



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE ARGAMASSAS
DE REVESTIMENTO PRODUZIDAS COM AGREGADO POLIMÉRICO**

IGOR VIEIRA FERNANDES

Orientadora: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça.

Campina Grande-PB, 16/09/2020

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE ARGAMASSAS
PRODUZIDAS COM AGREGADO POLIMÉRICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB, 16/09/2020

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

IGOR VIEIRA FERNANDES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Federal de Campina Grande
como requisito para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Civil.

Área de habilitação: Estruturas.

Orientador: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

Novembro/ 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por todas as oportunidades concedidas nesta existência.

Aos meus pais, Ivanildo Fernandes e Maria da Conceição, por todo incentivo e por me proporcionarem tudo de melhor em todos os aspectos da vida.

A minha irmã, Ísis Fernandes, pelo apoio, compreensão e parceria na vivência do dia a dia.

A minha namorada, Beatriz Lira, por todo apoio, compreensão e carinho.

Agradeço aos meus amigos que enfrentaram as dificuldades da graduação ao meu lado, em especial Renan Camilo e Luyse Rebeca, amigos adquiridos para toda a vida.

Aos amigos do Grupo Laços Fortes, por toda irmandade e pela compreensão das ausências em virtude dos estudos.

A professora Ana Maria, pela dedicação ao seu trabalho, pela boa vontade e preocupação para com todos os seus orientandos.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, que sempre me proporcionou e proporciona todo o apoio necessário, em todos os sentidos, para que eu possa atingir os meus objetivos e, acima de tudo, ser um cidadão de bem que se esforça para domar as imperfeições e ser um pouco melhor a cada dia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Interação entre argamassa de assentamento e os blocos em uma alvenaria.....	34
Figura 2: Alternativas de revestimento: (a) sistema mais antigo com chapisco, emboço, reboco e pintura; (b) sistema com camada única e pintura; (c) sistema RDM.....	36
Figura 3: Classificação dos materiais de engenharia.....	39
Figura 4: Fluxograma das etapas da pesquisa.....	44
Figura 5: Etapas da execução do ensaio da mesa de consistência.....	47
Figura 6: Ensaio de densidade de massa.....	49
Figura 7: Ensaio de absorção por capilaridade.....	51
Figura 8: Ensaio de resistência à compressão axial.....	52
Figura 9: Curva granulométrica do agregado miúdo.....	55
Figura 10: Curva granulométrica do agregado polimérico.....	56
Figura 11: Espalhamento e relação água/aglomerante para cada teor estudado.....	59
Figura 12: Densidade de massa fresca para as argamassas com os diferentes teores de PET.....	62
Figura 13: Teor de ar incorporado para as argamassas com os diferentes teores.....	63
Figura 14: Valores de absorção por capilaridade das argamassas aos 10 minutos e 90 minutos.....	65
Figura 15: Coeficientes de capilaridade das amostras.....	66
Figura 16: Densidade de massa aparente das amostras ao decorrer do tempo de cura.....	68
Figura 17: Resistência à Compressão Axial das amostras estudadas.....	70
Figura 18: Resistência à Tração na Flexão das amostras estudadas.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Granulometria e propriedades da areia.....	25
Tabela 2: Classificação dos agregados miúdos pelo módulo de finura.....	26
Tabela 3: Classificação quanto à densidade no estado fresco.....	30
Tabela 4: Classificação das argamassas segundo as suas funções na construção.....	33
Tabela 5: Tipos de argamassas de acordo com critérios de classificação.....	37
Tabela 6: Traço em massa para os corpos de prova de cada teor.....	46
Tabela 7: Quantitativo de corpos de prova para cada teor e para cada idade de cura.....	46
Tabela 8: Caracterização física do agregado miúdo.....	53
Tabela 9: Composição granulométrica do agregado miúdo.....	54
Tabela 10: Caracterização física do PET.....	55
Tabela 11: Composição granulométrica do agregado polimérico.....	56
Tabela 12 - Caracterização física do cimento CII Z.....	57
Tabela 13 - Caracterização física da Cal.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland
ABIPET - Associação Brasileira de Indústria do PET
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM - American Society for Testing and Materials
CH – Cal hidratada
CIMPOR – Grupo Cimentos de Portugal
CREA - Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
CP - Cimento Portland
CP II - Cimento Portland Composto
EMO - European Mortar Industry Organization
LDPE – Polietileno de baixa densidade
NBR – Norma Brasileira
NM – Norma Mercosul
PET - Politereftalato de Etileno
PIB – Produto Interno Bruto
REF - Referência
TCPO – Tabela de Composições e Preços para Orçamentos
UFMG – Universidade Federal de Campina Grande

LISTA DE SÍMBOLOS

cm – centímetros

g – Grama

g/cm³ - Grama por centímetro cúbico

g/dm².min^{1/2} – Grama por decímetro quadrado pela raiz quadrada de minuto

kg/m³- Quilograma por metro cúbico

ml – Mililitro

mm – Milímetros

Mpa – Megapascal

N - Newton

γ - Massa específica

ρ : densidade de massa no estado endurecido

μm – Micrômetro

°C – Graus Celsius

RESUMO

A Construção civil é um setor de extrema importância na sociedade, pois representa um dos índices de desenvolvimento de uma nação. Porém, se apresenta como um dos maiores consumidores de matéria-prima, consome cerca de um terço do total de recursos consumidos pela sociedade, além de ser o setor responsável por produzir mais da metade dos resíduos sólidos provenientes do conjunto de todas as atividades na sociedade. Então, com o aumento das preocupações ambientais, a busca por materiais alternativos para a construção civil com finalidade de reduzir custos, melhorar eficiência e produzir pouco ou nenhum dano ao meio ambiente é imperiosa. Dentre os materiais alternativos com potencial para incorporação à construção civil, está o PET (Politereftalato de Etileno), um derivado do petróleo, não renovável. Os resíduos compostos deste polímero levam em torno de cem anos para se decompor, o que tem contribuído para a degradação ambiental, com a poluição de rios e oceanos, além de gerar desequilíbrio nas cadeias interligadas, enfatizando ainda mais a importância de se obter novo destino para esses rejeitos. Diante do exposto, este trabalho teve como desígnio principal avaliar as propriedades físicas e mecânicas de argamassas de revestimento produzidas com substituição parcial do agregado miúdo por polímero. Foram realizados ensaios de caracterização física dos agregados, do cimento e do polímero, e, posteriormente, após o estudo do traço adotado, moldados os corpos de prova cilíndricos nas dimensões de 5 cm x 10 cm, com substituição parcial do agregado miúdo por polímero nos teores de 5%, 10% e 15%, para determinação da absorção de água por capilaridade, densidade de massa aparente e resistência à compressão simples das argamassas em estudo. Contudo, observou-se que no estado fresco a incorporação de PET contribuiu consideravelmente para a melhora da consistência da argamassa. No estado endurecido, constatou-se a redução tanto da densidade de massa aparente como da absorção por capilaridade das argamassas conforme foi aumentada a quantidade de agregados poliméricos, enquanto a resistência à compressão simples apresentou crescimento, graças a menor quantidade de água utilizada e o melhor empacotamento das partículas.

Palavras-chave: Argamassa; Materiais alternativos; Politereftalato de etileno.

ABSTRACT

The Civil construction is an extremely important sector in society, as it represents one of the nation's development indexes. However, it presents itself as one of the largest consumers of raw materials, consumes about a third of the total resources consumed by society, in addition to being the sector responsible for producing more than half of the solid waste from all activities in society. So, with increasing environmental concerns, the search for alternative materials for civil construction in order to reduce costs, improve efficiency and produce little or no damage to the environment is imperative. Among the alternative materials with the potential to be incorporated into civil construction, there is PET (Ethylene Polyetherephthalate), a non-renewable oil derivative. The waste composed of this polymer takes about one hundred years to decompose, which has contributed to environmental degradation, with the pollution of rivers and oceans, in addition to generating imbalance in the interconnected chains, further reinforcing the importance of obtaining a new one destination for these tailings. In view of the above, this work aimed to evaluate the physical and mechanical properties of coating mortars produced with partial replacement of fine aggregate by polymer. Physical characterization tests were carried out on the aggregates, cement and polymer, and, after the study of the adopted trace, the cylindrical specimens were molded in the dimensions of 5 cm x 10 cm, with partial replacement of the fine aggregate by polymer in the contents of 5%, 10% and 15%, to determine the absorption of water by capillarity, bulk density and resistance to simple compression of the mortars under study. However, it was observed that in the fresh state the incorporation of PET contributed considerably to the improvement of the mortar consistency. In the hardened state, there was a reduction in both the bulk density and the capillarity absorption of the mortars as the amount of polymeric aggregates increased, while the resistance to simple compression increased, thanks to the smaller amount of water used and the better packaging of particles.

Key words: Mortar; Alternative materials; Polyethylene terephthalate.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 ARGAMASSA	17
2.1.1 Histórico	18
2.1.2 Materiais constituintes das Argamassas.....	20
2.1.2.1 Cimento	20
2.1.2.2 Cal	22
2.1.2.3 Agregados	24
2.1.2.4 Água	26
2.2 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS	27
2.2.1 Estado fresco	28
2.2.1.1 Trabalhabilidade	28
2.2.1.2 Retenção de água	28
2.2.1.3 Consistência e Plasticidade.....	29
2.2.1.4 Densidade	29
2.2.1.4 Adesão inicial	30
2.2.2 Estado endurecido.....	30
2.2.2.1 Aderência	30
2.2.2.2 Retração.....	31
2.2.2.3 Capacidade de absorver deformações.....	31
2.2.2.4 Durabilidade	32
2.2.2.4 Resistência mecânica.....	32
2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS	32
2.3.1 Classificação de acordo com as funções das argamassas	32
2.3.1.1 Argamassa de assentamento	33
2.3.1.2 Argamassa de revestimento	34
2.3.1 Classificação das argamassas a partir de critérios.....	36
2.4 POLÍMERO	37
2.4.1 Politereftalato de Etileno – PET.....	39
2.2.2 Aplicações do PET no setor da construção civil	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43

3.1	<i>Materiais</i>	43
3.2	<i>Metodologia</i>	43
3.2.1	Caracterização física da Areia, Cimento, Cal e PET	44
3.2.3	Dosagem e moldagem dos corpos de prova	45
3.2.4	Ensaio no estado fresco	47
3.2.5	Ensaio no estado endurecido	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	<i>Caracterização Física dos Materiais</i>	53
4.1.1	Caracterização do agregado miúdo	53
4.1.2	Caracterização do polímero	55
4.1.3	Caracterização do Cimento	57
4.1.4	Caracterização da Cal	58
4.2	<i>Propriedades das Argamassas</i>	58
4.2.1	Ensaio no estado fresco	58
4.2.1.1	<i>Índice de consistência</i>	58
4.2.1.2	<i>Densidade de massa fresca e Teor de ar incorporado</i>	61
4.2.2	Ensaio no estado endurecido	64
4.2.2.1	<i>Determinação das propriedades físicas das argamassas modificadas</i>	64
4.2.3.1.1	<i>Determinação da absorção de água por capilaridade</i>	64
4.2.3.1.2	<i>Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido</i>	68
4.2.3.2	<i>Determinação das propriedades mecânicas das argamassas modificadas</i>	70
4.2.3.2.1	<i>Determinação da resistência à compressão simples</i>	70
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	74
5.1	<i>Considerações Finais</i>	74
5.2	<i>Sugestões para Pesquisas Futuras</i>	76
6	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICES	85

1. INTRODUÇÃO

Segundo Chagas Filho (2013), a construção civil é um dos setores da economia que mais tem importância no Produto Interno Bruto de um país, tendo em vista que está ligada a infraestrutura e proporciona grande geração de emprego e rendas pela soma de recursos aplicados. É, portanto, um dos índices de desenvolvimento de uma nação e representa a criação de investimentos de longo prazo em várias empresas nas áreas de indústria, serviço e agropecuária.

Por outro lado, a construção civil se apresenta como um dos grandes vilões a respeito da geração de impactos ambientais. Um exemplo de efeito negativo ao meio ambiente com grande relevância está desde a extração até a geração de resíduos sólidos. Segundo John (2000), é um setor que se apresenta como um dos maiores consumidores de matérias-primas, consome entre 14% e 50% dos recursos naturais que são extraídos em todo o planeta. Ademais, em termos de rejeitos, segundo o Ministério do Meio Ambiente (2014), estima-se que mais de 50% dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto de todas as atividades humanas sejam provenientes da construção civil.

Dentro desse aspecto, a gestão de resíduos sólidos tem sido uma das principais preocupações ambientais do mundo, principalmente por conta dos elevados custos com a disposição dos mesmos. Em virtude disso, a crescente conscientização sobre o meio ambiente tem contribuído para as preocupações relacionadas com a eliminação e reuso dos resíduos gerados. No setor da construção civil é imperiosa a busca por soluções que tenham um viés econômico e caráter sustentável, e nesse contexto, a utilização de resíduos tem se tornado uma alternativa atraente para sua disposição. (SIDDIQUE et al, 2008).

Ademais, o crescimento da preocupação ambiental tem cada vez mais tornado a construção civil um alvo da incorporação de materiais reciclados, tanto devido ao fato de alguns dos rejeitos reaproveitados possuírem composição ou características similares às matérias-primas naturais, como também com o intuito de buscar a eficiência, reduzir custos e ao mesmo tempo produzir pouco ou nenhum dano ao meio ambiente. Assim, o estudo de novas tecnologias para reaproveitamento dos resíduos industriais, de acordo com Mendonça et al.

(2013), poderá propiciar o desenvolvimento de novos produtos com consequente diminuição do descarte de resíduos e maximização da cadeia produtiva da indústria.

Inserido no grupo de materiais alternativos incorporados a construção civil, está o PET (Politereftalato de Etileno), que, segundo a Associação Brasileira de Indústria do PET – (ABIPET), é um poliéster, polímero termoplástico, 100% reciclado e é atualmente usado na fabricação de diversos produtos, dentre eles estão as embalagens de bebidas, as fibras têxteis, os filmes para adesivos, papéis, tapetes, mantas de tnt, resinas alquídicas usadas para produção de tintas, resinas poliéster, roupas, calçados, entre tantos outros.

Vale salientar que, embora o PET seja um dos materiais com maior índice de reciclagem no Brasil, Mello (2011) explica que sua aplicação é pouco conhecida quanto ao desempenho nas propriedades de argamassa. Ademais, é um derivado do petróleo não renovável, as embalagens de politereftalato de etileno, de acordo com a ABIPET, levam no mínimo cem anos para se decompor, podendo variar de acordo com as condições ambientais. Dessa maneira, no decorrer da sua vida, os recipientes provocam degradação ao meio ambiente, poluindo rios e oceanos, além de desequilíbrio nas cadeias interligadas, o que reforça ainda mais a importância da reciclagem desse tipo de material.

Diante do exposto, considerando a importância da incorporação do PET na construção civil como uma alternativa viável para amenizar os impactos causados ao meio ambiente e contribuir como um material de utilidade direta neste importante setor, o objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades físicas e mecânicas de argamassas produzidas com esse polímero substituindo parcialmente o agregado miúdo.

1.1 JUSTIFICATIVA

A evolução do setor da construção civil indica diretamente o maior uso e exploração da argamassa, por ser um material de fundamental importância para esse setor. Seja para assentamento, revestimento, contrapiso, vedação, entre outras, existem inúmeras aplicações para essa mistura argamassada, que apresenta propriedades imprescindíveis para o ramo da construção civil no Brasil e no mundo.

A importância dessa pesquisa reside no fato de que, dada extensa aplicação das argamassas na construção civil, faz-se necessário o uso e incorporação de novos materiais em sua composição visando a obtenção de propriedades específicas, e em especial quando da utilização de materiais alternativos, fazendo com que os mesmos tenham uma aplicabilidade prática e eficaz, passando a ser insumo de utilidade direta num ramo tão amplo e necessário, como a construção civil.

Ademais, a substituição do agregado miúdo (areia quartzosa) por resíduo polimérico pode minimizar o consumo do agregado natural, que é escasso em algumas regiões, além de reduzir a extração em jazidas, podendo ainda agregar valor ao resíduo e reduzir o impacto ambiental do seu descarte.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar as propriedades físicas e mecânicas de argamassas produzidas com substituição parcial ao agregado miúdo por polímero nos teores de 5,10 e 15%.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar caracterização física dos aglomerantes utilizados, dos agregados convencionais e do agregado polimérico;
- Avaliar a consistência, a densidade de massa e o teor de ar incorporado no estado fresco das argamassas em estudo;
- Determinar as propriedades físicas no estado endurecido, realizando os ensaios de absorção por capilaridade e densidade de massa aparente;
- Determinar as propriedades mecânicas das argamassas em estudo no estado endurecido, por meio da determinação das resistências à compressão simples e à tração na flexão.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

O texto deste Trabalho de Conclusão de Curso – TCC encontra-se em um volume único distribuído da seguinte forma:

Introdução – Nesta parte estão dispostos a Introdução, Justificativa, Objetivos e Organização da pesquisa.

Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados aos principais usos das argamassas, processos de produção, propriedades e aplicações.

Materiais e Métodos – São apresentados os materiais utilizados na pesquisa e relatados aspectos considerados importantes sobre os procedimentos da etapa experimental.

Resultados e Discussões – São apresentados os resultados que se pretende obter a partir da substituição do agregado miúdo convencional por agregado polimérico.

Considerações Finais e Sugestões para pesquisas futuras – São abordados as considerações à cerca dos objetivos propostos e as sugestões para o desenvolvimento de novos estudos.

Por fim, estão as Referências, onde serão listadas as pesquisas citadas neste estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ARGAMASSA

Segundo Carasek (2017), as argamassas são materiais de construção obtidos da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes (comumente cimento Portland e cal hidratada), agregado miúdo (areia) e água, podendo possuir ainda em sua constituição aditivos e adições minerais, e possuem propriedades de aderência e endurecimento.

Vaz (2016) explica que os aglomerantes são capazes de provocar a aderência dos materiais e podem ser utilizados isolados ou adicionados a materiais inertes, e no caso do uso exclusivo de aglomerante e água, tem-se a presença de uma pasta, e quando se mistura a pasta com agregado, obtém-se, então, a argamassa.

Recena (2012) esclarece que as argamassas não são consideradas como um material isolado, mas na verdade como um elemento de um sistema, considerando a interação da mesma com o ambiente e com o substrato. Dentre as funções essenciais das argamassas, pode-se destacar que visa garantir bom acabamento ao parâmetro revestido, impermeabilizar o substrato de aplicação, regularizar e/ou proteger mecanicamente substratos constituídos por sistemas de impermeabilização ou isolamento termoacústico e absorver as deformações naturais a que uma estrutura está sujeita.

Então, Carasek (2017) mostra ainda que as argamassas são materiais utilizados constantemente na construção civil, sendo empregados em assentamento de alvenarias, nas etapas de revestimento, como emboço, reboco ou revestimento de camada única de paredes e tetos, contrapisos, assentamento e rejuntamento de revestimentos de cerâmica e pedra.

2.1.1 Histórico

Desde a antiguidade o homem utiliza vários materiais com o intuito de unir solidariamente elementos de naturezas diferentes para a construção de determinadas edificações. Leal (2013) reflexiona que o homem primitivo sempre buscou abrigos seguros para que pudesse suprir suas necessidades. Acredita-se então que, como há hipóteses de que era comum o empilhamento de pedra sobre pedras de forma aleatória naquela época, de tal forma que a estabilidade ficava comprometida, a argamassa surgiu para satisfazer à necessidade de um material que fosse capaz de unir as pedras e conferisse firmeza em seus abrigos.

Segundo a European Mortar Industry Organization – EMO (2006), os primeiros registros da utilização da argamassa como material de construção são da pré-história, de períodos a cerca de 11 mil anos atrás. Em 1985, foi descoberto o que hoje é considerado o registro mais antigo de emprego da argamassa, um piso polido feito com pedras e argamassa de cal e areia, encontrado devido a uma escavação realizada para abrir uma rua. Estima-se que o piso foi produzido entre 7 mil e 9 mil a.C.

De acordo com Recena (2012), existem relatos do emprego de um aglomerante natural obtido de rejeitos das minas de cobre localizadas no monte

Sinai. Este material, caracterizado como geopolímero, era por vezes misturado com outro aglomerante formado por gesso impuro calcinado, a ponto de existir uma teoria que afirma que os blocos de pedra, dos quais foram construídas as pirâmides, seriam na verdade elementos de argamassa fundidos no próprio local. Ademais, observações realizadas nas pirâmides de Gizé e Quéfrem apontaram a existência de argamassa de areia natural, na qual percebeu-se também que um de seus constituintes era a cal.

A Cal e suas aplicações eram bastante conhecidas pelos gregos. Os romanos, mais especificamente, foram os responsáveis pela mistura, em concretos rudimentares, da cal com agregados como os seixos rolados, areias e fragmentos cerâmicos. Posteriormente, os romanos ainda acrescentaram cinzas vulcânicas às misturas a fim de melhorar o desempenho das argamassas em relação à umidade. As cinzas vulcânicas eram obtidas de uma cidade chamada de Pozzuoli, e é justamente por isso que o composto com sílica reativa denominado pozolana recebe esta nomenclatura (RECENA, 2012).

Segundo Guimarães (1981, apud RECENA, 2012), por volta do ano de 1549 tem-se o registro de unidades que, a partir da calcinação de conchas marinhas, produziam cal, que era destinado à pintura e produção de argamassas, de tal forma que é possível afirmar que o emprego da cal no Brasil é tão antigo quanto o próprio país.

Contudo, é possível ver que as argamassas antigas eram geralmente produzidas com cal e areia, porém com os avanços dos procedimentos construtivos foram confeccionados novos materiais. O cimento Portland e os aditivos, por exemplo, são comumente utilizados nas argamassas com o intuito de melhorar suas propriedades.

Margalha (2011) explica que o emprego de cimento substituiu parcialmente o uso da cal nas argamassas, principalmente pelo fato de o cimento melhorar à durabilidade das mesmas. Segundo Carasek (2017), os incorporadores de ar que modificam a reologia da massa fresca pela introdução de pequenas bolhas de ar, ou mesmo os retentores de água à base de ésteres de celulose capazes de regular a perda da água de amassamento, são exemplos de aditivos utilizados em argamassas.

São muito empregadas no Brasil nos dias atuais, as argamassas industrializadas, que surgiram na Europa e nos Estados Unidos durante o século

XIX, dosadas em plantas industriais, que basta a adição de água para serem utilizadas em obras (CARASEK, 2017).

2.1.2 Materiais constituintes das Argamassas

De acordo com Fiorito (2019), 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.

2.1.2.1 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 reagem 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. O Coliseu, na cidade de Roma, a Pont du Gard, próxima a Nimes, são exemplos de construções que foram assentadas com argamassa constituída desse material cimentício pozolânico e que ainda hoje estão firmes (NEVILLE, 2016).

Neville (2016) explica que James Park desenvolveu o chamado “cimento romano”, por meio da calcinação de nódulos de calcário argiloso, até culminar na patente para “cimento Portland” obtida por Joseph Aspdin. O cimento Portland era preparado pelo aquecimento de uma mistura de argila finamente moída e calcário em um forno até a extinção do CO₂, que ocorre em temperatura muito abaixo do que a necessária para clinquerização. Porém, Isaac Johnson, ao calcinar uma mistura de argila e giz até a clinquerização, de forma que

ocorressem as reações necessárias à formação de compostos de alta capacidade cimentante, produziu o protótipo do cimento moderno.

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 e pela posterior moagem do clínquer restante, e foi atribuído devido à semelhança em cor e qualidade do cimento endurecido com a pedra de Portland, um calcário extraído em Dorset (NEVILLE, 2016).

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.

As matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento Portland são geralmente misturas de materiais calcários e argilosos em proporções adequadas que resultem em composições químicas apropriadas para o cozimento. A fabricação comporta seis operações principais: a extração de matéria-prima, britagem, moedura e mistura, queima, moedura do clínquer e expedição.

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 potenciais do cimento para produção de argamassas e concretos, que se enquadram em processos artificialmente definidos nos métodos e especificações padronizados, são: massa específica, exsudação, finura, pasta de consistência normal, tempo de pega e resistência.

As propriedades químicas estão diretamente ligadas ao processo de endurecimento por hidratação, que é um procedimento complexo, admitindo-se, atualmente, que se desenrole 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.

2.1.2.2 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).

Borrelli (1999) explica que já no século XVI era conhecido o processo de produção da cal virgem a partir de calcário contendo impurezas, obtido em certas jazidas, que endurecia rapidamente quando misturada com a água. Mas foi em 1756 que John Smeaton obteve um novo tipo de cal, ao estudar misturas de cal e aditivos, empregando um calcário contendo aproximadamente 11% de impurezas argilosas. Por volta de 1796, James Parker obteve a cal hidráulica, que foi patenteada com o nome “cimento romano”, a partir da queima ou calcinação de calcário com um teor elevado de impureza argilosa à temperatura de até 1100°C. E só em 1818, que Vicat efetivamente demonstrou a possibilidade de se produzir cal hidráulica artificialmente, através da queima de calcário com adição de argila com o propósito de melhorar o desempenho hidráulico do produto final.

Santiago (2007) explica que o uso da cal reduziu consideravelmente devido a 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 da qual, 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.

Em relação a composição da Cal, para que sua pureza seja definida, Cincotto (1985) explica que tanto na cal virgem quanto na cal hidratada deve haver um mínimo de 88% de óxidos de cálcio e magnésio na base de material isento de constituintes voláteis, ou óxidos totais na base não volátil. Além disso, a reatividade da cal virgem é o segundo requisito essencial que determina o grau de hidratação possível de ser atingido em condições contínuas de processo.

As partículas de cal possuem dimensões muito pequenas e área superficial bastante elevada, fato que permite a retenção de água entre suas moléculas por adsorção superficial, de tal forma que confere plasticidade às pastas e a trabalhabilidade e retenção de água das argamassas. Essa capacidade de retenção de água constitui aspecto positivo para as argamassas, por permitir a liberação da água de amassamento para o substrato de forma gradativa e contínua (AGOPYAN, 1985).

Ademais, Agopyan (1985) acrescenta que a plasticidade da cal está relacionada diretamente com o tamanho e a forma das partículas de cal hidratada e tem reflexo direto na aplicação da cal. As cales mais plásticas são mais trabalháveis, portanto, sua aplicação é mais fácil, produz melhor acabamento e eficiência no assentamento dos elementos de alvenaria. Como a plasticidade da cal favorece o uso de maior proporção ou incorporação de areia nas argamassas, propicia a economia na obra.

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, permitir melhor acabamento ao se empregar a areia fina, aumento da resistência à penetração de água, entre outras.

2.1.2.3 Agregados

Bauer (2019) define os agregados como sendo matérias-primas minerais de grande importância para a sociedade. São materiais granulares que possuem faixas de tamanho estabelecidas, utilizados na pavimentação, lastros de ferrovias, obras geotécnicas, concretos, argamassas e construções em geral. Segundo a NBR 7211 (2009), os agregados graúdos possuem faixa de tamanho de 4,75 a 75 mm, enquanto os agregados miúdos, que serão utilizados na composição das argamassas deste trabalho, possuem faixa de tamanho de 0,075 a 4,75 mm.

Segundo a NBR 12655 (2015), os agregados podem ser classificados de acordo com a massa específica em agregados leves, normais ou pesados:

- Leve: Agregado de baixa massa específica ($\leq 2000 \text{ kg/m}^3$), como a, escória siderúrgica, o folhelho expandido, vermiculita, ardósia, entre outros;
- Normal: Agregado com massa específica entre 2000 kg/m^3 e 3000 kg/m^3 , como as areias, cascalhos, pedra-britadas, entre outros;
- Pesado: Agregado de elevada massa específica ($\geq 3000 \text{ kg/m}^3$), como, por exemplo, barita, magnetita, limonita e hematita.

Em relação as argamassas, existem minerais com densidade baixa que são utilizados nas mesmas com o intuito de lhe dar leveza e, devido ao fato de possuírem estruturas porosas que acumulam ar em suas composições, o que dificulta a passagem de som e a transferência de calor, lhe conferir isolamento térmico e acústico (BARROS, 2018).

Para Margalha (2011), a dureza, a granulometria, a porosidade e a forma dos grãos são características do agregado que influenciam diretamente no comportamento da argamassa. Dentro desse mesmo aspecto, de acordo com Carasek (2017), os agregados devem ser escolhidos com cautela devido ao fato de representarem cerca de 60% a 80% do consumo dos materiais da argamassa pronta, ou seja, possui influência relevante no seu comportamento no estado fresco e no seu desempenho. Nas argamassas de revestimento, por exemplo, o agregado utilizado é a areia natural, que é constituída principalmente de quartzo e extraída de leitos de rios e cavas. Porém, na atualidade também têm sido empregadas areias artificiais obtidas pela britagem das rochas.

Vaz (2016), por sua vez, explica que a composição granulométrica influencia as propriedades da argamassa, refletindo que se a areia for pouco graduada, maior será o índice de vazios, o que implica diretamente em um maior consumo da pasta de cimento e, como consequência, causa um aumento na retração e no custo. Ademais, torrões de argila, matéria orgânica, materiais pulverulentos e carbonosos, entre outras possíveis impurezas presentes nas areias, afetam diretamente na granulometria e, por consequência, a trabalhabilidade, pois aumentam a absorção de água. A Tabela 1 apresenta as propriedades da argamassa equivalente a cada granulometria do agregado miúdo.

Tabela 1: Granulometria e propriedades da areia

Granulometria da areia	Propriedades da argamassa
Contínua (bem graduada)	Maior trabalhabilidade e menor consumo de cimento
Descontínua	Maior resistência
Uniforme	Maior consumo de água

FONTE: Vaz (2016)

Para Recena (2012), uma das principais funções do agregado miúdo, tanto na argamassa quanto no concreto, é gerar à mistura determinada estabilidade de volume e contribuir para redução da possibilidade do processo

de retração. A norma NBR NM 248/2003, utilizando o módulo de finura, faz uma classificação granulométrica dos agregados miúdos. A tabela 2 apresenta essa classificação.

Tabela 2: Classificação dos agregados miúdos pelo módulo de finura

Muito fina	1,35 a 2,25
Fina	1,71 a 2,85
Média	2,11 a 3,38
Grossa	2,71 a 4,02

FONTE: Bauer (2019).

É necessária a utilização de uma quantidade mais elevada de água no caso de argamassas que possuem um agregado miúdo mais fino para se garantir a trabalhabilidade, mas é válido salientar que na fase de endurecimento estas argamassas geralmente apresentam uma maior quantidade de fissuras por retração (BOTAS, 2009). Segundo Agostinho (2008), para uma redução da porosidade e, conseqüentemente, da absorção de água, deve-se utilizar areias mais finas, enquanto que para reduzir a ocorrência de fendilhação, patologia caracterizada por fendas, ou rachaduras, que ocorrem na argamassa possibilitando entrada de água e microrganismos que comprometem sua durabilidade, deve-se utilizar areias grossas.

2.1.2.4 Água

Segundo Mendonça (2007), a água é de fundamental importância para produção das argamassas, pois é um elemento que possibilita a reação de hidratação dos ligantes hidráulicos, cimento Portland e cal hidráulica, desencadeando suas propriedades aglutinantes e formando uma pasta que permite a aglomeração dos agregados. É necessária uma quantidade de água superior a suficiente para a hidratação do ligante quando for produzir a argamassa, para que haja hidratação dos agregados e, conseqüentemente, este seja aglutinado pelo ligante, gerando fluidez à argamassa para sua melhor aplicação.

Penas (2008) explica que a quantidade de água utilizada na mistura deve ser adicionada obedecendo a determinados critérios, pois dependerá da mesma a trabalhabilidade, a facilidade de aplicação da argamassa, a aderência ao suporte, entre outros fatores que interferem no rendimento da mão-de-obra e, obviamente, também vão intervir nas características da argamassa no seu estado endurecido. Então, Henz (2009) esclarece que a quantidade de água que deve ser utilizada é calculada através da relação água/ligante, que deve ser criteriosamente calculada. De acordo com a composição da argamassa em estudo, a quantidade de água pode variar, sendo de extrema importância que sejam inicialmente analisados a granulometria, natureza dos agregados e do ligante, o traço a ser utilizado e a trabalhabilidade que se deseja alcançar.

Ainda nesse aspecto, para Botas (2009), deve ser adicionada água em quantidades mínimas para se garantir as funções desejadas, uma vez que, se for colocada em excesso, pode originar características e propriedades indesejadas. Segundo Penas (2008), com a utilização de água em excesso, verifica-se um aumento da retração associada à fase de secagem e da porosidade da argamassa. No que diz respeito as propriedades, Botas(2009) explica que deve-se dar destaque a porosidade e porometria, e em relação ao comportamento, é importante dar relevância para a resistência mecânica, absorção de água e resistência aos sais solúveis.

Contudo, como elucida Cruz (2008), a água utilizada em argamassas e concretos deve ser limpa, isenta de impurezas, sobretudo de sais, para evitar prejuízos ao desempenho da argamassa devido a uma degradação acelerada.

2.2 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, enquanto que no estado endurecido podemos dar relevância a aderência,

capacidade de absorver deformações, durabilidade, conforto térmico e resistência mecânica (Carasek, 2017).

2.2.1 Estado fresco

2.2.1.1 *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).

Recena (2012) acrescenta ainda que a trabalhabilidade deve ser adequada conforme o tipo de bloco utilizado. O assentamento de bloco de pedras, por exemplo, onde a junta de argamassa é mais grossa, por conta das irregularidades, não se pode haver trabalhabilidade em excesso, pois deixaria a argamassa muito mole e dificultaria o serviço. Por outro lado, os tijolos maciços possuem juntas geralmente menores e, portanto, demandam uma trabalhabilidade maior para facilitar o andamento do processo.

2.2.1.2 *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)..

Segundo Forti (2017), uma argamassa possui um aumento gradual na resistência mecânica quando possui uma maior retenção de água. Ademais,

essa propriedade permite ao substrato uma boa aderência que contribui para impedir que uma parte da argamassa perca mais água do que outra e cause o deslocamento da mesma.

2.2.1.3 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, enquanto 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.

2.2.1.4 Densidade

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 a argamassa e será mais trabalhável durante mais tempo. As argamassas podem ser classificadas quanto a massa específica conforme demonstrada na tabela 3 a seguir (CARASEK, 2017).

Tabela 3: Classificação quanto à densidade no estado fresco

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

FONTE: Carasek (2017)

2.2.1.4 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).

2.2.2 Estado endurecido

2.2.2.1 Aderência

É uma propriedade que se caracteriza pelo comportamento futuro existente entre suporte e argamassa, dependendo da porosidade e rugosidade do suporte onde a argamassa será aplicada e da trabalhabilidade da mesma (LOURENCI, 2003). É a capacidade da argamassa de se fixar ao substrato, seja no assentamento, com a finalidade de unir elementos em uma alvenaria ou em um revestimento, mesmo sofrendo com dilatação térmica, choques térmicos e movimentações (RECENA, 2012).

Recena (2012) ainda acrescenta que existem três mecanismos de aderência que atuam de forma conjunta. A aderência instantânea, que consiste

na capacidade da argamassa em se manter aderida à superfície por um curto espaço de tempo, a microaderência e microaderência, que podem ser entendidos como o processo observado em nível microscópico e a partir da observação à vista desarmada, respectivamente.

2.2.2.2 Retração

Segundo Lourenci (2003), esta propriedade é definida como a diminuição do volume de uma argamassa, sem suporte, durante o seu endurecimento, na qual parte da água de amassamento é usada nas reações de hidratação e parte evapora.

Dentro do mesmo raciocínio, 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.

2.2.2.3 Capacidade de absorver deformações

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.

Para Mehta e Monteiro (2008) é de extrema importância a avaliação da capacidade de deformação da argamassa, seja ela destinada ao revestimento ou ao assentamento de componentes de alvenaria. Caso a capacidade de deformações da argamassa não seja compatível ao nível de tensões gerado, já que em todos os casos a argamassa está sujeita às restrições devido às tensões oriundas da aderência ao substrato, ela será rompida e pode haver prejuízos para sua funcionalidade.

2.2.2.4 Durabilidade

Segundo Lourenci (2013), é a resistência da argamassa a condições químicas, mecânicas e climáticas, que se mantém ao longo da vida útil. Recena (2012), por sua vez, entende 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. 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.

2.2.2.4 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) reflexiona 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 ou quando é empregada em microconcreto, por exemplo, 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.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS

2.3.1 Classificação de acordo com as funções das argamassas

Segundo Carasek (2017), a classificação das argamassas de acordo com as suas funções na construção pode ser representada pela tabela 4.

Tabela 4: Classificação das argamassas segundo as suas funções na construção.

Função da argamassa	Classificação
Construções de alvenarias	<ul style="list-style-type: none">• Argamassa de assentamento (elevação da alvenaria)• Argamassa de fixação (ou encunhamento) – alvenaria de vedação
Revestimentos de paredes e tetos	<ul style="list-style-type: none">• Argamassa de chapisco• Argamassa de emboço• Argamassa de reboco• Argamassa de camada única• Argamassa para revestimento decorativo monocamada
Revestimentos de pisos	<ul style="list-style-type: none">• Argamassa de contrapiso• Argamassa de alta resistência para piso
Revestimentos cerâmicos (paredes/pisos)	<ul style="list-style-type: none">• Argamassa de assentamento de peças cerâmicas – colante• Argamassa de rejuntamento
Recuperação de estruturas	<ul style="list-style-type: none">• Argamassa de reparo

FONTE: Carasek (2017)

De acordo com Carasek (2017), as argamassas mais empregadas na construção civil na atualidade são: as argamassas de assentamento de alvenaria ou de revestimento de paredes. Neste trabalho será estudada argamassas de revestimento. Estão apresentadas a seguir informações a respeito desses tipos principais.

2.3.1.1 Argamassa de assentamento

Carasek (2017) explica que a argamassa de assentamento é utilizada para a elevação de paredes e muros de tijolos ou blocos (alvenarias), e possui dentre suas principais funções, as seguintes:

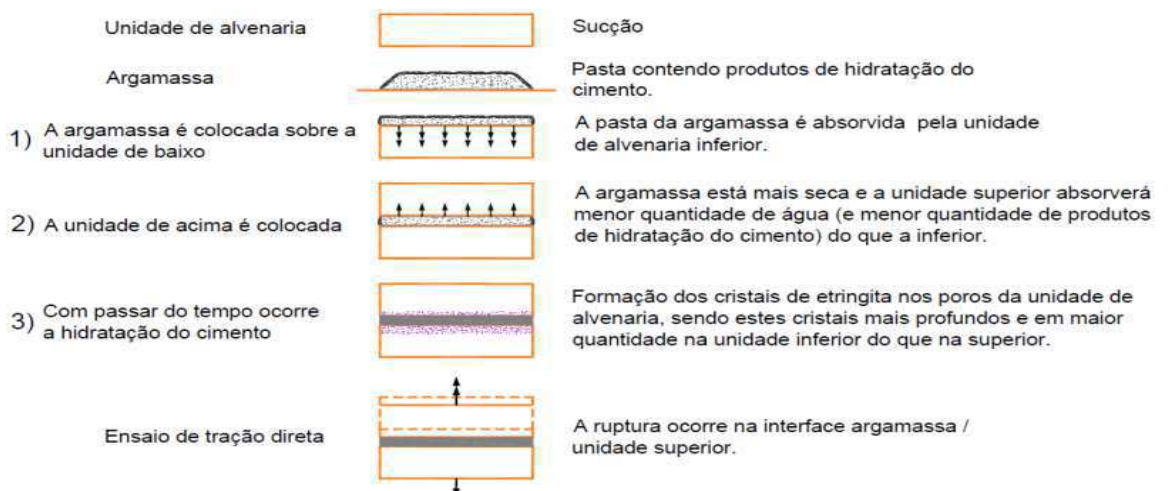
- unir solidariamente entre si os elementos que compõem uma alvenaria, de maneira que constitua um elemento monolítico e contribua para a resistência aos esforços laterais;
- absorver as deformações naturais, como as de origem térmica e as de retração por secagem;

- distribuir de forma uniforme os esforços atuantes em uma alvenaria por toda a área resistente dos blocos;
- garantir a impermeabilidade das alvenarias de elementos à vista (sem revestimento).

Para que a argamassa de assentamento cumpra as suas principais funções, é necessário que determinadas propriedades sejam satisfeitas: trabalhabilidade, retenção de água, aderência, resistência mecânica e capacidade de deformação (CARASEK, 2017).

A Figura 1 ilustra a perda de água de argamassa fresca em uma junta de assentamento, na qual ocorre primeiro o contato da argamassa com o bloco inferior, sofrendo o efeito de sucção pelos seus poros. Ademais, observa-se que o efeito da força de gravidade também contribui para ocorrer uma ligação mais efetiva entre a junta de assentamento e o bloco inferior.

Figura 1: Interação entre argamassa de assentamento e os blocos em uma alvenaria



FONTE: Gallego (1989, apud Carasek, 2017).

2.3.1.2 Argamassa de revestimento

Como neste trabalho será avaliada as características de argamassas de revestimento, é de suma importância analisar suas características. De acordo com Vaz (2016), a argamassa de revestimento é utilizada para revestir paredes, muros e tetos, que recebem, por sua vez, acabamentos (pintura, revestimentos

cerâmicos, laminados, entre outros). Chapisco, emboço e reboco são as três camadas que constitui esse tipo de argamassa.

Segundo Pereira (2018), o que diferencia as três camadas, é a espessura de cada uma delas, características e as finalidades utilizadas para o revestimento de uma parede ou muro, conforme definido a seguir:

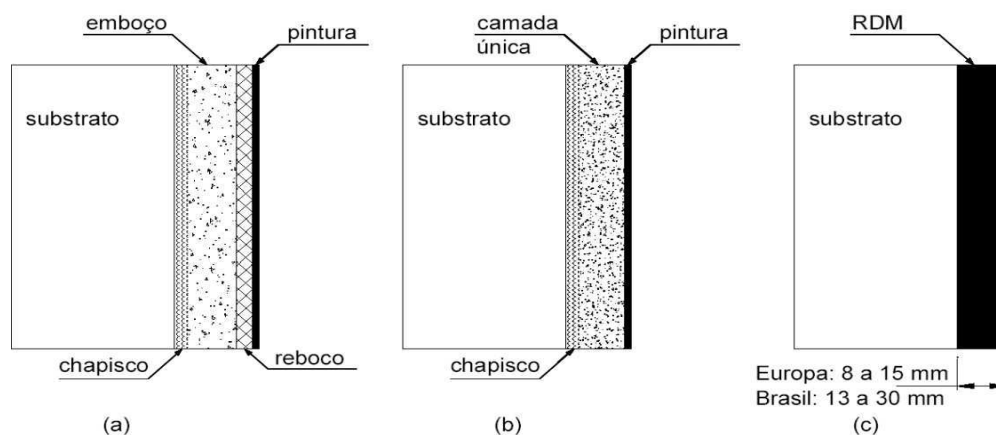
Chapisco: É a primeira camada da argamassa a ser aplicada, podendo ser aplicada de forma contínua ou descontínua, que faz contato direto com a alvenaria, tendo a função de criar uma superfície áspera, uniformizando-a quanto à absorção, para possibilitar maior aderência para o reboco que vem em seguida. Podem ser utilizados aditivos para melhorar a aderência e geralmente o traço utilizado é de 1:3, produzido com cimento, areia grossa e água.

Emboço: É a camada aplicada logo após o chapisco, com o intuito de regularizar a base de forma a preparar a parede para a execução do reboco, e posterior pintura, ou para o assentamento de revestimento decorativo, como o cerâmico. O emboço é produzido com cimento, cal, areia grossa ou média e água, utilizando geralmente traço de 1:2:8 ou 1:2:9.

Reboco: É uma camada fina de argamassa, a última a ser aplicada em um revestimento, ou seja, aplicada sobre o emboço para deixar a superfície com melhor aspecto, plana e lisa para realização dos serviços de pintura. Existe a utilização de aditivos para uma boa qualidade do reboco, como é o caso de aditivos impermeabilizantes. É recomendável um traço de 1:2:8 de cimento, cal, areia fina e água para que esta camada seja produzida com qualidade.

Carasek (2017) acrescenta que, além do sistema mais antigo, constituído por chapisco, emboço, reboco e pintura, que atualmente vem sendo menos utilizado, também existem o revestimento de um único tipo de argamassa aplicado à base (sobre o qual é aplicada uma camada decorativa, como a pintura), a camada única, chamado popularmente de “massa única”, e o revestimento aplicado em uma única camada, que faz, simultaneamente, a função decorativa e de regularização que é muito utilizada na Europa e ainda não normalizado no Brasil, o revestimento decorativo monocamada, ou monocapa (RDM). Na figura 2 abaixo, são mostradas as diferentes alternativas de revestimentos de parede.

Figura 2: Alternativas de revestimento: (a) sistema mais antigo com chapisco, emboço, reboco e pintura; (b) sistema com camada única e pintura; (c) sistema RDM.



FONTE: Carasek, 2017.

Para Vaz (2016), proteger a alvenaria e a estrutura contra a ação do intemperismo (para o caso dos revestimentos externos) e integrar o sistema de vedação dos edifícios, contribuindo para o isolamento térmico, isolamento acústico, segurança ao fogo, resistência ao desgaste e abalos superficiais e estanqueidade à água, constituem as principais funções da argamassa de revestimento.

Segundo Carasek (2017), as propriedades essenciais para as argamassas de revestimento alcançarem as funções almejadas são: trabalhabilidade, consistência e plasticidade, adesão inicial, retração plástica, aderência, permeabilidade à água, capacidade de absorver deformações e a resistência mecânica.

2.3.1 Classificação das argamassas a partir de critérios

Além da classificação de acordo com a função a qual se destina, as argamassas podem ser classificadas em relação a vários critérios, alguns dos quais são apresentados na tabela 4 a seguir:

Tabela 5: Tipos de argamassas de acordo com critérios de classificação

Critério de classificação	Tipos de argamassas
Quanto à natureza do aglomerante	<ul style="list-style-type: none">• Argamassa aérea• Argamassa hidráulica
Quanto ao tipo de aglomerantes	<ul style="list-style-type: none">• Argamassa de cal• Argamassa de cimento• Argamassa de cimento e cal• Argamassa de gesso• Argamassa de cal e gesso
Quanto ao número de aglomerantes	<ul style="list-style-type: none">• Argamassa simples• Argamassa mista
Quanto à consistência da argamassa	<ul style="list-style-type: none">• Argamassa seca• Argamassa plástica• Argamassa fluida
Quanto à plasticidade da argamassa	<ul style="list-style-type: none">• Argamassa pobre ou magra• Argamassa média ou cheia• Argamassa rica ou gorda
Quanto à densidade da massa da argamassa	<ul style="list-style-type: none">• Argamassa leve• Argamassa normal• Argamassa pesada
Quanto à forma de preparo ou fornecimento	<ul style="list-style-type: none">• Argamassa preparada em obra• Mistura semipronta• Argamassa industrializada• Argamassa dosada em central

FONTE: Carasek, 2017.

2.4 POLÍMERO

Gorni (2003) explica que a palavra POLÍMERO é de origem grega. Poli significa “muito” e Mero se refere a “parte” ou “unidade” repetitiva. Há ligações covalentes entre os meros para haver a formação dos polímeros. Observa-se, por exemplo, que em um novelo de lã é muito difícil a extração de um fio, e em um polímero as características são parecidas, pois as moléculas estão ordenadas da mesma maneira que um novelo de lã e para retirada de alguma é complicado devido ao fato que as cadeias estão presas entre si.

Segundo Akcelrud (2007), os polímeros são compostos de origem natural ou sintética com massa molar na ordem de 10^4 a 10^6 , e existem polímeros orgânicos e inorgânicos. Os orgânicos são os mais estudados e mais importantes comercialmente. Os polímeros são considerados macromoléculas, mas a recíproca não é obrigatoriamente verdadeira, pois a alta massa molar do polímero é proveniente da repetição de unidades estruturais, enquanto na

macromolécula é consequência da complexidade molecular, como as que estão presentes nos organismos vivos.

Andrade (2007) explica que a reação que constitui um polímero é chamada de reação de polimerização, na qual a molécula inicial se junta às outras de maneira consecutiva e, assim, vai produzindo o que se chama de dímero, trímero, tetâmetro e, então, o polímero. Existem várias técnicas e processos diferentes para realização dessa reação, as polimerizações por adição e condensação são as mais utilizadas.

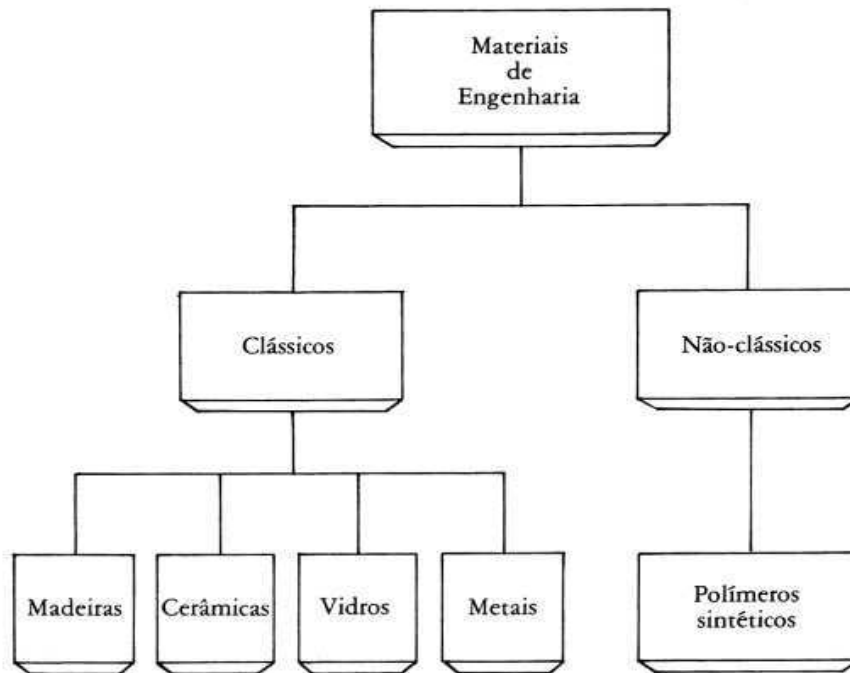
Quanto a classificação dos polímeros, segundo Mano (1998), pode ser feita baseada em diversos critérios:

- *Origem do polímero*: podem ser classificados como naturais ou sintéticos;
- *Número de monômeros*: será um homopolímero, aquele formado a partir de um único monômero, ou copolímero, quando formado por dois ou mais monômeros;
- *Método de preparação do polímero*: podem ser de adição, condensação ou por modificação de outro polímero.
- *Estrutura química da cadeia polimérica*: podem ser Poliéster, Poliamida ou Poli-hidrocarboneto.
- *Encadeamento da cadeia polimérica*: ou possuem sequência cabeça-cauda ou sequência cabeça-cabeça, cauda-cauda;
- *Configuração dos átomos da cadeia polimérica*: se dispõem espacialmente com isomeria cis ou isomeria trans;
- *Taticidade da cadeia polimérica*: a posição do radical em relação ao eixo da cadeia será isostática, sinditática ou atática;
- *Fusibilidade e/ou solubilidade do polímero*: podem ser termoplásticos ou termorrígidos;
- *Comportamento mecânico do polímero*: podem ser borracha ou elastômero, Plástico ou Fibra.

Vários polímeros são utilizados na engenharia, dentre os mais conhecidos e indispensáveis à vida moderna estão: plásticos, borrachas, fibras e adesivos. Segundo Mano (1991), plásticos de engenharia são todos os polímeros que podem ser usados em substituição aos materiais tradicionais de engenharia,

independentemente de sua estrutura química ou de seu caráter, termoplástico ou termorrígido. A figura abaixo representa uma classificação dos materiais de engenharia, separando-os em clássicos (tradicionalmente usados, como madeiras, cerâmicas, vidros e metais) e não-clássicos (polímeros que são materiais utilizados mais recentemente).

Figura 3: Classificação dos materiais de engenharia.



FONTE: Mano (1991)

2.4.1 Politereftalato de Etileno – PET

De acordo com Rolim e Nascimento (2000), o Politereftalato de Etileno é um polímero que foi desenvolvido pelos químicos Winfield e Dickson, ambos ingleses, na década de 40, inicialmente destinado à confecção de fibras têxteis. Só na década de 60 que o PET passou a ser utilizado para aplicações em embalagens. Já na década de 70, o processo de injeção e sopro com biorientação introduziu o PET na aplicação como garrafa, o que revolucionou o mercado de embalagens e, principalmente, o das bebidas carbonatadas.

A Associação Brasileira da indústria do PET (2012) esclarece que o mesmo nada mais é do que um poliéster, ou seja, um polímero termoplástico, e destaca as suas características como pontos extremamente positivos para

utilização e reciclagem, pois é um plástico muito resistente para a fabricação de garrafas, frascos e embalagens para água, sucos, refrigerantes, medicamentos, cosméticos, entre tantos outros produtos. O PET é capaz de conter e proteger os mais diversos produtos com total higiene e segurança, pois fornece resistências mecânica e química muito boas, de tal forma que suporta bem o contato dos agentes agressivos.

Dentro desse contexto, Nascimento et al (1996) explica que a grande adequação desse poliéster para aplicação nas embalagens de bebidas carbonatadas se dá justamente devido ao fato de o mesmo possuir características de leveza, transparência, brilho, boas propriedades mecânicas e de barreira ao dióxido de carbono.

A fim de analisar as propriedades do PET, Silva (2003) realizou ensaios de tração, para analisar o comportamento do material quando submetido a esforços que tendem a puxá-lo até que se rompa, microscopia ótica, para analisar a superfície do material, e dureza, para classificá-lo conforme a profundidade de impressão provocada por uma carga aplicada sobre um penetrador, tanto com garrafas PET virgens como recicladas. Contudo, Silva (2003) concluiu que esse polímero não sofre perdas significativas quando reciclado, podendo substituir o virgem desde que não seja utilizado como embalagens de alimentos, mas em várias outras finalidades.

O PET chegou ao Brasil no final da década de 80 e trouxe vantagens consideráveis para os consumidores, mas, em contrapartida, também surgiram os desafios do manejo deste novo material, ou seja, reciclagem, reaproveitamento e sua destinação correta. O PET demora séculos para se degradar; contribui para o aumento dos custos do manejo dos resíduos sólidos urbanos; causa impermeabilização das camadas em decomposição, prejudicando a passagem de gases e líquidos; quando queimado libera gases tóxicos, corrosivos e cancerígenos, contribui negativamente para a drenagem urbana, agravando enchentes, entre outros problemas (WELLE, 2013; ROMÃO et al., 2009).

Porém, segundo Chilton et al. (2010) e Shen et al. (2010), quando o manejo do PET é realizado de forma correta, gera ganhos nos campos ambiental, social e econômico, pois contribui para reduzir os custos com o manejo e reduzir os problemas ambientais e de consumo de energia; o resíduo

do mesmo é o segundo material que melhor remunera o catador, atrás apenas do alumínio; contribui pra geração de emprego e renda e também para economizar recursos naturais; colabora para aumentar a vida útil de aterros, entre vários outros pontos positivos.

2.2.2 Aplicações do PET no setor da construção civil

Diversos estudos acerca dos vários tipos de rejeitos de garrafas PET têm sido realizados pela indústria da construção civil, com o intuito de gerar novas descobertas a respeito do uso desse polímero como material de construção (MODRO, 2008). Dessa maneira, o PET reciclado ou puro vem sendo usado na construção civil de diversas maneiras. A ABIPET (2012) afirma que só no setor da construção civil são produzidas com esse material caixas d'água, tubos e conexões, torneiras, piscinas e telhas. Além do mais, bancadas e pias são produzidas com mármores sintéticos com PET reciclado, e tintas e vernizes também são fabricadas com uso do mesmo.

Segundo notícia publicada no site do CREA do estado de Alagoas, empresas de arquitetura e de engenharia civil têm dado nos últimos anos uma atenção especial para o PET, pois sabe-se que é um plástico com alta resistência mecânica, química, à compressão, ao fogo, aos fenômenos naturais e com capacidade isolante maior até do que a dos tijolos e blocos convencionais. Dessa forma, esse plástico vem sendo utilizado como um insumo alternativo em edificações residenciais de baixo custo, seja substituindo a brita na fabricação de cimento, substituindo a areia na produção de tijolos e blocos, ou mesmo como peças preenchidas com areia ou entulho de obra, intercaladas de argamassa ou barro e moldadas em formas de madeiras, para a formação de paredes (SAIBA, 2019).

Podemos comprovar os usos do PET citados anteriormente observando alguns casos. Um exemplo interessante foi a notícia publicada em diferentes meios de comunicação a respeito do pedreiro Ed Mauro Aparecido, que construiu uma casa ecologicamente correta com garrafas PET, no município de Extrema no estado de Minas Gerais. Ele resolveu unir criatividade, economia e preservação ambiental na construção da casa própria e utilizou mais de 10 mil garrafas PET na estrutura do imóvel. O pedreiro executou um telhado com

garrafas e utilizou cimento e, no lugar dos tijolos, garrafas cheias de areia. O resultado obtido foi uma casa resistente e arejada, avaliada pelos especialistas como um projeto seguro e sustentável, e vista como uma solução muito positiva em relação a preservação do meio ambiente (PEDREIRO, 2014).

O projeto Composto de Resíduo Plástico – PET mais conhecido como CREP, foi desenvolvido pelo economista Mário Augusto Rocha. No mesmo, é realizado um processo com o PET triturado, junto de seixo de areia, vidro e outros materiais, no qual há um aquecimento e uma mistura em uma máquina conhecida como “creponeira”, formando uma massa muito semelhante ao asfalto. Esta é colocada em moldes para a produção de artefatos de formas e usos diferentes, como blocos para pisos de calçadas, meio-fio, estacas e outros. Cada tijolo obtido com o processo usa em torno de vinte garrafas PET. A ideia de Mário, embora o procedimento de queima leve em torno de dois dias, é considerada ecológica (SAIBA, 2019).

Jardim (2016) realizou um estudo da viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo por agregado reciclado de PET em concretos convencionais, com o intuito de verificar a influência dessa substituição quanto às propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral). Com a análise estatística realizada pelo pesquisador, constatou-se não haver diferença significativa entre os resultados dos concretos com substituição de PET nos teores estudados (que foram de 10% e 15%) e às suas respectivas referências. Percebeu-se também que os concretos com o polímero se apresentaram trabalháveis e coesos, representando um indicativo positivo para o uso do agregado reciclado de PET em concretos convencionais.

Zhi Ge et al. (2013) realizou 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 graduação 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.

Além dos exemplos aqui discutidos, existem várias outras aplicações do polímero em estudo no setor da construção civil, e existem muitas outras pesquisas, além das que aqui foram apresentadas, a respeito da descoberta de novas formas de utilização do mesmo. Pesquisas como esta, com o intuito de contribuir com o meio ambiente, reduzindo o descarte, visto que o PET é um material que demora muito para se decompor, e agregar valor aos rejeitos do mesmo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

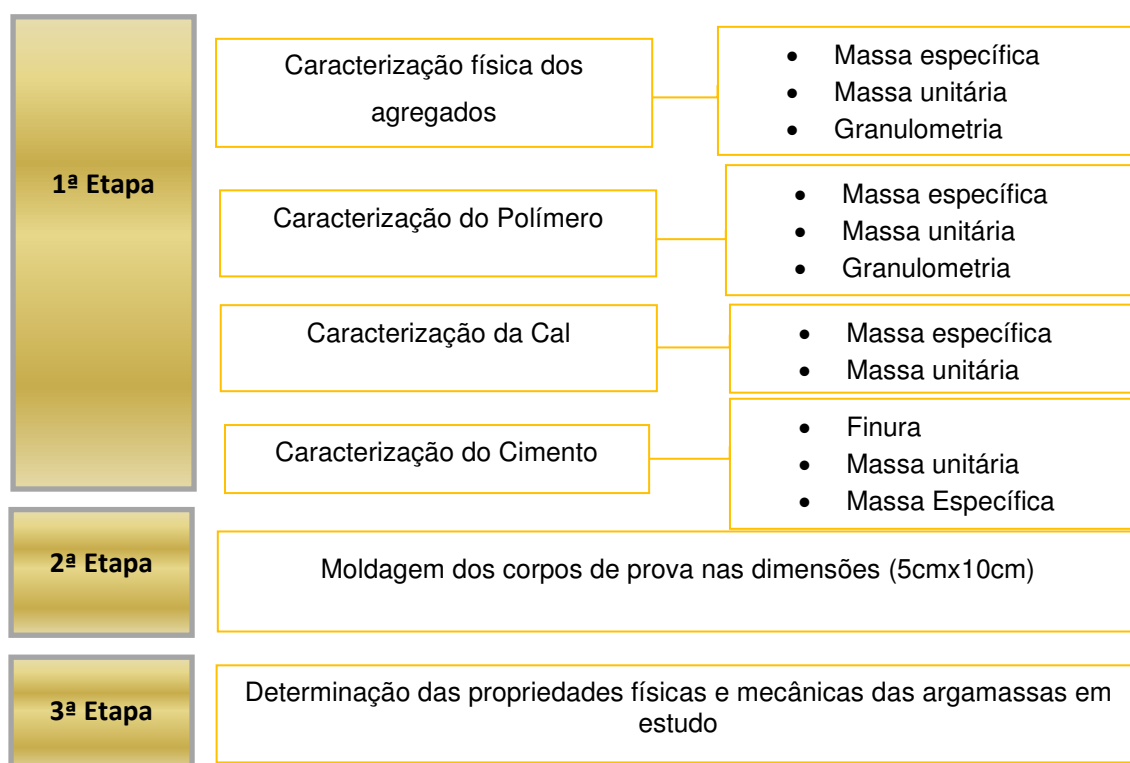
Os materiais utilizados para desenvolvimento deste trabalho, foram:

- Agregado miúdo: O agregado miúdo, utilizado na pesquisa, foi do tipo natural proveniente de jazida do leito do Rio Paraíba.
- Cimento: Cimento Portland CII-Z 32.
- Cal: A Cal utilizada foi a Carbomil, que é uma cal hidratada, do tipo CH-I fabricada a partir do puro calcário cretáceo.
- Agregado polimérico: O polímero utilizado foi do tipo triturado, obtido da reciclagem de garrafas PET, classificado como plastômero, e com a denominação de Politereftalato de etileno, adquirido na indústria DEPET Reciclagem localizada no município de Campina Grande-PB;
- Água: fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba (CAGEPA).

3.2 Metodologia

Para efetivação desta pesquisa serão realizadas as etapas apresentadas no Fluxograma da Figura 4.

Figura 4: Fluxograma das etapas da pesquisa.



FONTE: Dados da Pesquisa (2019).

3.2.1 Caracterização física da Areia, Cimento, Cal e PET

Análise granulométrica

O ensaio de granulometria determina a distribuição percentual dos diferentes tamanhos dos grãos do agregado. É representada pela curva de distribuição granulométrica que mostra o porcentual de material passando na peneira em questão versus logaritmo do diâmetro da abertura da peneira.

O ensaio de composição granulométrica para o e agregado miúdo e para o PET foi realizado segundo o método de ensaio da ABNT NBR NM 248:2003.

Determinação da massa específica

A massa específica do agregado é a relação da massa e o seu volume, não considerando os vazios permeáveis da água. Este valor tem importância no cálculo do consumo dos materiais a serem determinados no traço de argamassa.

A determinação da massa específica da areia e do PET foi realizada por meio do frasco de Chapman, segundo a ABNT NBR NM 52:2009. Para o cimento e a cal, o ensaio foi realizado seguindo a norma ABNT NBR NM 23:2001.

Determinação da massa unitária

A massa unitária do agregado no estado solto corresponde ao quociente da massa do agregado lançado no recipiente e o volume desse recipiente. Este ensaio tem como objetivo principal verificar a massa unitária do agregado miúdo, incluindo os vazios, e umidade que existem entre os grãos, e determinar sua utilização no traço de concreto. Com essa determinação pode-se ser feito as transformações dos traços de massa para volume durante o procedimento de dosagem.

O ensaio foi realizado com os agregados miúdos (areia e PET), cal e cimento segundo o método de ensaio ABNT NBR NM 45:2006.

Ensaio de finura

É a determinação da porcentagem, em massa, de cimento Portland cujas dimensões de grãos são superiores a $75\mu\text{m}$ através do método de peneiramento manual de acordo com a norma ABNT NBR 11579:2012.

É importante se conhecer o valor da finura dos cimentos, pois quanto mais fino for o cimento melhor será a sua reação de hidratação e a resistência mecânica da argamassa.

3.2.3 Dosagem e moldagem dos corpos de prova

Depois de realizada a caracterização dos materiais, estudou-se a dosagem das argamassas de revestimento, com o intuito de determinar a quantidade necessária de material para moldagem de todos os corpos de prova. No estudo de trabalhos científicos e TCPO, percebeu-se que o traço para as argamassas de revestimento é de 1:2:9 (cimento: cal: areia), e, portanto, adotado neste trabalho. A relação água/cimento, por sua vez, variou para cada teor de acordo com o ensaio de índice de consistência. A Tabela 6 apresenta a dosagem utilizada.

Tabela 6: Traço em massa para os corpos de prova de cada teor

Argamassa	Cimento (g)	Cal (g)	Areia (g)	PET (g)	Relação a/agl.	Água (ml)
REF	1575	1150	17273	0	1,75	4770
5% PET	1576	1150	16406	866	1,52	4143
10% PET	1576	1150	15546	1727	1,54	4198
15% PET	1576	1150	14682	2591	1,55	4225

FONTE: Dados da pesquisa (2020)

Após a caracterização do material e o estudo do traço a ser adotado, foram moldados os corpos de prova. Para os ensaios de resistência à compressão simples, absorção por capilaridade e densidade de massa aparente, foram moldados 144 corpos de prova cilíndricos, sendo 9 corpos de prova para cada teor em estudo, nas idades de cura de 7,14,28 e 56 dias. E para o ensaio de resistência à tração na flexão, foram moldados mais 48 corpos de prova prismáticos, sendo 3 para cada teor em estudo e para as mesmas idades de cura anteriormente mencionadas. Totalizando, então, 12 corpos de prova para cada teor e para cada idade de cura, como mostra a tabela 7.

Tabela 7: Quantitativo de corpos de prova (cilíndricos e prismáticos) para cada teor e cada idade de cura

Idade de cura	Teores de PET			
	0%	5%	10%	15%
7	12	12	12	12
14	12	12	12	12
28	12	12	12	12
56	12	12	12	12

FONTE: Dados da pesquisa (2020)

A moldagem seguiu os procedimentos previstos na NBR 7215 (ABNT, 1997), sendo a colocação da argamassa feita em quatro camadas, aplicando 30

golpes uniformes com soquete normal em cada camada. Por fim, realizou-se a rasadura por meio da régua.

Após 24 horas, os corpos de prova eram desmoldados, identificados e colocados na areia úmida para, posteriormente, serem submetidos aos ensaios de caracterização física e mecânica.

3.2.4 Ensaio no estado fresco

Índice de Consistência

Ensaio realizado de acordo com a norma NBR 13276 (ABNT, 2016). Para realização do mesmo foi necessário umedecer o tampo da mesa de consistência e as paredes do molde no formato de tronco de cone. Em seguida, centralizou-se o molde na mesa e encheu o mesmo com três camadas de argamassa, aplicando em cada uma delas respectivamente 15, 10 e 5 golpes com o soquete. Quando foi necessário, completou-se o volume do molde com mais argamassa e, logo depois, foi feito o rasamento com uma régua para, então, retirar-se o molde. Posteriormente, realizou-se a queda da mesa de consistência 30 vezes em 30 segundos, e os três valores obtidos para o diâmetro da argamassa espalhada representou o índice de consistência. O ensaio foi feito por tentativas, até que se conseguisse o espalhamento trabalhável de 255 ± 10 mm. A figura 5 ilustra o ensaio.

Figura 5: Etapas do ensaio da mesa de consistência.



FONTE: Dados da pesquisa (2020)

Densidade de massa fresca e Teor de ar incorporado

A determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado da argamassa no estado fresco foi realizada conforme a norma NBR 13278 (ABNT, 2005), que se refere a argamassas destinadas tanto ao assentamento como ao revestimento de paredes e tetos.

No procedimento, após a calibração do recipiente cilíndrico adequado ao ensaio e o preparo da argamassa, ocorre a introdução suave de porções de argamassa no recipiente, formando três camadas de alturas aproximadamente iguais, nas quais são aplicados 20 golpes conforme indicado em norma. Posteriormente, são efetuadas três quedas do recipiente com altura aproximada de 3 cm de tal forma que, ao final, não exista vazios entre a argamassa e a parede do recipiente. Por fim, é realizada a rasadura, o recipiente é pesado e registrado a massa do molde com a argamassa.

A determinação da densidade de massa da argamassa, no estado fresco, está caracterizada pela figura 6. Para o cálculo dessa propriedade, em quilogramas por metro cúbico, utiliza-se a equação abaixo:

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_t}$$

Onde:

d é a densidade da argamassa, em kg/m³;

m_c é a massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio, em gramas;

m_v é a massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas;

v_t é o volume do recipiente cilíndrico, em centímetros cúbicos.

Figura 6: Ensaio de densidade de massa.



FONTE: Dados da Pesquisa (2020).

Para o cálculo do teor de ar incorporado, utilizou-se a expressão seguinte:

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

Onde:

d é a densidade da argamassa, em kg/m^3 ;

d_t é a densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios, que, por sua vez, é representada pela expressão:

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}}$$

Onde:

m_i é a massa seca de cada componente da argamassa, juntamente com a massa da água;

γ_i é a massa específica de cada componente da argamassa.

3.2.5 Ensaio no estado endurecido

Absorção de água por capilaridade

Ensaio realizado com o intuito de determinar a absorção de água por capilaridade de argamassas em seu estado endurecido. O mesmo é regido pela NBR 15259 (ABNT, 2005), que é específica tanto para as argamassas de assentamento como de revestimento.

Para realização do procedimento foram produzidos 3 corpos de prova de cada teor para cada idade de cura. Antes da realização do ensaio, foram pesados para determinar sua massa seca (m_o) e, então, foi determinada a massa saturada (m_t) com 10 e 90 minutos durante o ensaio. Como os corpos de prova ficam parcialmente imersos em água, como mostra a figura 7, ocorre um aumento de massa e, com isso, a absorção de água por capilaridade (expressa em g/cm^2) é obtida por meio da equação:

$$A_t = \frac{m_t - m_o}{16}$$

Onde:

A_t : Absorção de água por capilaridade (g/cm^2);

m_o : Massa do corpo de prova seco (g)

m_t : Massa do corpo de prova durante o ensaio (g);

t : Corresponde aos tempos de 10min e 90min;

Figura 7: Ensaio de absorção por capilaridade.



FONTE: Dados da Pesquisa (2020).

Ademais, o coeficiente de capilaridade, deve ser determinado pela diferença entre a massa obtida no tempo de 90 minutos e a obtida no tempo de 10 minutos, cujo resultado será em $\text{g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$.

Densidade de massa aparente no estado endurecido

A densidade de massa aparente é determinada conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005). Utilizou-se três corpos-de-prova de cada mistura e foi verificada a relação entre a massa e seu volume através da equação abaixo:

$$\rho = \frac{m}{v} \times 100$$

Onde:

ρ : densidade de massa no estado endurecido;

m: massa do corpo de prova, em g;

v: volume do corpo de prova, dado por largura x altura x comprimento, em cm^3 .

Resistência à compressão simples

Técnica utilizada para a verificação da resistência à compressão de argamassas feitas de cimento Portland, em seu estado endurecido. Todo o procedimento é feito através de uma adaptação da NBR 7215 (ABNT, 1996), que especifica a determinação de resistência à compressão de cimento Portland, e que foi modificada para a mensuração desta propriedade em argamassas. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG, como mostra a figura 8, com o equipamento Shimadzu Servopulser, modelo EHF-EM100K1-020-0A de capacidade máxima de 100KN.

Figura 8: Ensaio de Resistência à Compressão Axial.



FONTE: Dados da Pesquisa (2020).

Resistência à tração na flexão

Ensaio realizado com base na norma NBR 13279 (2005). Para realização do mesmo, foi necessário posicionar o corpo de prova nos dispositivos de apoio do equipamento de ensaio de modo que a face rasada com a régua não ficasse em contato com os dispositivos de carga nem com os de apoio. Em seguida, se aplicou uma carga de $50 \pm 10 \text{ N/s}$ até obter a ruptura da amostra. O cálculo da resistência à tração na flexão se baseia da seguinte expressão:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot L}{40^3}$$

Onde:

R_f : Resistência à tração na flexão (MPa);

F_f : Carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L: Distância entre os suportes (mm).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização Física dos Materiais

4.1.1 Caracterização do agregado miúdo

O agregado miúdo foi classificado de acordo com a NBR 7211:2009, intitulada Agregados para concreto – Especificação. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos para caracterização física do agregado miúdo utilizado nessa pesquisa.

Tabela 8: Caracterização física do agregado miúdo

Parâmetro determinado	Média dos valores
Massa unitária (g/cm ³)	1,40
Massa específica real (g/cm ³)	2,56

Segundo Neville (2016), os valores de massa unitária variam de 0,52 a 0,74 vezes a massa específica, e Racena (2012) afirma que a massa unitária e a massa específica real da areia são de aproximadamente 1,50 g/cm³ e 2,63 g/cm³, respectivamente. Diante disso, e observando que os valores obtidos para a massa unitária e massa específica do agregado miúdo utilizado neste estudo foram, respectivamente, 1,40 g/cm³ e 2,56g/cm³, constata-se que os valores obtidos estão similares aos da literatura e atendem os parâmetros para uso.

A distribuição granulométrica do agregado miúdo está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9: Composição granulométrica do agregado miúdo

Porcentagem em Massa (%)			
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
Fundo	19,18	1,92	100
Módulo de finura		2,25	
Diâmetro máximo		2,40 mm	

A tabela 9 aponta o módulo de finura, que é determinado pela soma das porcentagens retidas acumuladas, nas peneiras de série normal, dividida por 100, como sendo 2,25 e o diâmetro máximo característico de 2,40 mm, tendo a maior parte do material retido nas peneiras de 0,6 e 0,3 mm.

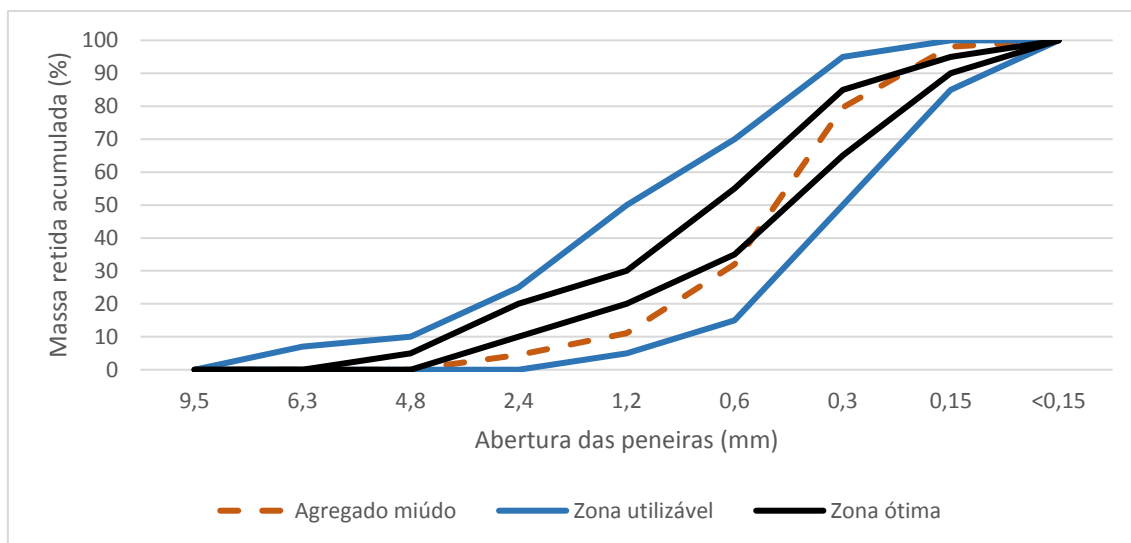
As areias são classificadas segundo a sua granulometria em grossas, médias, finas e muito finas conforme o valor do seu módulo de finura como mostrado na tabela 2. Constatamos, então, que, de acordo com seu módulo de finura, a areia utilizada é classificada como fina e média.

Uma das finalidades do ensaio de granulometria do agregado em estudo é a comparação da distribuição granulométrica do mesmo com a que é determinada por normas específicas para cada uso. A NBR 7211:2009, que trata dos requisitos mínimos dos agregados miúdos para uso em concreto, apresenta os limites superior e inferior da distribuição granulométrica que o agregado miúdo deve ter para ser apropriado, assim como a zona utilizável e ótima para cada limite.

Tendo em vista os dados apresentados na Figura 9, 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 7211:2009, 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.

Figura 9: Curva granulométrica do agregado miúdo



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.

4.1.2 Caracterização do polímero

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos para caracterização física do agregado polimérico utilizado nessa pesquisa.

Tabela 10: Caracterização física do PET

Parâmetro determinado	Média dos valores
Massa unitária (g/cm ³)	0,54
Massa específica real (g/cm ³)	1,45

De acordo com os resultados apresentados na tabela 10, foram obtidos os valores de 0,54 g/cm³ e 1,45 g/cm³ para a massa unitária e massa específica real do PET, respectivamente. Ou seja, a primeira cerca de 61,4% inferior a

massa unitária da areia e a segunda em torno de 43,4% menor que a massa específica real do agregado miúdo que será parcialmente substituído pelo o PET. Dessa forma, por ter massas de valores consideravelmente inferior, certamente implicará em alterações na densidade de massa das argamassas objetos de estudo contendo esse polímero.

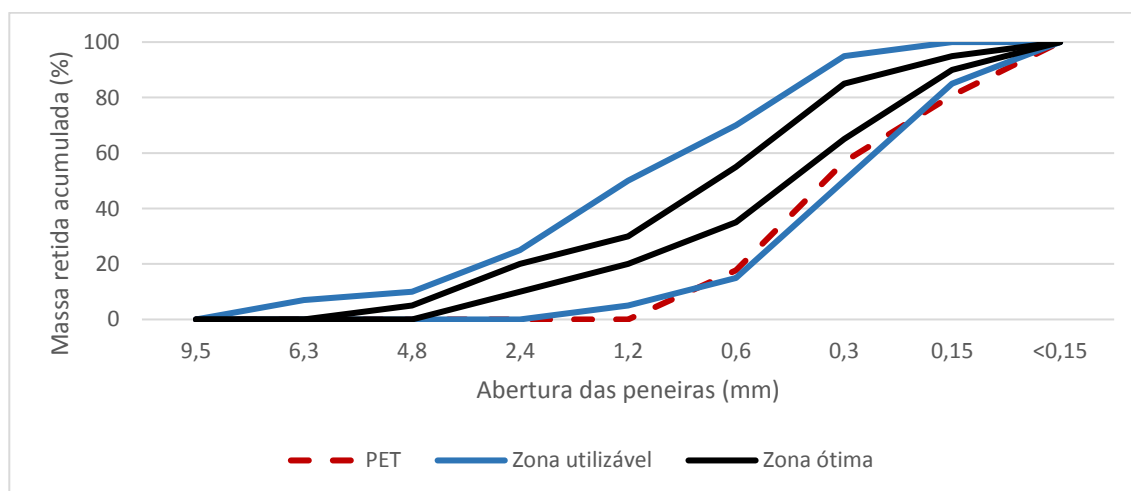
Na Tabela 11, observa-se os resultados obtidos no ensaio de granulometria para o agregado polimérico.

Tabela 11: Composição granulométrica do agregado polimérico

Porcentagem em Massa (%)			
Peneiras (mm)	Material Retido (g)	Retida	Acumulada
2,4	0,0	0,0	0,0
1,2	0,0	0,0	0,0
0,6	176,97	17,69	17,69
0,3	392,05	39,20	56,89
0,15	238,24	23,82	80,71
Fundo	192,74	19,28	100
Módulo de finura			1,55
Diâmetro máximo			0,6 mm

A Figura 10 apresenta a curva granulométrica de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), para o resíduo polimérico.

Figura 10: Curva granulométrica do agregado polimérico



Diante dos dados obtidos, e sabendo que a NBR 7211 (ABNT, 2009) classifica os agregados miúdos com módulo de finura variando de 1,55 a 2,20 como pertencentes à zona utilizável inferior, observa-se na tabela 9 que o módulo de finura do PET foi de 1,55 e o diâmetro máximo obtido foi de 0,6 mm, podendo-se considerá-lo como um agregado inserido nesta zona. Ademais, levando em consideração a classificação dos agregados miúdos segundo a sua granulometria, apresentadas na tabela 2, conclui-se que pode ser classificado como um agregado miúdo muito fino.

Como o PET irá substituir parcialmente o agregado miúdo, é importante a análise da sua granulometria, pois suas dimensões certamente influenciarão diretamente no fator água/cimento que será utilizado na mistura, na trabalhabilidade da argamassa no seu estado fresco e, claro, na quantidade de vazios da argamassa no seu estado endurecido.

4.1.3 Caracterização do Cimento

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos para caracterização física do cimento Portland CII Z - 32 utilizado neste estudo.

Tabela 12: Caracterização física do cimento CII Z

Parâmetro	Valor obtido
Massa específica (ABNT NBR 23:2001)	2,91 g/cm ³
Massa unitária (ABNT NBR NM 45:2006)	1,15 g/cm ³
Finura (ABNT NBR 11579:2012)	2,84%

Verifica-se então, que o valor do índice de finura, 2,84%, satisfaz ao valor limite máximo de 12% para este ensaio, como é estabelecido na norma para cimentos Portland compostos, ABNT NBR 11578: 1991.

Segundo Recena (2012), a massa específica real e unitária do cimento é aproximadamente 2,70 g/cm³ e 1 g/cm³, respectivamente. Deste modo, os valores obtidos neste trabalho se aproximam dos valores citados anteriormente. Ademais, percebe-se que a massa específica, 2,91 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.

4.1.4 Caracterização da Cal

Nos estudos de Recena (2012), os valores característicos obtidos de massa específica e massa unitária para a cal foram 2,57 g/cm³ e 0,65 g/cm³, respectivamente.

Comparando os valores obtidos com os que foram apresentados por Recena (2012), verificou-se a proximidade dos mesmos, e, portanto, foram considerados aceitáveis. A Tabela 13 apresenta os valores de massa específica real e unitária para a cal utilizada neste trabalho.

Tabela 13: Caracterização física da Cal

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

4.2 Propriedades das Argamassas

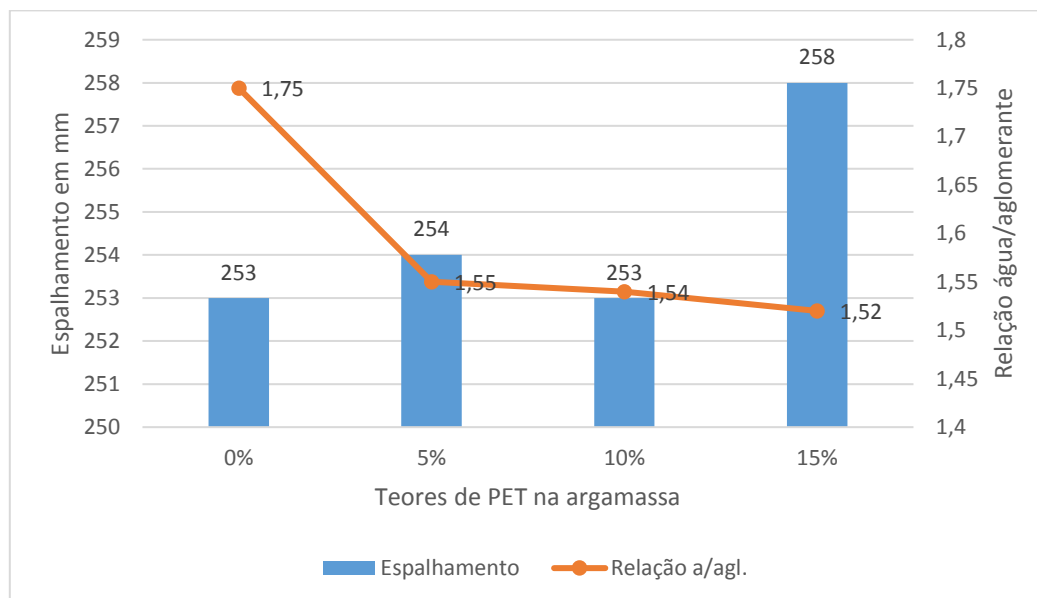
4.2.1 Ensaio no estado fresco

4.2.1.1 Índice de consistência

O ensaio de consistência, usando uma mesa de espalhamento, realizado conforma a norma NBR 13276 (ABNT, 2016), tem o objetivo de avaliar a trabalhabilidade da argamassa de modo a se obter a relação água/aglomerante adequada para a mistura. Dessa forma, o ensaio permitiu a análise da relação direta existente entre a trabalhabilidade e a consistência, bem como a influência que esta sofre pela quantidade de água adicionada na mistura. Levando em consideração que o índice de consistência foi pré-fixado em 255 ± 10 mm, podemos observar os resultados obtidos neste estudo, os quais foram organizados de forma a apresentar a relação água/aglomerante (a/agl.) para o

espalhamento pré-estabelecido em questão para cada teor. A figura 11 apresenta os resultados.

Figura 11: Espalhamento e relação água/aglomerante para cada teor estudado



Com o ensaio foi possível perceber que as argamassas com teores de PET necessitaram de uma quantidade menor de água na mistura para atingir o índice de consistência pré-estabelecido. De acordo com os resultados mostrados na figura 7, a medida que o teor de polímero foi elevado, a relação água/aglomerante diminuiu, de tal modo que para as argamassas com teores de 5 %, 10% e 15% de PET, ocorreram redução de cerca de 11,43%, 12,0% e 13,14%, respectivamente, em comparação à relação água/aglomerante da argamassa de referência.

Levando em consideração que, segundo Bauer (2019), a consistência é a facilidade do concreto ou argamassa escoar e é o mais importante dos fatores que influem na trabalhabilidade, percebeu-se claramente que quanto maior a quantidade de polímero constituindo a argamassa, maior a fluidez desta e, portanto, maior a trabalhabilidade, tendo em vista que com uma menor quantidade de água, quando comparada à utilizada pela argamassa de referência, já se permitiu atingir o índice de consistência desejado.

Essa contribuição dos grãos de PET para melhora da consistência, pode ser devida a determinados fatores, dentre eles estão as características da superfície desse polímero, o bom empacotamento gerado pelos grãos de PET e

as particularidades químicas do termoplástico em estudo. Fatores estes que podem ser comprovados levando em consideração os resultados obtidos neste estudo e a partir de outros trabalhos presentes na literatura.

Damineli et al. (2017) mostraram em seu trabalho, que trata da influência do empacotamento e dispersão de partículas no consumo de cimento de concretos, 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 das partículas 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.

No trabalho realizado por Jucá (2017), por exemplo, a cerca das propriedades mecânicas do politereftalato de etileno, o autor percebeu que a superfície das fibras desse material era extremamente lisa, o que promovia uma grande falta de aderência e, então, gerava uma dificuldade no uso da mesma em setores da engenharia civil. Para gerar segurança na aplicação, viu-se a necessidade de tratamento mecânico superficial e térmico da fibra de PET.

Fontoura (2018), por sua vez, analisou a viabilidade da adição de PET no concreto convencional, e, ao examinar a consistência do concreto, percebeu que, com a adição do polímero obteve-se uma melhora nessa propriedade e, portanto, uma maior trabalhabilidade do concreto. Tal acontecimento foi concluído como relacionado ao fato da fibra de PET ser lisa, proporcionando a formação de uma película de água em torno da mesma.

Já no estudo realizado por Da Silva (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.

Então, levando em consideração os resultados de consistência da argamassa em estudo e as informações apresentadas nas pesquisas de Jucá (2017), Fontoura (2018) e Da Silva (2014) a respeito da superfície lisa do politereftalato de etileno, pode-se considerar o fato como um dos possíveis motivos para a melhora da consistência da argamassa com adição de PET. A

superfície alisada do PET pode ter corroborado para o melhor escorregamento dos grãos de areia, gerando maior mobilidade entre as partículas da mistura e, portanto, melhorando a trabalhabilidade.

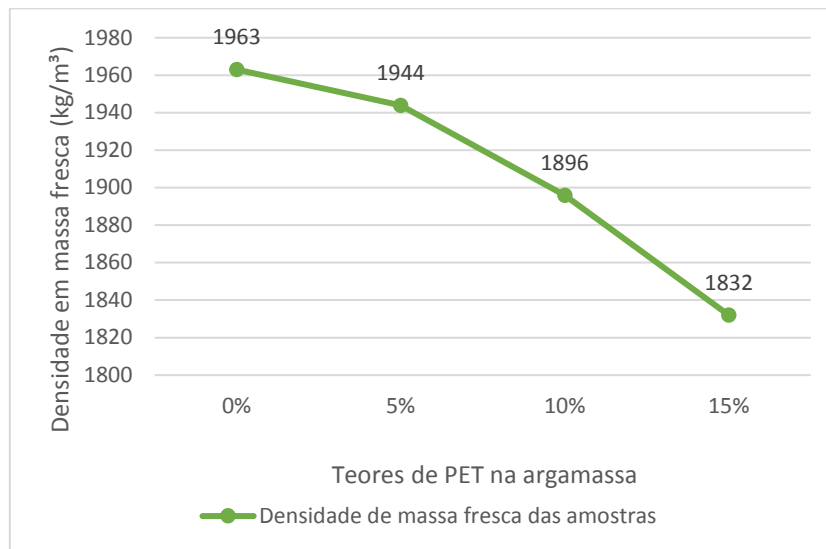
Outro fator que pode justificar a melhora da trabalhabilidade da argamassa com a adição do polímero em estudo, são as características químicas intrínsecas do politereftalato de etileno. Esse termoplástico apresenta uma cadeia polimérica grande e a permeabilidade está diretamente ligada ao peso molecular do elemento, o que torna o poliéster em estudo altamente impermeável (JUCÁ, 2017). Da Silva (2014) explica que o PET é quimicamente inerte, ele apresenta superfície hidrófuga. Verifica-se, assim, que o PET não absorve água como o agregado miúdo convencional. Então, aquela que não for absorvida pelos agregados ou utilizada na hidratação do cimento ficará livre na mistura.

Conclui-se, então, que 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. E, seguindo o mesmo raciocínio, quanto mais polímero existir na mistura, levando em conta que o PET não absorve água na mesma intensidade que a areia, menor é a quantidade de água necessária para atingir a consistência desejada.

4.2.1.2 Densidade de massa fresca e Teor de ar incorporado

O ensaio para determinação da densidade de massa fresca e teor de ar incorporado, como já explanado na metodologia realizada, foi executado segundo a norma NBR 13278 (ABNT, 2005). Os resultados obtidos para a densidade de massa fresca estão representados na figura 12.

Figura 12: Densidade de massa fresca para as argamassas com os diferentes teores de PET.



Conforme os dados apresentados acima, verificou-se a ocorrência de uma redução na densidade de massa com os diferentes teores, de tal forma que quanto maior a quantidade de agregado reciclado de PET adicionada à mistura, menor a densidade de massa obtida. Observa-se que para os teores de 5%, 10% e 15% de PET, quando comparados à argamassa de referência (0%), obtiveram redução de 0,97%, 3,41% e 6,67% para essa propriedade.

Da Silva (2014) em sua pesquisa sobre incorporação de agregados plásticos finos em argamassa, esclareceu que a redução da densidade de massa no estado fresco com a adição de PET é justificada pela densidade individual de cada elemento constituinte da mistura, pois o agregado polimérico em estudo possui uma densidade muito inferior à do agregado miúdo convencional.

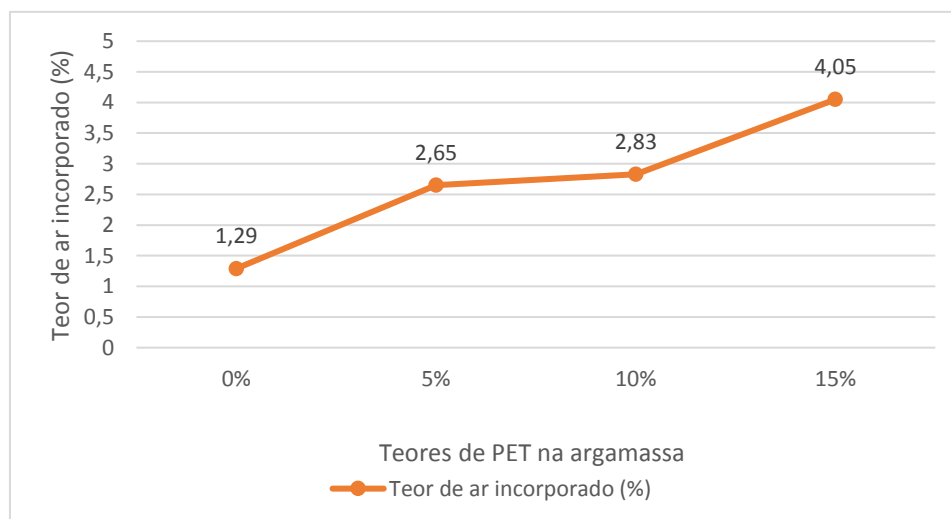
Levando em consideração as informações apresentadas pela norma NBR 13281 (ABNT, 2005), acerca dos requisitos para argamassas destinadas ao assentamento e ao revestimento de paredes e tetos, é importante a realização da classificação de acordo com os valores de densidade de massa obtidos. Dessa maneira, a norma classifica todas as argamassas aqui estudadas como da classe D5, em virtude de todos os valores estarem no intervalo de 1800 e 2200 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.

A figura 13 apresenta os dados correspondentes ao teor de ar incorporado para as argamassas com os diferentes teores em estudo.

Figura 13: Teor de ar incorporado para as argamassas com os diferentes teores



Com relação aos dados relativos ao teor de ar incorporado, apresentaram comportamento contrário aos valores de densidade de massa. Quanto mais agregado polimérico foi acrescentado durante o estado fresco, maior o percentual de ar incorporado nas amostras. Para os teores de 5%, 10% e 15% de PET, quando comparados à argamassa de referência (0%), obtiveram aumento de 1,8%, 2% e 3% para essa propriedade.

Diante dos valores anteriores, e sabendo que, segundo a ASTM C270 (ASTM, 2019), o teor máximo de ar incorporado em argamassas contendo cal é de 14% para não gerar problemas referentes à resistência de aderência à tração, percebe-se que neste trabalho o acréscimo no teor de ar incorporado tem um impacto muito pequeno, tendo em vista que a diferença entre a argamassa de referência e a amostra com teor de 15% de PET é de apenas 3%.

Segundo Pczieccek (2017), o aumento do teor de ar incorporado da argamassa contribui para a melhora da trabalhabilidade da mesma. Em seu trabalho, houve aumento deste parâmetro para as argamassas com teores de borracha, obtendo-se o máximo de 11% de teor de ar incorporado, gerando

melhora na trabalhabilidade. Seguindo esse raciocínio, percebe-se que, o pequeno acréscimo dessa propriedade pode, além dos fatores já discutidos anteriormente, ter contribuído levemente para uma melhora na trabalhabilidade das argamassas com PET em estudo.

Segundo Vaz (2016), o ar incorporado nada mais é do que os vazios formados pela entrada de ar no interior das argamassas, que ocorre principalmente devido ao processo de mistura mecânica que acaba introduzindo ar na argamassa. Vaz (2016) concluiu, através de seus resultados e de explicações de Mansur (2007), que argamassas modificadas com polímeros apresentam teor de ar incorporado maior que as argamassas sem adição dos mesmos, e que a presença de agentes tensoativos nas primeiras, denominados surfactantes, contribuem para esse aumento. Os surfactantes presentes nas argamassas com polímeros são moléculas capazes de modificar propriedades físico-químicas das substâncias e diminuir a tensão superficial, o que contribui para gerar estabilidade as bolhas incorporadas na argamassa no processo de mistura. Essas bolhas se apresentam, então, pequenas e de difícil remoção.

Então, tendo em conta que tanto Vaz (2016), com sua avaliação do desempenho de argamassas modificadas com areia de PET, como Duó (2017), com o estudo da aderência e absorção de água em argamassas de revestimento com agregados reciclados de PET em substratos de blocos cerâmicos, assim como neste trabalho, obtiveram diminuição dos valores de densidade de massa fresca e acréscimo nos valores de teor de ar incorporado no estado fresco com a adição de PET nas argamassas, verifica-se a coerência dos valores obtidos nesta pesquisa para essas propriedades.

4.2.2 Ensaio no estado endurecido

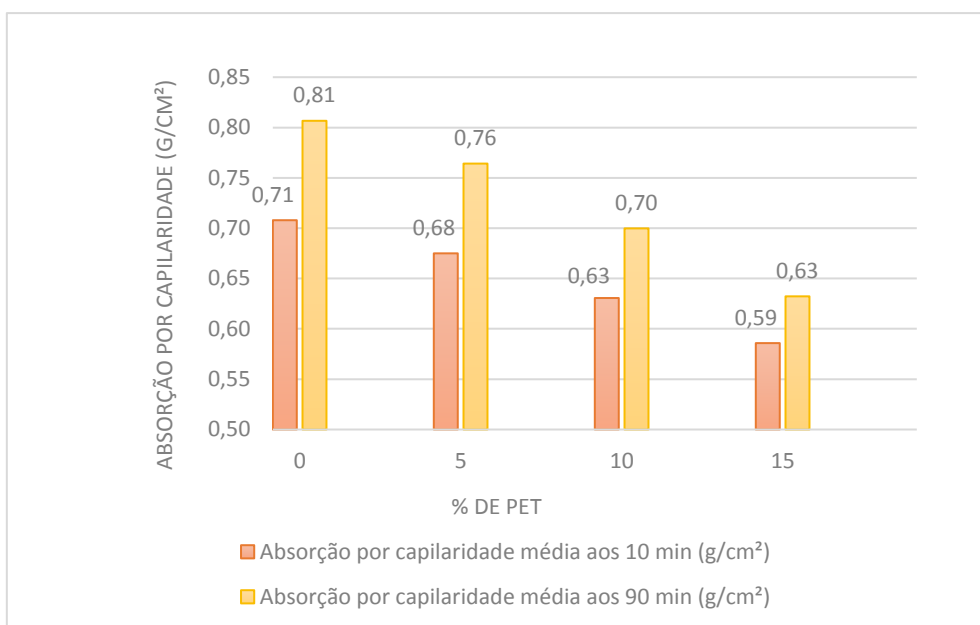
4.2.2.1 Determinação das propriedades físicas das argamassas modificadas

4.2.3.1.1 Determinação da absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade foi realizada em duas leituras, como recomenda a norma NBR 15259 (ABNT, 2005), ou seja, aos

10 minutos e aos 90 minutos. Os resultados médios obtidos estão descritos no gráfico da figura 14.

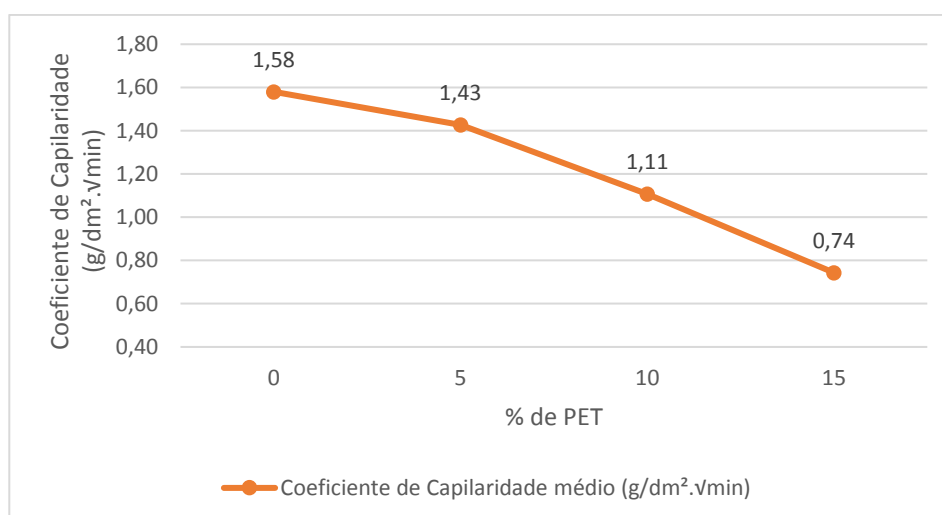
Figura 14: Valores de absorção por capilaridade das argamassas aos 10 minutos e 90 minutos



Analisando os valores apresentados acima, percebe-se que a absorção capilar, tanto para o tempo de 10 minutos como de 90 minutos, diminui de forma gradativa conforme se aumenta a quantidade de agregados poliméricos nas misturas. Observa-se que os valores para todos os teores são menores que os valores de absorção por capilaridade da argamassa de referência. A redução mais significativa da absorvidade foi com a substituição de 15%, na qual a diferença percentual entre esta e a argamassa de referência foi de 16,9% aos 10 minutos e 22,2% aos 90 minutos.

Os valores para coeficiente de capilaridade das amostras seguem o mesmo padrão de decréscimo, como observado na figura 15. Assim, observa-se que a diferença mais significativa também é da amostra com 15% de substituição, e que as amostras com teores de agregado polimérico apresentam valores menores que a argamassa de referência. Os valores detalhados de absorção capilar e coeficientes de capilaridade se encontram no apêndice A.

Figura 15: Coeficientes de capilaridade das amostras



De acordo com a classificação da tabela 4 da NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as amostras aqui estudadas se enquadram dentro das classes C1, que possui valores para o coeficiente de capilaridade menores ou iguais a 1,5 g/dm².min^{1/2}, e C2, com coeficientes entre 1,0 e 2,5 g/dm².min^{1/2}.

Bauer (2013) diz que as argamassas para aplicações gerais devem apresentar valores pertencentes à classe C3 (2,0 a 4,0 g/dm².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.

É importante salientar, como explica Santana (2017), que vários são os fatores que podem influenciar na absorção por capilaridade e, em virtude disso, apenas alguns ensaios tradicionais não são suficientes para ter a completa compreensão a respeito do comportamento da argamassa referente a sua absorção por capilaridade, pois seria necessário um estudo minucioso da microestrutura do material, já que a estrutura interna de uma argamassa permite diferentes formas de transporte de umidade por capilaridade. Dessa forma, com base nos resultados obtidos neste trabalho e em estudos de outras pesquisas presentes na literatura, serão analisadas as possíveis causas dos comportamentos observados.

De acordo com Almeida (2016), que trabalhou com incorporação de agregado miúdo de PET em peças de concreto para pavimento intertravado, há

a necessidade de uma quantidade correta de água nas misturas, pois se a quantidade de água for inferior à necessária, não ocorrerá a hidratação completa do cimento. E, por outro lado, se houver água em excesso, após finalizada toda a hidratação do cimento, a água de amassamento em excesso promove a formação de capilares em seu interior, aumentando os vazios e contribuindo para o aumento da absorção capilar quando no estado endurecido.

Assim, diante dessas informações, percebe-se que neste trabalho a formação de vazios nas argamassas poliméricas, após as reações de hidratação do cimento, provavelmente foi muito pequena, pois, como já discutido anteriormente, o PET por si só já promoveu uma elevada trabalhabilidade, além de ser hidrófobo e não absorver água como a areia, necessitando, então, de menor quantidade de água para atingir a consistência desejada, visto que foi acrescentada água na mistura somente até atingir o índice de consistência pré-estabelecido. Dessa forma, o processo não favoreceu à existência de água de amassamento em excesso e, desse modo, também não favoreceu a formação de vazios, o que justifica o fato de as amostras com percentual de agregado polimérico apresentarem valores de absorção inferiores aos da argamassa de referência.

Ademais, segundo Damineli et al. (2017), como já mencionado, 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, obviamente contribui para redução da absorção e aumento da resistência.

Dentro desse aspecto, com a pequena granulometria dos grãos de PET, que apresentaram módulo de finura de apenas 1,55 e dimensão máxima de somente 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.

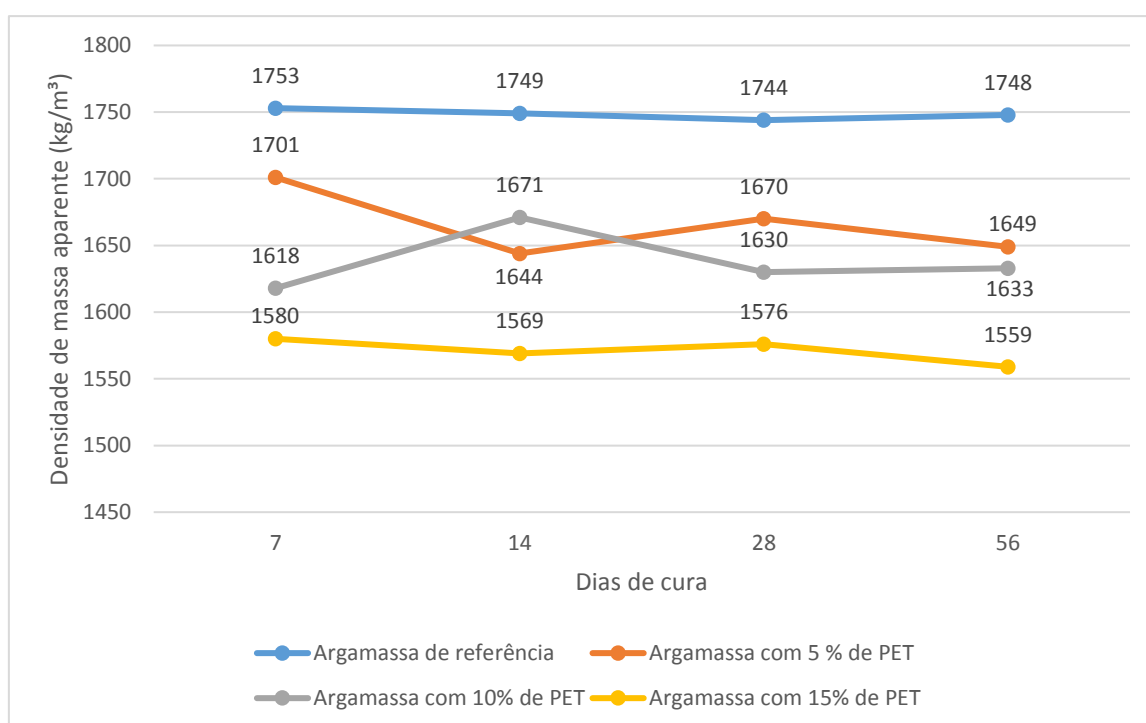
Segundo Pczieccek (2017), a quantidade de água absorvida por um material está diretamente relacionada com o índice de vazios presentes em sua microestrutura e, conseqüentemente, sua permeabilidade. Lintz et al. (2012) acrescenta que é uma medida da durabilidade das peças, pois indiretamente

aponta os vazios existentes, e explica que a diminuição da permeabilidade da peça contribui diretamente para o aumento da resistência ao processo de eflorescência, muito bom para argamassas aplicadas em áreas úmidas. Com essas informações, pode-se inferir que as argamassas poliméricas apresentadas neste trabalho apresentam características que favorecem a uma maior durabilidade e uma maior resistência ao processo patológico da eflorescência.

4.2.3.1.2 Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido

Os resultados obtidos para a densidade de massa aparente no estado endurecido, determinados segundo a NBR 13280 (ABNT, 2005), estão representados na figura 16. O ensaio foi realizado para 7, 14, 28 e 56 dias de idade, a fim de observar o comportamento dessa propriedade ao decorrer do tempo de cura.

Figura 16: Densidade de massa aparente das amostras ao decorrer do tempo de cura



Diante dos dados apresentados, observa-se que com a incorporação do agregado polimérico, da mesma forma que aconteceu com a densidade de massa no estado fresco, houve redução da densidade de massa aparente no

estado endurecido, o que já era esperado devido ao polímero apresentar densidade cerca de 43,4% menor do que a da areia. Considerando a idade de cura de 28 dias, que é a idade recomendada pela norma para a realização do ensaio, para as substituições de 5%, 10% e 15% de PET, as reduções da densidade aparente foram de 4,24%, 6,54% e 9,63% respectivamente.

Barros (2018) estudou as propriedades das argamassas com uso de vermiculita expandida como substituto da areia natural e explicou que argamassas com agregados leves apresentam densidades menores do que argamassas sem os mesmos. No caso de seu trabalho, as argamassas com substituições de 25%, 50% e 75% de vermiculita expandida resultaram em uma diminuição de 7,6%, 25% e 46% da densidade de massa aparente, respectivamente. Segundo o autor, o uso desse tipo de argamassa é muito interessante pelo fato do revestimento se tornar bastante leve e acarretar uma diminuição das cargas transmitidas às fundações.

Silva (2019), por sua vez, avaliou a viabilidade da substituição parcial da areia por politereftalato de etileno em argamassas, de forma similar a este trabalho. Foi analisada em sua pesquisa a densidade dos corpos de prova e constatou-se a redução dessa propriedade com a incorporação de PET triturado. Silva (2019) justificou o ocorrido com o fato de a massa específica dos grãos poliméricos ser inferior a massa específica da areia. Verificou, então, reduções de 12,7% e 16,9% dessa propriedade para as argamassas com substituições de 5% e 10% de polímero, respectivamente, aos 28 dias de cura.

Guendouz et al. (2016) trabalharam com a utilização de dois tipos de resíduos de plástico como agregados miúdos para produção de concreto, PET em forma de tiras e polietileno de baixa densidade (LDPE). Os autores perceberam que o uso de resíduos plásticos, tanto PET quanto LDPE diminui de 10 a 15% a densidade do concreto.

Segundo Canellas (2005), a redução da densidade de argamassas e concretos com a incorporação de agregados leves é positiva no ponto de vista de que favorece à produção de peças pré-moldadas que não exercem funções estruturais, pois elas passam a ser mais leves.

Ademais, de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), as argamassas de referência e com teores de agregados de PET estudadas neste trabalho são classificadas de acordo com a Tabela 2 – Densidade de massa aparente no

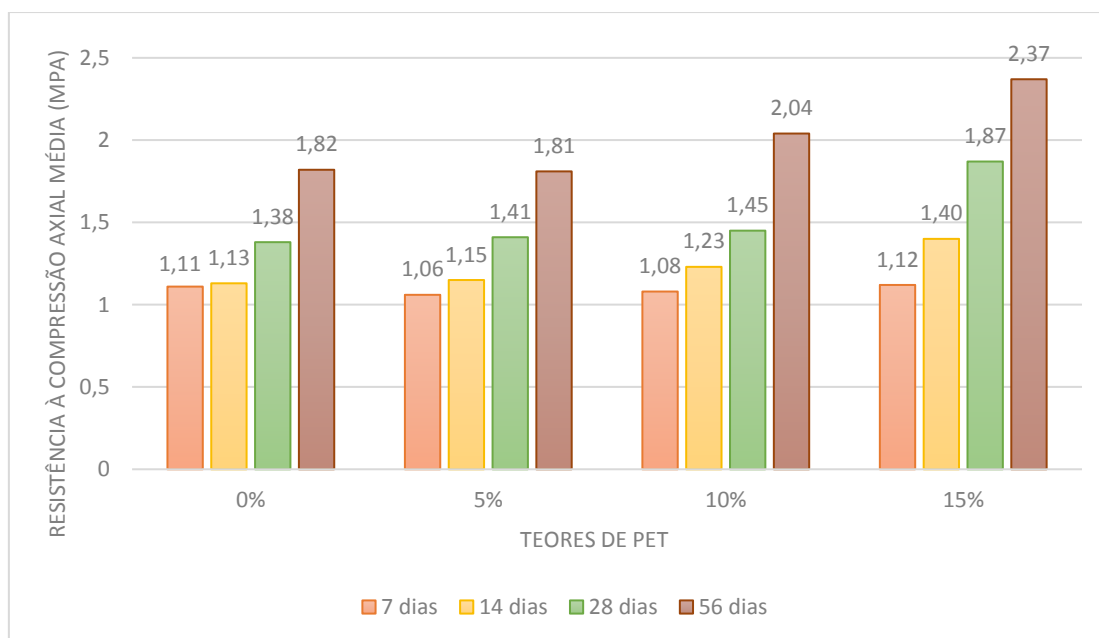
estado endurecido, apresentada na página 3, como pertencente às classes M4 (valores de 1400 a 1800 kg/m³) e M5 (de 1600 a 2000 kg/m³).

4.2.3.2 Determinação das propriedades mecânicas das argamassas modificadas

4.2.3.2.1 Determinação da resistência à compressão simples

O ensaio de Resistência à compressão foi realizado para as idades de 7, 14, 28 e 56 dias. A figura 17 apresenta os dados obtidos no ensaio.

Figura 17: Resistência à Compressão Axial das amostras estudadas



É possível perceber com os dados apresentados que a variação não é muito significativa com o incremento de agregado polimérico nas amostras até os 28 dias de cura. Para as substituições de 5% e 10% até esta idade de cura, por exemplo, praticamente não há mudanças nos valores de resistência. Só se começa a perceber um aumento mais significativo da resistência à compressão para idade de 28 dias no teor de 15%. O aumento mais significativo da resistência foi para a argamassa com teor de 15% na idade de cura de 56 dias, sendo de 30,22% quando comparada à argamassa de referência.

Segundo a tabela 7 da NBR 13281 (ABNT, 2005) classifica as amostras estudadas neste trabalho, quanto à compressão simples, tendo em vista que o maior valor obtido foi de 2,42 MPa, como sendo argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos da classe P1 (com valores menores que 2,0 Mpa) e P2 (entre 1,5 e 3,0 Mpa).

O aumento da resistência com a incorporação de agregado de PET era esperado, tendo em vista que a relação água/aglomerante reduziu com o aumento do teor de agregado polimérico. Esse aumento pode ser justificado também, tendo em vista que foi observada a redução na absorção por capilaridade, pelo melhor empacotamento das partículas presentes na mistura e, portanto, pelo melhor preenchimento dos vazios. Podemos comprovar essas justificativas através de elucidações presentes na literatura.

Neville (2016) explica que, na prática, a relação água/ cimento é o maior fator individual da resistência que pode ser obtida de uma mistura trabalhável de cimento, agregados e água adequadamente lançada, e que, em condições adequadas de adensamento, a sua resistência é considerada inversamente proporcional à relação água/ cimento. Diante disso, como foi necessária uma quantidade de água menor na mistura com adição de polímero para atingir a consistência desejada, conclui-se que esse fato corroborou para o aumento da resistência à compressão axial.

A respeito do empacotamento dos grãos, tanto Bauer (2019) quanto Neville (2016) afirmam que distribuições granulométricas contínuas resultarão em um volume de vazios menor, quando comparadas a distribuições uniformes, ou seja, quando partículas extremamente finas são incluídas na mistura, elas preenchem os vazios deixados pelos agregados de maior tamanho, conferindo melhor empacotamento e melhor resistência.

Ademais, Bauer (2019) acrescenta que a exsudação é uma forma de segregação que prejudica consideravelmente a resistência e a durabilidade, sendo importante reduzi-la ao máximo. Não só a diminuição do excesso de água de amassamento contribuirá para redução da exsudação, mas, considerando-se que a diminuição dos espaços intergranulares aumenta a resistência ao percurso ascendente da água, um melhor empacotamento das partículas constituintes da mistura também favorecerá para redução desse fenômeno. Assim, o bom arranjo

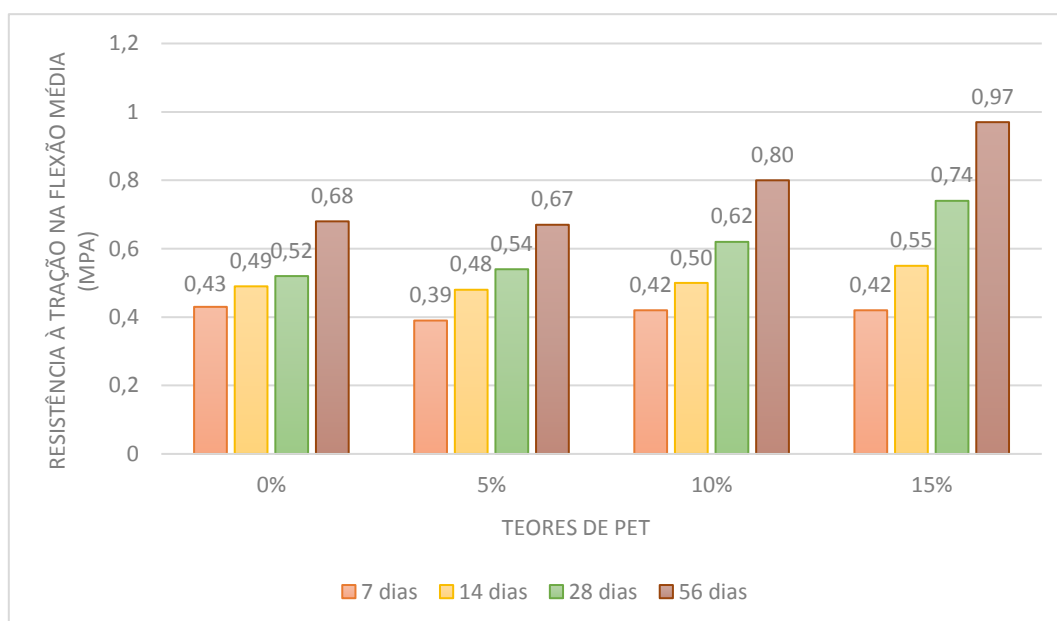
estrutural das partículas das argamassas poliméricas deste estudo favorece a redução da exsudação, que, por sua vez, favorece à resistência.

É importante observar que vários trabalhos que analisaram a incorporação de PET em concretos, como a pesquisa de Almeida (2016), o trabalho de Sadeghifar e Sohrabi (2014), entre outros, obtiveram resultados opostos aos obtidos neste trabalho com argamassa, obtendo aumento da absorção e redução da resistência. Porém, é relevante ressaltar que, além dos casos que utilizaram agregados com granulometria ou forma que não contribuiu para o bom empacotamento, no caso de concretos, a relação água/ cimento é fixada no traço e, portanto, é utilizada a mesma quantidade de água para todas as amostras, o que favorece o aumento do excesso de água de amassamento nas amostras com polímero e, então, o surgimento de vazios, aumentando a porosidade e reduzindo a resistência. Nos casos de argamassa, como neste trabalho, é adicionada água apenas até atingir a consistência pré-estabelecida, reduzindo o excesso.

4.2.3.2.2 Determinação da resistência à tração na flexão

O ensaio de Resistência à tração na flexão também foi realizado para as idades de 7, 14, 28 e 56 dias. A figura 18 apresenta os dados obtidos no ensaio.

Figura 18: Resistência à Tração na Flexão das amostras estudadas



Notou-se que, assim como nos resultados obtidos para a resistência à compressão, os valores de resistência à tração na flexão aumentam com a incorporação de agregado polimérico na mistura, sendo observado uma elevação mais significativa também no teor de 15% de PET e na idade de 56 dias. Dessa maneira, percebe-se que os mesmos raciocínios discutidos anteriormente, relativos a menor quantidade de água utilizada nas argamassas com PET e o possível melhor empacotamento, também valem para análise dos dados de resistência à tração.

De acordo com a classificação da NBR 13281 (ABNT, 2005), tendo em vista que o maior valor de resistência a tração na flexão obtido foi de 0,97 Mpa, todas as amostras ensaiadas estão inseridas na classe R1 da tabela 3 da referida norma, que possui valores menores ou iguais a 1,5 Mpa.

Percebe-se a coerência dos valores deste trabalho quando se compara aos valores obtidos por outras pesquisas. Tanto Duó (2017) como Vaz (2016), por exemplo, obtiveram valores de resistência à tração na flexão menores que os de resistência à compressão axial, mas apresentando comportamentos similares, assim como ocorreu no presente estudo.

Contudo, conclui-se que a incorporação de agregado fino de PET em argamassas, substituindo parcialmente o agregado miúdo convencional, é bastante positiva, pois, além de necessitar de menor quantidade de água para obter-se a consistência desejada, gera bom empacotamento das partículas da mistura, que são dois fatores que contribuem para melhorar as resistências à compressão e à tração na flexão.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 Considerações Finais

O presente trabalho buscou avaliar as propriedades físicas e mecânicas de argamassas de revestimento com a utilização de resíduo de politereftalato de etileno substituindo parcialmente o agregado miúdo e com granulometria bem menor do que o mesmo. Com os ensaios e estudos realizados, observou-se resultados satisfatórios em relação às propriedades da argamassa tanto no estado fresco como no estado endurecido.

A partir dos resultados obtidos com a caracterização, percebeu-se que os materiais utilizados para a produção da argamassa estavam de acordo com os parâmetros estabelecidos pelas normas específicas para cada componente. O agregado polimérico foi considerado um agregado miúdo muito fino e, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), classificado como sendo da zona utilizável inferior.

No estado fresco pode-se concluir que:

- A medida que se aumentava o teor de resíduo polimérico, menos água necessitava-se na mistura para atingir o índice de consistência pré-estabelecido;
- A incorporação do PET, devido à característica lisa de sua superfície, o bom empacotamento dos grãos na mistura e às particularidades químicas intrínsecas do mesmo, tornou a argamassa mais trabalhável mesmo com menor quantidade de água;
- Houve redução da densidade de massa das argamassas poliméricas. Como a densidade do agregado polimérico é muito inferior à da areia, quanto maior a quantidade de agregado reciclado de PET adicionado à mistura, menor a densidade de massa;
- Quanto mais agregado polimérico foi acrescentado, maior foi o percentual de ar incorporado das amostras, porém esse acréscimo teve um impacto pequeno quando comparado aos valores para a argamassa de referência.

No estado endurecido, pode-se concluir a respeito das argamassas poliméricas que:

- A absorção por capilaridade diminuiu de forma gradativa conforme se aumentou a quantidade de agregados poliméricos nas misturas. Isso devido à menor quantidade de água utilizada nas amostras com PET, o que não favoreceu à existência de água de amassamento em excesso e, portanto, à formação de vazios;
- Segundo parâmetros normativos, todas as amostras estudadas se enquadram dentro dos valores recomendados tanto para aplicações gerais quanto para paredes expostas à chuva;
- Observou-se que as argamassas poliméricas estudadas neste trabalho apresentaram características que favorecem a uma maior durabilidade e resistência à eflorescência;
- Houve redução da densidade de massa aparente no estado endurecido com a incorporação do PET nas argamassas. Fato positivo, pois torna o revestimento desse tipo bastante leve;
- Percebeu-se aumento nos valores de resistência à compressão axial com a incorporação de polímero nas argamassas, devido a menor quantidade de água utilizada e o melhor empacotamento das partículas da mistura. Só para 15% de PET aos 28 dias começou-se a perceber um acréscimo de resistência. O mais significativo foi neste mesmo teor na idade de 56 dias de cura;
- Os valores observados para a resistência à tração na flexão, embora menores, apresentaram comportamento similar aos de resistência à compressão axial. Ocorreu um aumento da resistência à tração com a incorporação de polímero, sendo o mais significativo também no teor de 15% aos 56 dias.

Contudo, foi possível comprovar a viabilidade técnica da utilização de agregado fino de PET em substituição parcial ao agregado miúdo convencional em argamassas para revestimento. Ademais, utilizar resíduos de PET na construção civil se caracteriza como uma alternativa sustentável, tendo em vista

que reduz o consumo exacerbado do agregado miúdo convencional, reduz o impacto ambiental do descarte de PET e pode ainda agregar valor a este resíduo.

5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

A fim de aprofundar as pesquisas referentes ao tema abordado no presente trabalho, sugere-se a realização dos seguintes estudos para trabalhos futuros:

- Avaliação mais precisa da superfície dos grãos de PET e dos métodos de tratamento superficial dos mesmos para melhoria de suas propriedades como agregados;
- Avaliação da durabilidade e/ou da viabilidade econômica de argamassas com incorporação de PET;
- Análise mais profunda das manifestações patológicas favorecidas ou combatidas com a incorporação de PET em misturas cimentícias;
- Estudos dos efeitos da incorporação de adições diferentes da cal e/ou de aditivos plastificantes em argamassas com PET.

Observação: É fundamental ressaltar que este trabalho foi realizado no período da pandemia de coronavírus, de tal maneira que, ainda durante a realização dos experimentos, os laboratórios da Universidade Federal de Campina Grande foram fechados. O ensaio de microscopia eletrônica de varredura, por exemplo, para análise das características da superfície do Politereftalato de Etileno, e o ensaio de retenção de água, estavam planejados para serem realizados, porém, com o decreto da UFCG para fechamento dos laboratórios, foram impossibilitados tais procedimentos. Contudo, diante de todos os resultados já obtidos até aquele momento, foi possível a realização de proveitosa pesquisa com valiosas discussões.

REFERÊNCIAS

ABIPET – **Associação Brasileira da Indústria do PET**. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=81>.

Acesso em: 20/11/2019.

ABIPET- **Associação Brasileira da Indústria do PET**. Censo da Reciclagem de PET no Brasil, décimo censo da Reciclagem de PET no Brasil, 2016. Disponível

em:<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>. Acesso em: 20/11/2019.

AGOSTINHO, C. **Estudo da Evolução do Desempenho no Tempo de Argamassas de Cal Aérea**. 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, pp. 5-23. 2008.

AKCELRUD, Leni. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. Barueri, São Paulo: Manole, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos),

ALMEIDA, Salomão Pereira de. **Uso de politereftalato de etileno (PET) como agregado em peças de concreto para pavimento intertravado**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia. Campina Grande, PB. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C-270**: Standard specification for mortar for unit masonry. United States, 2019.

ANDRADE, H. Polímeros. In: Isaia, G. C. (Org). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007, p.1269-1285.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7211: **Agregados para concreto** - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7215. **Cimento Portland** – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos** – Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578. **Cimento Portland Composto**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 11579: **Determinação do índice de finura do cimento**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: **Concreto de cimento portland** - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, p. 29. 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13278: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos**– Determinação da densidade de massas e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13279: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos** – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13280: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos** – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13281: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15259: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade**. Rio de Janeiro, 2005.

BARROS, I. M. D. S. **Análise térmica e mecânica de argamassa de revestimento com adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRN. Natal, p. 86. 2018.

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

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

BORRELLI E., Binders. In: **ARC Laboratory Handbook**, v. 4. Rome: ICCROM, 1999, p. 60-71. Disponível em: http://www.iccrom.org/ifrcdn/pdf/ICCROM_14_ARCLabHandbook00-1t_en.pdf. Acesso em: 5 nov. 2019.

BOTAS, Sandro. **Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios**. 2009. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa. Dissertação de Mestrado. 2009.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Construção Sustentável**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/urbanismo-sustentavel/constru%C3%A7%C3%A3o-sustent%C3%A1vel>>. Acesso em: 20 de Novembro de 2019.

CANELLAS, Susan Sales. **Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassas**. 2005. Dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. 2005.

CARASEK, H. Argamassas, **Livro Materiais de Construção**, capítulo 26, Volume 01, IBRACON, 8ª Edição. 2017.

CHAGAS FILHO, M. B. **Estudo de agregados lateríticos para utilização em concretos estruturais**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2013.

CHILTON, T.; BURNLEY, S.; NESARATNAM, S. *A life cycle assessment of the close loop recycling and thermal recovery of post-consumer PET*. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n.7, p. 1241 – 1249, 2010.

CINCOTTO, M. A. Conceitos básicos sobre tecnologia da cal. In: Reunião aberta da indústria da cal- Uso da cal na engenharia civil, 5, 1985, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 1985, p. 15-26.

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, v. 1. Cap. 22. P. 693-727.

CRUZ, N. **Estudo da Influência da Granulometria das Areias no Desempenho de Rebocos de Ligante Hidráulico**. 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, pp. 3-25. 2008.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G. ; JOHN, V. M. . **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.

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

DUÓ, Danielli. **Estudo da aderência e da absorção de água em argamassas de revestimento com agregados reciclados de PET em substratos de blocos cerâmicos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.

EUROPEAN MORTAR INDUSTRY ORGANIZATION – EMO. **History**. Disponível em: <http://www.euromortar.com>. Acesso em: 22 de outubro de 2019.

FIORITO, Antonio J.S.I. **Manual de argamassas e revestimentos**: estudos e procedimentos de execução / Antonio J.S.I. Fiorito. - 2. ed. - São Paulo: Pini, 2009.

FONTOURA, Talissa Ribeiro. **Análise da Viabilidade da Adição de Fibra de Garrafa PET no Concreto Convencional**: 2018. 73p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas, Foz do Iguaçu, 2018.

GALLEGOS, H. **Albañileria estructural**. 2. ed. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Fondo editorial, 1989.

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.

GORNI, Augusto A. **Introdução aos Plásticos**. 2003. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/intropol.html>>. Acesso em: 8 de nov. de 2019.

GUENDOZ, M. DEBIEB, F. BOUKENDAKDJI, O. KADRI, E. H. BENTCHIKOU, M. SOUALHI, H. **Use of plastic waste in sand concrete**. In: Journal Materials. Environmental. Sci. 7 (2) (2016) 382-389. ISSN: 2028-2508.

GUIMARÃES, José Epitácio Passos. Epitome da História da Mineração. São Paulo: Ant. Ed. Secretaria de Estado da Cultura, 1981.

HENZ, Carla – **Análise experimental de compatibilidade das argamassas de revestimento e encunhamento**. 2009. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Civil. Graduação em Engenharia Civil. 2009.

JARDIM, R.R. **Estudo da viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo por agregado miúdo reciclado de PET em concretos convencionais**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**. 2000. 102 p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

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.

LEAL, Márcio Manuel Rodrigues. **Desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado**. 2013. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico de Setúbal. Disponível em: http://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/3954/1/Desenvolvimento%20argamassas%20revestimento%20com%20comportamento%20termico%20melhorado_M%C3%A1rcio%20Leal.pdf. Acesso em: 22 de outubro de 2019.

LINTZ, Rosa Cristina Cecche. BARBOSA, Luísa Andréia Gachet. SEYDELL, Maria Rachel Russo. JACINTHO, Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila.

Avaliação do comportamento de concreto contendo borracha de pneus inservíveis para utilização em pisos intertravados. In: Revista IBRACON. 2012.

MANO, ELOISA B.; MENDES LUÍS C. **Introdução a polímeros 2ª revista ampliada.** São Paulo, 1998, Editora Edgar Blucher LTDA.

MANO, ELOISA BLASOTTO. **Polímeros como materiais de engenharia.** São Paulo: Blucher, 1991.

MANSUR, A. A. P. **Mecanismos Físico-Químicos de Aderência na Interface Argamassa Modificada com Polímeros/Cerâmica de Revestimento.** 2007. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte. 2007

MARGALHA, Maria Goreti. Argamassas. 2011. **Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património.** Universidade de Évora. Disponível em: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/4969/1/Argamassas.pdf>. Acesso 23 de outubro de 2019.

MELLO, Anselmo Lima et al. **Utilização de resíduos de PEAD como alternativa aos agregados naturais em argamassa.** 2011. Tese de Doutorado. Master Dissertation in Civil Engineering, Universidade Federal da Bahia, Salvador. Disponível em <http://www.meau.ufba.br/site/node/1659>. Acesso em: 19 de Novembro de 2019.

MENDONÇA, A. M. G. D; MONTEIRO H. B. S; CHAGAS FILHO, M. B. Avaliação das resistências de concretos com adição de resíduo oleoso da indústria de e & p de petróleo sob influência da umidade. In: **X Congresso de Iniciação Científica da UFCG**, 2013.

MENDONÇA, B. **Estudo do Desempenho das Argamassas Hidráulicas – Influência do Ligante.** 2007. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, pp. 6-9. 2007.

MODRO, NLR. **Desenvolvimento e Caracterização de Concreto de Cimento Portland Contendo Resíduos Poliméricos de PET.** 2008. Tese de Doutorado. Dissertação de M. Sc., UNIVILLE, Joinville, SC, Brasil, 2008. Disponível em: http://univille.edu.br/data/sitelimages/8/Dissertacao_Neilson_Luiz_Ribeiro_Modro.pdf. Acesso 20 de Janeiro de de 2019.

NASCIMENTO, C. R., PACHECO, E. B., & DIAS, M. L. (1997). **Reciclagem de Garrafas de PET.** Revista de Química Industrial. n. 706/707, mai./ago., p.14-21.

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

PCZIECZEK, Adriane. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Joinville, 2017.

PENAS, F. **Argamassas de Cal Hidráulica para Revestimentos de Paredes**. 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, pp. 20-29. 2008.

PEDREIRO faz casa 'ecologicamente correta' com garrafas pet em MG. **G1**, Minas Gerais, 6 de dez. 2014. Disponível em: <http://glo.bo/1w1iv8c>. Acesso em: 22 de novembro de 2019.

PEREIRA, Caio. Argamassa: O que é, principais tipos e propriedades. **Escola Engenharia**, 2018. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/argamassa/>. Acesso em: 13 de novembro de 2019.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo Argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: editora universitária da PUCRS, 2012. 188p.

ROLIM, A. M., & NASCIMENTO, L. F. (2000). **Oportunidades na reciclagem de PET e inovação**: estudos de dois casos. XXI Simpósio de Gestão da Inovação Tecnológica, São Paulo.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLLI, M. A.; Poli (Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem. **Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 19, n. 2, p. 121-132, 2009.

SADEGHIFAR, Adel. SOHRABI, Mohammad Reza. **Investigating the properties of mechanical concrete containing waste plastic bottles replaced instead rock material**. In: Interdisciplinary Journal of Contemporary Research In Business. Vol 5. Fev-2014.

SAIBA como as garrafas PET estão sendo utilizadas na construção civil. **CREA**, Alagoas, 3 de jan. 2019. Disponível em: <http://www.crea-al.org.br/2019/01/inovacao-e-sustentabilidade-como-as-garrafas-pet-estao-servindo-de-insumo-para-construcao-civil/>. Acesso em: 22 de novembro de 2019.

SANTANA, B. V. DE; ALEIXO, I. V. **Avaliação da absorção por capilaridade de argamassas para revestimento com diferentes aditivos impermeabilizantes**. Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica. Centro Universitário de Brasília - UNICEUB, 2017.

SANTIAGO, Cybèle Celestino. **Argamassas tradicionais de cal**. Salvador Bahia 2007. Editora da Universidade federal da Bahia.

SHEN, L.; WORRELL, E.; PATEL, M.K. Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to fibre recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 11, p. 34-52, 2010.

SIDDIQUE, R.; KHATIB, J.; KAUR, I. **Use of recycled plastic in concrete: a review**. *Waste Management*, v. 28, p. 1835–52, 2008.

SILVA, J.S. **Estudos de concretos de diferentes resistências à compressão quando submetidos a altas temperaturas sem e com incorporação de fibras de politereftalato de etileno (PET)**. 2013. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SILVA, R.O. **Avaliação da viabilidade da substituição de parcial do agregado miúdo por politereftalato de etileno (PET) em argamassas**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

SILVA, T.C.; MIRANDA, L. F. **Estudo comparativo das propriedades do poli (tereftalato de etileno) virgem e reciclado**. Universidade Mackenzie, Departamento de Engenharia de Materiais, São Paulo, 2003. Disponível em: http://www.mackonline.com.br/fileadmin/Graduacao/EE/Revista_on_line/Estudo_Comparativo_Poli.pdf. Acesso 3 de dezembro de 2019.

SOARES, A. P. D. S.; MARMORE, I. A. P. **Estudo comparativo do desempenho térmico da argamassa convencional e com adição de vermiculita**. UCB. Brasília, p. 40. 2016

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.

WELLE, F. *Is PET bottle-tobottle recycling safe? Evaluation of post-consumer recycling processes according to the EFSA guidelines*. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 79, n. 11, p. 41-45, 2013.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Espalhamento das misturas para determinação do índice de consistência e relação água/aglomerante.

PET (%)	Relação a/agl.	E1 (mm)	E2 (mm)	E3 (mm)	E médio (mm)
0%	1,75	250	253	257	253
5%	1,55	256	250	255	254
10%	1,54	252	253	254	253
15%	1,52	257	257	259	258

E1 = espalhamento 1; E2 = espalhamento 2; E3 = espalhamento 3; a/agl = água/aglomerante.

APÊNDICE B – Determinação de densidade de massa fresca.

PET (%)	mv (g)	mc (g)	vr (cm³)	d (kg/m³)
0%	99,33	884,52	400	1.963
5%	99,33	877,10	400	1.944
10%	99,33	857,80	400	1.896
15%	99,33	832,20	400	1.832

mv = massa do recipiente; mc = massa do recipiente com argamassa; vr = volume do recipiente; d = densidade

APÊNDICE C – Determinação do teor de ar incorporado.

PET (%)	d (g/cm³)	dt (g/cm³)	A (%)
0%	1,96	1,99	1,29
5%	1,94	2,00	2,65
10%	1,90	1,95	2,83
15%	1,83	1,91	4,05

d = densidade real; dt = densidade teórica; A = teor de ar incorporado

APÊNDICE D – Determinação da absorção por capilaridade e coeficiente de capilaridade individuais e médios em 10 minutos e 90 minutos para idade de cura de 28 dias.

PET (%)	CP	m0 (g)	m10 (g)	m90 (g)	C (g/dm².√min)	C médio (g/dm².√min)	A10 (g/cm²)	A10 média (g/cm²)	A90 (g/cm²)	A90 média (g/cm²)
0	1	325,21	336,44	337,98	1,54	1,58	0,70	0,71	0,80	0,81
	2	325,87	336,68	338,3	1,62		0,68		0,78	
	3	326,27	338,21	339,79	1,58		0,75		0,85	
5	4	387,89	398,1	399,47	1,37	1,43	0,64	0,68	0,72	0,76
	5	334,93	346,11	347,52	1,41		0,70		0,79	
	6	345,95	356,96	358,46	1,50		0,69		0,78	
10	7	383,66	393,74	394,9	1,16	1,11	0,63	0,63	0,70	0,70
	8	334,51	344,65	345,7	1,05		0,63		0,70	
	9	314,52	324,57	325,68	1,11		0,63		0,70	
15	10	318,35	328,06	328,76	0,70	0,74	0,61	0,59	0,65	0,63
	11	309,06	317,25	317,98	0,73		0,51		0,56	
	12	324,79	335,01	335,81	0,80		0,64		0,69	

CP = corpo de prova; m10 = massa aos 10 minutos; m90 = massa aos 90 minutos; C = coeficiente de capilaridade; A10 = absorção por capilaridade aos 10 min; A90 = absorção por capilaridade aos 90 min

APÊNDICE E – Determinação da densidade de massa aparente individual e média para as idades de cura de 7, 14, 28 e 56 dias.

% de PET	Cura	CP	D1 (cm)	D2 (cm)	h (cm)	m (g)	Densidade de massa aparente (kg/m³)	Densidade de massa aparente média (kg/m³)
0%	7 dias	1	5,50	5,50	9,95	415,8	1.759	
		2	5,50	5,50	10,00	420,5	1.770	1.753
		3	5,50	5,50	10,00	410,7	1.729	
	14 dias	4	5,55	5,50	9,90	419,2	1.766	
		5	5,00	5,00	9,85	336,9	1.742	1.749
		6	5,30	5,20	10,00	376,5	1.739	
	28 dias	7	5,00	5,00	9,80	336,0	1.746	
		8	4,95	5,00	9,90	336,3	1.747	1.744
		9	5,00	5,00	9,90	338,1	1.739	
	56 dias	10	5,06	5,01	9,91	346,2	1.754	
		11	5,20	5,25	9,95	368,6	1.728	1.748
		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	
		2	5,20	5,15	10,05	364,5	1.724	1.701
		3	5,55	5,50	10,00	404,9	1.689	
	14 dias	4	5,54	5,58	10,00	398,3	1.640	
		5	5,52	5,52	10,00	392,0	1.638	1.644
		6	5,56	5,56	10,00	401,5	1.654	
	28 dias	7	5,51	5,51	10,00	397,9	1.669	
		8	5,20	5,20	10,00	345,9	1.629	1.670
		9	5,14	5,16	10,00	356,8	1.713	
	56 dias	10	5,50	5,50	10,10	394,5	1.644	
		11	5,45	5,50	10,10	390,5	1.642	1.649
		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	
		2	5,48	5,48	10,08	380,9	1.602	1.618
		3	5,56	5,54	9,90	383,3	1.600	
	14 dias	4	5,56	5,56	10,00	400,0	1.647	
		5	5,38	5,38	10,00	385,8	1.697	1.671
		6	5,18	5,18	10,00	351,9	1.670	
	28 dias	7	5,54	5,52	10,02	393,7	1.636	
		8	5,24	5,24	9,98	344,5	1.601	1.630
		9	5,00	5,00	10,00	324,5	1.653	

	56 dias	10	5,55	5,50	10,10	393,1	1.623	
		11	5,30	5,30	9,90	357,2	1.636	1.633
		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	
		2	5,50	5,50	10,05	377,2	1.580	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	
		5	5,20	5,25	10,20	343,7	1.572	1.569
		6	5,15	5,20	9,95	329,5	1.574	
	28 dias	7	5,25	5,15	9,85	328,4	1.570	
		8	4,95	4,95	10,00	307,1	1.596	1.576
		9	5,30	5,20	9,90	334,8	1.562	
	56 dias	10	5,32	5,30	9,93	342,8	1.559	
		11	5,20	5,30	9,90	334,2	1.559	1.559
		12	5,26	5,30	9,92	338,47	1.559	

CP = corpo de prova; D1 = diâmetro 1; D2 = diâmetro 2; h = altura; m = massa.

APÊNDICE D – Determinação da resistência à compressão simples individual e média para as idades de cura de 7, 14, 28 e 56 dias.

% de PET	Cura	CP	Res. à compressão (MPa)	Res. à compressão média (MPa)
0%	7 dias	1	1,06	1,11
		2	1,11	
		3	1,15	
	14 dias	4	1,14	1,13
		5	1,09	
		6	1,17	
	28 dias	7	1,34	1,38
		8	1,37	
		9	1,42	
	56 dias	10	1,78	1,82
		11	1,84	
		12	1,83	
5%	7 dias	1	1,01	1,06
		2	1,10	
		3	1,08	
	14 dias	4	1,11	1,15
		5	1,15	
		6	1,20	
	28 dias	7	1,43	1,41

	56 dias	8	1,38	1,81
		9	1,42	
		10	1,79	
		11	1,82	
		12	1,82	
10%	7 dias	1	1,05	1,08
		2	1,08	
		3	1,10	
	14 dias	4	1,22	1,23
		5	1,21	
		6	1,27	
	28 dias	7	1,45	1,45
		8	1,42	
		9	1,48	
	56 dias	10	2,10	2,04
		11	2,03	
		12	1,98	
15%	7 dias	1	1,09	1,12
		2	1,12	
		3	1,15	
	14 dias	4	1,43	1,40
		5	1,40	
		6	1,38	
	28 dias	7	1,87	1,87
		8	1,92	
		9	1,83	
	56 dias	10	2,36	2,37
		11	2,33	
		12	2,42	

CP = corpo de prova.

APÊNDICE E – Determinação da resistência à tração na flexão individual e média para as idades de cura de 7, 14, 28 e 56 dias.

% de PET	Cura	CP	Res. à tração na flexão (MPa)	Res. à tração média (MPa)
0%	7 dias	1	0,43	0,43
		2	0,38	
		3	0,48	
	14 dias	4	0,51	0,49
		5	0,49	
		6	0,47	
	28 dias	7	0,48	0,52

	56 dias	8	0,54	0,68
		9	0,53	
		10	0,65	
		11	0,72	
5%	7 dias	12	0,68	0,39
		1	0,38	
		2	0,42	
	14 dias	3	0,36	0,48
		4	0,52	
		5	0,48	
	28 dias	6	0,45	0,54
		7	0,56	
		8	0,59	
	56 dias	9	0,48	0,67
		10	0,66	
		11	0,65	
10%	7 dias	12	0,71	0,42
		1	0,38	
		2	0,45	
	14 dias	3	0,44	0,50
		4	0,46	
		5	0,54	
	28 dias	6	0,51	0,62
		7	0,65	
		8	0,54	
	56 dias	9	0,67	0,80
		10	0,74	
		11	0,85	
15%	7 dias	12	0,81	0,42
		1	0,39	
		2	0,42	
	14 dias	3	0,45	0,55
		4	0,51	
		5	0,55	
	28 dias	6	0,58	0,74
		7	0,70	
		8	0,75	
	56 dias	9	0,78	0,97
		10	1,06	
		11	0,92	
		12	0,94	