 40: Espalhamento e relação água/aglomerante para o traço 1:2:9

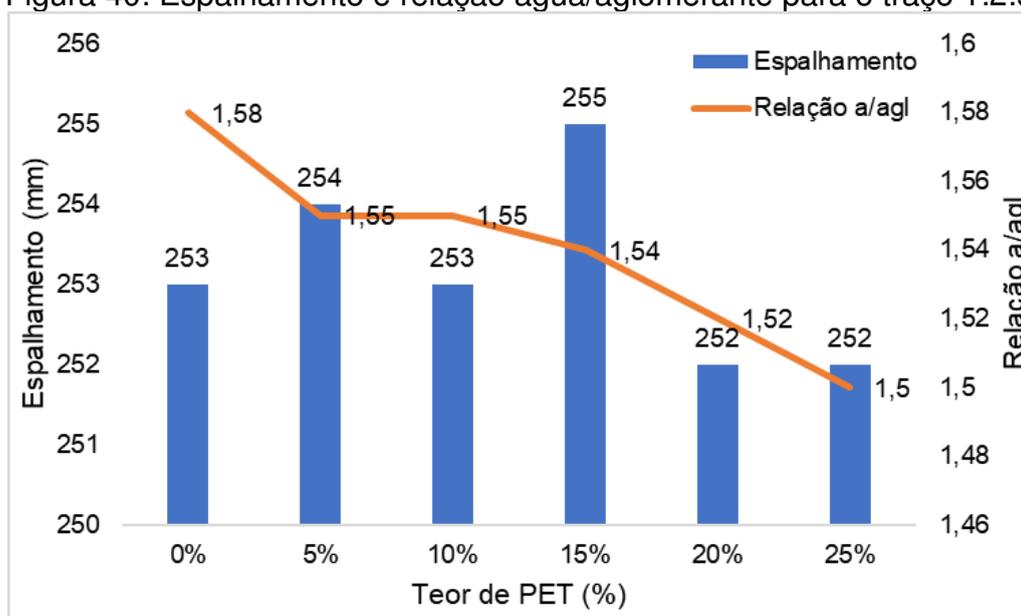
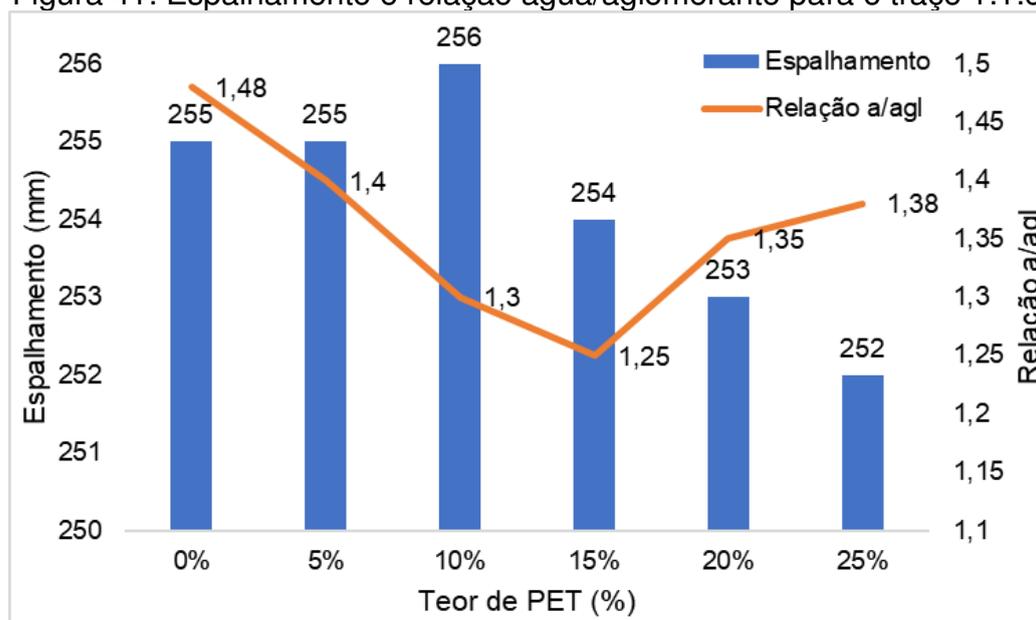


Figura 41: Espalhamento e relação água/aglomerante para o traço 1:1:6



De acordo com os resultados obtidos, nota-se que a medida em que o teor de polímero foi elevado, a relação água/aglomerante diminuiu, de tal modo que para as argamassas com teores de 5 %, 10%, 15%, 20% e 25% de PET, ocorreram redução de 1,90%, 1,90%, 2,53%, 3,80% e 5,06% respectivamente, em comparação à relação água/aglomerante da argamassa de referência.

Já o traço 1:1:6, para as argamassas com 5%, 10% e 15% de substituição de PET, apresenta um comportamento de diminuição da relação água/aglomerante, correspondente a 5,40%, 12,16% e 15,54%, respectivamente. Nota-se um aumento dessa relação para os produtos com 20% e 25% de PET, todavia, permanecem apresentando valores inferiores aos de referência, com diferenças de 8,78% e 6,76%.

Quanto ao espalhamento, o maior e menor valor registrados para o traço 1:2:9 foi de 252mm e 255mm, respectivamente. Já para o traço 1:1:6 esses valores correspondem a 252mm e 256mm. A NBR 13.276/2016 estabelece como valor de referência $255\text{mm} \pm 10\text{mm}$ (ABNT, 2016). Logo, todas argamassas analisadas nesse estudo atendem às especificações descritas.

Damineli *et al.* (2017) mostram que no caso de uma suspensão, onde há a inserção de um fluido entre os vazios para afastar as partículas e fazê-las se moverem, um bom empacotamento é muito importante, pois reduz consideravelmente os vazios e permite que a fluidez da suspensão seja atingida com quantidades bem menores do fluido. Dessa forma, como a granulometria do PET é muito pequena, os grãos do mesmo podem preencher os vazios deixados pela areia e gerar um bom empacotamento, contribuindo para atingir a consistência desejada com uma menor quantidade de água.

Silva *et al.* (2014), avaliou-se a viabilidade da incorporação de agregados plásticos finos na argamassa de beneficiamento e observou que agregados plásticos são impermeáveis e apresentam superfície lisa, ao contrário dos agregados convencionalmente utilizados. Explica que o PET é quimicamente inerte e apresenta superfície hidrófuga. Verifica-se, assim, que o PET não absorve água como o agregado miúdo convencional. Então, a água que não for absorvida pelos agregados ou utilizada na hidratação do cimento ficará livre na mistura.

O fator que pode justificar a melhora da trabalhabilidade da argamassa com a adição do polímero em estudo, são as características químicas, intrínsecas ao

PET. Esse termoplástico apresenta uma cadeia polimérica grande e a permeabilidade está diretamente ligada ao peso molecular do elemento, o que torna o poliéster em estudo altamente impermeável (JUCÁ, 2017).

Dessa maneira, quanto maior a quantidade de politereftalato de etileno na argamassa, maior a contribuição para a existência de água livre e, conseqüentemente, para o aumento da trabalhabilidade.

4.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado no estado fresco

Nas Figuras 42 e 43 são apresentados os resultados obtidos para a densidade de massa e teor de ar incorporado.

Figura 42: Densidade de massa e teor de ar incorporados das argamassas com diferentes teores de PET – Traço 1:2:9

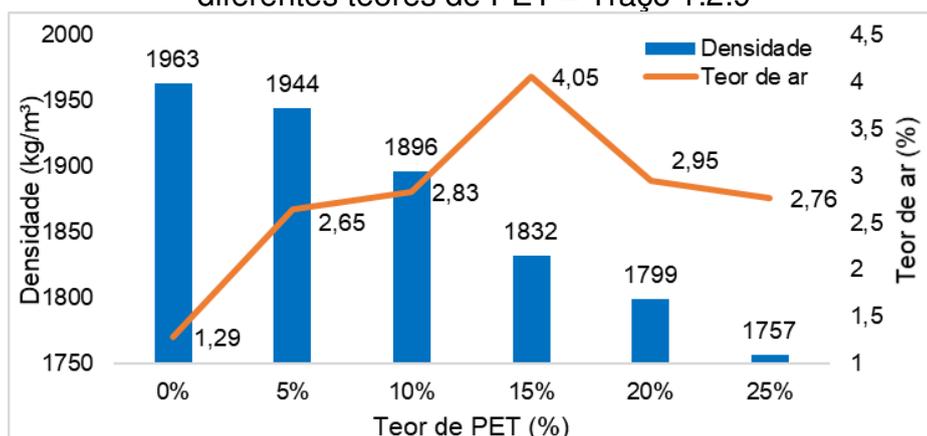
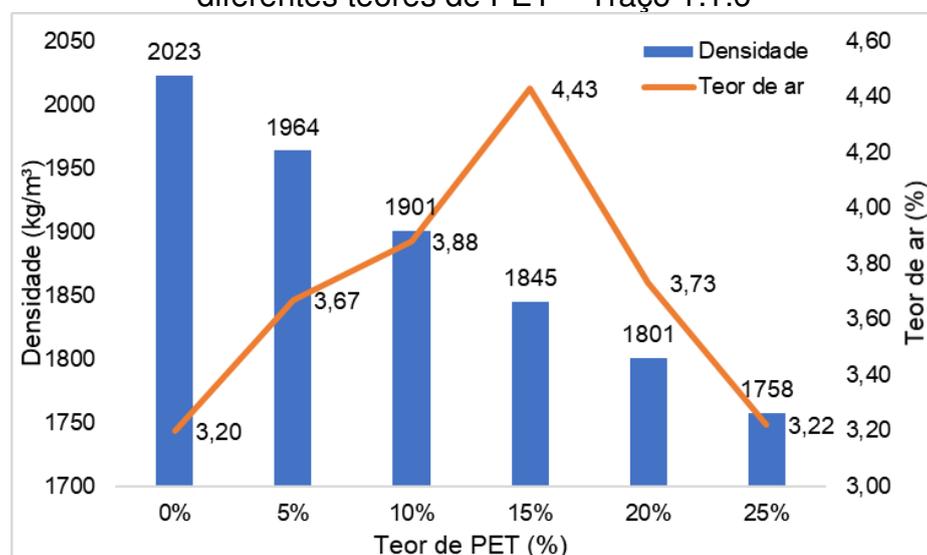


Figura 43: Densidade de massa e teor de ar incorporados das argamassas com diferentes teores de PET – Traço 1:1:6



Verificou-se a ocorrência de uma redução linear na densidade de massa com os diferentes teores, tanto para o traço 1:2:9 quanto para o traço 1:1:6. Observa-se que quanto mais se incorpora PET, a densidade de massa é reduzida. Segundo Silva (2014), isso ocorre devido a menor densidade dos agregados de resíduos plásticos em comparação com o agregado miúdo convencional.

Observa-se que para os teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de PET, no traço 1:1:6, quando comparados à argamassa de referência (0%), obtiveram redução de 1,11%, 3,52%, 7,09%, 9,31% e 11,48%, respectivamente, e com os mesmos teores para o traço 1:2:9, quando comparados à argamassa de referência (0%), obtiveram redução de 0,97%, 3,41%, 6,67%, 8,35% e 10,49%, respectivamente.

A redução da densidade de massa fresca nos compósitos, pode ser explicada em razão do menor valor de massa unitária do PET em relação a agregado, quase 3 vezes menor, o que influencia nas argamassas cimentícias. Infere-se, portanto, que a diminuição gradual da densidade de massa ocorre devido ao aumento do teor de PET, devidamente fundamentado no fato de que o PET é menos denso do que a areia.

Os resultados das densidades de massa no estado fresco, para todas as argamassas estudadas, estão de acordo com a literatura (CINTRA 2013; PINTO; FIORITI, 2016; PCZIECZEK, 2017).

Levando em consideração as informações apresentadas pela norma NBR 13.281/2005, acerca dos requisitos para argamassas destinadas ao assentamento e ao revestimento de paredes e tetos, é importante a realização da classificação de acordo com os valores de densidade de massa obtidos. Dessa maneira, a norma classifica todas as argamassas em estudo como pertencentes à classe D4, em virtude de todos os valores estarem no intervalo de 1600 e 2000 kg/m³.

Segundo Carasek (2017), argamassas que possuem densidade de massa menor que 1400 kg/m³ são classificadas como argamassas leves, enquanto as argamassas normais apresentam valores entre 1400 e 2300 kg/m³. Dessa forma, mesmo com a redução dessa propriedade por conta da adição de resíduos de PET, todas as argamassas obtidas ainda são classificadas como argamassas normais, podendo, então, ser utilizadas em aplicações convencionais.

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que para as argamassas

de traço 1:2:9, que todas as que possuem percentuais de PET, apresentaram valores de teor de ar incorporado maiores que as argamassas de referência. O mesmo comportamento é verificado para as argamassas de traço 1:1:6.

Pelos limites estabelecidos pela NBR 13.281/2005, as argamassas de assentamento e revestimento podem ser classificadas como sendo do tipo A, pois apresentaram percentual do teor de ar incorporado menor que 8% (ABNT, 2005). Verificou-se ainda que os percentuais mais elevados correspondem às argamassas com substituição parcial de 15% de PET, contudo, os valores obtidos estão dentro do limite estabelecido pela norma.

Conforme Garcia *et al.* (2020), o teor de ar incorporado aumenta à medida em que se eleva a adição de material polimérico na composição da argamassa. Enfatizam ainda que esse comportamento à baixa densidade do agregado miúdo alternativo e à porosidade, que contribuem para reduzir a massa específica do produto cimentício.

4.2.3 Densidade de massa no estado endurecido

Nas Figuras 44 e 45 são apresentados os resultados de densidade de massa no estado endurecido, das argamassas incorporadas com PET, com 7, 14, 28 e 56 dias de cura, para os traços 1:2:9 e 1:1:6.

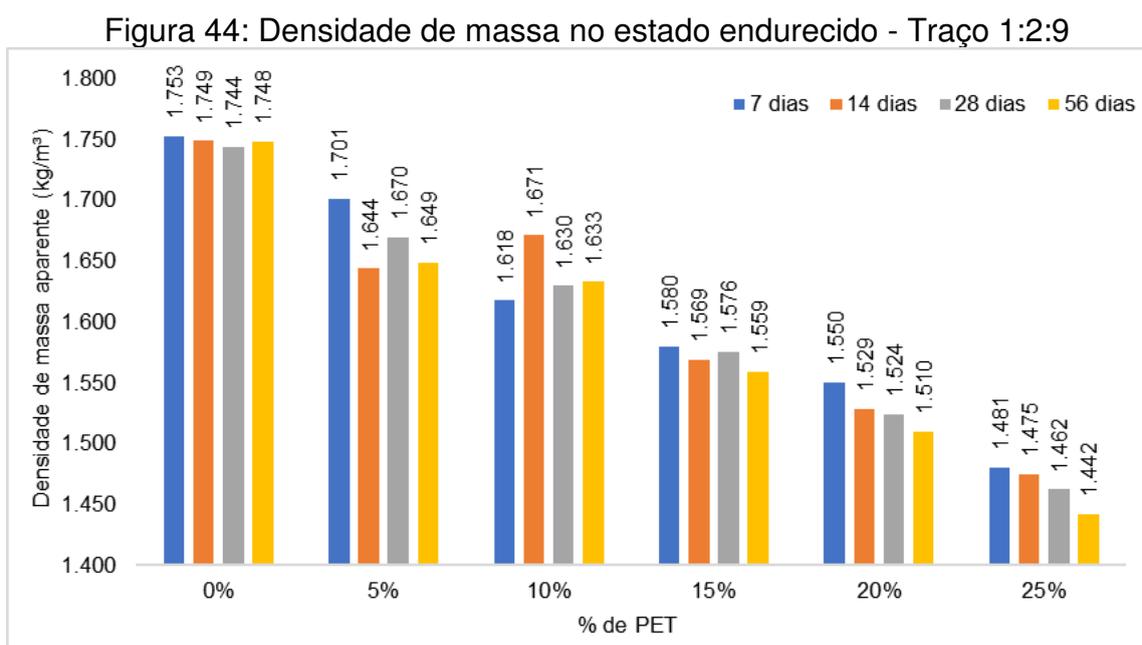
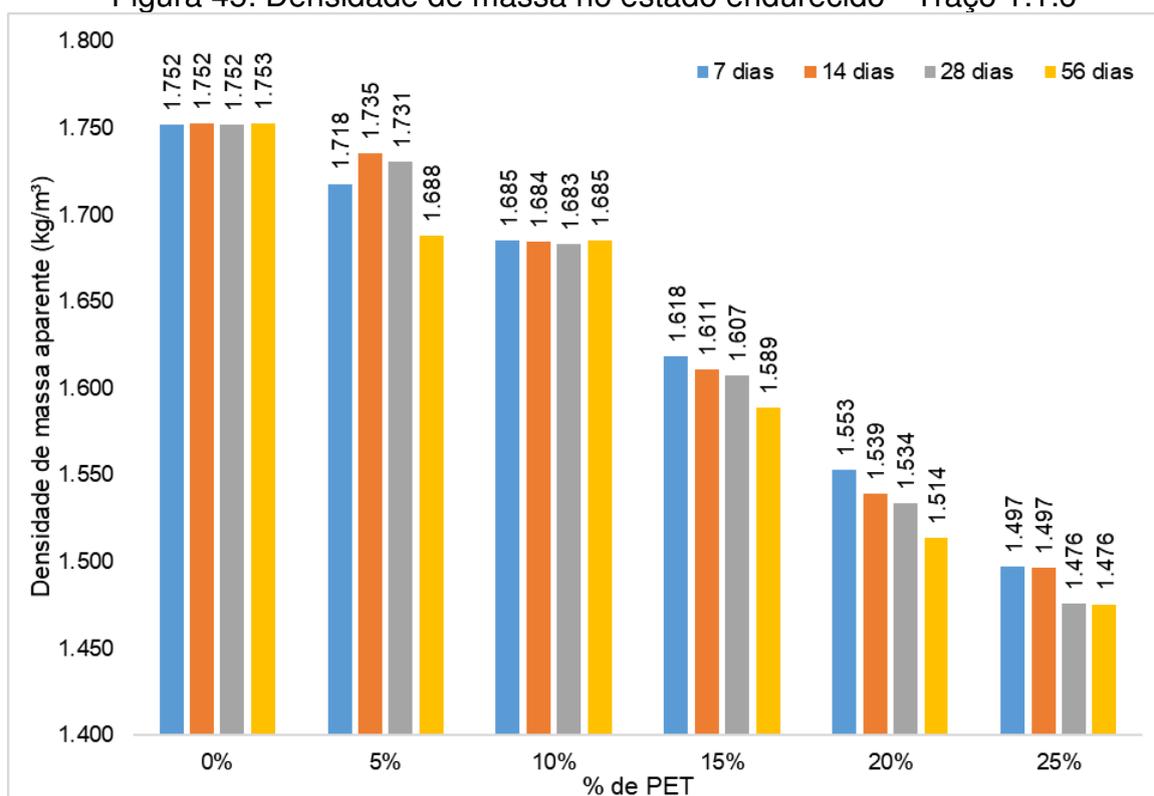


Figura 45: Densidade de massa no estado endurecido - Traço 1:1:6



Observa-se que a densidade de massa aparente no estado endurecido exibiu tendência de diminuição, semelhante ao comportamento do ensaio no estado fresco.

Para o traço 1:2:9, a maior densidade de massa aparente foi obtida para a argamassa de referência, que apresentou densidade superior em 2,92%, 7,70%, 9,85%, 11,56% e 15,52%, aos 7 dias; 6,01%, 4,45%, 10,30%, 12,60% e 15,66%, aos 14 dias; 4,25%, 6,56%, 5,64%, 12,61% e 16,16% aos 28 dias; 5,69%, 6,59%, 10,83%, 13,64% e 17,53% aos 56 dias de cura, quando em comparação as produtos com 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de PET incorporado, respectivamente.

De forma análoga, a argamassa de referência do traço 1:1:6 também apresentou uma maior densidade, quando em comparação com as argamassas com PET. As diferenças observadas foram de 1,93%, 3,81%, 7,61%, 11,36% e 14,54% aos 7 dias; 0,97%, 3,88%, 8,07%, 12,17% e 14,60% aos 14 dias; 1,20%, 3,92%, 8,24%, 12,45% e 14,70% aos 28 dias; 3,69%, 3,85%, 9,36%, 13,62% e 15,81% aos 56 dias, em comparação com as argamassas com 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de PET.

Ao comparar os resultados obtidos com os padrões normativos,

estabelecidos pela NBR 13.281/2005, pode-se enquadrar as argamassas de ambos os traços na classe M4, cujos limites de densidade aparente no estado endurecido correspondem a 1400 kg/m³ e 1800 kg/m³ (ABNT, 2005).

Nota-se que a densidade é inversamente proporcional ao teor de PET incorporado, comportamento que se justifica pelo fato de que o peso específico da areia é superior ao peso específico do PET (AOCHAROEN; CHOTICKAI, 2021). Esse fator torna-se pertinente por reduzir o peso total e, por consequência, o custo das construções (RATHORE; CHOUHAN; PRAKASH, 2021)

Oliveira *et al.* (2020) analisando percenturais de incorporação de PET de 0%, 5% e 10%, registrando reduções de densidade de até 32%. Já Spósito *et al.* (2020), registraram reduções de até 13,85%, para argamassas com 20% de PET em substituição parcial do agregado miúdo, valores que se assemelham aos encontrados no presente estudo.

4.2.4 Resistência à compressão simples (RCS)

Nas Figuras 46 e 47 estão apresentados os resultados obtidos para resistência à compressão simples, aos 7, 14, 28 e 56 dias de cura.

Figura 46: Resistência à compressão simples – Traço 1:2:9

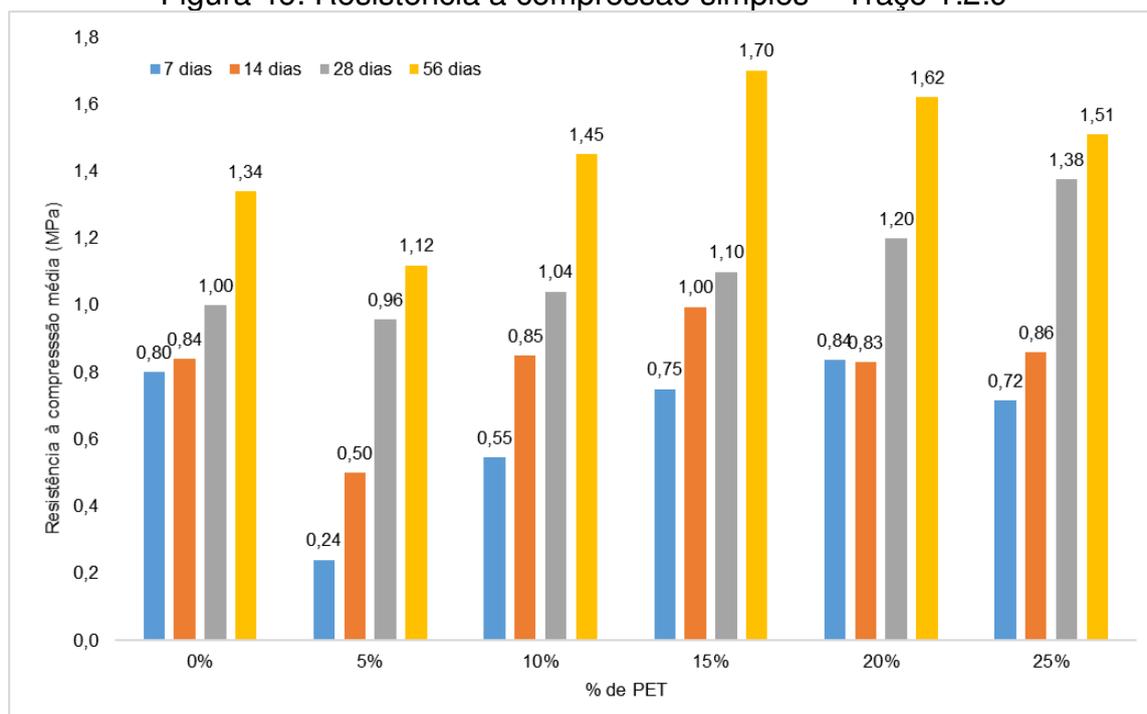
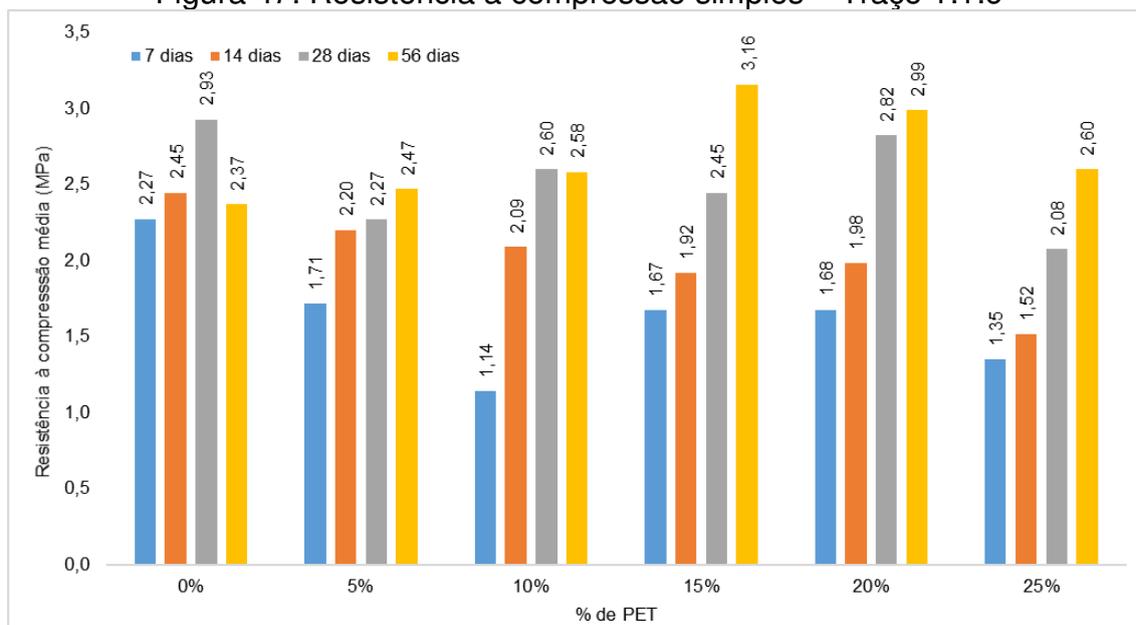


Figura 47: Resistência à compressão simples – Traço 1:1:6



Conforme resultados apresentados na Figura 46, observa-se que para o traço 1:2:9, a RCS obtida para as argamassas, de uma maneira geral, aumentou tanto com a incorporação de PET quanto com a idade de cura. As argamassas incorporadas com 10%, 15%, 20% e 25% de PET, obtiveram melhor desempenho mecânico aos 56 dias de cura quando em comparação com a argamassa de referência (1,34 MPa), sendo de 1,45 MPa (8,21%), 1,70 MPa (26,86%), 1,62 MPa (20,89%) e 1,51 MPa (12,69%), respectivamente. Observa-se também que aos 56 dias de cura as argamassas que apresentaram melhor desempenho mecânico foram a que contêm percentual de PET, correspondendo a 15%.

Para o traço 1:1:6, a argamassa de referência, aos 28 dias de cura, foi a que apresentou melhor resistência a compressão simples. Todavia, aos 56 dias, nota-se que todas as argamassas com PET incorporado obtiveram desempenho superior: 4,05%, 8,14%, 25%, 20,74% e 8,85%, para os teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de PET, respectivamente.

Percebe-se que o traço 1:2:9 apresentou desempenho mecânico inferior ao traço 1:1:6. A diferença pode estar relacionada às proporções de aglomerante e agregado da mistura. Como o proporção do traço 1:2:9 é menor, ocorre uma diminuição na formação de produtos ao longo da hidratação, resultando em menores valores de resistência.

De acordo com os parâmetros estabelecidos pela Norma ABNT NBR

13.281/2005, verifica-se que as argamassas do traço 1:2:9 se enquadram na classe P1, por apresentarem resistência $\leq 2,0$ MPa. Quanto ao traço 1:1:6, considerando os valores registrados aos 28 dias de cura, as argamassas classificam-se como P2, cujo intervalo definido é de 1,5 MPa a 3,0 MPa. Para as argamassas com 15% de PET, aos 56 dias, os valores obtidos permitiu classificá-las como P3, referente ao intervalo de 2,5 MPa e 4,5 MPa (ABNT, 2005).

Ge *et al.* (2013) constataram que a amostra com 15% de partículas finas foi a que proporcionou os melhores resultados da resistência à compressão simples, de modo que à medida que esse percentual era aumentado, notava-se oscilações em relação à resistência e uma tendência à diminuição dessa propriedade. Esses resultados coincidem com o comportamento observado para os dois traços estudados. Resultados promissores também foram encontrados para percentuais de 5% de PET, que aumentou a resistência à compressão aos 28 dias de cura (ABED *et al.*, 2021).

Entretanto, é pertinente enfatizar que a adição de PET pode reduzir o desempenho mecânico das argamassas, devido à baixa aderência entre a pasta cimentícia e o agregado plástico, por se tratar de um material hidrofóbico (BAHIJ *et al.*, 2020). Esse aspecto permite compreender o comportamento do traço 1:1:6, aos 28 dias de cura.

Mesmo diante das indicações contrárias, os resultados obtidos se mostram consistentes pelo fato de que foram consideradas as idades de cura, bem como composições de traço e percentuais de incorporação de PET distintos da maioria dos trabalhos apresentados na literatura.

4.2.5 Resistência à tração na flexão

As Figuras 48 e 49 mostram os resultados obtidos para a resistência à tração na flexão.

Figura 48: Resistência à tração na flexão no traço 1:2:9

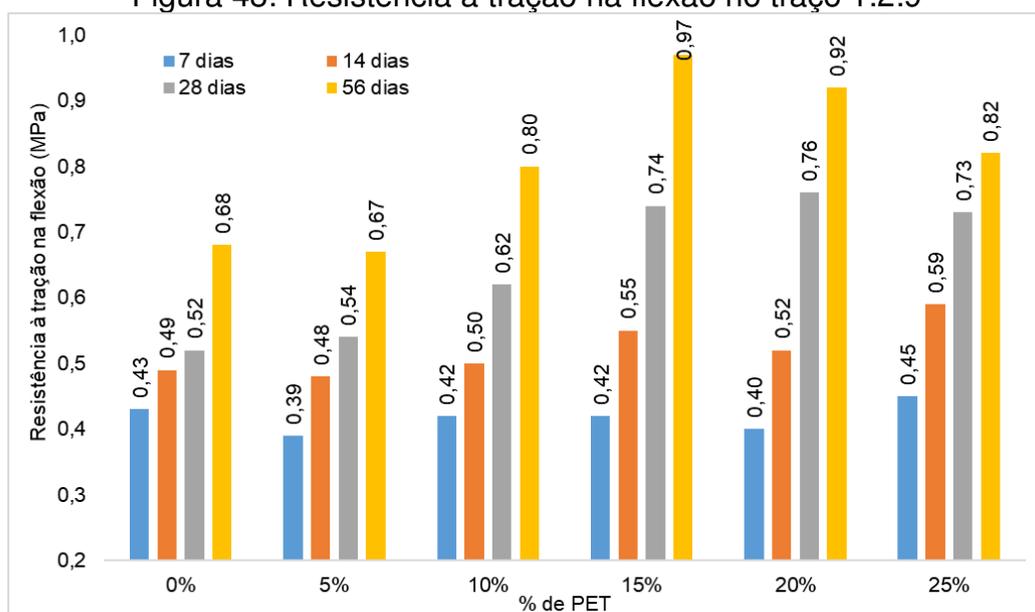
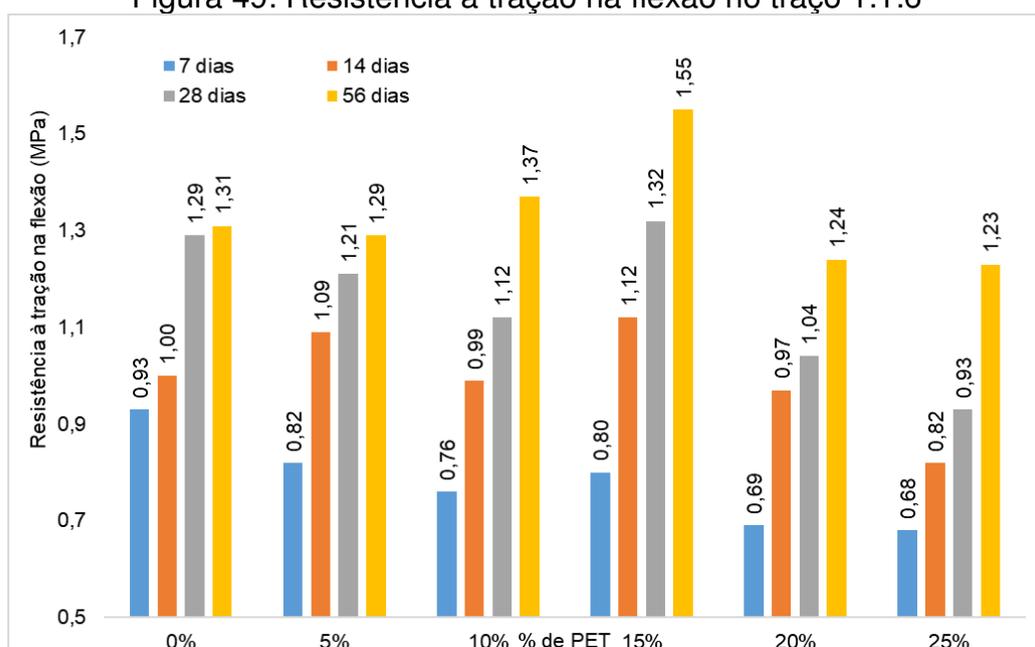


Figura 49: Resistência à tração na flexão no traço 1:1:6



Conforme resultados obtidos para o traço 1:2:9, observa-se que, aos 7 dias de cura, as argamassas apresentam desempenho mecânico semelhante, visto que o produto de referência registrou resistência à tração na flexão correspondente a 0,43 MPa, superior em 9,3%, 2,3%, 2,23% e 6,9%, quando em comparação com as argamassas com percentuais de 5%, 10%, 15% e 20% de PET, respectivamente. A argamassa com 25% de PET incorporado foi a única que apresentou desempenho superior, com diferença de 0,2 MPa.

Para as idades de 14 e 28 dias, as argamassas com 10%, 15%, 20% e 25% de PET apresentaram maior resistência. Aos 56 dias, a argamassa com 5% de PET triturado foi a única que apresentou desempenho inferior à de referência.

Para o traço 1:1:6, a argamassa de referência apresentou o melhor resultado para a idade de 7 dias de cura. Aos 14 dias, as argamassas com 5% e 15% foram as que se sobressaíram, com valores de resistência à tração na flexão de 8,2% e 10% superiores. Para 28 dias, a argamassa com 15% de PET registrou 3% a mais de resistência, quando comparada à argamassa de controle. E, aos 56 dias, os produtos com 10% e 15% de PET foram os que registraram melhor desempenho, 4,3% e 15,5%, superior ao de referência.

Ademais, verifica-se, em ambos os traços, que a resistência à tração na flexão aumenta com a idade de cura e que o produto com 15% de PET foi o que obteve o melhor desempenho, aos 56 dias. Nota-se que o traço 1:1:6 detém os maiores valores para esse parâmetro, fato explicado pela maior razão aglomerante/agregado, já discutida na resistência à compressão simples.

Conforme a NBR 13.281/2005, as argamassas obtidas no traço 1:2:9 são da classe R1, por apresentarem resistência à tração na flexão inferior a 1,5 MPa. Os produtos derivados do traço 1:1:6, para a idade de 28 dias de cura, também se enquadram nessa classe. Entretanto, considerando a idade de 56 dias, é possível classificar a argamassa com 15% de PET como R2, que apresenta intervalo entre 1,0 e 2,0 MPa (ABNT, 2005).

Os resultados obtidos para o traço 1:2:9, aos 56 dias de cura, vão de encontro ao que é discutido por Rathore *et al.* (2021). Conforme os autores, o PET tende a promover a perda de resistência à tração das argamassas, devido à baixa interação com a pasta cimentícia.

Contudo, pela perspectiva do que foi observado aos 28 dias de cura para o traço 1:1:6, nota-se uma coerência entre os resultados e o apontamento feitos por Rathore *et al.* (2021), dada a menor resistência observada na maioria das argamassas, com exceção do produto com 15% de PET.

Bahij *et al.* (2020) afirmam que a resistência à tração pode ser melhorada à medida que são incrementadas pequenas porcentagens de PET, pelo fato de que a resistência à tração desse material se sobressai em relação aos demais

constituintes da argamassa. Tal comportamento pôde ser constatado especialmente para o tempo de cura de 56 dias, para o traço 1:2:9.

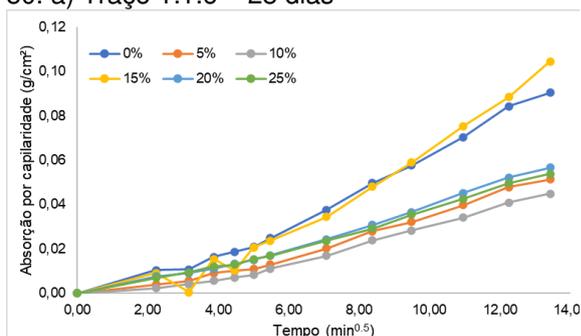
É necessário ressaltar ainda que os estudos que abordam essa propriedade mecânica adotam a idade de 28 dias como referência. Todavia, dadas as particularidades do material polimérico, torna-se pertinente avaliar o comportamento para tempos de cura maiores.

4.2.6 Absorção de água por capilaridade

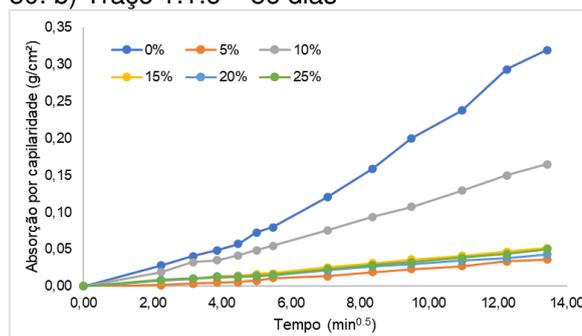
Na Figura 50 são apresentados os resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas incorporadas com PET, com 28 e 56 dias de cura.

Figura 50: Absorção por capilaridade

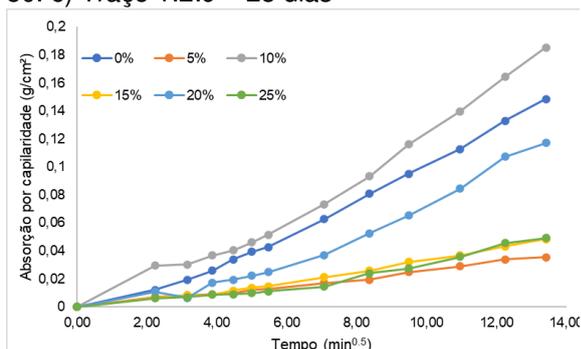
50. a) Traço 1:1:6 – 28 dias



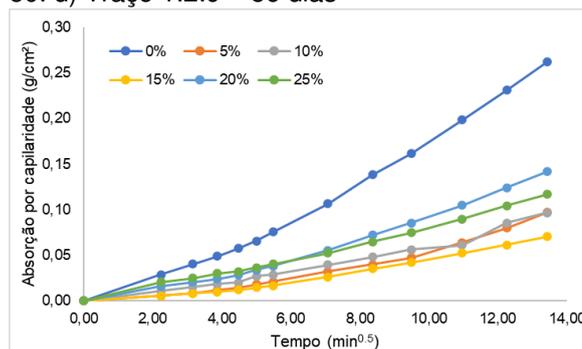
50. b) Traço 1:1:6 – 56 dias



50. c) Traço 1:2:9 – 28 dias



50. d) Traço 1:2:9 – 56 dias



De acordo com a classificação da NBR 13.281/2005, as amostras estudadas se enquadram dentro das classes C1, que possui valores para o coeficiente de capilaridade menores ou iguais a $1,5 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$, e C2, com coeficientes entre 1,0 e $2,5 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$.

Bauer *et al.* (2013) afirmam que as argamassas para aplicações gerais devem apresentar valores pertencentes à classe C3 ($2,0$ a $4,0 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) ou

inferior a ela, e que para alvenarias que estejam em contato com a água da chuva, se recomenda as classes C1 e C2. Dessa forma, verifica-se que o coeficiente de capilaridade das amostras se enquadra dentro dos valores recomendados, tanto para aplicações gerais quanto para paredes expostas à chuva.

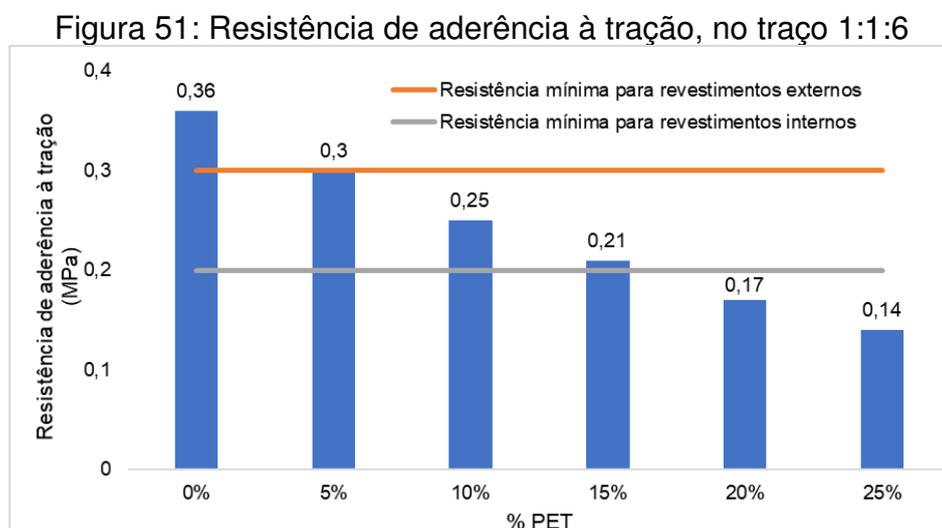
Segundo Damineli *et al.* (2017), o melhor empacotamento das partículas e, então, o melhor preenchimento dos vazios na mistura, reduz o volume de pasta necessário à fluidez da mistura, e isso possibilita um aumento na eficiência do uso de ligantes e uma redução considerável da porosidade intergranular, o que contribui para redução da absorção.

Dentro desse aspecto, com a pequena granulometria dos grãos de PET, que apresentaram módulo de finura de 1,55 e dimensão máxima de 0,6mm como visto anteriormente, percebe-se que os mesmos contribuem para o preenchimento dos vazios deixados pela areia, resultando em um melhor empacotamento, o que contribui para redução da porosidade e, portanto, da absorção.

Com essas informações, pode-se inferir que as argamassas poliméricas analisadas neste estudo apresentam características que propiciam maior durabilidade e uma maior resistência ao processo patológico da eflorescência.

4.2.7 Resistência de aderência à tração (RAT)

Na Figura 51, são apresentados os resultados da resistência média de aderência à tração das argamassas incorporadas com PET, aos 28 dias de cura, para o traço 1:1:6.



Analisando a figura 51, observa-se que a argamassa de referência (0%), obteve melhor comportamento em relação à resistência de aderência à tração, no valor de 0,36 MPa, enquanto que para as substituições com 5%, 10% e 15%, 20% e 25% do agregado miúdo por PET, foram obtidos os valores de 0,30 MPa, 0,25 MPa, 0,21 MPa, 0,17 MPa e 0,14 MPa, respectivamente. De maneira geral, pode-se observar que, à medida em que se aumenta o teor de PET na argamassa, há uma diminuição considerável da resistência de aderência à tração.

A NBR 13.479/2013 especifica os revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas e estabelece limites em função de sua aplicação. Para revestimentos externos (pintura ou base de reboco) a resistência mínima é maior ou igual a 0,30 MPa, e para revestimentos internos (pintura ou base de reboco) a resistência mínima é maior ou igual a 0,20 MPa (ABNT, 2013).

Pode-se observar que as argamassas com 0% e 5% de PET, apresentaram resistência para aplicação em revestimento externo, visto que ambas as argamassas atenderam os limites prescritos pela NBR 13.749/2013 (ABNT, 2013), pois apresentaram valores iguais ou superiores a 0,30 MPa em, no mínimo, 8 dos 12 corpos de prova, sendo possível, o uso dessas argamassas para revestimento em paredes internas e externas.

As argamassas com teores de PET de 10% e 15%, enquadram-se nos requisitos para aplicação em revestimentos internos (pintura ou base de reboco), onde a resistência mínima é maior ou igual a 0,20 MPa em, no mínimo, 8 dos 12 corpos de prova. Já as argamassas com 20% e 25% de PET não atendem as exigências determinadas pela ABNT.

Silva *et al.* (2014), utilizaram dois tipos de PET em substituição ao agregado miúdo. O valor da resistência de aderência da argamassa de referência foi de 0,33 MPa, enquanto para uma substituição de 15% do agregado miúdo por PET foram obtidos os valores de 0,21 MPa e 0,26 MPa para os agregados PF e PP, respectivamente. Atribuíram o comportamento às heterogeneidades microestruturais entre as argamassas e o agregado plástico, especialmente na zona de transição interfacial, que proporcionam uma má conexão entre a matriz cimentícia e os agregados plásticos.

4.2.8 Resistência das argamassas ao ataque por sulfatos

As Figuras 52 e 53 ilustram as curvas das expansões para as argamassas incorporadas com PET, quando imersas em solução de sulfato de sódio por um período de 42 dias.

Figura 52: Expansão das argamassas submetidas ao sulfato – Traço 1:2:9

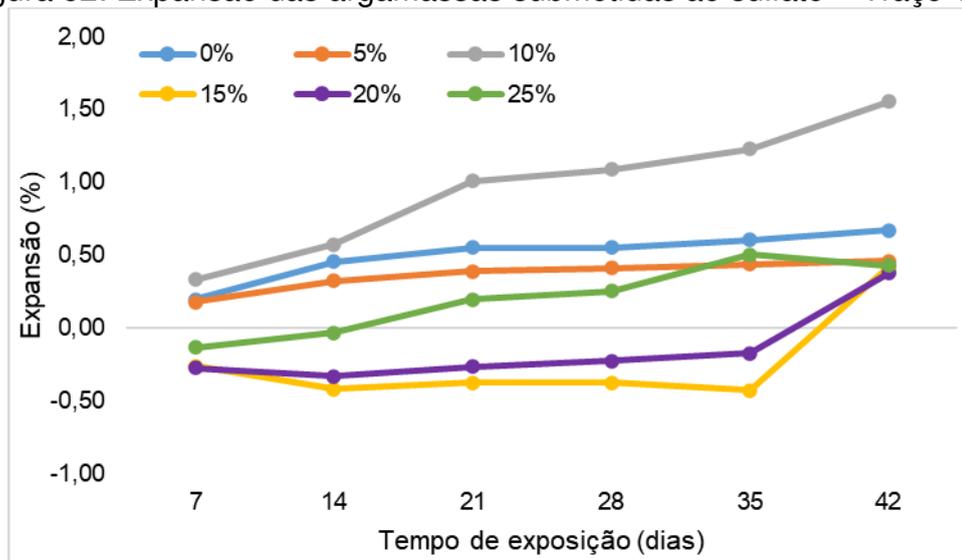
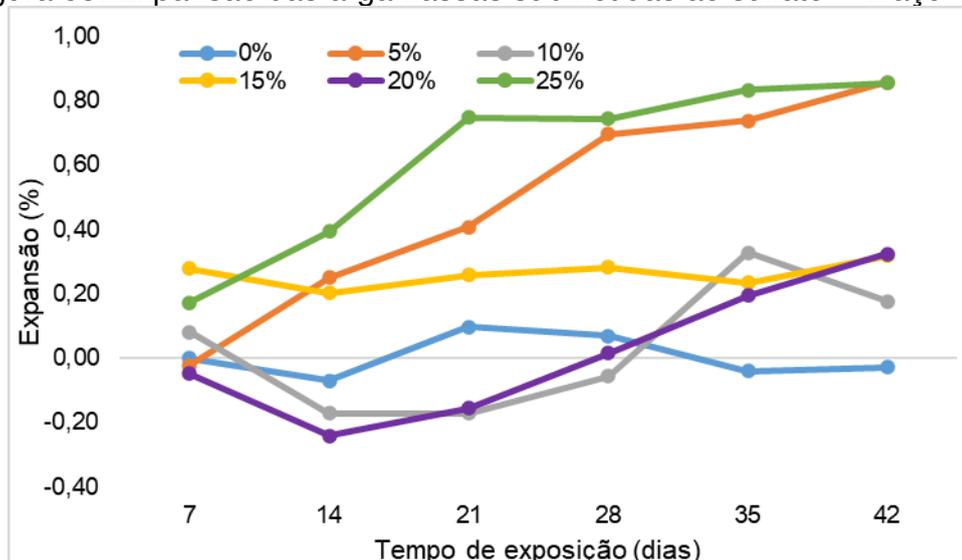


Figura 53: Expansão das argamassas submetidas ao sulfato – Traço 1:1:6



Para o traço 1:2:9, os valores obtidos para as expansões aos 42 dias variaram entre 0,38%, referente ao produto com substituição parcial de 20% de PET, e 1,55%, para a argamassa com 10%. A argamassa de referência (com 0% de PET) apresentou 0,67% e, as demais registraram expansões correspondentes

a 0,46%, 0,42% e 0,43%, para os percentuais de 5%, 15% e 25%, respectivamente.

No traço 1:1:6, a argamassa de referência apresentou uma retração de 0,03%. Nos produtos com PET incorporado, o percentual de 10% foi o que mostrou menor expansão, equivalente a 0,18%. Para os percentuais de 5%, 15%, 20% e 25% de PET incorporado, as expansões foram de 0,86%, 0,32%, 0,32% e 0,85%.

O ataque por sulfato ocorre devido a presença de íons dispersos na água. Estes, por sua vez, penetram na argamassa, interagem com os componentes constituintes da pasta e formam minerais que promovem a expansão e a deterioração (ABU-SALEEM *et al.*, 2021).

Ao analisar o comportamento das argamassas modificadas por resíduos de PET, verifica-se que possuem maior resistência ao ataque por sulfatos (TANI *et al.*, 2018). Considerando o traço 1:2:9, percebe-se que tal afirmativa é corroborada, uma vez que somente a argamassa com 10% de PET incorporado apresentou expansão superior ao produto de referência. Para o traço 1:1:6, nota-se que a argamassa de referência foi a que sofreu menores alterações dimensionais.

Percebe-se que o coeficiente de resistência à corrosão diminui com o tempo de exposição ao meio agressivo (TANI *et al.*, 2018). Ainda em consonância com os autores, os percentuais de substituição ótimos para o PET, considerando a durabilidade, varia entre 6% e 17%, valores próximos aos utilizados neste estudo.

Já Coppola *et al.* (2018), ao analisarem os efeitos da incorporação do PET, verificaram que teores elevados de agregados artificiais aumentam a propensão à desintegração, devido à formação da entrigita, ao baixo nível de compactação e baixa coesão dos constituintes. Esse aspecto pode estar relacionado ao desempenho observado a partir do experimento, especialmente para as argamassas do traço 1:1:6.

As argamassas estudadas não apresentaram efetividade ao ataque por sulfato de sódio, uma vez que os valores obtidos são superiores a 0,06%, estabelecido pela norma ASTM C 452.

Para além da variação dimensional, a exposição do material cimentício ao meio quimicamente hostil promove alterações na massa. Logo, as Figuras 54 e 55 mostram as curvas de variação de massa durante o ataque por sulfatos para os traços 1:2:9 e 1:1:6, respectivamente.

Figura 54: Variação de massa das argamassas submetidas ao sulfato – Traço 1:2:9

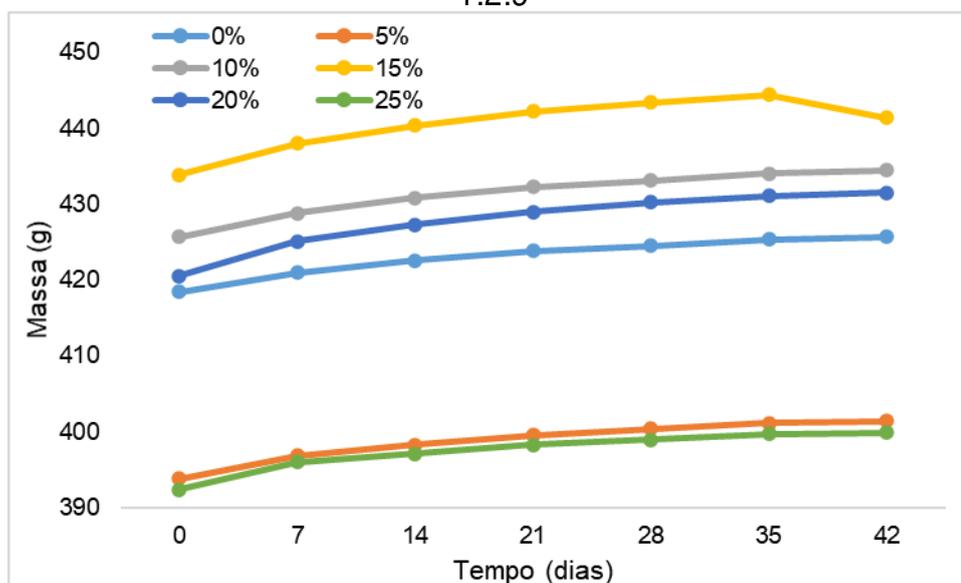
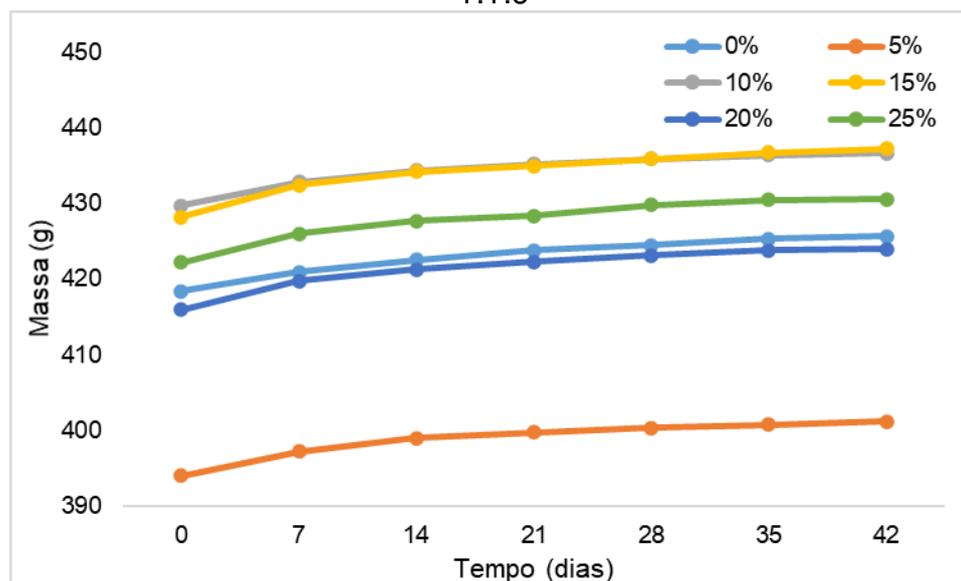


Figura 55: Variação de massa das argamassas submetidas ao sulfato – Traço 1:1:6



Conforme se observa para ambos os traços, ao longo do período de exposição ao meio ácido ocorreu o ganho de massa em todas as amostras. Para o traço 1:2:9, os menores ganhos de massa ocorreram nas argamassas com percentuais de PET correspondentes a 5% e 25%. A argamassa de referência apresentou ganho de massa intermediário, enquanto a amostra com 15% de PET incorporado apresentou a maior variação, seguida de uma perda ao final dos 42 dias.

Para o traço 1:1:6, a menor variação correspondeu à argamassa com 5%

de PET, já os maiores valores registrados corresponderam às argamassas como 10% e 15% de PET. A amostra de referência, apresentou uma variação intermediária quando em comparação às demais.

O comportamento progressivo quanto a variação da massa foi observado em outros estudos (BENOSMAN *et al.*, 2017; COPPOLA *et al.*, 2018; ABU-SALEEM *et al.*, 2021). Pode ser explicado pela saturação dos poros pela solução aquosa que, por sua vez propicia o sequestro dos íons sulfato após a penetração, proporcionando a ocorrência da corrosão, conforme indicam Abu-Saleem *et al.* (2021).

Benosman *et al.* (2017) afirmam que o aumento de massa também pode ser atribuído aos produtos recém-surgidos, derivados do processo corrosivo, como o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), a etringita ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) e taumasita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$), que passam a preencher os poros ao longo do período de exposição.

Coppola *et al.* (2018) afirmam que devido ao fato de as argamassas com incorporação de polímero apresentarem menor densidade, estas possuem poros maiores que favorecem a formação da etringita. Afirmam ainda que para ciclos de análise maiores do que os que foram adotados nesse estudo, o ganho de massa é acompanhado por uma perda gradual que indica a desintegração do material. Esse aspecto permite entender a perda de massa observada para a argamassa com 15% de PET, do traço 1:2:9, contudo, para uma avaliação mais satisfatória, seria necessário prolongar o tempo de execução do experimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que:

- O aumento de teor de PET em substituição parcial ao agregado miúdo reduziu a relação água/aglomerante em até 15%. Com isso, há ganhos na trabalhabilidade das argamassas em decorrência da maior disponibilidade de água livre. Quanto ao espalhamento, todas as argamassas atenderam satisfatoriamente às especificações instituídas pela NBR 13.276/2016;
- No estado fresco, a densidade de massa reduz linearmente, a medida em que se aumenta o percentual de PET, com diferenças de até 11,48% para substituição parcial do agregado miúdo. O teor de ar incorporado sofre elevações, contudo, tende a decrescer quando o percentual de substituição parcial ultrapassa 15%;
- As argamassas desenvolvidas nesse trabalho são enquadradas na classe D4 (1600 kg/m³ a 2000 kg/m³) quanto à densidade no estado fresco, e classe A (até 8%) quanto ao teor de ar incorporado, conforme a NBR 13.281/2005;
- No estado endurecido, também ocorre a diminuição de densidade em função do aumento do teor de PET na composição das argamassas, chegando a 15,81% para substituição parcial de 25%. A NBR 13.281/2005 classifica as argamassas estudadas na categoria M4 (1400 kg/m³ a 1800 kg/m³);
- Quanto à resistência à compressão simples, para o traço 1:2:9, houve um aumento tanto com a incorporação de PET quanto com a idade de cura, para as argamassas com teores de substituição parcial de 10%, 15%, 20% e 25% de PET, a partir dos 14 dias;
- Para o traço 1:1:6, aos 28 dias de cura, percebe-se que a argamassa sem adição de PET demonstrou melhor desempenho para esse parâmetro mecânico. Todavia, aos 56 dias de cura, todas as argamassas com substituição do agregado por PET mostraram maior resistência;
- Para ambos os traços a substituição parcial de 15% resultou na melhor RCS, aos 56 dias de cura. Os valores de resistência do traço 1:1:6 são

substancialmente superiores aos registrados para o traço 1:2:9. A partir da NBR 13.281/2005, as argamassas do traço 1:2:9 são enquadradas na classe P1, por apresentarem resistência $\leq 2,0$ MPa. Já as argamassas do traço 1:1:6, pertencem à classe P3, cuja resistência varia entre 1,5 MPa a 3,0 MPa, aos 28 dias de cura;

- De maneira análoga ao que foi observado para a RCS, na resistência à tração na flexão o traço 1:2:9 melhorou com o aumento do tempo de cura e com teor de PET incorporado. O mesmo comportamento se repete para o traço 1:1:6, contudo, a argamassa de referência apresentou melhor desempenho para este traço;
- Embora o traço 1:1:6 tenha apresentado melhor desempenho que o traço 1:2:9 para a resistência à tração na flexão, ambos são pertencem a classe R1 (resistência à tração na flexão inferior a 1,5 MPa), aos 28 dias de cura;
- A substituição do agregado por PET reduziu a absorção de água por capilaridade, possibilitando classificar as argamassas desenvolvidas como C1 ($\leq 1,5$ g/dm².min^{0,5}) e C2 (entre 1,0 e 2,5 g/dm².min^{0,5}), possibilitando aplicações das argamassas para finalidades gerais, inclusive a exposição à chuva;
- A substituição do agregado por PET reduziu a aderência à tração das argamassas do traço 1:1:6. Com base no desempenho no ensaio de aderência à tração, admite-se as argamassas com teores de PET de 10% e 15% de PET atende os requisitos para aplicação em revestimentos internos, isto é, pintura ou base de reboco. Já as argamassas com 20% e 25% de PET, não atenderam as exigências da NBR 13.749/2013;
- Evidenciou-se que as argamassas desenvolvidas não foram efetivas para o ataque de sulfato, sobretudo, devido à expansão registrada;
- Diante do comportamento mecânico das argamassas estudadas, recomenda-se o uso do traço 1:2:9 para assentamento, enquanto o traço 1:1:6 se mostra mais adequado para revestimento;
- Os resultados indicam um êxito parcial para o desempenho das argamassas incorporadas com PET. Entretanto, os benefícios propiciados, em especial à gestão de resíduos sólidos, não podem ser desconsiderados.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Ampliar o tempo de realização do ensaio durabilidade - ataque por sulfatos -, de modo a alcançar a perda de massa dos corpos de prova;
- Determinar o desempenho para isolamento térmico e acústico de argamassas com inserção de PET;
- Realizar estudos com PET pós-tratamento térmico, de modo a avaliar as propriedades físicas, químicas e mecânicas;
- Determinar a viabilidade econômica da inserção do resíduo do PET em produtos cimentícios

REFERÊNCIAS

ABED, Jasim M; A KHALEEL, Ban; ALDABAGH, Inas s; SOR, Nadhim Hamah. The effect of recycled plastic waste polyethylene terephthalate (PET) on characteristics of cement mortar. **Journal Of Physics: Conference Series**, [S.L.], v. 1973, n. 1, p. 012121, 1 ago. 2021.

ABU-SALEEM, Mahmoud; ZHUGE, Yan; HASSANLI, Reza; ELLIS, Mark; RAHMAN, Md Mizanur; LEVETT, Peter. Impact Resistance and Sodium Sulphate Attack Testing of Concrete Incorporating Mixed Types of Recycled Plastic Waste. **Sustainability**, [S.L.], v. 13, n. 17, p. 9521, 24 ago. 2021.

AGYEKUM, K. State-of-the-art review of current literature and development studies on recycled aggregate concrete. **Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering**, v. 11, n. 3, p. 121-134, 2018.

ALMESHAL, Ibrahim; TAYEH, Bassam A.; ALYOUSEF, Rayed; ALABDULJABBAR, Hisham; MOHAMED, Abdeliazim Mustafa; ALASKAR, Abdulaziz. Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: a review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 253, p. 119146, ago. 2020.

ALVAREZ, José; SEQUEIRA, Cristina; COSTA, Marta. Ensinaamentos a retirar do passado histórico das argamassas. In: **1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC**, Lisboa, 2005.

AOCHAROEN, Yanika; CHOTICKAI, Piya. Compressive Mechanical Properties of Cement Mortar Containing Recycled High-Density Polyethylene Aggregates: Stress–Strain Relationship. **Case Studies in Construction Materials**, p. e00752, 2021.

ASSIS, Marcos Wilson Vicente; SANTOS, Taidés Tavares. PROPRIEDADES QUÍMICAS, PROBLEMAS AMBIENTAIS E RECICLAGEM DE PLÁSTICO: UMA REVISÃO DE LITERATURA/Chemical properties, environmental problems and plastic recycling: a review. **Jornal Interdisciplinar de Biociências**, v. 5, n. 1, p. 31-37, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2016. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2016/>. Acesso em 15 jan.2020.

_____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2019. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2019/>. Acesso em 15 jan.2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.007/2004**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR NM 23/2001**: Cimento portland e outros materiais em pó -

Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 248/2003:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 13.278/2005:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 13.279/2005:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

_____. **NBR 13.280/2005:** Argamassa Para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 13.281/2005:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

_____. **NBR 15.259/2005:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2005c.

_____. **NBR NM 45/2006:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR 7.211/2009:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 52/2009:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 13.749/2013:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 15.575/2013:** Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 13.528/2019:** Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração - Parte 3: Aderência superficial. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **NBR 7.215/2019:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **NBR 13.583/2014:** Cimento Portland — Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **NBR 11.579/2012:** Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 7.175/2002:** Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

_____. **NBR 13.276/2016:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 13.479/2016:** Materiais compostos de uso aeroespacial. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET (ABIPET). **Indústria do PET no Brasil.** 2013. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/UserFiles/File/Site%201.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2020.

_____. **PET no Brasil.** 2021. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/UserFiles/File/Site%201.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASMT). **ASTM C 452:** Standard Test Method for Potential Expansion of Portland Cement Mortars Exposed to Sulfate, 2002.

BADACHE, Abdelhak; BENOSMAN, Ahmed Soufiane; SENHADJI, Yassine; MOULI, Mohamed. Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE). **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 163, p. 40-52, fev. 2018.

BAHIJ, Sifatullah; OMARY, Safiullah; FEUGEAS, Françoise; FAQIRI, Amanullah. Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste – A review. **Waste Management**, [S.L.], v. 113, p. 157-175, jul. 2020.

BANNACH, Gilbert; PERPÉTUO, Glauco Lini; CAVALHEIRO, Éder Tadeu Gomes; CAVALHEIRO, Carla Cristina Schmitt; ROCHA, Rafael Rodrigo. Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero PET: um experimento para ensino de análise térmica. **Química Nova**, v. 34, n. 10, p. 1825-1829, 2011.

BATISTA, Meysi; CARVALHO, Rafael Vieira; FAGUNDES, Pedro Henrique Pires. Análise de tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula**, v. 2, n. 2, p. 150-166, 2020.

BAUER, Elton et al. **Análise das argamassas de revestimento industrializadas e usadas), empregadas em obras do Distrito Federal, quanto aos requisitos e ao desempenho.** IX Congresso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras (CIMPAR), João Pessoa - PB, 2013.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**. Volume 1. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC. 2019.

BENOSMAN, A. S.; TAIBI, H.; SENHADJI, Y.; MOULI, M.; BELBACHIR, M.; BAHLOULI, M.I. Plastic waste particles in mortar composites: sulfate resistance and thermal coefficients. **Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology**, v. 33, n. 3, p. 171-202, 2017.

BEZERRA, I. M. T. **Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

BRASIL. **Lei nº 11.445 de 05 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 15 jan. 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 15 jan. 2020.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO – CBIC. **Banco de Dados**. 2018. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/home/>. Acesso em: 28 jan. 2020.

CAMPOS, Marina de Oliveira. **Estudo da resistência de aderência à tração e ao cisalhamento de revestimentos de argamassa em substratos de concreto**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

CANEVAROLO JÚNIOR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**. São Paulo: Artiber, 2002.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010.

CARASEK, Helena; JAPIASSÚ, Pammila; CASCUDO, Oswaldo; VELOSA, Ana. Bond between 19th Century lime mortars and glazed ceramic tiles. **Construction & Building Materials**, v. 59, p. 85-98, 2014.

CARASEK, Helena. Argamassas, **Livro Materiais de Construção**. 8 Ed. São Paulo: IBRACON, 2017.

CARVALHO, Gustavo B.; SOUSA, José Alexandrino. Comportamento mecânico de compósitos de pet reciclado/fibra de vidro/elastômeros olefínicos reativos. In:

Congresso Brasileiro de Polímeros, 10, 2009, **Anais do 10^a Congresso Brasileiro de Polímeros**, Foz do Iguaçu- PR: CBPol, 2009.

CHEN, Luyi; PELTON, Rylie EO; SMITH, Timothy M. Comparative life cycle assessment of fossil and bio-based polyethylene terephthalate (PET) bottles. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 667-676, 2016.

CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. A.; JOHN, V.M. Cal na construção civil. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2017.

CINTRA, C. L Dias. **Masonry mortar with termo-acoustic insulating properties based on vermiculite and recycled rubber aggregates from wasted tires**. 2013. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

CNP Reciclagem. **Um planeta melhor para você**. 2015. Disponível em: http://www.cnpreciclagem.com.br/index_arquivos/Page540.htm. Acesso em 02 de Fevereiro de 2019.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso Futuro Comum**. Rio de Janeiro: FGV, 1987.

COPPOLA, Bartolomeo; COURARD, Luc; MICHEL, Frédéric; INCARNATO, Loredana; SCARFATO, Paola; MAIO, Luciano di. Hygro-thermal and durability properties of a lightweight mortar made with foamed plastic waste aggregates. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 170, p. 200-206, maio 2018.

CÔRTEZ, Rogério Gomes; FRANÇA, Sérgio Luiz Braga; QUELHAS, Osvaldo Luiz Gonçalves; MOREIRA, Marcos Muniz; MEIRINO, Marcelo Jasmim. Contribuições para a sustentabilidade na construção civil. **Sistemas & Gestão**, v. 6, n. 3, p. 384-397, 2012.

CRUZ, Herbert Melo; VASCONCELOS, Luciano Silva; SANTOS, Rafaela Lima; SANTOS, Débora de Gois. Jogo didático “Construbusiness a cadeia produtiva da construção civil”. **Revista Docência do Ensino Superior**, v. 7, n. 2, p. 113-129, 2017.

DAMINELI, Bruno Luís; PILEGGI, Rafael Giuliano; JOHN, Vanderley Moacyr. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, p. 998-1024, 2017.

DONATO, Laryssa de Almeida; BARBOSA, Maria de Fátima Nóbrega; BARBOSA, Erivaldo Moreira. Reciclagem: o caminho para o desenvolvimento sustentável. **Polêmica**, v. 15, n. 2, p. 023-034, 2015.

ETRULO, Natália Molina; CETRULO, Tiago Balieiro; DIAS, Sylmara Lopes

Francelino Gonçalves; RAMOS, Tomás Barros. Solid waste indicators in local sustainability assessment: a literature review. **Ambiente & Sociedade**, [S.L.], v. 23, p. 1-33, 2020.

ESMAEILIAN, Behzad; WANG, Ben; LEWIS, Kemper; DUARTE, Fabio; RATTI, Carlo; BEHDAD, Sara. The future of waste management in smart and sustainable cities: a review and concept paper. **Waste Management**, [S.L.], v. 81, p. 177-195, nov. 2018.

FARIAS FILHO, João. Estudo da durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos da construção e granito. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, 2007.

FEITOSA, Anny Kariny; BARDEN, Júlia Elisabete; KONRAD, Odorico. Análise gravimétrica na gestão de resíduos sólidos urbanos: uma revisão sistemática. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamago**, [s.l.], v. 12, n. 1, p.131-146, 20 jul. 2018. Essentia Editora. <http://dx.doi.org/10.19180/2177-4560.v12n12018p131-146>.

FIORITO, Antônio J. S. I. **Manual de Revestimentos de Argamassa Manual de Revestimentos**. 2 Ed. São Paulo: Pini, 2010.

FORTI, Eduardo Zambiasi. **Influência da cal hidratada nas características da argamassa de revestimento realizada em obra**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2017.

FREITAS, Ingrid Zanuto; SANTOS, Ana Paula; BRANDALISE, Loreni Teresinha; BERTOLINI, Geysler Rogis Flor. Os sacos plásticos na perspectiva da sustentabilidade: uma revisão sistemática. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade (ISSN 2318-3233)**, v. 10, n. 3, p. 182-203, 2020.

GARCIA, Adson de Sousa; CAMARGO, Luís Faruk Entringer de; SILVA, Bárbara Cristina Soares; SOUZA, Grazielle Tigre de. Avaliação das propriedades no estado fresco de argamassas produzidas com resíduos de polipropileno (PP). **Technology Sciences**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 66-72, 7 jan. 2020.

GASPERIN, Josiane. **Aderência de revestimentos de argamassa em substrato de concreto**: influência da forma de aplicação e composição do chapisco. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

GE, Zhi; SUN, Renjuan; Zhang, Kun; GAO, Zhili; LI, Pengcheng. Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 81-86, 2013.

GE, Zhi; HUANG, Dawei; SUN, Renjuan; GAO, Zhili. Properties of plastic mortar made with recycled polyethylene terephthalate. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 682-687, 2014.

GEYER, Björn; LORENZ, Günter; KANDELBAUER, Andreas. Recycling of poly (ethylene terephthalate)-A review focusing on chemical methods. **Express Polymer Letters**, v. 10, n. 7, 2016.

GOMES, Thiago S.; VISCONTE, Leila LY; PACHECO, Elen BAV. Life cycle assessment of polyethylene terephthalate packaging: an overview. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 27, n. 3, p. 533-548, 2019.

GOMEZ, W.; PRATA, D.; RAMOS, J.; MORALES, M.; OSORIO, S.; RODRÍGUEZ, J.; ARRAZOLA, A.; MEZA, E. Análise de misturas de degradação térmica de tereftalato de polietileno reciclado (R-PET/PET) de frascos de bebidas carbonadas de consumo popular na cidade de Cartagena. **Jornal Colombiano de Materiais**, [S. l.], n. 5 p. 93–99, 2014.

GONÇALVES, Andriani Tavares Tenório; MORAES, Flávia Tuane Ferreira; MARQUES, Guilherme Lima; LIMA, Josiane Palma; LIMA, Renato da Silva. Urban solid waste challenges in the BRICS countries: a systematic literature review. **Revista Ambiente & Água**, v. 13, n. 2, 2018.

GUIMARÃES, J. E. P. **Fundamentos e Aplicações em Engenharia Civil**. 2ª Ed. São Paulo: editora PINI, 2002.

HEMAIS, Carlos A. Polímeros e a indústria automobilística. **Polímeros**, v. 13, n. 2, p. 107-114, 2003.

INOUE, Cristina A. Y.; RIBEIRO, Thais Maria Machado Lemos. Padrões sustentáveis de produção e consumo: resíduos sólidos e os desafios de governança do global ao local. **Meridiano 47 - Journal Of Global Studies**, [s.l.], v. 17, p.1-9, 29 mar. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico**. 2000. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=7308>. Acesso em: 07 jan. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico**. 1980. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo.html?view=detalhes&id=7310>. Acesso em: 07 jan. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico**. 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>. Acesso em: 07 jan. 2020.

ISAIA, Geraldo C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3 Ed. São Paulo: IBRACON, 2017.

JUCÁ, P.H.O. **Estudo das propriedades mecânicas em diferentes temperaturas do PET e ensaios de arrancamento com tratamento em matriz**

cimentícia a base de cimento Portland. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.

KANG, DongHo; AURAS, Rafael; SINGH, Jay. Life cycle assessment of non-alcoholicsingle-serve polyethylene terephthalate beverage bottles in the state ofCalifornia. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 116, p. 45-52, 2017.

KHOONKARI, Mohammad; HAGHIGHI, Amir Hossein; SEFIDBAKHT, Yahya; SHEKOOHI, Khadijeh; GHADERIAN, Abolfazl. Chemical recycling of PET wastes withdifferent catalysts. **International Journal of Polymer Science**, v. 2015, 2015.

KOCOT, Agnieszka; ĆWIRZEŃ, Andrzej; PONIKIEWSKI, Tomasz; KATZER, Jacek. Strength Characteristics of Alkali-Activated Slag Mortars with the Addition of PET Flakes. **Materials**, [S.L.], v. 14, n. 21, p. 6274, 21 out. 2021.

KOSCHEVIC, Marivane Turim; BITTENCOURT, Paulo Rodrigo Stival. Meio ambiente e materiais poliméricos: Breves considerações com ênfase ao Politereftalato de Etileno (PET) e processos de degradação. **Revista Eletrônica Científica Inovação eTecnologia**, n. 14, v. 2, p. 60-80, 2016.

KOSHTI, Rupali; MEHTA, Linchon; SAMARTH, Nikesh. Biological recycling of polyethylene terephthalate: A mini-review. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 26, n. 8, p. 3520-3529, 2018.

LARA, Luiz Alcides Mesquita. **Materiais de construção.** Ouro Preto: IFMG, 2013.

LATROCH, Noureddine; BENOSMAN, Ahmed Soufiane; BOUHAMOU, Nasr-Eddine; SENHADJI, Yassine; MOULI, Mohamed. Physico-mechanical and thermal properties of composite mortars containing lightweight aggregates of expanded polyvinyl chloride. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 175, p. 77-87, jun. 2018.

LEAL, Ailton Pires. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: uma revisão sobre as possibilidades de aplicação. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S.L.], v. 7, n. 6, p. 459-483, 30 jun. 2021.

LIMA, Gustavo Ferreira da Costa. Consumo e resíduos sólidos no Brasil: as contribuições da educação ambiental. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n. 37, p. 47-57, 2015.

LOMASSO, Alexandre Lourenço; SANTOS, Bruno Rodrigo; ANJOS, Fabiana Alves da Silva; ANDRADE, Juliana Cristina; SILVA, Lucimar Aparecida; SANTOS, Quintiliana Rodrigues; CARVALHO, Ana Cristina Marques. Benefícios e desafios na implementação da reciclagem: um estudo de caso no centro mineiro de referência emresíduos (CMRR). **Revista Pensar Gestão e Administração**, v. 3, n. 2, p. 1-20, 2015.

LOPES, Herbert Medeiros Torres. **Aplicação do conceito de empacotamento de**

partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

LOURENCI, Sidnei. **Caracterização de argamassas de revestimento fabricadas com materiais alternativos.** 2003. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2003.

MAGA, Daniel; HIEBEL, Markus; ARYAN, Venkat. A Comparative Life Cycle Assessment of Meat Trays Made of Various Packaging Materials. **Sustainability**, v. 11, n. 19, p. 5324, 2019.

MANRICH, Silvio. **Processamento de Termoplásticos:** rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

MARGALHA, Maria Goreti. **Argamassas.** Évora: 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1ª Ed. -São Paulo: IBRACON, 2008.

MEKHZOUM, El Mehdi; BENZEID, Hanane; RODRIGUE, Denis; QAISS, Abou El Kacem; BOUHFIDA, Rachid. Recent advances in polymer recycling: a short review. **Current Organic Synthesis**, v. 14, n. 2, p. 171-185, 2017.

MONTEIRO, José Penido Henrique; ZVEIBIL, Victor Zular. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos.** Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** Porto Alegre: Bookman, 2016.

NOGUEIRA, Luciana Íris Amaro; MARTINS, Islane Cristina; SILVA, Georgia Rolim da. A gestão de resíduos sólidos urbanos e o desenvolvimento sustentável: uma revisão. **Environmental Scientiae**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 48-57, 11 jan. 2020.

OLIVEIRA, Luiz A. Pereira; GOMES, João P. CASTRO. Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1712-1717, 2011.

OLIVEIRA, M. Rosário; GARCIA, Maria da Luz; CASTRO, Ana C. Meira; SILVA, Teresa Neto. Mortar with pet—Preliminary results. **Energy Reports**, [S.L.], v. 6, p. 800-803, fev. 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Population Data.** 2020. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>. Acesso em: 20 dez. 2020.

PARK, Sang Ho; KIM, Seong Hun. Poly (ethylene terephthalate) recycling for high value added textiles. **Fashion and Textiles**, v. 1, n. 1, p. 1-17, 2014.

PASSATORE, Cláudio Roberto. **Química dos Polímeros**. São Paulo: Centro Paula Souza, 2013

PEREIRA, Rita de Cássia Campos; MACHADO, Andréa Horta; SILVA, Glaura Goulart.(Re) Conhecendo o PET. **Química & Sociedade**, n 5, 2002, p. 3-5.

PIATTI, Tânia Maria; RODRIGUES, Reinaldo Augusto Ferreira. **Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais**. Maceió: EDUFAL, 2005.

PINTO, Nayra Alberici; FIORITI, Cesar Fabiano. Avaliação de argamassas mistas de revestimento produzidas com borracha de pneus. **Tecno-Lógica**, v. 20, n. 2, p. 103-110, 2016.

PITT, Fernando Darci; BOING, Denis; BARROS, António André Chivanga. Desenvolvimento histórico, científico e tecnológico de polímeros sintéticos e de fontes renováveis. **Revista da UNIFEBE**, v. 1, n. 09, 2011.

PRATA, Joana C.; SILVA, Ana L. Patrício; COSTA, João P.; MOUNEYRAC, Catherine; Walker, Tony R.; DUARTE, Armando C.; ROCHA-SANTOS, Teresa. Solutions and integrated strategies for the control and mitigation of plastic and microplastic pollution. **International journal of environmental research and public health**, v. 16, n. 13, p. 2411, 2019.

PCZIECZEK, Adriane. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinzas volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville/SC, 2017.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2006.

RAGAERT, Kim; DELVA, Laurens; VAN GEEM, Kevin. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. **Waste Management**, v. 69, p. 24-58, 2017.

RAHEEM, Ademola Bolanle; NOOR, Zainura Zainon; HASSAN, Azman; HAMID, MohdKamaruddin Abd; SAMSUDIN, Sani Amril; SABEEN, Ali Hussein. Current developments in chemical recycling of post-consumer polyethylene terephthalate wastes for new materials production: a review. **Journal of Cleaner Production**, 2019.

RAITU, Catalin; ANDERSON, Beverlee B.; SFAKIANAKI, Eleni. Resource-efficient construction: Rethinking construction towards sustainability. **World Journal of Science, Technology and Sustainable Development**, 2015.

RATHORE, Rituraj Singh; CHOUHAN, Harshwardhan Singh; PRAKASH, Divya. Influence of plastic waste on the performance of mortar and concrete: a

review. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 47, p. 4708-4711, 2021.

RAVINDRANATH, K.; MASHELKAR, R. A. Polyethylene terephthalate—I. Chemistry, thermodynamics and transport properties. **Chemical Engineering Science**, v. 41, n. 9, p. 2197-2214, 1986.

REIS, J. M. L.; CHIANELLI-JUNIOR, R.; CARDOSO, J. L.; MARINHO, F. J. V. Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2799-2804, 2011.

REIS, J. M. L.; CARNEIRO, E. P. Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 107-111, 2012.

RECENA, Fernando Antônio Piazza. **Conhecendo Argamassa**. 1 Ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2011.

RECENA, Fernando Antônio Piazza. **Conhecendo Argamassa**. 2 Ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2012.

REZENDE, Maria Luiza de Souza. **Resíduo de caulim primário como material pozolânico em concreto seco: propriedades físico-mecânicas e durabilidade**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

ROMÃO, Wanderson; SPINACÉ, Márcia AS; PAOLI, Marco-A. De. Poli (tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros**, v. 19, n. 2, p. 121-132, 2009.

RUDIN, Alfred; CHOI, Phillip. **Ciência e engenharia de polímeros**. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2016.

SANTIAGO, Cybèle Celestino. **Argamassas tradicionais de cal**. Salvador: EDUFBA, 2007.

SANTOS, João Almeida; GALDINO, Clóvis Luiz; AKABANE, Getúlio Kazue; SANTOS, Eduardo Biagi Almeida. Matéria-prima gerada da reciclagem de garrafas pet e seus produtos derivados. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, v. 5, n. 2, p. 03-13, 2015.

SANTOS, White José; ALVARENGA, Rita de Cassia Silva Sant'Ana; PEDROTI, Leonardo Gonçalves; SILVA, Reginado Carneiro; FREIRE, Antonio Serpa; MORAES, Bruna Antunes; CARVALHO, Clara Cordeiro. Proposta de método de dosagem para argamassas de revestimento com areia artificial de britagem. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 225-243, 2018.

SCHEIRS, John; GARDETTE, Jean-Luc. Photo-oxidation and photolysis of poly (ethylene naphthalate). **Polymer degradation and stability**, v. 56, n. 3, p. 339-350, 1997.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006. Dissertação (Mestrado em construção civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SILVA, Alexandra M.; BRITO, Jorge; VEIGA, Rosário. Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 226-236, 2014.

SILVA, Manoel Mariano Neto; CARVALHO, Carla Caroline Alves; LIMA, Daniela de Freitas; ALVES, Larissa da Silva Ferreira. Analysis of solid waste management in the Northeast region of Brazil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 1, p. 130911796, 2020.

ŞİMŞEK, Barış; UYGUNOĞLU, Tayfun. Thermal, electrical, mechanical and fluidity properties of polyester-reinforced concrete composites. **Sādhanā**, v. 43, n. 4, p. 57, 2018.

SINGH, R.K.; RUJ, B.; SADHUKHAN, A.K.; GUPTA, P.. A TG-FTIR investigation on the co-pyrolysis of the waste HDPE, PP, PS and PET under high heating conditions. **Journal Of The Energy Institute**, [S.L.], v. 93, n. 3, p. 1020-1035, jun. 2020.

SOARES, A. P. D. S.; MARMORE, I. A. P. **Estudo comparativo do desempenho térmico da argamassa convencional e com adição de vermiculita**. Brasília: UCB, 2016.

SOUZA, J., K., D. **Síntese de catalisadores utilizando garrafa PET para a produção de biodiesel**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2012.

SPÓSITO, Felipe A.; HIGUTI, Ricardo T.; TASHIMA, Mauro M.; AKASAKI, Jorge L.; MELGES, José Luiz P.; ASSUNÇÃO, Camila C.; BORTOLETTO, Marcelo; SILVA, Rodrigo G.; FIORITI, Cesar F.. Incorporation of PET wastes in rendering mortars based on Portland cement/hydrated lime. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 32, p. 101506, nov. 2020.

STONE, Catherine; WINDSOR, Fredric M.; MUNDAY, Max; DURANCE Isabelle. Natural or synthetic—how global trends in textile usage threaten freshwater environments. **Science of The Total Environment**, p. 134689, 2019.

TANI, Nabil Kazi; BENOSMAN, A.s.; SENHADJI, Y.; TAÏBI, H.; MOULI, M.; BELBACHIR, M.. Prediction models of mechanical properties for pet-mortar composite in sodium sulphate aggressive mediums. **Matec Web Of Conferences**, [S.L.], v. 149, p. 01051, 2018.

THIAM, Moussa; FALL, Mamadou. Mechanical, physical and microstructural properties of a mortar with melted plastic waste binder. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 302, p. 124190, out. 2021.

TROMBINI, R. C.; AGNELLI, J. A. M.; TAFURI, R. M. Comportamento Mecânico do PET, do PEN e das blendas poliméricas PET/PEN. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 14, 2000. **Anais**. São Paulo: 2000.

VAZ, Camila Escaramusa. **Avaliação de desempenho de argamassa modificada**: com areia de pet. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

VEIGA, M. R. **Comportamento de argamassas de revestimento de paredes** - contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1997

VIDALES, Juana María Miranda; HERNÁNDEZ, Lilia Narváez; LÓPEZ, Jesus Ivan Tapia; FLORES, Esperanza Elizabeth Martínez; HERNÁNDEZ, Luis Salvador. Polymer mortars prepared using a polymeric resin and particles obtained from waste pet bottle. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 376-383, 2014.

VIEIRA, Bianca Alencar; NOGUEIRA, Lauro. Construção civil: crescimento versus custos de produção civil. **Sistemas & Gestão**, v. 13, n. 3, p. 366-377, 2018.

WORKING TOGETHER FOR A WORLD WITHOUT WASTE. **Business Plan**: 2011 –2015. Disponível em:
https://www.sustainabilityexchange.ac.uk/files/bus_plan_2011_final_web_2.pdf.
Acesso em: 20 fev. 2020.

XARGAY, H.; RIPANI, M.; CAGGIANO, A.; FOLINO, P.; MARTINELLI, E. Uso de materiais reciclados em compostos cimentícios. **Tecnura**, v. 23, n. 60, p. 38-51, abr1 2019.

APÊNDICES

APÊNDICE A: Mesa de consistência para as argamassas estudadas com diferentes teores de PET.

Traço	% de PET	Relação a/aglo.	Diâmetro (mm)			Dmédio (mm)
			D1	D2	D3	
1:2:9	0%	1,58	250	253	257	253
	5%	1,55	256	250	255	254
	10%	1,55	252	253	254	253
	15%	1,54	257	257	259	255
	20%	1,52	253	251	252	252
	25%	1,50	253	252	251	252
1:1:6	0%	1,48	255	252	258	255
	5%	1,40	267	265	262	265
	10%	1,30	256	258	253	256
	15%	1,25	254	254	255	254
	20%	1,35	255	252	252	253
	25%	1,38	251	252	253	252

APÊNDICE B: Densidade de massa aparente (kg/m³) para Traço 1:2:9

% de PET	Cura	CP	D1 (cm)	D2 (cm)	h (cm)	m (g)	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Densidade de massa aparente média (kg/m ³)
0%	7 dias	1	5,50	5,50	9,95	415,8	1.759	1.753
		2	5,50	5,50	10,00	420,5	1.770	
		3	5,50	5,50	10,00	410,7	1.729	
	14 dias	4	5,55	5,50	9,90	419,2	1.766	1.749
		5	5,00	5,00	9,85	336,9	1.742	
		6	5,30	5,20	10,00	376,5	1.739	
	28 dias	7	5,00	5,00	9,80	336,0	1.746	1.744
		8	4,95	5,00	9,90	336,3	1.747	
		9	5,00	5,00	9,90	338,1	1.739	
	56 dias	10	5,06	5,01	9,91	346,2	1.754	1.748
		11	5,20	5,25	9,95	368,6	1.728	
		12	5,20	5,15	9,90	367,2	1.763	
5%	7 dias	1	5,40	5,35	10,20	391,4	1.691	1.701
		2	5,20	5,15	10,05	364,5	1.724	
		3	5,55	5,50	10,00	404,9	1.689	
	14 dias	4	5,54	5,58	10,00	398,3	1.640	1.644
		5	5,52	5,52	10,00	392,0	1.638	
		6	5,56	5,56	10,00	401,5	1.654	
	28 dias	7	5,51	5,51	10,00	397,9	1.669	1.670
		8	5,20	5,20	10,00	345,9	1.629	
		9	5,14	5,16	10,00	356,8	1.713	
	56 dias	10	5,50	5,50	10,10	394,5	1.644	1.649
		11	5,45	5,50	10,10	390,5	1.642	
		12	5,27	5,17	10,05	357,1	1.660	
10%	7 dias	1	5,12	5,14	10,00	341,2	1.651	1.618
		2	5,48	5,48	10,08	380,9	1.602	
		3	5,56	5,54	9,90	383,3	1.600	
	14 dias	4	5,56	5,56	10,00	400,0	1.647	1.671
		5	5,38	5,38	10,00	385,8	1.697	
		6	5,18	5,18	10,00	351,9	1.670	
	28 dias	7	5,54	5,52	10,02	393,7	1.636	1.630
		8	5,24	5,24	9,98	344,5	1.601	
		9	5,00	5,00	10,00	324,5	1.653	
	56 dias	10	5,55	5,50	10,10	393,1	1.623	1.633
		11	5,30	5,30	9,90	357,2	1.636	
		12	5,30	5,35	10,10	369,0	1.640	
15%	7 dias	1	5,50	5,50	9,95	373,9	1.582	1.580
		2	5,50	5,50	10,05	377,2	1.580	
		3	5,50	5,50	10,05	376,8	1.578	
	14 dias	4	5,35	5,40	10,15	359,6	1.561	1.569
		5	5,20	5,25	10,20	343,7	1.572	
		6	5,15	5,20	9,95	329,5	1.574	
	28 dias	7	5,25	5,15	9,85	328,4	1.570	1.576
		8	4,95	4,95	10,00	307,1	1.596	
		9	5,30	5,20	9,90	334,8	1.562	
	56 dias	10	5,32	5,30	9,93	342,8	1.559	1.559
		11	5,20	5,30	9,90	334,2	1.559	
		12	5,26	5,30	9,92	338,47	1.559	
20%	7 dias	1	5,50	5,50	9,80	361,0	1.551	1.550
		2	5,45	5,50	9,90	365,1	1.566	
		3	5,30	5,30	9,90	334,9	1.533	
	14 dias	4	5,50	5,50	9,90	362,0	1.539	1.529
		5	5,40	5,35	10,10	346,7	1.513	

		6	5,20	5,20	10,10	329,2	1.535	
		7	5,15	5,25	9,95	322,8	1.528	
	28 dias	8	5,20	5,30	9,90	327,4	1.528	1.524
		9	5,20	5,30	10,00	328,5	1.517	
		10	5,21	5,22	10,00	319,6	1.496	
	56 dias	11	5,50	5,50	10,10	363,6	1.515	1.510
		12	5,15	5,21	9,81	313,8	1.518	
		1	5,50	5,50	9,90	349,5	1.486	
	7 dias	2	5,20	5,20	9,85	312,1	1.492	1.481
		3	5,35	5,15	10,15	321,7	1.464	
		4	5,50	5,50	10,00	349,3	1.470	
	14 dias	5	5,30	5,20	9,90	317,3	1.481	1.475
		6	5,30	5,30	9,90	322,2	1.475	
25%		7	5,50	5,50	9,90	347,5	1.477	
	28 dias	8	5,40	5,35	10,15	332,6	1.444	1.462
		9	5,50	5,50	10,05	349,9	1.466	
		10	5,30	5,30	10,00	319,4	1.448	
	56 dias	11	5,50	5,50	10,00	343,3	1.445	1.442
		12	5,50	5,45	10,06	339,4	1.433	

APÊNDICE C: Densidade de massa aparente (kg/m³) para Traço 1:1:6

% de PET	Cura	CP	D1 (cm)	D2 (cm)	h (cm)	m (g)	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Densidade de massa aparente média (kg/m ³)
0%	7 dias	1	5,15	5,20	10,00	367,4	1.747	1.752
		2	5,50	5,50	10,00	418,9	1.763	
		3	5,50	5,50	9,95	412,6	1.746	
	14 dias	4	5,30	5,35	9,90	386,9	1.755	1.752
		5	5,50	5,50	9,90	412,5	1.754	
		6	5,30	5,15	9,95	373,1	1.749	
	28 dias	7	5,00	4,95	10,10	346,0	1.762	1.752
		8	5,00	4,95	9,95	338,1	1.748	
		9	5,00	4,95	10,10	342,7	1.745	
	56 dias	10	5,50	5,50	10,10	415,9	1.733	1.753
		11	5,52	5,52	10,18	428,8	1.760	
		12	5,16	5,16	10,10	372,8	1.765	
5%	7 dias	1	5,00	5,00	9,90	331,2	1.704	1.718
		2	4,95	5,00	9,80	328,6	1.725	
		3	4,90	5,05	9,75	327,0	1.725	
	14 dias	4	5,00	4,95	9,90	333,1	1.731	1.735
		5	4,95	4,95	9,80	329,8	1.749	
		6	5,00	5,00	9,80	332,3	1.727	
	28 dias	7	5,14	5,14	10,00	370,8	1.787	1.731
		8	5,21	5,24	10,00	359,5	1.676	
		9	5,22	5,22	10,00	369,9	1.728	
	56 dias	10	5,52	5,52	9,98	407,9	1.708	1.688
		11	5,52	5,52	9,98	398,4	1.668	
		12	5,52	5,52	9,98	403,2	1.688	
10%	7 dias	1	5,50	5,50	9,95	399,6	1.690	1.685
		2	5,50	5,50	9,95	395,3	1.672	
		3	5,25	5,20	9,85	357,5	1.693	
	14 dias	4	5,50	5,50	9,90	396,0	1.684	1.684
		5	5,05	5,05	9,85	332,3	1.684	
		6	5,25	5,25	9,80	357,6	1.686	
	28 dias	7	5,50	5,50	11,00	396,9	1.519	1.683
		8	5,32	5,32	11,00	376,1	1.538	
		9	5,41	5,41	11,00	386,5	1.529	
	56 dias	10	5,20	5,10	10,05	355,4	1.698	1.685
		11	5,30	5,20	10,10	362,8	1.659	
		12	5,50	5,50	10,00	403,7	1.699	
15%	7 dias	1	5,20	5,30	10,00	347,9	1.607	1.618
		2	5,20	5,30	9,90	348,4	1.626	
		3	5,50	5,50	10,00	385,6	1.623	
	14 dias	4	5,55	5,55	9,90	388,4	1.622	1.611
		5	5,50	5,50	10,00	383,3	1.613	
		6	5,20	5,25	9,90	339,1	1.598	
	28 dias	7	5,20	5,25	9,80	338,7	1.612	1.607
		8	5,30	5,30	9,90	349,3	1.599	
		9	5,35	5,30	9,90	355,1	1.611	
	56 dias	10	5,02	5,01	10,20	319,2	1.584	1.589
		11	5,20	5,15	10,00	335,1	1.593	
		12	5,11	5,08	10,10	327,2	1.589	
20%	7 dias	1	5,55	5,55	10,00	376,6	1.556	1.553
		2	5,30	5,20	9,95	334,3	1.552	
		3	5,20	5,20	10,10	332,4	1.550	
	14 dias	4	5,15	5,20	10,00	323,1	1.536	1.539
		5	5,20	5,20	9,95	325,0	1.538	

		6	5,25	5,20	9,90	327,6	1.543	
		7	5,50	5,50	9,95	360,7	1.526	
	28 dias	8	5,50	5,50	10,05	366,8	1.536	1.534
		9	5,50	5,50	9,95	363,8	1.539	
		10	5,55	5,50	10,05	365,7	1.518	
	56 dias	11	5,30	5,30	10,05	338,0	1.524	1.514
		12	5,00	5,00	10,00	294,5	1.500	
		1	5,50	5,50	10,00	351,4	1.479	
	7 dias	2	5,50	5,50	9,90	353,1	1.501	1.497
		3	5,25	5,25	9,90	323,8	1.511	
		4	5,50	5,50	9,90	356,2	1.514	
	14 dias	5	5,15	5,30	10,00	319,8	1.492	1.497
		6	5,20	5,20	9,90	311,9	1.484	
25%		7	5,20	5,25	9,90	313,1	1.475	
	28 dias	8	5,35	5,35	10,05	335,3	1.484	1.476
		9	5,25	5,25	9,95	316,5	1.469	
		10	5,20	5,15	9,85	307,9	1.486	
	56 dias	11	5,30	5,30	9,92	323,3	1.477	1.476
		12	5,25	5,25	9,95	315,2	1.463	

APÊNDICE D: Absorção por capilaridade para Traço 1:2:9.

% de PET	min ^{0,5}	Cura	
		28 dias	56 dias
0%	0,00	0,00	0,00
	2,24	0,01	0,03
	3,16	0,02	0,04
	3,87	0,03	0,05
	4,47	0,03	0,06
	5,00	0,04	0,07
	5,48	0,04	0,08
	7,07	0,06	0,11
	8,37	0,08	0,14
	9,49	0,09	0,16
	10,95	0,11	0,20
	12,25	0,13	0,23
	13,42	0,15	0,26
5%	0,00	0,00	0,00
	2,24	0,01	0,01
	3,16	0,01	0,01
	3,87	0,01	0,01
	4,47	0,01	0,01
	5,00	0,01	0,02
	5,48	0,01	0,02
	7,07	0,02	0,03
	8,37	0,02	0,04
	9,49	0,02	0,05
	10,95	0,03	0,06
	12,25	0,03	0,08
	13,42	0,04	0,10
10%	0,00	0,00	0,00
	2,24	0,03	0,01
	3,16	0,03	0,02
	3,87	0,04	0,02
	4,47	0,04	0,02
	5,00	0,05	0,03
	5,48	0,05	0,03
	7,07	0,07	0,04
	8,37	0,09	0,05
	9,49	0,12	0,06
	10,95	0,14	0,06
	12,25	0,16	0,09
	13,42	0,19	0,10
15%	0,00	0,00	0,00
	2,24	0,01	0,01
	3,16	0,01	0,01
	3,87	0,01	0,01
	4,47	0,01	0,01
	5,00	0,01	0,01
	5,48	0,01	0,02
	7,07	0,02	0,03
	8,37	0,03	0,04
	9,49	0,03	0,04
	10,95	0,04	0,05
	12,25	0,04	0,06
	13,42	0,05	0,07
20%	0,00	0,00	0,00
	2,24	0,01	0,02
	3,16	0,01	0,02

	3,87	0,02	0,02
	4,47	0,02	0,03
	5,00	0,02	0,03
	5,48	0,02	0,04
	7,07	0,04	0,06
	8,37	0,05	0,07
	9,49	0,07	0,09
	10,95	0,08	0,10
	12,25	0,11	0,12
	13,42	0,12	0,14
	0,00	0,00	0,00
	2,24	0,01	0,02
	3,16	0,01	0,03
	3,87	0,01	0,03
	4,47	0,01	0,03
	5,00	0,01	0,04
25%	5,48	0,01	0,04
	7,07	0,01	0,05
	8,37	0,02	0,07
	9,49	0,03	0,07
	10,95	0,04	0,09
	12,25	0,05	0,10
	13,42	0,05	0,12

APÊNDICE E: Absorção por capilaridade para Traço 1:1:6.

% de PET	min ^{0,5}	Cura	
		28 dias	56 dias
0%	0,00	0,00	0,00
	2,24	0,01	0,03
	3,16	0,01	0,04
	3,87	0,02	0,05
	4,47	0,02	0,06
	5,00	0,02	0,07
	5,48	0,02	0,08
	7,07	0,04	0,12
	8,37	0,05	0,16
	9,49	0,06	0,20
	10,95	0,07	0,24
	12,25	0,08	0,29
	13,42	0,09	0,32
5%	0,00	0,00	0,00
	2,24	0,00	0,00
	3,16	0,01	0,00
	3,87	0,01	0,01
	4,47	0,01	0,01
	5,00	0,01	0,01
	5,48	0,01	0,01
	7,07	0,02	0,01
	8,37	0,03	0,02
	9,49	0,03	0,02
	10,95	0,04	0,03
	12,25	0,05	0,03
	13,42	0,05	0,04
10%	0,00	0,00	0,00
	2,24	0,00	0,02
	3,16	0,00	0,03
	3,87	0,01	0,04
	4,47	0,01	0,04
	5,00	0,01	0,05
	5,48	0,01	0,05
	7,07	0,02	0,08
	8,37	0,02	0,09
	9,49	0,03	0,11
	10,95	0,03	0,13
	12,25	0,04	0,15
	13,42	0,04	0,17
15%	0,00	0,00	0,00
	2,24	0,01	0,01
	3,16	0,00	0,01
	3,87	0,02	0,01
	4,47	0,01	0,01
	5,00	0,02	0,02
	5,48	0,02	0,02
	7,07	0,03	0,03
	8,37	0,05	0,03
	9,49	0,06	0,04
	10,95	0,08	0,04
	12,25	0,09	0,05
	13,42	0,10	0,05
20%	0,00	0,00	0,00
	2,24	0,01	0,01
	3,16	0,01	0,01

	3,87	0,01	0,01
	4,47	0,01	0,01
	5,00	0,02	0,01
	5,48	0,02	0,02
	7,07	0,02	0,02
	8,37	0,03	0,03
	9,49	0,04	0,03
	10,95	0,05	0,03
	12,25	0,05	0,04
	13,42	0,06	0,04
	0,00	0,00	0,00
	2,24	0,01	0,01
	3,16	0,01	0,01
	3,87	0,01	0,01
	4,47	0,01	0,01
	5,00	0,02	0,01
25%	5,48	0,02	0,02
	7,07	0,02	0,02
	8,37	0,03	0,03
	9,49	0,04	0,03
	10,95	0,04	0,04
	12,25	0,05	0,04
	13,42	0,05	0,05

APÊNDICE F: Resistência à compressão simples (MPa) - Traço 1:1:6.

% de PET	Cura	CP	Res. à compressão (MPa)	Res. à compressão média (MPa)	Desvio Relativo	Nova Res. à compressão média (MPa)
0%	7 dias	1	0,8	0,8	4,0	0,8
		2	0,9		8,0	
		3	0,8		4,0	
	14 dias	4	0,9	0,8	6,0	0,8
		5	0,7		11,9	
		6	0,9		6,0	
	28 dias	7	1,1	1,0	6,0	1,0
		8	0,9		6,0	
		9	1,0		0,0	
	56 dias	10	1,4	1,3	0,7	1,3
		11	1,3		0,7	
		12	1,3		0,0	
5%	7 dias	1	0,6	0,5	7,7	0,5
		2	0,5		5,8	
		3	0,5		1,9	
	14 dias	4	0,3	0,3	10,5	0,2
		5	0,2		5,3	
		6	0,2		5,3	
	28 dias	7	0,9	1,0	4,9	1,0
		8	1,0		1,4	
		9	1,0		3,5	
	56 dias	10	1,1	1,1	5,9	1,1
		11	1,1		2,2	
		12	1,0		8,0	
10%	7 dias	1	0,6	0,6	6,5	0,5
		2	0,5		5,9	
		3	0,6		0,6	
	14 dias	4	0,8	0,8	3,3	0,9
		5	0,9		5,7	
		6	0,7		9,0	
	28 dias	7	1,0	1,0	3,8	1,0
		8	1,1		1,0	
		9	1,1		2,9	
	56 dias	10	1,4	1,6	12,1	1,7
		11	1,7		6,0	
		12	1,7		6,0	
15%	7 dias	1	0,8	0,7	5,1	0,8
		2	0,6		10,3	
		3	0,8		5,1	
	14 dias	4	1,0	1,0	3,9	1,0
		5	1,0		2,9	
		6	1,1		6,8	
	28 dias	7	0,9	1,0	10,2	1,1
		8	1,1		5,1	
		9	1,1		5,1	
	56 dias	10	1,5	1,5	3,2	1,5
		11	1,4		4,4	
		12	1,5		1,1	
20%	7 dias	1	0,8	0,8	2,2	0,8
		2	0,9		5,7	
		3	0,7		8,0	
	14 dias	4	0,8	0,9	5,7	0,8
		5	0,8		5,7	
		6	1,0		11,4	

28 dias	7	1,2		5,9	1,2
	8	1,2	1,1	5,9	
	9	1,0		11,8	
56 dias	10	1,6		3,2	1,6
	11	1,4	1,6	9,0	
	12	1,6		5,8	
7 dias	1	0,8		7,6	0,7
	2	0,7	0,7	1,8	
	3	0,7		5,8	
14 dias	4	0,9		4,7	0,9
	5	0,8	0,9	5,8	
	6	0,9		1,2	
28 dias	7	1,4		0,9	1,4
	8	1,3	1,4	5,9	
	9	1,5		6,8	
56 dias	10	1,5		5,3	1,5
	11	1,5	1,6	1,9	
	12	1,7		11,6	

APÊNDICE G: Resistência à compressão simples - Traço 1:2:9.

% de PET	Cura	CP	Res. à compressão (MPa)	Res. à compressão média (MPa)	Desvio Relativo	Nova Res. à compressão média (MPa)
0%	7 dias	1	2,3	2,3	1,2	2,3
		2	2,1		5,9	
		3	2,4		4,7	
	14 dias	4	2,2	2,4	6,6	2,4
		5	2,4		2,7	
		6	2,5		3,9	
	28 dias	7	3,1	2,9	4,6	2,9
		8	2,8		3,3	
		9	2,9		1,3	
	56 dias	10	2,3	2,5	5,6	2,4
		11	2,7		8,9	
		12	2,4		3,2	
5%	7 dias	1	1,6	1,7	4,9	1,7
		2	1,7		1,6	
		3	1,8		3,3	
	14 dias	4	2,2	2,1	5,8	2,2
		5	2,2		5,8	
		6	1,8		11,5	
	28 dias	7	2,2	2,3	4,7	2,3
		8	2,4		5,4	
		9	2,3		0,7	
	56 dias	10	2,4	2,4	0,1	2,5
		11	2,5		6,0	
		12	2,3		6,1	
10%	7 dias	1	1,1	1,2	5,8	1,1
		2	1,4		11,6	
		3	1,1		5,8	
	14 dias	4	2,1	2,2	1,2	2,1
		5	2,3		7,1	
		6	2,0		5,8	
	28 dias	7	2,6	2,5	5,8	2,6
		8	2,3		9,1	
		9	2,6		3,4	
	56 dias	10	2,5	2,6	3,1	2,6
		11	2,6		0,8	
		12	2,6		2,3	
15%	7 dias	1	1,5	1,6	7,0	1,7
		2	1,6		1,7	
		3	1,7		5,4	
	14 dias	4	1,9	2,0	4,2	1,9
		5	2,1		6,9	
		6	1,9		2,7	
	28 dias	7	2,9	2,6	11,7	2,4
		8	2,5		5,6	
		9	2,4		6,0	
	56 dias	10	3,7	3,3	10,9	3,2
		11	3,1		5,9	
		12	3,2		5,0	
20%	7 dias	1	1,7	1,6	5,0	1,7
		2	1,5		8,1	
		3	1,7		3,1	
	14 dias	4	1,7	1,9	9,9	2,0
		5	2,0		3,9	
		6	2,0		6,0	

28 dias	7	2,9		0,9	2,8
	8	2,8	2,8	0,2	
	9	2,8		1,2	
56 dias	10	2,9		1,6	3,0
	11	2,9	3,0	2,2	
	12	3,1		3,8	
7 dias	1	1,4		5,5	1,4
	2	1,4	1,3	5,5	
	3	1,1		10,9	
14 dias	4	1,5		5,9	1,5
	5	1,5	1,6	2,7	
	6	1,7		8,6	
25% 28 dias	7	2,1		5,2	2,1
	8	1,8	2,0	8,9	
	9	2,1		3,7	
56 dias	10	2,9		7,4	2,6
	11	2,7	2,7	1,5	
	12	2,5		5,9	

APÊNDICE H: Resistência de aderência à tração - Traço 1:1:6 (28 dias).

% de PET	CP	Res. de aderência à tração (MPa)	Res. de aderência à tração média (MPa)	Forma de Ruptura
0%	1	>	0,42	Argamassa
	2	>	0,46	Argamassa
	3	>	0,36	Argamassa
	4	>	0,37	Argamassa
	5	>	0,41	Argamassa
	6	>	0,25	Argamassa
	7	=	0,26	Substrato
	8	>	0,41	Argamassa
	9	>	0,28	Argamassa
	10	>	0,38	Argamassa
	11	>	0,39	Argamassa
	12	>	0,28	Argamassa
5%	1	>	0,33	Argamassa
	2	>	0,38	Argamassa
	3	>	0,38	Argamassa
	4	>	0,26	Argamassa
	5	>	0,28	Argamassa
	6	>	0,2	Argamassa
	7	>	0,35	Argamassa
	8	>	0,2	Argamassa
	9	>	0,28	Argamassa
	10	>	0,32	Argamassa
	11	>	0,35	Argamassa
	12	>	0,24	Argamassa
10%	1	=	0,24	Substrato
	2	>	0,22	Argamassa
	3	>	0,3	Argamassa
	4	>	0,29	Argamassa
	5	>	0,26	Argamassa
	6	>	0,21	Argamassa
	7	>	0,23	Argamassa
	8	=	0,27	Substrato
	9	>	0,24	Argamassa
	10	>	0,22	Argamassa
	11	=	0,23	Substrato
	12	=	0,24	Substrato

15%	1	=	0,23	Substrato
	2	>	0,2	Argamassa
	3	>	0,22	Argamassa
	4	>	0,2	Argamassa
	5	>	0,2	Argamassa
	6	>	0,19	Argamassa
	7	>	0,22	Argamassa
	8	>	0,22	Argamassa
	9	>	0,21	Argamassa
	10	>	0,2	Argamassa
	11	>	0,22	Argamassa
	12	>	0,21	Argamassa
20%	1	>	0,18	Argamassa
	2	>	0,18	Argamassa
	3	>	0,18	Argamassa
	4	>	0,16	Argamassa
	5	>	0,16	Argamassa
	6	>	0,17	Argamassa
	7	>	0,16	Argamassa
	8	>	0,17	Argamassa
	9	>	0,18	Argamassa
	10	>	0,18	Argamassa
	11	>	0,18	Argamassa
	12	>	0,18	Argamassa
25%	1	>	0,16	Argamassa
	2	>	0,14	Argamassa
	3	>	0,14	Argamassa
	4	>	0,16	Argamassa
	5	>	0,16	Argamassa
	6	>	0,12	Argamassa
	7	>	0,10	Argamassa
	8	>	0,14	Argamassa
	9	>	0,12	Argamassa
	10	>	0,12	Argamassa
	11	>	0,16	Argamassa
	12	>	0,14	Argamassa

APÊNDICE I: Variação dimensional resultante da exposição a sulfatos (%).

Traço	Teor de substituição (%)	Tempo de imersão (dias)					
		7	14	21	28	35	42
1:2:9	0	0,04	0,11	0,13	0,13	0,15	0,17
	5	0,05	0,10	0,15	0,16	0,18	0,19
	10	0,06	0,12	0,28	0,31	0,38	0,49
	15	-0,04	-0,06	-0,04	-0,04	-0,05	0,06
	20	-0,02	-0,02	0,02	0,03	0,04	0,03
	25	-0,02	0,01	0,09	0,13	0,20	0,17
1:1:6	0	0,00	-0,06	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
	5	-0,02	0,06	0,12	0,18	0,19	0,22
	10	0,01	-0,02	-0,02	0,02	0,20	0,09
	15	0,06	0,07	0,10	0,14	0,13	0,14
	20	-0,05	-0,08	-0,04	0,01	0,12	0,17
	25	0,04	0,09	0,18	0,22	0,28	0,29