



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

**APLICAÇÃO DA MEV NA INVESTIGAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO
DE PARTÍCULAS DE PET MICRONIZADO EM ARGAMASSA
PARA REVESTIMENTO E ASSENTAMENTO**

MATHEUS OLIVEIRA LIRA

Orientadora: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

Campina Grande-PB, 20/12/2017.

**APLICAÇÃO DA MEV NA INVESTIGAÇÃO DA
DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS DE PET MICRONIZADO
EM ARGAMASSA PARA REVESTIMENTO E
ASSENTAMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande - PB

Dezembro/2017

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

MATHEUS OLIVEIRA LIRA

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

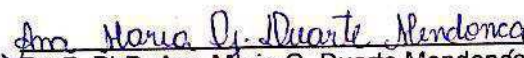
Dezembro/2017

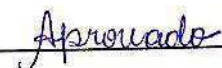
FOLHA DE APROVAÇÃO

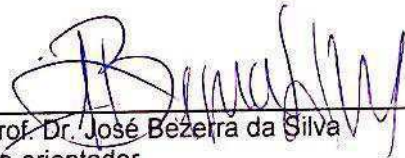
MATHEUS OLIVEIRA LIRA

APLICAÇÃO DA MEV NA INVESTIGAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS DE PET MICRONIZADO EM ARGAMASSA PARA REVESTIMENTO E ASSENTAMENTO


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 21/12/2017
perante a seguinte Comissão Julgadora:

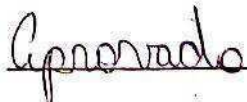

Prof.^a PhD. Ana Maria G. Duarte Mendonça
Orientadora
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

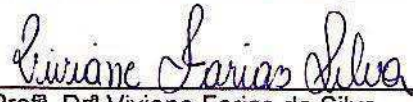



Prof. Dr. José Bezeira da Silva
Co-orientador
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande




Prof.^a Dr.^a Carina Silvani
Examinador Interno
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal de Campina Grande




Prof.^a Dr.^a Viviane Farias da Silva
Examinador Externo
Departamento de Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande



AGRADECIMENTOS

À Deus, pelas condições que Ele me proporcionou durante toda minha fase de estudante, que agora chega a mais um ciclo final.

A meus pais, por toda confiança e apoio que me foram cedidos, sempre acreditando no meu potencial e capacidade.

À Prof^a. PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça, que me aceitou como orientando e o fez com uma brilhante e eficaz boa vontade, sempre disposta a sanar dúvidas e direcionar a pesquisa para os melhores caminhos.

Ao amigo Felipe Aranha, por todo companheirismo e suporte durante toda a realização deste trabalho e durante os anos de convivência e amizade.

Aos meus colegas de curso, que sempre foram bons companheiros e suportes para a minha caminhada acadêmica.

A todos os amigos adquiridos na minha caminhada de igreja, que sempre se mostraram fortes apoiadores na minha caminhada acadêmica.

A minha namorada, Caroline, por todo entendimento e suporte durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos dos laboratórios de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande por toda paciência dedicada ao explicarem o correto manuseio e execução dos ensaios necessários.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, autor de meu destino, meu guia, socorro presente na hora da angústia, ao meu pai Raimundo, minha mãe Gláucia, meu irmão Arthur e aos meus amigos.

Com amor e respeito.

“Para alcançar voos altos, antes, apresente seus pés ao chão. Nenhuma ave se mantém todo o tempo no ar...”

Lavínia Lins

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Argamassa de assentamento de blocos.	5
Figura 2: Relação e influência da resistência da argamassa na resistência da parede de alvenaria.....	6
Figura 3: Interação entre argamassa de assentamento e bloco de alvenaria. ...	6
Figura 4: Argamassa de revestimento.....	7
Figura 5: Diferença entre aplicações dos tipos de argamassas de revestimento.	7
Figura 6: Três alternativas para revestimento de paredes: (a) Emboço, reboco e pintura, (b) camada única e pintura; (c) revestimento decorativo monocamada (RDM).....	8
Figura 7: Execução de contrapiso.....	10
Figura 8: Variação da retenção de água para diferentes tipos de argamassas.	13
Figura 9: Relação entre densidade de massa e teor de ar de argamassas no estado fresco.....	15
Figura 10: Processo para criação da resina PET.....	23
Figura 11: Garrafas PET.....	24
Figura 12: Pré-formas de embalagens PET.....	25
Figura 13: Processo de sopro da pré-forma no molde.....	25
Figura 14: Molde para pré-forma de garrafa PET.....	26
Figura 15: Retirada da garrafa pronta do molde.....	26
Figura 16: Hierarquização dos resíduos.....	28
Figura 17: Quantidade de PET em Kton reciclada ao longo dos anos.....	29
Figura 18: Usos finais do PET reciclado no Brasil.....	30
Figura 19: Fluxograma das etapas da pesquisa.....	33
Figura 20: Molde para corpos de prova de argamassas (50x100 mm).	36
Figura 21: Corpos de provas de argamassa desmoldados e identificados.	36
Figura 22: Balança de precisão (a) e dispositivo para pesagem de amostras submersas (b).	37
Figura 23: Prensa de compressão axial.....	38
Figura 24: Comparativo entre microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura.....	39
Figura 25: Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão para incorporação de 20% de PET micronizado.	40
Figura 26: Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão para incorporação de 30% de PET micronizado.	41
Figura 27: Fotografias de amostras de resíduos de PET utilizados na pesquisa: (a) Filme de PET; (b) Areia de PET; (c) Flake de PET. Menor divisão da escala equivale a 1 mm.	42
Figura 28: Resultados dos ensaios de índice de vazios para incorporação de 20% de PET micronizado.....	43

Figura 29: Resultados dos ensaios de índice de vazios para incorporação de 30% de PET micronizado.	43
Figura 30: Resistência à compressão simples para incorporação de 20% de PET micronizado.	45
Figura 31: Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para incorporação de 30% de PET micronizado.	46

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Limites de resistência de aderência à tração (Ra) para argamassas de paredes.	9
Tabela 2: Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco.....	14
Tabela 3: Taxa de recuperação do PET no Brasil.....	29
Tabela 4: Formas de recolhimento do PET para a reciclagem.....	31
Tabela 5: Traço em massa para um corpo de prova de argamassa.	35
Tabela 6: Classificação de argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos quanto a resistência à compressão.	49

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

NBR – Normalização Brasileira

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

PET – Politereftalato de etileno

ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET

RSU – Resíduo Sólido Urbano

RCD – Resíduo de construção e demolição

RESUMO

Os processos de descarte e reutilização de resíduos são pontos fortes nas discussões e estudos relacionados à conservação do meio ambiente desde que o homem atentou-se desta necessidade. Paralelamente, e não menos importante, tem-se os estudos voltados à descoberta de novas matérias primas e tecnologias para os mais diversos segmentos de atividades a fim de evitar a escassez de diversos produtos. O Politereftalato de Etileno (PET) é um termoplástico largamente utilizado em todo o mundo para a fabricação de embalagens, notadamente garrafas para bebidas carbonatadas, tendo como características a baixa densidade, a transparência, o brilho, a sua boa performance em diferentes designs, a segurança e a facilidade de moldagem, além de proporcionar uma alta resistência mecânica e química. Seu uso gera um grande volume de resíduos descartados de forma inadequada no meio ambiente, o que ocasiona sérios impactos ambientais. Assim, objetivou-se com este trabalho avaliar a microestrutura de argamassas incorporadas com PET micronizado em substituição parcial ao agregado miúdo nos teores 20% e 30%. Foram moldados corpos de prova nas dimensões de 5 cm x 10 cm e avaliados as propriedades físicas, mecânicas e microestrutura das argamassas aos 7, 14 e 28 dias. Verificou-se, em comparação com as argamassas de referência, um aumento na absorção de água e índice de vazios. Os ensaios de compressão simples indicaram que a resistência das argamassas diminui a medida que aumenta o percentual de incorporação de PET, e, para ambos os teores, os resultados foram inferiores aos das amostras de referência. A investigação através de MEV identificou que as argamassas incorporadas com PET possuem uma matriz irregular e heterogênea, com presença de vazios na estrutura.

Palavras-chave: Polímero, microestrutura, propriedades.

ABSTRACT

The waste disposal and reuse processes are strong points in the discussions and studies related to the conservation of the environment since the man realized this need. At the same time, studies are focused on the discovery of new raw materials and technologies for the most diverse segments of activities in order to avoid the scarcity of various products. Polyethylene terephthalate (PET) is a thermoplastic widely used for the manufacture of packaging, namely carbonated beverage bottles, having low density, transparency, brightness, good performance in different designs, Safety and ease of molding, as well as providing high mechanical and chemical resistance. Its use generates a large volume of improperly disposed waste in the environment, which generates serious environmental impacts. Thus, the objective of this project is to evaluate the microstructure of mortar incorporated with micronized PET in partial substitution to the small aggregate in the contents 20% e 30%. The specimens were molded in 5 cm x 10 cm dimensions and the physical, mechanical and microstructure properties of mortars at 7, 14 and 28 days were evaluated. Compared with reference mortars, an increase in water absorption and void index was found. The simple compression tests indicated that the mortar strength decreases as the percentage of PET incorporation increases, and, for both levels, the results were lower than those of the reference samples. The SEM investigation identified that the mortars incorporated with PET have an irregular and heterogeneous matrix, with voids in the structure.

Key words: Polymer, microstructure, properties.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	2
1.2 HIPÓTESE DA PESQUISA	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 Objetivo Geral.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Organização do Trabalho de Conclusão de Curso - TCC	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Argamassa: Propriedades, tipos, usos.	4
2.1.1 Tipo de argamassas	4
2.1.2 Argamassas de assentamento de alvenaria.....	5
2.1.3 Argamassas de revestimento.....	6
2.1.4 Argamassas de contrapiso.....	9
2.2 Propriedades das argamassas	10
2.2.1 Propriedades das argamassas no estado fresco.....	10
2.2.2 Propriedades das argamassas no estado endurecido.....	16
2.3 Utilização de resíduos em argamassas	18
2.4 PET	21
2.4.1 Definição e propriedades	21
2.4.2 Fabricação da resina PET.....	22
2.4.2 Garrafas PET	23
2.4.3 Fabricação de garrafas PET	24
2.4.4 Resíduos de PET	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Materiais.....	32
3.2 Metodologia.....	32
3.2.1 Caracterização física dos Agregados e do Cimento	33
3.2.2 Caracterização do Politereftalato de Etileno.....	34
3.2.3 Moldagem dos corpos de prova	35
3.2.3 Determinação das propriedades físicas e mecânicas das argamassas.....	37
3.2.4 Análise microestrutural através da microscopia eletrônica de varredura (MEV)	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40

4.1 Avaliação de propriedades físicas de argamassas incorporadas com 20% e 30% de PET micronizado em substituição do agregado miúdo.	40
4.1.1 Absorção de água por imersão	40
4.1.2 Índice de vazios	42
4.2 Avaliação de propriedades mecânicas de argamassas incorporadas com 20% e 30% de PET micronizado em substituição do agregado miúdo.	45
4.2.1 Resistência à compressão simples	45
4.3 Avaliação da microestrutura de argamassas incorporadas com 20% e 30% de PET micronizado em substituição ao agregado miúdo natural.	49
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	52
REFERÊNCIAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é uma atividade importantíssima em todo mundo. Está ligada a infraestrutura de um país e tem grande geração de emprego e rendas pela grande soma de recursos aplicados, sendo um dos índices de desenvolvimento de uma nação. Representa a criação de investimentos de longo prazo em empresas diversas nas áreas de indústria, serviço e agropecuária (CHAGAS FILHO, 2005).

O crescimento socioeconômico implica em maior consumo de recursos naturais, tornando importante garantir a disponibilidade de recursos demandados pela sociedade. Tem-se assim, uma relação intrínseca entre o desenvolvimento econômico, qualidade de vida e de bens minerais.

Nos últimos anos, a construção civil, tem sido alvo da incorporação dos mais diversos tipos de materiais, em virtude de alguns possuírem composição similar às matérias-primas naturais. A busca por materiais alternativos para a construção civil com finalidade de reduzir custos é imperiosa, diante do crescimento populacional existente, limitação de recursos econômicos e escassez de recursos naturais pelas altas demandas de consumo.

O estudo de novas tecnologias para o reaproveitamento dos resíduos industriais poderá propiciar o desenvolvimento de novos produtos com conseqüente diminuição do descarte de resíduos e maximização da cadeia produtiva da indústria (MENDONÇA, et al, 2013).

O politereftalato de etileno (PET) é um polímero termoplástico, com estrutura parcialmente alifática e aromática, semicristalino e membro comercialmente mais importante da família dos poliésteres (KARAGIANNIDS et al., 2008). É formado a partir do ácido tereftálico – AT e do etilenoglicol-EG. Devido a larga utilização e ao volume de garrafas PET pós-consumo descartadas indiscriminadamente no meio ambiente, é necessário o desenvolvimento de tecnologias de reaproveitamento deste resíduo.

As argamassas são materiais de construção, que possuem propriedades de aderência e endurecimento, obtidas a partir da mistura homogênea de um ou

mais aglomerantes, agregado miúdo (areia) e água, podendo ainda conter aditivos e adições minerais. Largamente utilizada em praticamente todas as obras e reformas de construção civil, e de diversas formas, seja para assentamento ou revestimento.

Os aglomerantes (cimento, cal, gesso) são produtos capazes de provocar a aderência dos materiais. Esses quando utilizados em adição com água, formando a pasta, e agregado, formam a argamassa.

1.1 JUSTIFICATIVA

A importância dessa pesquisa reside no fato de que, dados os números relativos à quantidade de resíduos gerados pela humanidade, é preciso destinar aos mesmos um fim mais ambientalmente adequado, de forma que tenha uma aplicabilidade prática e eficaz, deixando de ser apenas resíduo e passando a ser insumo de utilidade direta num ramo tão amplo e necessário, como a construção civil.

1.2 HIPÓTESE DA PESQUISA

Parte-se da hipótese de que: *“O politereftalato de etileno (PET) micronizado pode ser utilizado como matéria-prima de argamassas utilizadas na construção civil”*. A manter desta, é possível observar a chance de redução da disposição inadequada desse resíduo no meio ambiente, através de processos que o tornam útil como incorporação de argamassas, que devem atender de maneira satisfatória as propriedades que lhe são esperadas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a microestrutura de argamassas incorporadas com Politereftalato de Etileno micronizado nos teores de 20% e 30%.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analisar as propriedades físicas de argamassas incorporadas com PET micronizado nos teores de 20% e 30%;
- Determinar as propriedades mecânicas de argamassas incorporadas com PET micronizado nos teores de 20% e 30%;
- Investigar a distribuição das partículas de PET micronizado em argamassas.

1.3 Organização do Trabalho de Conclusão de Curso - TCC

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

[Capítulo 1] Introdução – Introdução, Justificativa, Hipótese da pesquisa, Objetivos da Pesquisa e Organização do trabalho de conclusão de curso;

[Capítulo 2] Fundamentação Teórica – são abordados assuntos relacionados a argamassas, resíduos, ao PET, etc;

[Capítulo 3] Materiais e Métodos – são apresentados os materiais utilizados na pesquisa e relatados os aspectos considerados importantes sobre os procedimentos da etapa experimental;

[Capítulo 4] Resultados e Discussões;

[Capítulo 5] Conclusões e sugestões para pesquisas futuras;

Por fim, estão as Referências, onde serão listadas as pesquisas citadas no trabalho, e os anexos relacionados ao estudo realizado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O avanço da construção civil indica diretamente o maior uso e exploração da argamassa, por ser um material de importância tamanha para esse setor. 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.

O sistema construtivo mais utilizado no Brasil é o que faz uso de paredes de alvenaria revestidas com camadas argamassadas, sejam chapisco, emboço e reboco, interna e externamente as edificações. Esse tipo de revestimento ocorre mais comumente em habitações para pessoas de baixa e média renda, no qual as placas à base de cimento e agregados minerais chegam a um total de 20% do custo médio das obras (RESENDE, 2013).

2.1 Argamassa: Propriedades, tipos, usos.

A NBR 13281 (ABNT, 2005) define argamassa como uma mistura homogênea de aglomerante(s), água e agregado(s) miúdo(s), podendo ainda existir a presença de aditivos. As argamassas são materiais utilizados na construção civil, possuem altas propriedades de aderência e endurecimento.

Os revestimentos argamassados tem a função de proteger as vedações e estruturas contra a ação do intemperismo, reduzindo assim a degradação das edificações, além de aumentar a durabilidade e reduzir os custos com manutenções e reformas, proporcionar isolamento térmico e acústico, vedação contra água, gases, proteção em caso de incêndio (VAZ, 2016).

2.1.1 Tipo de argamassas

As argamassas podem ser classificadas segundo uma série de critérios, dentre os quais estão o tipo e a natureza do aglomerante utilizado, a quantidade de aglomerantes utilizados na mistura, consistência da argamassa, função do revestimento, forma de preparo ou fornecimento, propriedades especiais, número de camadas de aplicação, ambiente de exposição, comportamento à umidade, comportamento à radiação, comportamento ao calor e ao acabamento de superfície. Ainda, com relação à sua função, a argamassa possui subdivisões,

levando em consideração a utilização da mesma na obra, pode ser utilizada para assentamento de alvenaria, chapisco, emboço, reboco, contrapiso, rejuntamento e reparo.

2.1.2 Argamassas de assentamento de alvenaria

A argamassa de assentamento de alvenaria é utilizada na construção de paredes de unidades de alvenaria, podendo ser tijolos ou blocos. Unindo as unidades de alvenaria, formando um elemento único, resistindo assim melhor aos esforços laterais aos quais a estrutura será submetida, tal como a força do vento. Toda a carga atuante será então redistribuída por toda área das unidades de alvenaria. Além disso, a argamassa promoverá uma vedação contra a infiltração de água. A Figura 1 ilustra a argamassa de assentamento de blocos.

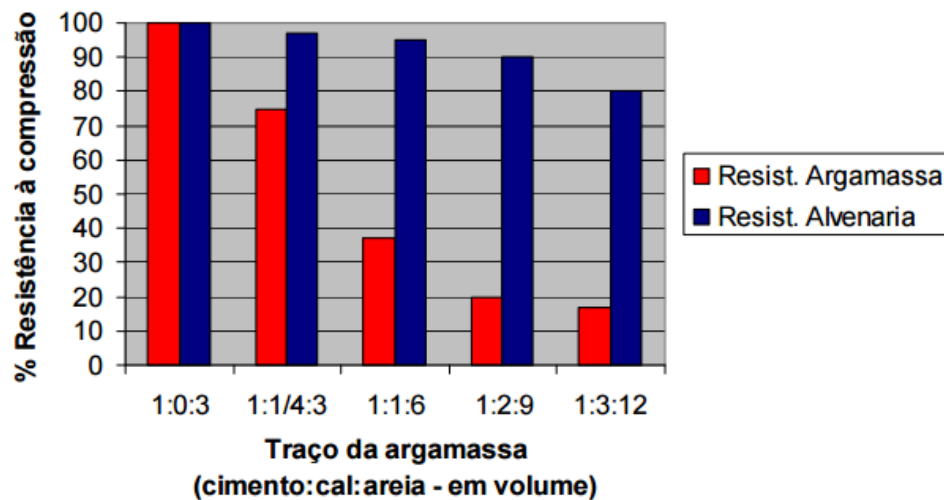
Figura 1: Argamassa de assentamento de blocos.



FONTE: mptres.com (2012).

Segundo Carasek (2007), as propriedades mais importantes para o bom desempenho de argamassas de alvenaria são: trabalhabilidade, ou seja, consistência adequada para o processo de execução, boa aderência, resistência mecânica e a capacidade de absorver deformações. Além disso, é comprovado que há relação entre resistência de argamassas e da parede de alvenaria, conforme a Figura 2.

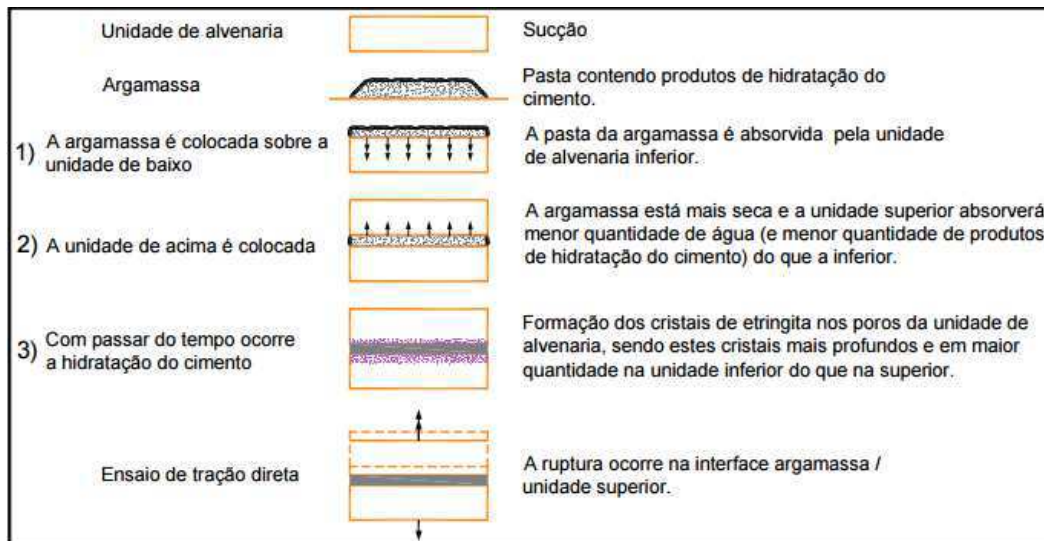
Figura 2: Relação e influência da resistência da argamassa na resistência da parede de alvenaria.



FONTE: Building Research Station, 1986, apud Carasek (2007).

A Figura 3 ilustra como se dá a interação argamassa de assentamento e bloco de alvenaria, explanando detalhadamente as etapas de interação e como se dá o comportamento da argamassa em contato com as unidades de alvenaria.

Figura 3: Interação entre argamassa de assentamento e bloco de alvenaria.



FONTE: Carasek adaptada de Gallegos (1989).

2.1.3 Argamassas de revestimento

As argamassas para revestimento de paredes e tetos são indicadas para revestimentos de ambientes internos das edificações, agindo como uma camada de regularização, assim como para ambientes externos, em revestimentos de muros, fachadas e demais elementos externos da edificação, além de ser

aplicada como uma camada de regularização. Carasek (2007) evidencia que as argamassas de revestimento têm a função de proteger a estrutura contra os intemperismos. Além disso, servem como forma de integração entre os sistemas de vedação das edificações, contribuindo em torno de 30% com o isolamento térmico, 50% com o isolamento acústico, 70 a 100% do isolamento contra a infiltração da água, e também propõem segurança em caso de incêndios.

As argamassas de revestimento de paredes e tetos são classificadas em chapisco, emboço, reboco e massa única. A Figura 4 ilustra a argamassa de revestimento.

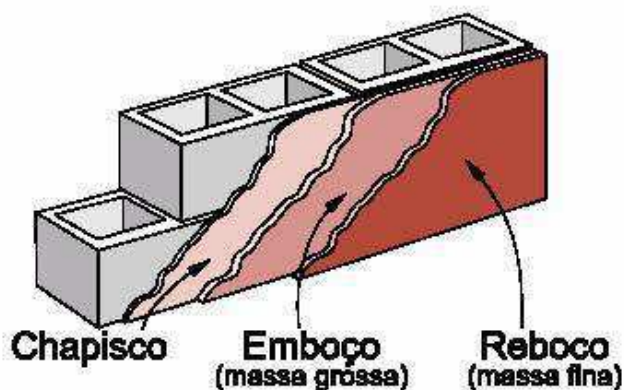
Figura 4: Argamassa de revestimento.



FONTE: equipedeobra.pini.com.br (2014).

A Figura 5 ilustra a diferença das aplicações dos tipos de argamassas de revestimento.

Figura 5: Diferença entre aplicações dos tipos de argamassas de revestimento.



FONTE: a8se.com (2010).

Segundo Vaz (2016):

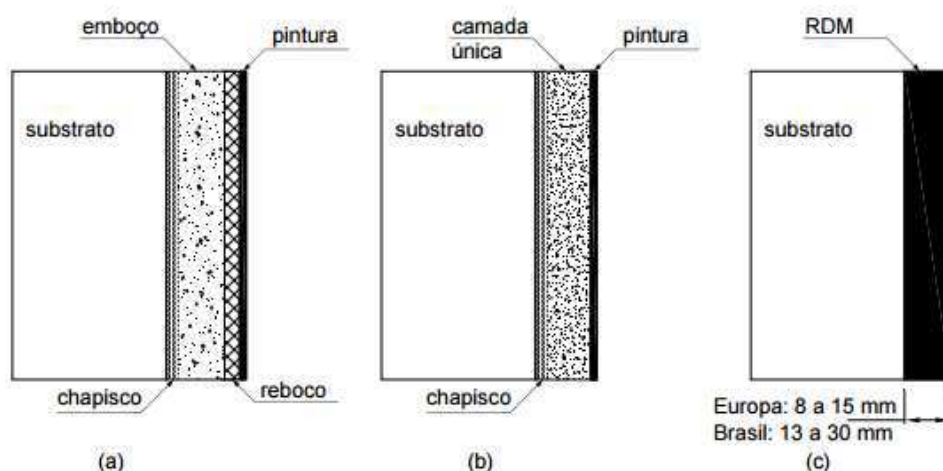
- Chapisco: Sua função é deixar a superfície mais áspera e serve como ancoragem para o revestimento posterior, facilitando a aderência do emboço ao substrato.
- Emboço: É uma camada com a função de regularizar a superfície de alvenaria, vindo a receber posteriormente as demais camadas do revestimento, seja reboco, cerâmica ou um outro revestimento.
- Reboco: Trata-se de uma camada fina de argamassa, aplicada sobre o emboço para dar um melhor acabamento à superfície de revestimento.
- Massa única: Também conhecido com revestimento paulista, ocorre quando o revestimento é feito em uma única camada. O resultado deve ser uma camada que cumpra as funções do emboço e reboco.

Carasek (2007) ainda define mais um tipo de argamassa de revestimento, o revestimento decorativo monocamada (RDM):

- Revestimento decorativo monocamada – RDM: Trata-se de um produto industrializado, aplicado em camada única, que faz a função de regularização e de decoração. Bastante utilizado em países europeus.

Na figura 6 é possível diferenciar três diferentes tipos de revestimentos de paredes, a sequência de camadas argamassadas.

Figura 6: Três alternativas para revestimento de paredes: (a) Emboço, reboco e pintura, (b) camada única e pintura; (c) revestimento decorativo monocamada (RDM).



FONTE: Carasek (2017).

A NBR 13749 (ABNT, 2013) estabelece os valores limites para resistência de aderência à tração para os diferentes tipos de revestimentos argamassados de paredes de alvenaria (Tabela 1).

Tabela 1: Limites de resistência de aderência à tração (Ra) para argamassas de paredes.

Local	Acabamento	Ra (Mpa)
Interna	Pintura ou base para reboco	≥ 20
	Cerâmica ou laminado	≥ 30
Externa	Pintura ou base para reboco	≥ 30
	Cerâmica	≥ 30

FONTE: ABNT (2013).

2.1.4 Argamassas de contrapiso

As argamassas para execução de contrapiso proporcionam caimento necessário para todos os diversos ambientes, além de suportar o revestimento do piso e tudo que lhe compõe, corrigir desníveis, resistir aos esforços sem apresentar ruptura, embutir tubulações e complementar sistemas de impermeabilização. Com relação as argamassas utilizadas na execução do piso, estas tem o objetivo de propor o acabamento final, atendendo às necessidades especificadas na etapa de projeto, como resistência à compressão, à abrasão, ao ataque de agentes químicos, etc (SANTOS, 2011). Na Figura 7 observa-se os procedimentos de execução de um contrapiso.

Figura 7: Execução de contrapiso.



FONTE: metálica.com.br (2015)

2.2 Propriedades das argamassas

Em relação as propriedades das argamassas, o seu desempenho é dependente das características verificadas em seus dois estados: plástico e endurecido. Durante o primeiro, a argamassa deve apresentar uma boa trabalhabilidade, para tornar mais fácil e rápido o assentamento de unidades de alvenaria, tal como blocos e tijolos, além de possuir uma boa capacidade de retenção de água, a fim de causar a hidratação do cimento. As características necessárias, quando no estado endurecido, são resistência à compressão adequada, uma boa resiliência e adequada resistência ao cisalhamento (aderência). Silva (2011) discorre que o bom desempenho de argamassas de revestimento depende das propriedades que as mesmas possuem no estado fresco e endurecido. Ainda segundo ele, feita a correta adequação das propriedades das argamassas no estado fresco será permitido que o revestimento cumpra as funções específicas e esperadas no estado endurecido.

2.2.1 Propriedades das argamassas no estado fresco

2.2.1.1 Trabalhabilidade

Trabalhabilidade é a propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que as mesmas podem ser manuseadas, misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e finalizadas (CARASEK, 2007). Ainda, essa propriedade é resultado do somatório de diversas outras propriedades, como: consistência, plasticidade, retenção de água e de consistência, coesão,

exsudação, densidade de massa e adesão inicial. Trabalhabilidade é a facilidade com que o pedreiro trabalha com a argamassa (KANNING, 2013).

Esta propriedade significa, na prática, facilidade de manuseio. Uma argamassa classificada com trabalhável quando se distribui facilmente ao ser assentada, não gruda na colher do pedreiro ao ser aplicada, também não segrega quando em transporte, não endurece quando está em contato de superfícies absorvivas e permanece plástica suficientemente, até que o manuseio seja finalizado (SILVA, 2011). Para que uma argamassa possua uma boa trabalhabilidade é necessário ser de fácil manuseio e espalhamento sobre a superfície de alvenaria, deve ter boa adesão para permitir a pré-colocação da argamassa no topo da alvenaria para formação de juntas verticais, deve manter a consistência durante um determinado tempo para permitir o assentamento de unidades consecutivas, deve ser coesa o suficiente para evitar o escorregamento pelas paredes da unidade inferior quando da realização do assentamento da unidade superior, deve ter facilidade e rapidez para alcançar a espessura da junta adequada e mantê-la após todo o processo de assentamento e de confecção das fiadas posteriores (DA MATA, 2006, apud SHANKOSKI, 2012).

2.2.1.2 Consistência

Segundo Kanning (2013), a consistência é definida como um valor numérico que caracteriza a fluidez da argamassa. Isaia (2007) define a consistência das argamassas como a resistência que apresentam quando são solicitadas por uma tensão ainda no estado fresco. Carasek (2007) discorre que do ponto de vista do comportamento reológico das argamassas, a consistência está ligada à capacidade da mistura resistir o escoamento.

As argamassas podem ser classificadas quanto a sua consistência como secas (pasta preenche os vazios entre grãos), plásticas (pasta forma película que lubrifica a superfície dos grãos do agregado) e fluidas (grãos são imersos na pasta) (SILVA, 2011). Argamassas são classificadas secas quando necessitam de grande energia para conformação, plásticas quando necessitam de um pequeno esforço para conformação e fluidas quando são autonivelantes (SHANKOSKI, 2012).

Silva (2011) relata que a consistência é determinada de forma direta pelo conteúdo de água, e é influenciada pela relação água/aglomerante, pela relação aglomerante/agregado miúdo, pela granulometria do agregado miúdo e pela natureza e qualidade do aglomerante.

2.2.1.3 Plasticidade

Cascudo et al. (2005, apud KANNING, 2013) evidencia que plasticidade é a propriedade que a argamassa apresenta em reter a deformação, quando cessa parcial ou completamente o esforço de deformação aplicado sobre ela. Ainda, é a propriedade que permite que a argamassa se deforme sem ruptura, quando são submetidas à ações de forças maiores do que as que mantêm a sua estabilidade, mantendo a deformação após o suspensão da ação do esforço (RESENDE, 2010).

Segundo Silva (2011), a plasticidade é influenciada pelo teor de ar incorporado, características e proporcionamentos dos materiais constituintes da argamassa e pelo processo de mistura.

Casali e Prudêncio Jr. (2008) verificaram a variação das propriedades das argamassas de assentamento mistas com o uso de areias grossa, média e fina, com módulos de finura de 2,67, 2,09 e 1,71, de forma respectiva, e foi concluído que quanto menor o módulo de finura do agregado, menor será a energia necessária para se obter 1 de cm de espessura de junta e maior será o índice de plasticidade. Também foi verificado que o módulo de finura aumentava com o aumento do teor de cal na mistura. Logo, a cal propicia maior plasticidade à argamassa em seu estado fresco, permitindo a mesma uma melhor trabalhabilidade e produtividade.

2.2.1.4 Retenção de água

Retenção de água é a capacidade que as argamassas apresentam em seu estado fresco de reter a água empregada na mistura, quando se dá contato com superfícies absorventes ou quando em processo de evaporação (KANNING, 2013). Carasek (2007) define retenção de água como uma propriedade que está interligada à capacidade da argamassa fresca manter a

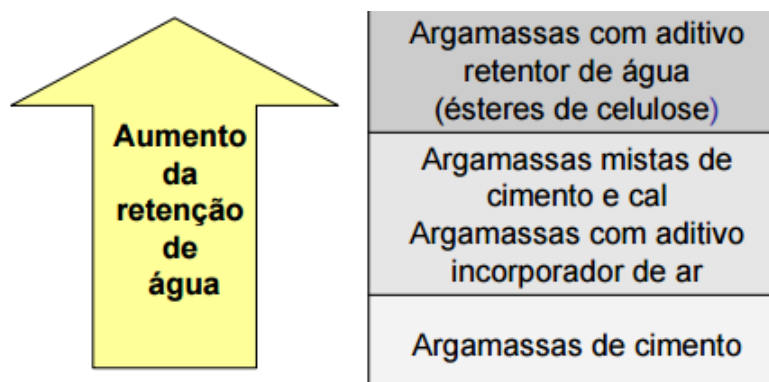
sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água de amassamento, por evaporação ou absorção de água da base.

Freitas (2010) discorre que a retenção de água possui influencia na retração por secagem, uma das principais causas de fissuração das argamassas no estado endurecido, trazendo malefícios para a estanqueidade e durabilidade da alvenaria.

É importante a otimização da retenção de água para que as argamassas tornem-se trabalháveis, porém, sem apresentar grandes fissurações. Pode-se aumentar a capacidade de retenção de água de argamassas, através do aumento do teor de cal utilizado, do uso de aditivos retedores de água e do uso de aditivos que obstruem a percolação de água capilar (ALVES, 2002 apud RESENDE, 2010).

A variação da retenção de água para diferentes tipos de argamassas aditivadas, em comparação com a argamassa de referência, ou seja, sem aditivos, Figura 8.

Figura 8: Variação da retenção de água para diferentes tipos de argamassas.



FONTE: Carasek (2007).

2.2.1.5 Adesão inicial

Adesão inicial é também denominada a “pegajosidade” da argamassa, pode ser vista como a capacidade de união inicial da argamassa no estado fresco a uma superfície base (CARASEK, 2007). Vaz (2016) discorre que a adesão inicial pode ser entendida como a propriedade que caracteriza o comportamento futuro do conjunto suporte-argamassa e depende das características de trabalhabilidade da argamassa e também relativo à porosidade

e rugosidade do suporte onde a argamassa será aplicada. Está relacionada com aspectos reológicos da pasta, tal como a tensão superficial.

Para se melhorar a adesão de uma argamassa, é necessário reduzir a tensão superficial da pasta, favorecendo assim a “molhagem” do substrato, diminuindo o ângulo de contato entre as superfícies e aumentando a união entre as mesmas (SHANKOSKI, 2012).

2.2.1.6 Densidade de massa

A densidade de massa no estado fresco é definida como a razão entre a massa de argamassa que ocupa um recipiente e o volume desse. É muito utilizada para determinar o rendimento da argamassa, e ainda influencia de forma significativa várias propriedades no estado fresco e endurecido. Também é possível calcular a quantidade de ar incorporado no interior de argamassas através desta propriedade (SILVA, 2011).

A classificação de argamassas quanto a sua densidade de massa, levando em conta quais os agregados utilizados e qual o uso adequado para as mesmas, Tabela 2.

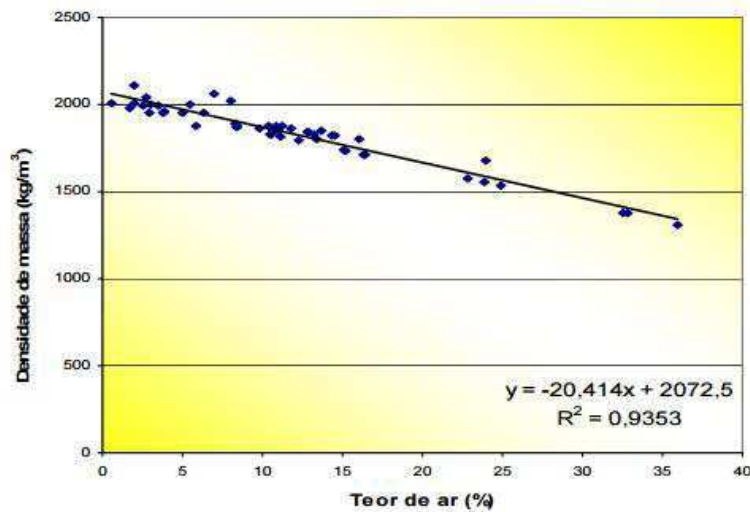
Tabela 2: Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco.

Argamassa	Densidade de massa A (g/cm³)	Principais agregados empregados	Usos e observações
Leve	< 1,40	Vermiculita, perlita, argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	$2,30 \leq A \leq 1,40$	Areia de rio (Quartzo) e calcário britado	Aplicações convencionais
Pesada	>2,30	Barita (Sulfato de bário)	Blindagem de radiação

FONTE: Carasek (2007).

A Figura 9 ilustra a relação entre densidade de massa e teor de ar em argamassas no estado fresco.

Figura 9: Relação entre densidade de massa e teor de ar de argamassas no estado fresco.



FONTE: Carasek (2007).

O teor de ar incorporado em argamassas de revestimento deve ser analisado de forma criteriosa, pois ele pode alterar propriedades essenciais no estado fresco da argamassa, tal como plasticidade e trabalhabilidade, proporcionando mais facilidade à aplicação da mesma, como também pode alterar diversas outras propriedades no estado endurecido (SILVA, 2011).

2.2.1.7 Coesão e tixotropia

Pode ser definida como a propriedade que a argamassa possui em manter seus constituintes homogêneos, não havendo segregação (SHANKOSKI, 2012).

Segundo Mehta e Monteiro (2008) dosagens experimentais, quando a coesão é dita eficiente, é possível alterar a mesma através da modificação de alguns parâmetros, tais como relação água/materiais secos, quantidade, tipo e finura do cimento, proporção cimento/agregado, granulometria e forma dos agregados, presença de material pulverulento e uso de cal ou de aditivos.

Vaz (2016) discorre que a coesão refere-se as forças físicas de tração que existem entre as partículas sólidas da argamassa e às ligações químicas da pasta ligante.

A tixotropia está relacionada à coesão, porém, numa escala mais acentuada. Argamassas tixotrópicas exigem uma baixa energia para alterarem

sua forma, e quando isso acontece, a mantém inclusive sob força da gravidade (SHANKOSKI, 2012).

2.2.2 Propriedades das argamassas no estado endurecido

2.2.2.1 Resistência Mecânica

Segundo Carasek (2007), a resistência mecânica é uma propriedade que fornece informações quantitativas e qualitativas acerca das características físicas das argamassas, além de uma relação entre carga aplicada e área de aplicação. As características da resistência mecânica são uma relação das tensões de compressão, tração ou cisalhamento, as quais uma argamassa está submetida, e também a natureza, dosagem dos materiais, além do fator água/aglomerante. Kanning (2013) salienta ainda um dos principais motivos acarretadores da perda de resistência mecânica de argamassas, trata-se dos vazios criados pelo alto fator água/aglomerante, durante a mistura. Isso deve-se ao excesso de água empregado nas misturas que não participa efetivamente das reações químicas do aglomerante, evaporando com o passar do tempo, criando assim caminhos, causando perda de resistência mecânica.

As argamassas de revestimento possuem valores do fator água/cimento maiores, quando comparadas ao concreto, isso por que a resistência à compressão não é o enfoque maior das argamassas, e por que a água influencia diretamente na sua trabalhabilidade, propriedade muito importante para as argamassas em seu estado fresco (SHANKOSKI, 2012). Porém, ainda assim é preciso verificar a resistência à compressão, para que não ocorram valores muito baixos de resistência, o que pode prejudicar o desempenho de toda alvenaria (SILVA, 2007, apud SHANKOSKI, 2012). Argamassas com resistências à compressão muito baixas podem provocar a ruptura da alvenaria por esmagamento da junta (SHANKOSKI, 2012).

Segundo Shankoski (2012), o desenvolvimento da resistência à compressão de argamassas acontece de forma similar para com os concretos, partindo do enrijecimento constante com o tempo em função da hidratação do

Silva (2011) afirma que essa propriedade sofre influência das características e do traço dos materiais constituintes da argamassa, sendo melhorada com o aumento do consumo de cimento, o material ativo da mistura.

A NBR 8789 (ABNT, 1985) estabelecia uma resistência à compressão de 9 MPa para argamassas de alvenaria estrutural de blocos de concreto. Porém, segundo Prudêncio Jr. et al. (2003, apud SHANKOSKI, 2012), é incoerente a consideração de um valor mínimo para resistência, tendo em vista que o ensaio de verificação da resistência à compressão não reproduz a realidade dos estados de tensões que as argamassas são sujeitas quando em uma junta de alvenaria, também devido a fatores tais como a retenção de água e absorção inicial dos blocos.

Vale ressaltar que uma alta resistência à compressão da argamassa não significa uma solução estrutural. As argamassas devem resistir aos esforços que a parede de alvenaria está submetida, porém, não deve extrapolar a resistência do bloco na área líquida, de modo que as fissuras aconteçam no conjunto aconteçam na junta (SHANKOSKI, 2012).

Silva (2011) experimentou argamassas mistas com blocos de resistências diferentes, de 12 e 22 MPa, e verificou que aumentando em 116% a resistência da argamassa, aumentou-se em 21,9% a resistência dos primas moldados com blocos de resistência de 12 MPa, e 2,2 % nos prismas moldados com blocos de resistência de 22 MPa.

2.3.2.2 Capacidade de deformação

Consiste na relação entre a tensão existente em um corpo e a deformação específica que essa tensão produz, sendo determinada pela declividade da curva tensão x deformação, sob carregamento uniaxial (SHANKOSKI, 2012).

É a capacidade que as argamassas apresentam em se deformar sem ruptura, de forma plástica, retornando para as dimensões iniciais ao cessar das solicitações as quais são submetidas. Silva (2011), ainda discorre que esta propriedade pode ser classificada através do módulo de elasticidade, onde quanto menor o valor do módulo, maior é a capacidade da argamassa em absorver deformações.

O módulo de elasticidade é a expressão da rigidez da argamassa em seu estado endurecido, e é proporcionado pelo cimento hidratado, através do embricamento entre as partículas dos agregados, isso devido à forma e rugosidade dos grãos, dos teores de ar incorporado e da presença de material pulverulento (SILVA & CAMPITELI, 2008).

2.3 Utilização de resíduos em argamassas

O volume de resíduos sólidos inorgânicos gerados e despejados na natureza vem aumentando de forma considerável e preocupante, se tornando inclusive um grave problema para a atual e futuras gerações da sociedade. Nesse tocante, visando aplicar esse resíduo, dar-lhe um novo uso, inúmeras pesquisas vem sendo tomadas a fim de retirar da natureza esse tipo de resíduo antes tido como lixo e reaproveitá-lo como insumo e matéria prima.

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) têm necessitado da correta atenção por parte do poder público e dos institutos pesquisadores, pois a gestão destes tem relações com a saúde, meio ambiente, além de influenciar a qualidade do meio urbano e possuírem uma rede de interações que envolvem aspectos sociais, técnicos, administrativos, operacionais, jurídicos, econômicos e financeiros. (FRANÇA & RUARO, 2009 e SILVA & PINHEIRO, 2010).

Para a problemática da destinação dos resíduos industriais, a aposta se deu na inovação tecnológica dos materiais utilizados pela construção civil, pois a comunidade científica constatou que os rejeitos gerados por alguns ramos produtivos eram reutilizados como matéria prima na fabricação dos materiais da indústria da construção e, além disso, averiguou que tais resíduos não causavam contaminação que viesse a afetar a saúde humana e minorar propriedades físicas, químicas, mecânicas e térmicas dos novos produtos (PÉREZ-VILLAREJO et al., 2012).

Segundo Madurwar et al (2013), o reaproveitamento de resíduos industriais parece ser uma viável e sustentável solução para a enorme demanda de materiais de construção, principalmente nas últimas décadas, quando houve um acentuado crescimento populacional. Institutos e pesquisadores tem apostado em inovações tecnológicas para o atendimento da demanda de

materiais de construção necessários para suprir o crescimento populacional e o aumento dos padrões de vida, além de dar um novo destino a esse resíduo, que provavelmente seria depositado em aterros e lixões.

Por tal, surgiu a necessidade de buscar novas formas de reduzir os impactos causados pela indústria da construção civil, principalmente pelo setor de produção de compósitos de cimentos, concretos e argamassas, que é responsável por cerca de 4% dos gases liberados para a atmosfera que causam o aquecimento global, libera enormes quantidades de poluentes e é um grande consumidor de energia (PÉREZ-VILLAREJO et al., 2012).

Tais compósitos, apesar de serem geradores de impactos significativos, desempenham um papel indispensável em termos de desenvolvimento econômico e social, pois são fundamentais para as construções e para o avanço da infraestrutura. Logo, utilizar resíduos industriais nos compósitos da construção civil também pode melhorar a sustentabilidade da indústria de cimento (RODRIGUES & JOEKES, 2011, apud DUARTE, 2014).

É, então, necessário o desenvolvimento de materiais sustentáveis para aplicação e utilização na construção civil, visando reduções de custos, energia e de consumos das reservas naturais (DUARTE et al., 2014).

Donato da Silva et al. (2010) discorrem que utilizar agregados reciclados para produção de argamassas e concretos possui vantagens dos pontos de vista técnico, ambiental, econômico e social, como a preservação dos recursos naturais, redução de custos de transporte, um menor índice de poluição causado pelo descarte dos resíduos, redução do consumo energético e, conseqüentemente, atende aos requisitos da sustentabilidade.

Os resíduos da indústria química podem ser utilizados em substituição ou adição de materiais convencionais para a produção de argamassas e concretos. Inúmeras pesquisas utilizando fibras de polímeros tais como polipropileno, poliestireno, tereftalato de polietileno e polietileno, polímeros que têm se tornado alternativas inovadoras e sustentáveis para a incorporação em argamassas e concretos (AGREDO et al., 2010).

Na literatura é possível encontrar inúmeras pesquisas acerca da utilização de resíduos industriais como incorporação de argamassas, em substituição do agregado miúdo natural.

Em suas pesquisas, Silva et al. (2010) realizaram análises de granulometria, ensaio de compressão axial, ensaio de flexão, densidade e absorção de água de argamassas incorporadas com cerâmica de barro vermelho em granulometria de areia em substituição do agregado miúdo natural. Concluíram que as argamassas com areia reciclada apresentam melhores resultados do que a argamassa de referência. A resistência à flexão e à compressão cerca de 12% mais altas e o coeficiente de permeabilidade a água aproximadamente 16% mais baixo.

Saikia et al. (2012) pesquisaram acerca da utilização de escória de alto forno em granulometria de areia como incorporação de argamassas em substituição do agregado miúdo natural, realizando análises de granulometria, composição química, e ensaio de compressão axial. Concluiu-se que a escória de alto forno em granulometria de areia gerada pode ser utilizada como substituta parcial do agregado miúdo natural nas argamassas. Os resultados de compressão variaram de acordo com a dosagem da escória incorporada, porém os autores ainda consideram a utilização do material em substituição do agregado natural muito vantajosa.

Menezes et al (2009) desenvolveram pesquisas acerca da utilização de resíduos da serragem do granito e resíduos da construção civil como materiais alternativos para a produção de argamassas, e obtiveram como resultado que é admissível a substituição do aglomerante por resíduos nas argamassas no teor de até 50%, além de concluir que os resíduos com atividades pozolânicos proporcionam aumentos na resistência à compressão simples das argamassas.

Reis e Carneiro (2012) trabalharam incorporando garrafas PET em flocos e realizando análises de granulometria, compressão axial e flexão. Concluíram que a incorporação de PET em flocos acarretou na redução do peso específico da argamassa, e não prejudicou a mesma em termos de propriedades mecânicas.

Portanto, a reciclagem e o reaproveitamento de resíduos oriundos dos mais diversos ramos industriais podem melhorar os parâmetros técnicos dos materiais na construção civil, além de trazer ganhos econômicos e ambientais. Mas, para tal, é de suma importância a realização de análises criteriosas prévias ao emprego de materiais alternativos. Sempre é preciso utilizar-se de três critérios para avaliação da possibilidade de reutilização e incorporação de um resíduo como material alternativo, são esses: análise científica, sustentabilidade e enfoque no ciclo de vida (DUARTE et al., 2014).

2.4 PET

2.4.1 Definição e propriedades

Segundo a ABIPET (2017), o politereftalato de etileno (PET) é um polímero formado pela reação do ácido tereftálico, que é obtido pela oxidação do p – xileno, e o etilenoglicol, sintetizado a partir do eteno. Ambos compostos são oriundos da indústria petroquímica.

Silva (2013) discorre que o polímero é uma macromolécula criada a partir da repetição de longas cadeias de uma mesma unidade molecular chamada mero, que por sua vez é obtido partindo-se de compostos químicos simples, os monômeros, tal como o etileno, fenol, entre outros.

Baseado em seu comportamento quando aquecidos, os polímeros podem ser classificados como termoplásticos e termofixos. Polímeros termoplásticos, quando aquecidos, fundem-se e podem ser moldados; enquanto que os termofixos só podem ser moldados uma vez e, se aquecidos, queimam, porém, sem se fundir (MEDEIROS, 2005, apud SILVA, 2013). O PET é tido como material reciclável pois sob efeito de temperatura e pressão, amolece e flui, tornando-se então moldável, e posteriormente, sob exposição à aplicação de temperatura e pressão, pode ser remodelado (PEZZIN, 2007).

Ainda, esse material é sensível à degradação térmica, especialmente na presença de água e/ou oxigênio. A presença de oxigênio induz uma degradação oxidativa, enquanto que a degradação térmica com umidade induz a quebra de cadeias, o que reduz o peso molecular do polímero (ABIPET, 2017).

A escolha do PET micronizado para incorporação de argamassa se deu em função do PET ser um material 100% reciclável, abundante no meio ambiente e de baixo custo. Todos esses fatores o tornam bastante atrativo, pois aqui se aliam dois grandes benefícios: o benefício sustentável e a melhoria das propriedades de um importante material para a construção civil.

2.4.2 Fabricação da resina PET

A produção industrial da resina PET se dá em três etapas: pré-polimerização, policondensação e polimerização no estado sólido.

2.4.2.1 Pré-polimerização

Na primeira etapa, o PET amorfo é obtido através da polimerização no estado líquido com viscosidade intrínseca em torno de 0,6. Nessa etapa, forma-se o bis-2-hidroxietil-tereftalato (BHET), conhecido como monômero da polimerização. O poliéster pode ser fabricado por dois caminhos diferentes: a) esterificação direta; e b) transesterificação (ROMÃO et al., 2009).

2.4.2.2 Policondensação

Nesta reação (c), o BHET é gradativamente aquecido a 280^o após a pré-polimerização. São obtidos então polímeros com massa molecular em torno de 33.000 g/mol, pois o aumento na viscosidade do material dificulta a difusão do EG e, logo, reduz a taxa de reação. Para a obtenção do polímero com massa molecular elevada, é preciso realizar outra etapa, a polimerização no estado sólido (ROMÃO, et al., 2009).

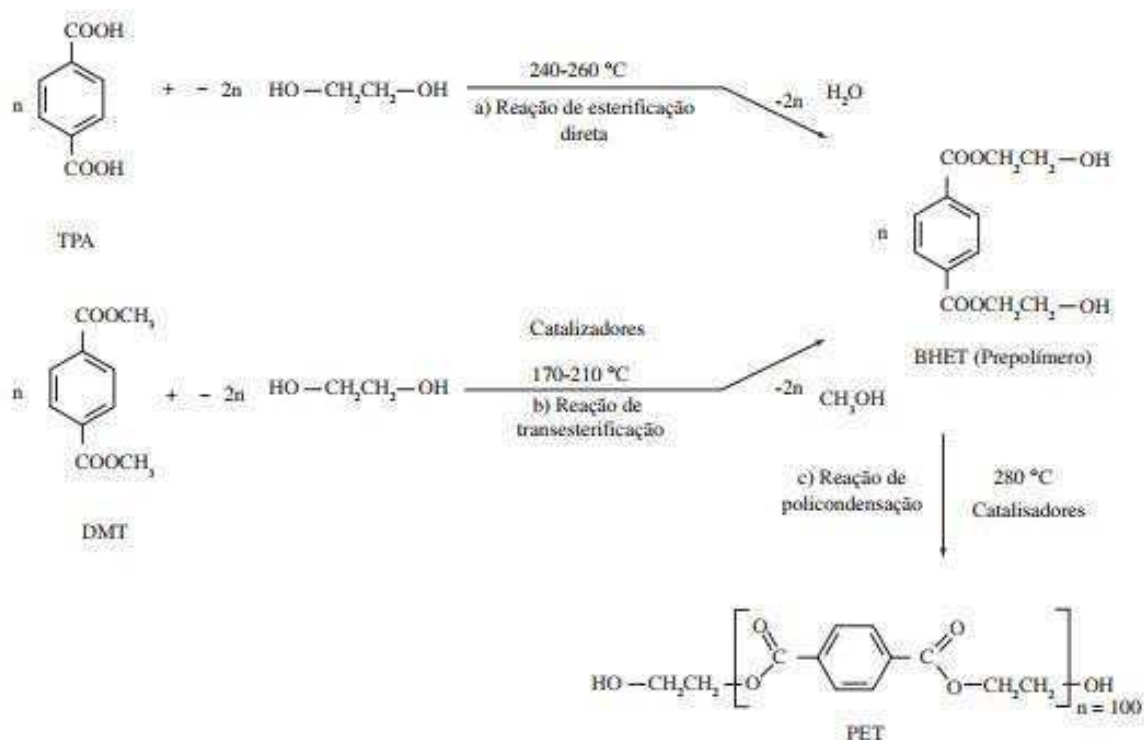
2.4.2.3 Polimerização no estado sólido

Esta reação é feita a uma temperatura entre a de transição vítrea e a de fusão, ou seja, entre 220 e 230 °C, por um período entre 10 e 30 horas. É utilizada para a produção de PET com massa molar acima de 30.000 g/mol. O PET produzido pela polimerização no estado sólido é utilizado em artefatos processados por injeção-sopro, como as embalagens para bebidas carbonatadas (ROMÃO et al., 2009).

Segundo Romão et al. (2009), o aspecto mais importante desta etapa reside no fato de aumentar o grau de cristalinidade do material em um intervalo de tempo curto sob alto vácuo, ou com um sistema de atmosfera inerte sob agitação, para assim evitar o processo de sinterização, no qual as partículas começam a aderir entre si.

Todo o processo está sintetizado e detalhado na Figura 10.

Figura 10: Processo para criação da resina PET.



FONTE: Adaptado de Romão et al. (2009)

2.4.2 Garrafas PET

O PET proporciona uma elevada resistência mecânica ao impacto e resistência ao contato com agentes agressivos. Além disso, é um excelente isolador de para gases e odores, conservando assim uma variedade de produtos com segurança e higiene, para o produto e para o consumidor (ABIPET, 2017).

A ABIPET(2017) discorre ainda que as embalagens de PET tem se mostrado ser o recipiente mais adequado para a indústria de bebidas em todo o mundo, reduzindo custos de transporte e produção, pois evita desperdícios em

todas as fases de produção e distribuição. A Figura 11 ilustra garrafas PET comuns, utilizadas em larga escala em todo o mundo.

Figura 11: Garrafas PET.



FONTE: rzstore.com.br (2014)

Devido a sua grande variedade de usos, preferência por quase totalidade das empresas de bebidas e de líquidos e os benefícios do processo de produção por elas proporcionadas, as garrafas PET acabam se tornando um lixo urbano que pode causar sérios problemas à natureza se não destinado corretamente após o uso (MENESES, 2011).

2.4.3 Fabricação de garrafas PET

Partindo-se da resina PET, são necessárias 7 etapas para a sintetização das embalagens, tal como as garrafas. Conforme a ABIPET (2017), as etapas são: secagem, alimentação, plastificação, injeção, condicionamento, sopro e ejeção do produto, sendo as últimas três etapas referentes a produção da garrafa propriamente.

2.4.3.1 Condicionamento

Nesta etapa, a pré-forma recebe um tratamento térmico diferente, sendo aquecida conforme o desenho da embalagem, onde for mais necessário, o que otimiza o sopro. Este condicionamento pode se dar de duas maneiras distintas: um estágio e dois estágios. A diferença da adoção dos tipos de condicionamento

de dá conforme for o sistema adotado para o sopro das embalagens (ABIPET, 2017). A Figura 12 ilustra diferentes tipos de pré-formas para embalagens PET.

Figura 12: Pré-formas de embalagens PET.

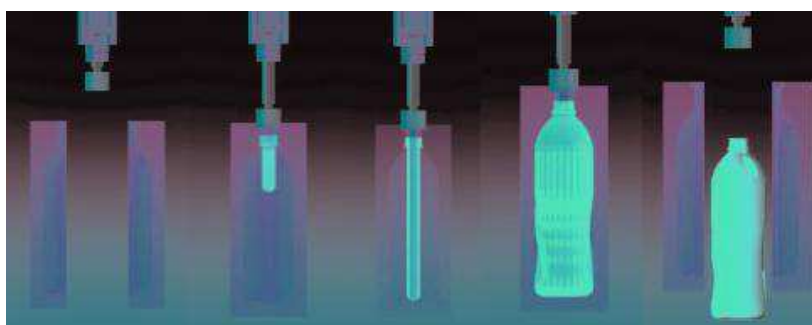


FONTE: plasticosslc.com.br (2017)

2.4.3.2 Sopro

Nesta fase, a pré-forma é posicionada dentro do molde, cuja cavidade tem a forma final da embalagem. Um pino penetra no gargalo da pré-forma para estirar a mesma, e então o ar comprimido é soprado no seu interior. O corpo da pré-forma é inflado de forma controlada, estirando-se as moléculas de PET nas direções radial e axial, até que encoste na cavidade do molde de sopro e adquira sua forma final (ABIPET, 2017). A Figura 13 ilustra todo o procedimento, e a Figura 14 ilustra um exemplo de molde para pré-forma de garrafa PET.

Figura 13: Processo de sopro da pré-forma no molde.



FONTE: ebah.com.br (2017)

Figura 14: Molde para pré-forma de garrafa PET.

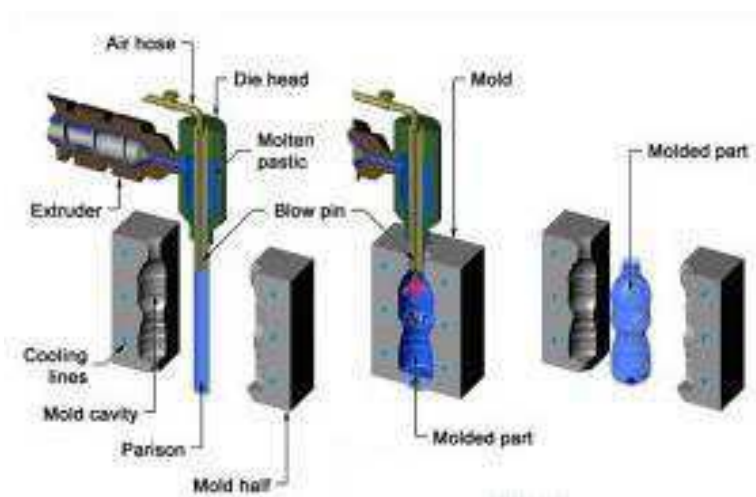


FONTE: cadxpert.com.br (2017)

2.4.3.3 Ejeção do produto

Por fim, a embalagem é retirada da máquina, pronta para o envase. Todo processo de produção de garrafas PET é normatizado pela NBR 15395 (2006) (ABIPET, 2017). A Figura 15 ilustra todo o processo e produto final retirado da máquina.

Figura 15: Retirada da garrafa pronta do molde.



FONTE: fanmasgroup.com (2017)

2.4.4 Resíduos de PET

Conforme preconiza a NBR 10004 (2004), norma brasileira de classificação dos resíduos sólidos, o PET pode ser classificado como resíduo classe II B – Inerte, como pode ser visto:

- *Resíduos classe II B – Inertes*: Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G.

Ainda, o anexo H da norma, que traz uma classificação quanto aos resíduos não perigosos, nos informa:

- *A007* – Resíduos de plástico polimerizado, excluídos aqueles contaminados por substâncias constantes nos anexos C, D ou E e que apresentem características de periculosidade.

O PET, quando descartado, pode levar cerca de 400 anos para degradar-se totalmente. Isso reduz a capacidade física dos aterros, e diminui a capacidade de percolação de gases e líquidos, o que ocasiona num maior tempo necessário para estabilização da matéria orgânica. Ainda, esse material possui uma forte resistência a agentes biológicos e os produtos de sua degradação não são nocivos ao ser humano (PEZZIN, 2007, apud MENESES, 2011).

Caso a hierarquização da gestão de resíduos para o descarte do PET não se dê de maneira adequada, uma série de impactos ambientais negativos são causados, são esses: além da demora de séculos para sua decomposição, os resíduos de PET representam 10 a 20% dos RS'U coletados; causam maiores custos para o manejo dos RSU; impermeabilizam as camadas em decomposição, prejudicando a percolação de gases e líquidos; em caso de queima, liberam gases tóxicos e nocivos e prejudicam a drenagem urbana, propiciando as enchentes (ROMÃO et al., 2009, FRIGIONE, 2010, COELHO et

al., 2011, HAMAD et al., 2013, apud DUARTE, 2014). A Figura 16 ilustra os caminhos para hierarquização dos resíduos.

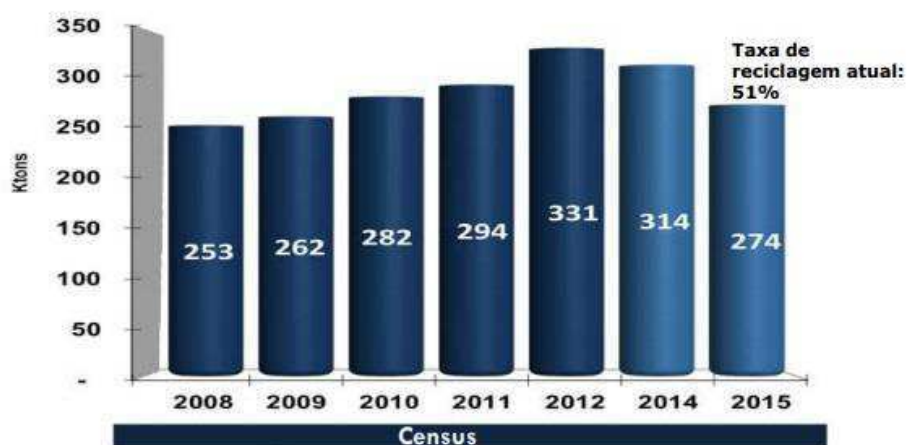
Figura 16: Hierarquização dos resíduos.



FONTE: Duarte adaptado de Demirbas (2011)

2.4.4.1 PET reciclado

Segundo o 10º censo da reciclagem do pet no Brasil, realizado pela ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET em 2015, 274 mil toneladas de PET foram recicladas no país. Um valor correspondente a 51% do total de PET consumido no país. Quanta essa que foi totalmente reciclada e reutilizada. Na Figura 17 observa-se as quantidades de PET recicladas ao longo dos anos, e na Tabela 3 verificou-se as taxas de reciclagem do PET no Brasil nos últimos três censos.

Figura 17: Quantidade de PET em Kton reciclada ao longo dos anos.

FONTE: ABIPET (2015).

Tabela 3: Taxa de recuperação do PET no Brasil.

Censos da Reciclagem de PET - Brasil	Taxa de reciclagem de PET no Brasil
2008	54,8%
2009	55,6%
2010	55,8%
2011	57,1%
2012	58,9%
2015	51%

FONTE: Adaptado de ABIPET (2015).

A Figura 18 ilustra a porcentagem de PET reciclado subdividida em seus destinos e utilizações finais, que são diversas. Concluindo então que mais da metade do PET reciclado do Brasil é reutilizado na indústria têxtil e na produção de resinas insaturadas e alquídicas. Vale salientar que o Brasil tem a maior variedade de aplicações do PET reciclado do mundo

Figura 18: Usos finais do PET reciclado no Brasil.



FONTE: Adaptado de ABIPET (2015).

A reciclagem do PET é classificada em: primária, secundária, terciária e quaternária. As reciclagens primária e secundária são conhecidas como reciclagem mecânica, sendo a diferença entre uma e outra o fato de que na primária utilizam-se polímeros pré-consumo e na secundária, polímeros pós-consumo. A terceira e quarta reciclagem são também denominadas de reciclagem química e energética, respectivamente. No Brasil, a reciclagem mais usual é a mecânica (ROMÃO et al., 2009).

Essa prática proporciona uma série de vantagens nos âmbitos ambiental, social e econômico. Essas vantagens podem ser vistas através da diminuição da extração da matéria prima virgem não renovável, da deposição em aterros, no consumo energético, já que o processo de reciclagem utiliza-se em média 30% da energia necessária para produzir a resina virgem, na criação de toda uma logística para coleta, segregação, transporte e destino do rejeito e na redução do preço dos produtos com o uso de material reciclado (FRIGIONE, 2010, apud DUARTE, 2014). Através da Tabela 4, é possível observar as principais fontes de recolhimento do PET ao longo dos anos no Brasil.

Tabela 4: Formas de recolhimento do PET para a reciclagem.

Forma de recolhimento	6º Censo 2009	7º Censo 2010	8º Censo 2011	10º Censo 2015
Catadores	37%	47%	47%	34%
Cooperativas	19%	19%	21%	49%
Outros	44%	34%	32%	17%

FONTE: Adaptado de ABIPET (2009, 2010, 2011 e 2015).

Analisando a Tabela 4 é possível perceber que o encaminhamento de PET para reciclagem por catadores e cooperativas vem sofrendo um aumento gradativo e considerável. A reciclagem vem se tornando, cada vez mais, oportunidade de emprego e de geração de renda para tantos trabalhadores e famílias envolvidos no processo. Além disso, é retirada das costas dos órgãos públicos a responsabilidade de envio desse material para empresas de reciclagem, o que se reflete em menores gastos para os cofres públicos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

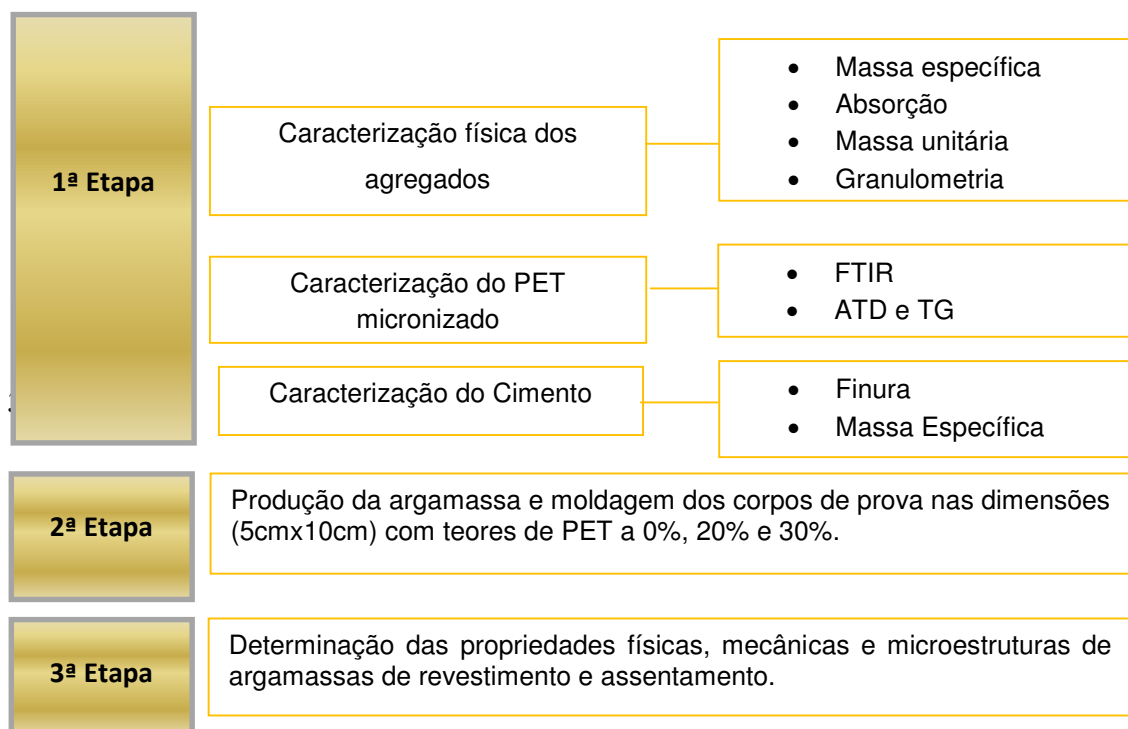
Os materiais usados na pesquisa foram:

- Cimento: O cimento utilizado na pesquisa foi o CP II Z 32 de massa específica de $2,91 \text{ g/cm}^3$ e módulo de finura de 2,84%.
- Agregado miúdo: Areia quartzosa retirada do leito do Rio Paraíba com módulo de finura de 2,42%, diâmetro máximo de 2,36 mm, massa específica de $2,618 \text{ g/cm}^3$, massa unitária no estado solto de $1,429 \text{ g/cm}^3$ e teor de materiais pulverulentos de 0,07%;
- Cal: Cal hidratada dolomítica, apresentando como principais compostos o óxido de cálcio e óxido de magnésio, sem partículas superiores a $100 \mu\text{m}$, significando que a cal possui um elevado teor de finos, apresentando para o diâmetro de $5 \mu\text{m}$ um percentual de 54,30%;
- Água: Destinada ao consumo humano fornecido pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA);
- Politereftalato de etileno-PET: O polímero utilizado será do tipo micronizado, adquirido na indústria de PET Reciclagem localizada no município de Campina Grande-PB. Apresenta picos endotérmicos a partir da temperatura de 200°C , indicando a ocorrência de modificações físicas e químicas na composição do PET. Dentre suas estruturas funcionais típicas, destacam-se as bandas: em aproximadamente 3000cm^{-1} , identificada pela vibração de deformação axial do grupo ($=\text{C}-\text{H}$), presentes em compostos aromáticos (benzeno); em 1709cm^{-1} estiramento $\text{C}=\text{O}$ de ácido carboxílico, indicativo da banda; em 1247cm^{-1} estiramento $\text{C}(\text{O})-\text{O}$ de grupos éster; em 1091 e em 1018cm^{-1} indicativo de estiramento da ligação $\text{C}-\text{O}$ e aproximadamente 726cm^{-1} , deformação angular dos carbonos dis-substituídos no anel aromático

3.2 Metodologia

A Figura 19 apresenta o Fluxograma das etapas da pesquisa.

Figura 19: Fluxograma das etapas da pesquisa.



FONTE: Autoria própria (2017).

3.2.1 Caracterização física dos Agregados e do Cimento

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 percentual de material passando na peneira em questão versus logaritmo do diâmetro da abertura da peneira.

Determinação da massa específica

A determinação da massa específica da areia é realizada por meio do frasco de Chapman, segundo a norma DNER-ME 194/1998.

Determinação da massa unitária

A massa unitária de um agregado no estado solto, é obtida pelo quociente da massa deste agregado em um recipiente de volume conhecido. O ensaio deverá ser realizado seguindo as Normas da ABNT- NBR NM 45:2006 ou DNER-ME 152/1995.

Determinação do teor de materiais pulverulentos

Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados graúdos destinados ao preparo de concreto. O ensaio deverá seguir o procedimento descrito na DNER-ME 266/1997.

Equivalente areia

Determina a porcentagem de areia, e, por conseguinte a parcela de finos, existente no material analisado. É a relação volumétrica que corresponde a razão entre a altura do nível superior de areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa do material analisado, numa proveta, em condições segundo a norma DNIT-ME 054/97.

3.2.2 Caracterização do Politereftalato de Etileno

Espectroscopia de Infravermelhos com Transformada de Fourier (FTIR)

É uma técnica usada para se obter espectros de absorção, emissão, fotocondutividade ou de difração de Raman de infravermelhos de um sólido, líquido ou gás. Um espectrômetro FTIR recolhe, simultaneamente, dados de uma vasta gama espectral, o que lhe confere vantagem sobre o espectrômetro dispersivo, que mede a intensidade num intervalo muito estreito de comprimentos de onda em cada medição.

Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (DTG)

As análises térmicas diferenciais (DTA) e termogravimétricas (DTG) de PET foram realizadas em equipamento BP Engenharia, Modelo RB 3000, operando a 12,5°C/min. A temperatura máxima utilizada nas análises térmicas será de 300°C e o padrão utilizado nos ensaios de DTA foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado.

3.2.3 Dosagem das argamassas

Foram moldadas 45 amostras, a fim de obter 3 amostras de referência e 6 amostras de cada teor de resíduo incorporado para cada idade. Foram

executadas amostras com traço base em massa de 1:2:9 (cimento:cal:areia) e a/c (fator água/cimento) = 2,18. A Tabela 5 simplifica o traço e dosagem utilizados.

Tabela 5: Traço em massa para um corpo de prova de argamassa.

Argamassa	Cimento (g)	Cal (g)	Areia (g)	PET	
				micronizado (g)	Água (mL)
REF.	33	66	296,96	0	71,93
20% PET	33	66	237,57	59,39	71,93
30% PET	33	66	207,87	89,09	71,93

FONTE: Autoria própria (2017).

3.2.3 Moldagem dos corpos de prova

Após a caracterização de todo o material e o estudo do traço a ser adotado, deu-se então a moldagem dos corpos de prova. Foram moldados, para cada idade, 3 corpos de prova de argamassa de referência, 3 corpos de prova de argamassas incorporadas com 20% de PET micronizado para o ensaio de resistência à compressão, 3 corpos de prova de argamassas incorporadas com 20% PET micronizado para o ensaio de absorção, 3 corpos de prova de argamassas incorporadas com 30% de PET micronizado para o ensaio de resistência à compressão, 3 corpos de prova de argamassas incorporadas com 30% PET micronizado para o ensaio de absorção. Totalizando então 45 corpos de prova, que foram colocados em cura na areia úmida, para as idades de 7, 14 e 28 dias.

A Figura 20 ilustra os moldes que foram utilizados para os 45 corpos de prova.

Figura 20: Molde para corpos de prova de argamassas (50x100 mm).



FONTE: kamacha.ind.br (2017).

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, realiza-se a rasadura por meio da régua.

Após 24 hrs da moldagem dos corpos de prova, os mesmos são desmoldados, identificados e colocados na areia úmida, Figura 21.

Figura 21: Corpos de provas de argamassa desmoldados e identificados.



FONTE: Autoria própria (2017).

3.2.3 Determinação das propriedades físicas e mecânicas das argamassas

Absorção de água por imersão

Ensaio realizado com o intuito de determinar a absorção de água, por meio de imersão, também do índice de vazios e da massa específica das argamassas em seu estado endurecido. O mesmo é regido pela NBR 9778 (ABNT, 2009).

Para a realização do ensaio foi-se necessário realizar pesagens das amostras nos estados saturado (M_{sat}), seco em estufa (M_s) e saturado imerso (M_I). Para tal, foi se utilizada uma balança de precisão com dispositivo para pesagem de amostras submersas, Figura 22.

Figura 22: Balança de precisão (a) e dispositivo para pesagem de amostras submersas (b).



(a)

(b)

FONTE: Autoria própria (2017).

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, 1997), que especifica a determinação de resistência à compressão de cimento Portland, e que foi modificada para a mensuração desta propriedade em argamassas. A Figura 23 ilustra o tipo de prensa utilizada para o rompimento dos corpos de prova de argamassa. A prensa deve atuar a uma velocidade de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s, como preconiza a NBR 7215 (ABNT, 1997)

Figura 23: Prensa de compressão axial.

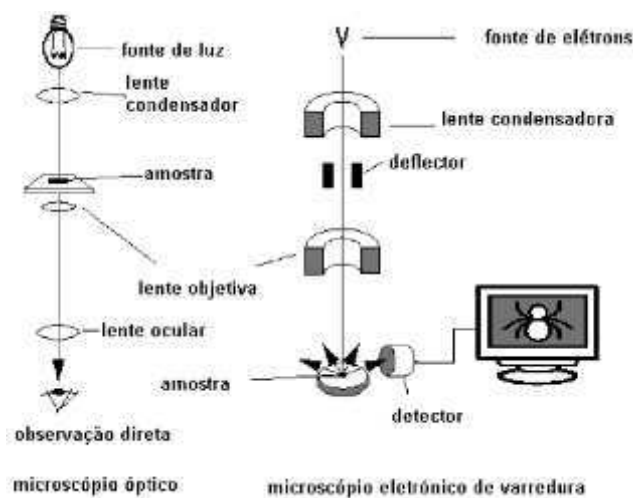


FONTE: emic.com.br (2017).

3.2.4 Análise microestrutural através da microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um versátil aparelho utilizado para a análise das características microestruturais de materiais sólidos, utilizando-se de um feixe de elétrons. A Figura 24 ilustra a diferença de maquinário entre um microscópio convencional e um microscópio eletrônico de varredura.

Figura 24: Comparativo entre microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura.



FONTE: Dedavid; Gomes; Machado (2007).

Trata-se de um aparelho que pode fornecer informações sobre a morfologia, estrutura e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida (NAGATAMI et al., 1987, apud DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007). Além disso, as imagens geradas das amostras são tridimensionais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

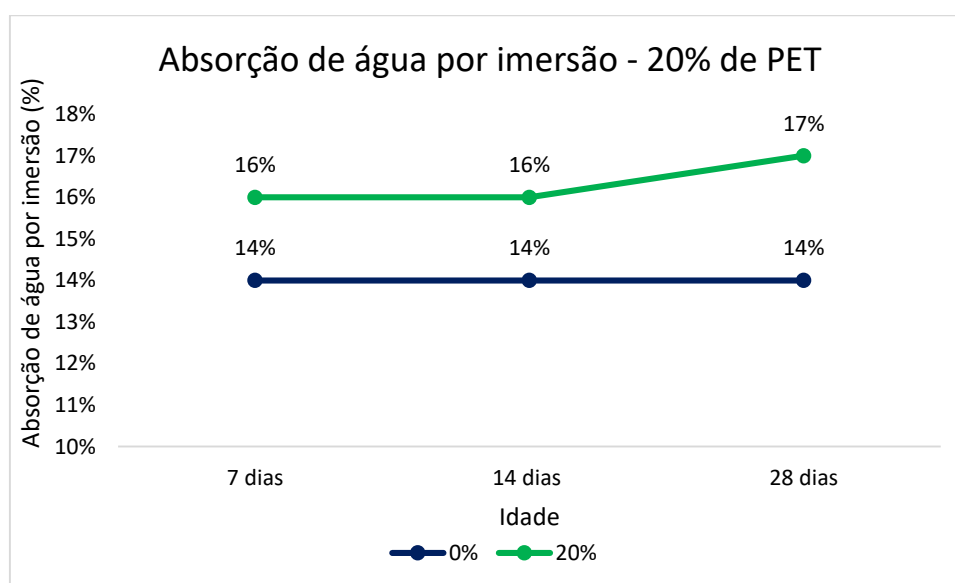
4.1 Avaliação de propriedades físicas de argamassas incorporadas com 20% e 30% de PET micronizado em substituição do agregado miúdo.

Nas propriedades físicas avaliadas, realizou-se análise relativa a absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica da amostra seca e saturada.

4.1.1 Absorção de água por imersão

Na Figura 25 verifica-se os resultados obtidos para absorção de água por imersão para as argamassas incorporadas com 20% de PET micronizado em substituição do agregado miúdo.

Figura 25: Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão para incorporação de 20% de PET micronizado.

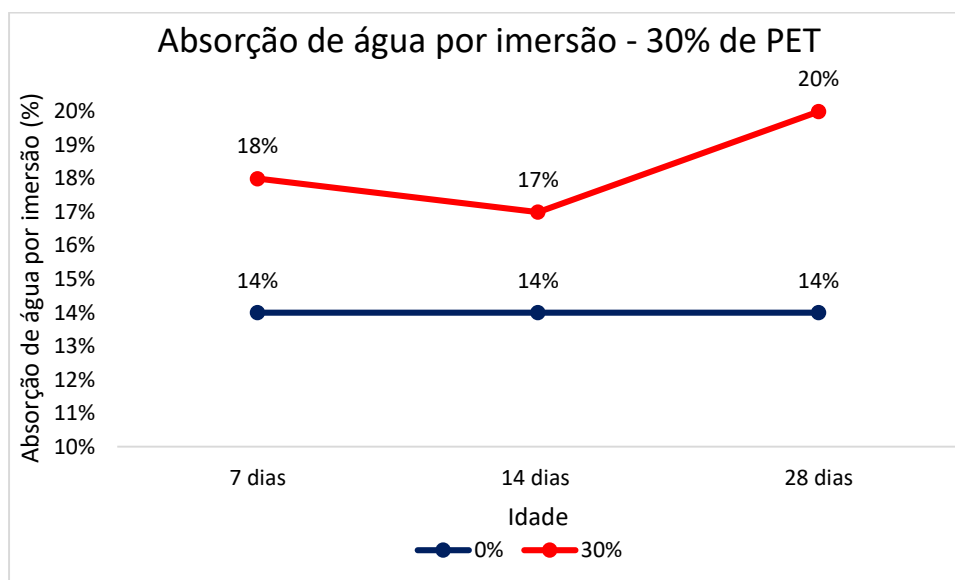


FONTE: Autoria própria (2017).

É possível inferir da Figura 25 que há um aumento da absorção de água com a incorporação do PET micronizado a um teor de 20%, em comparação com a argamassa de referência. Para a idade de 28 dias, houve um aumento de 3% da absorção de água, enquanto que a argamassa de referência permaneceu constante com 14% em todas as idades de avaliação.

Os resultados da absorção de água de argamassas incorporadas com 30% de PET, Figura 26.

Figura 26: Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão para incorporação de 30% de PET micronizado.



FONTE: Autoria própria (2017).

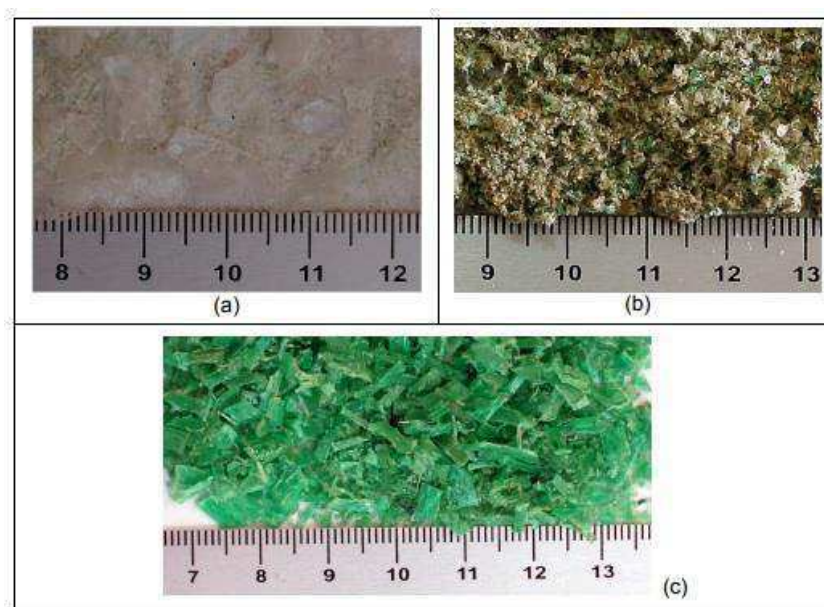
Para a incorporação de 30% de PET micronizado também houve um aumento na absorção de água por imersão. Aos 28 dias, o aumento foi de 6 %, o dobro do aumento que a incorporação de 20% de PET micronizado proporcionou para a mesma idade, Figuras 25 e 26.

O aumento da absorção de água com a incorporação de PET ocorre devido à característica higroscópica desse resíduo, ele absorve a água e não a libera. Além disso, não há interação química entre o polímero e a matriz cimentícia, o que gera a porosidade residual, elevando assim a absorção de água.

Os dados encontrados corroboram com a pesquisa de Modro (2008), que avaliou a absorção de água de concretos de cimento Portland incorporados com três tipos de resíduos de PET reciclado em substituição de agregados minerais: Filme de PET (ou FI), areia de PET (ou AR) e flake de PET (ou FL). Os três tipos de resíduo PET se apresentam em granulometrias e texturas diferentes, conforme Figura 27. Os teores de incorporação utilizados foram 1%, 2%, 3% e

4%vol para o filme de PET e 10%, 20%, 30% e 40%vol para a areia de PET e o flake de PET.

Figura 27: Fotografias de amostras de resíduos de PET utilizados na pesquisa: (a) Filme de PET; (b) Areia de PET; (c) Flake de PET. Menor divisão da escala equivale a 1 mm.



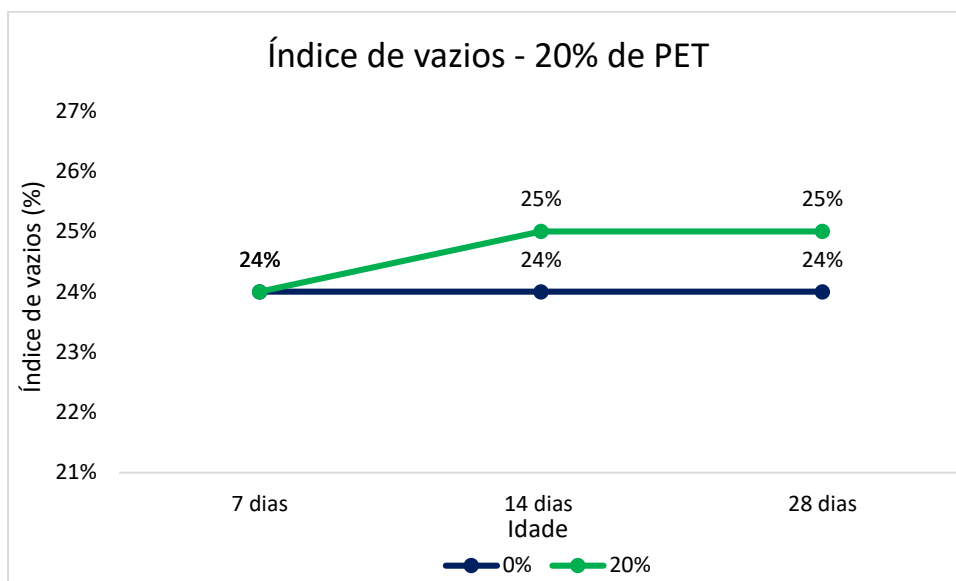
FONTE: Adaptado de Modro (2008).

Para todos os concretos incorporados com os resíduos de PET observou-se um aumento na absorção de água a medida que aumenta o percentual de substituições. Para os concretos incorporados com areia de PET, para o teor de 40%, o aumento de absorção de água foi de 76%. Para o resíduo tipo flake de PET, no teor de 40%, e para o resíduo filme de PET, no teor de 4%, os aumentos de absorção de água em relação aos concretos de referência foram de 9% e 12%, respectivamente (MODRO, 2008).

4.1.2 Índice de vazios

Na Figura 28 pode-se verificar os resultados para o índice de vazios da argamassa incorporada com 20% de PET micronizado em substituição ao agregado miúdo.

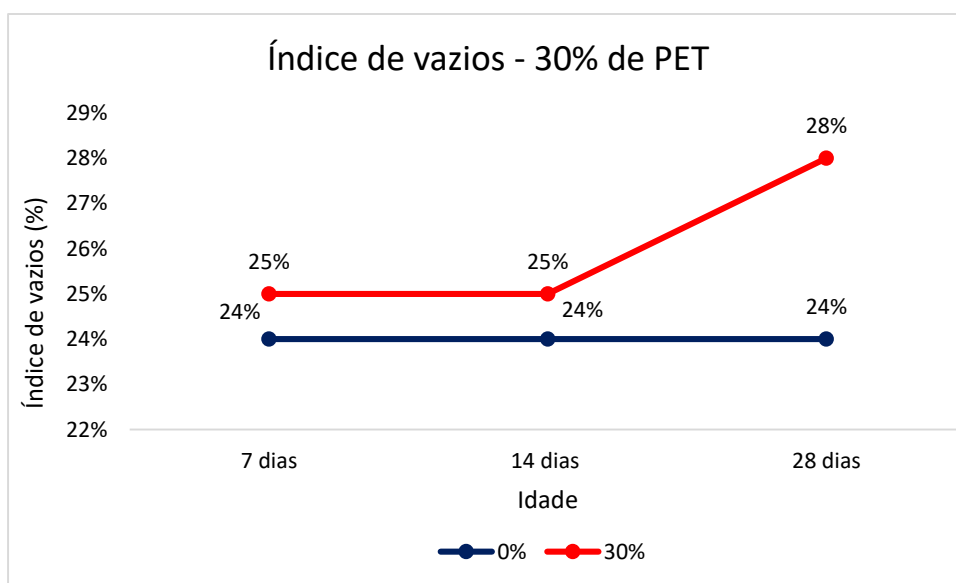
Figura 28: Resultados dos ensaios de índice de vazios para incorporação de 20% de PET micronizado.



FONTE: Autoria própria (2017).

A incorporação do polímero a composição das argamassas aumentou o índice de vazios, isso fica ainda mais notável através da análise dos resultados obtidos para as argamassas incorporadas com 30% de PET micronizado, Figura 29.

Figura 29: Resultados dos ensaios de índice de vazios para incorporação de 30% de PET micronizado.



FONTE: Autoria própria (2017).

Aos 28 dias, há aumento de 4% do índice de vazios para as argamassas incorporadas com PET micronizado no teor de 30%, Figura 29. Essa redução deve-se a falta de interação química entre o polímero e a matriz cimentícia, isso gera vazios na estrutura interna da argamassa, e aliado a isso está a falta de aderência do resíduo aos demais componentes da mistura, por ser um material liso. Logo, não há um perfeito empacotamento, gerando poros na estrutura interna.

Modro (2008), em suas pesquisas, também avaliou a porosidade de concretos de cimento Portland incorporados com filme de PET, areia de PET e flake de PET, em substituição do agregado mineral, como ilustrados na Figura 27. Os resultados obtidos indicaram que, para todos os traços de resíduos incorporados, há um aumento da porosidade dos concretos a medida que aumenta o percentual de substituições.

Ainda segundo Modro (2008), o aumento da porosidade, ou do índice de vazios, está ligado a área de superfície específica dos resíduos. Quanto mais irregular o resíduo, maior é sua área específica, é o caso da areia de PET, que para o teor de 40% teve um aumento de 14,14% no índice de vazios, em comparação com os concretos de referência. Para o filme de PET, no teor de 4%, e flake de PET, no teor de 40%, os aumentos de índices de vazios foram 1,97% e 7,87%, respectivamente.

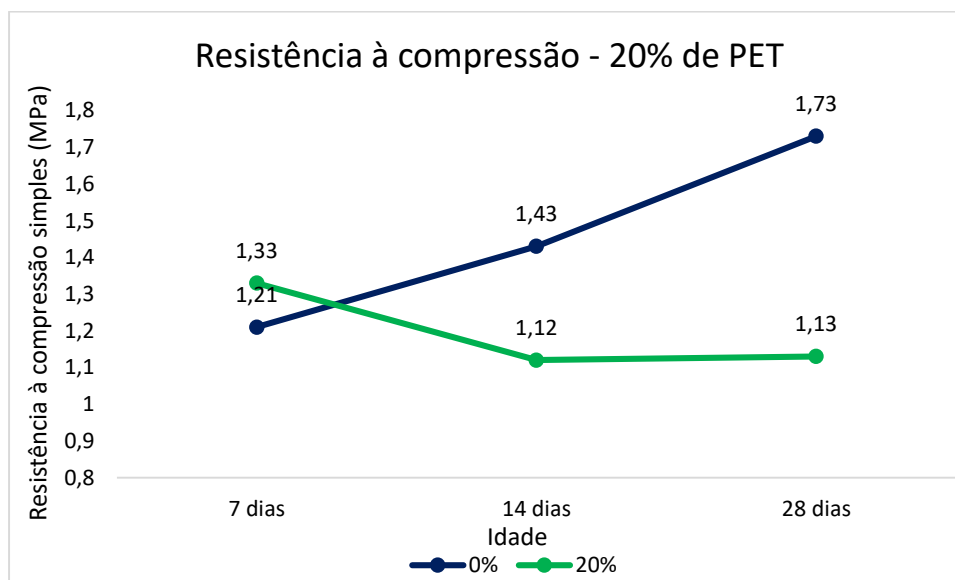
Ressalta-se que a incorporação de PET micronizado reduziu a massa específica da argamassa em seus estados seco e saturado, para ambos os teores incorporados. Isso ocorre devido ao fato da massa específica do PET micronizado ser inferior a massa específica da areia, caracterizada nessa pesquisa em $2,618 \text{ g/cm}^3$. Para a substituição de 20%, a redução aos 28 dias das massas específicas seca e saturada foram de 11% e 9%, respectivamente. Para a substituição de 30%, a redução aos 28 dias, das massas específica seca e saturada foram de 19% e 15%, respectivamente. Logo, um maior percentual de substituição de PET ocasiona uma maior redução na massa específica, seca ou saturada.

4.2 Avaliação de propriedades mecânicas de argamassas incorporadas com 20% e 30% de PET micronizado em substituição do agregado miúdo.

4.2.1 Resistência à compressão simples

Os resultados obtidos para o ensaio de compressão simples para as argamassas incorporadas com 20% de PET micronizado em substituição do agregado miúdo, é possível identificar uma redução da resistência à compressão com a incorporação do PET micronizado no teor de 20%, aos 14 e 28 dias, essa diferença chega a ser de 34,68%, em comparação com a argamassa de referência, Figura 30.

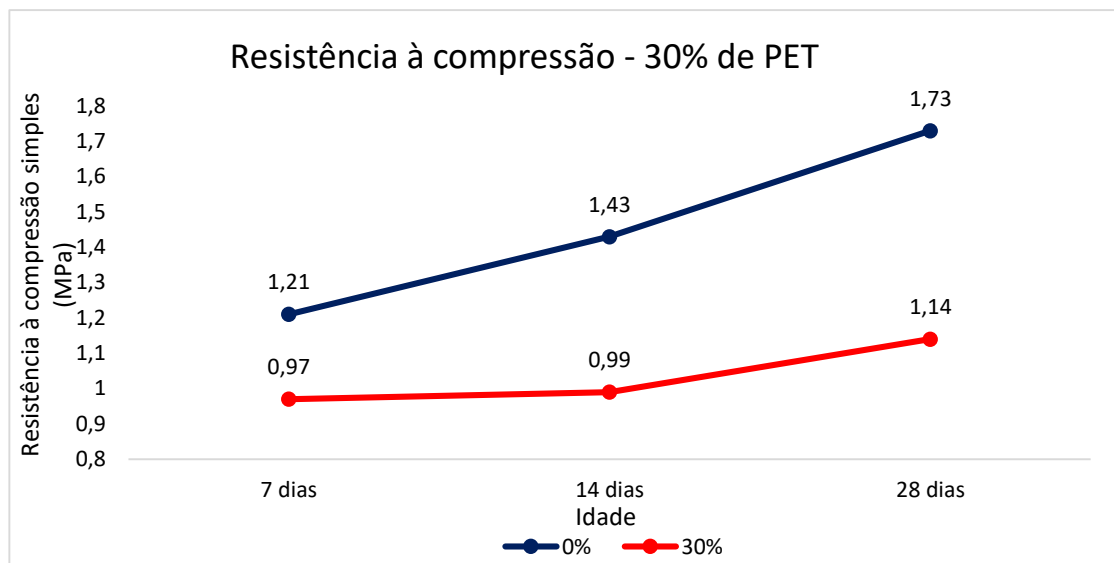
Figura 30: Resistência à compressão simples para incorporação de 20% de PET micronizado.



FONTE: Autoria própria (2017).

Na Figura 31, observa-se redução da resistência à compressão com a argamassa constituída a 30% PET. Com redução de 34,10% aos 28 dias, em comparação a argamassa de referência.

Figura 31: Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para incorporação de 30% de PET micronizado.



FONTE: Autoria própria (2017).

Para a idade de 28 dias, a redução foi de 34,10%, em comparação com a argamassa de referência.

Para ambos teores utilizados, aos 28 dias, as reduções de resistência a compressão foram praticamente as mesmas, o que indica que ao passar do tempo, existe uma indiferença entre os teores de 20% e 30% do polímero incorporado, no que diz respeito a resistência à compressão.

Partindo-se dos resultados verificados na Figura 30 e Figura 31, observa-se que o PET micronizado ocasionou a redução da resistência a compressão, para ambos os teores de substituição do agregado miúdo, para todas as idades. A única exceção foi para o teor de 20% de polímero, aos 7 dias, onde a resistência foi superior a de referência, mas foi inferior para as duas demais idades analisadas.

Essa redução deve-se, primordialmente, a falta de interação química entre o polímero e a matriz cimentícia, que gera porosidade residual e maior absorção de água, logo, menor resistência, e a menor resistência mecânica intrínseca dos polímeros, em relação aos agregados naturais, mais resistentes.

Além disso, a redução da resistência tem conexão com as propriedades verificadas. Quanto maior a absorção de água das argamassas incorporadas, menor é a quantidade de água para a hidratação do cimento. E quanto maior a incorporação de PET micronizado, maior o índice de vazios, pois se trata de um polímero liso, inerte, flexível e de estrutura irregular, o que acaba por gerar poros na estrutura interna da argamassa, reduzindo assim a resistência à compressão da mesma.

Vaz (2016), estudou o desempenho de argamassas incorporadas com areia de PET, nos teores de 5%, 15% e 30%, em substituição ao agregado miúdo natural. Verificou que a substituição resultou no aumento da resistência a compressão, para teores pequenos, enquanto que maiores teores de incorporação resultaram na diminuição da resistência a compressão. As amostras incorporadas com 5% e 15% de areia de PET obtiveram um ganho de resistência de 19% e 11,25%, respectivamente, em comparação com as argamassas de referência. A amostra incorporada com 30%, por sua vez, obteve uma redução na resistência de 19%, em comparação com a argamassa de referência.

Segundo Silva (2014, apud VAZ, 2014), a redução de resistência acontece devido ao fato de que os agregados de plásticos apresentam uma superfície lisa, são impermeáveis e menos resistentes, diferente dos agregados naturais, e isso podem vir a comprometer a ligação matriz e agregado.

Modro (2008), em seu estudos, analisou concretos de cimento Portland incorporados com filme de PET, areia de PET e flake de PET, em substituição do agregado natural. Verificou que a incorporação de areia de PET, no teor de 40%, o valor da resistência reduziu 87,39%. Para a incorporação de filme de PET, no teor de 4%, e de flake de PET, no teor de 40%, as resistências reduziram 49,80% e 59,82%, respectivamente, em comparação com os concretos de referência. Para todos os teores incorporados, em todas as idades das amostras, houve uma notável redução da resistência a compressão a medida que se aumenta os percentuais de substituição.

A redução da resistência a compressão dos concretos de cimento Portland incorporados com os resíduos de PET em comparação com os concretos de referência é devido a menor interação química entre o polímero e a matriz cimentícia e a porosidade residual gerada e, principalmente, devido a menor resistência mecânica intrínseca dos polímeros em relação aos agregados minerais, que possuem uma resistência mecânica muito maior (MODRO, 2008).

Duarte (2014) pesquisou acerca da resistência à compressão de argamassas incorporadas com resíduo de construção e demolição (RCD) e PET em flocos. As incorporações se deram nos teores de 80% RCD + 20% PET, 70% RCD + 30% PET, 60% RCD + 40% PET, 50% RCD + 50% PET, 40% RCD + 60% PET e 30% RCD + 70% PET, em substituição total do agregado natural.

Os resultados mostraram que para a substituição com 80% RCD + 20% PET há um incremento na resistência de 24%, para a idade de 28 dias, em comparação com a argamassa de referência. Para os demais teores de substituição houve uma diminuição da resistência a medida que se aumentou o percentual de PET em flocos, 32%, 43%, 57%, 57%, 57%, 59%, 58%, respectivamente.

A NBR 13281 (ABNT, 2005) classifica as argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos quanto a sua resistência à compressão simples, Tabela 6.

Tabela 6: Classificação de argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos quanto a resistência à compressão.

Classe	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Método
P1	≤ 2,0	
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	ABNT NBR 13279
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	> 8,0	

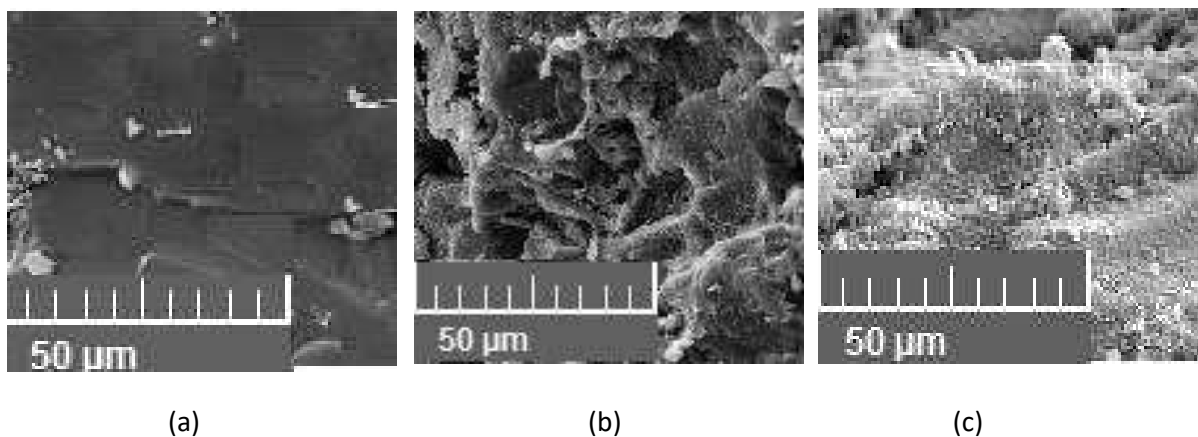
FONTE: ABNT (2005).

As resistências a compressão aos 28 dias encontradas nos ensaios foram de 1,13 e 1,14 MPa, para as incorporações de 20 e 30% de PET micronizado, respectivamente (Figuras 30 e 31). Ambos resultados se enquadram como argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos classe P1.

4.3 Avaliação da microestrutura de argamassas incorporadas com 20% e 30% de PET micronizado em substituição ao agregado miúdo natural.

De acordo com os resultados apresentados nas micrografias da Figura 32, observa-se que a argamassa de referência possui uma matriz organizada livre de imperfeições e com existência de poucos poros, indicando que ocorreu um perfeito arranjo entre a pasta de cimento e os grãos de agregado. Para a argamassa incorporada com 20% de resíduo de PET (Fig. 32 (b)), observa-se uma matriz irregular e heterogênea, com presença de vazios na estrutura, indicando que o resíduo de PET não interagiu quimicamente com o cimento promovendo a formação de uma estrutura porosa propensa ao surgimento de trincas e imperfeições, decorrente a falta de aderência do PET aos componentes da argamassa, impedindo melhor empacotamento, gerando uma estrutura interna com porosidade considerável.

Figura 32: Micrografia das argamassas em estudo: (a) Argamassa de referência; (b) Argamassa com 20% de PET; (c) Argamassa com 30% de PET.



.FONTE: Autoria própria (2017).

Para o teor de 30% de resíduo de PET (Fig. 32 (c)), verifica-se uma estrutura bastante heterogênea com partículas dispersas na matriz, que deve ser do resíduo PET que não interagiu com os componentes da argamassa e não apresentou aderência a pasta de cimento, presença de poros, indicando que este percentual de incorporação de resíduo de PET para produção de argamassa irá gerar um produto com restrições de uso e durabilidade indefinida.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após os estudos referentes ao uso de PET micronizado em substituição parcial do agregado miúdo natural em argamassas de revestimento e assentamento, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- As constituições de argamassas, a partir da resistência a compressão, foram classificadas com P1;
- A substituição do agregado miúdo por PET gerou um aumento da absorção de água, em relação a argamassa de referência, apresentando uma maior absorção para o teor de substituição de 30% de PET;
- O uso do PET micronizado em substituição do agregado miúdo ocasionou o aumento do índice de vazios das argamassas. O maior aumento ocorreu para o teor de substituição de 30% de PET. Houve, com o aumento do percentual de substituição de PET, uma diminuição da massa específica da argamassa seca e saturada. As maiores diminuições se deram para o teor de 30% do polímero;
- Quanto a resistência a compressão simples das argamassas, verificou-se que a substituição do agregado miúdo por PET causou a redução da resistência, em relação a argamassa de referência. A redução ocorreu a medida que o percentual de substituição aumentou. Porém, aos 28 dias, as reduções da resistência para ambos os teores, 20% e 30%, foram praticamente as mesmas, o que indica a indiferença da utilização destes teores na resistência a compressão a longo prazo. Ainda, foi possível classificar as argamassas de revestimento e assentamento incorporadas com 20% e 30% de PET micronizado como de classe P1, segundo parâmetros da NBR 13281 (2005);
- Por fim, a investigação MEV identificou, nas argamassas incorporadas com polímeros, matrizes irregulares e heterogêneas, com presença de vazios nas estruturas, indicando a falta de interação entre o PET e o cimento, promovendo uma estrutura porosa propensa ao surgimento de trincas e imperfeições. Além disso, a falta de aderência do PET aos componentes da argamassa impede que haja um melhor empacotamento, proporcionando uma estrutura com porosidade considerável. Concluiu-se que os percentuais de incorporação de resíduo de PET para a produção de argamassas irão gerar produtos com restrições de uso e durabilidade indefinida;

- A incorporação de melhor desempenho foi a de 30% PET, pois as argamassas não apresentaram divergências considerativas para as propriedades avaliadas, em relação as argamassas de referência. Porém, é preciso avaliar outras propriedades e desempenhos para enfim definir um uso adequado para as argamassas incorporadas com o PET micronizado.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Aplicação da MEV na investigação da distribuição de partículas de PET micronizado em concretos;
- Avaliação da durabilidade de argamassas incorporadas com PET micronizado para os teores de 20% e 30%;
- Estudo da viabilidade econômica da incorporação de argamassas com PET micronizado em substituição do agregado miúdo natural;
- Aplicação da MEV na investigação da distribuição de partículas de PET micronizado nos teores de 40% e 50% em argamassa para revestimento e assentamento;

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET), disponível em: www.abipet.org.br, acessado em 23 nov. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 8789**: Clorobromuron - Análise por cromatografia em fase gasosa - Padronização externa. Rio de Janeiro, 1985.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13528**: Revestimento de paredes de argamassa inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 1985.

_____. **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15961**: Alvenaria estrutural — Blocos de concreto - Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2011.

CALLISTER, William D. **Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales**. Reverté, 2002.

CARASEK, Helena. Argamassas. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. ISAIA, GC (Organizador/Editor). São Paulo: IBRACON, 2007.

CASALI, J. M.; PRUDÊNCIO JR, L. R. **New test method for the evaluation of the workability of concrete block masonry bedding mortars**. In: 14th

International brick and block masonry conference-2008, Sydney. Australia: 14IBMaC. 2008.

CHAGAS FILHO, M. B. **Estudo de Agregados Lateríticos para Utilização em Concretos Estruturais**. Tese - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

DA SILVA, Narciso Gonçalves; CAMPITELI, Vicente Coney. **Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia**. CEP, v. 80230, p. 901, 2008.

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. EdiPUCRS, 2007.

DONATO DA SILVA, Alexandre; DA SILVA PINHEIRO, Eduardo. **A problemática dos resíduos sólidos urbanos em Tefé, Amazonas**. Sociedade & Natureza, v. 22, n. 2, 2010.

DUARTE, Eric Brum de Lima et al. **Resistência a compressão de argamassa composta por resíduo de construção e demolição e politereftalato de etileno (PET) em flocos**. 2014.

FREITAS, Cleverson de. **Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da região metropolitana de Curitiba: propriedades no estado fresco e endurecido**. 2010. Tese de Doutorado. MS thesis, Dept. Civ. Const., Federal Univ. of Paraná, Brazil.

GARCIA FRANÇA, Rosiléa; RODRIGUES RUARO, Édina Cristina. **Diagnóstico da disposição final dos resíduos sólidos urbanos na região da Associação dos Municípios do Alto Irani (AMAI)**, Santa Catarina. Ciência & Saúde Coletiva, v. 14, n. 6, 2009.

ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. IBRACON, 2007.

KANNING, Rodrigo Cezar. **Utilização da cinza de folha de bananeira como adição de argamassas de cimento Portland**. 2013.

KARAGIANNIDIS, Panagiotis G.; STERGIU, Anagnostis C.; KARAYANNIDIS, George P. **Study of crystallinity and thermomechanical analysis of annealed poly (ethylene terephthalate) films**. European Polymer Journal, v. 44, n. 5, p. 1475-1486, 2008.

MADURWAR, Mangesh V.; RALEGAONKAR, Rahul V.; MANDAVGANE, Sachin A. **Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review**. construction and Building materials, v. 38, p. 872-878, 2013.

MANSUR, A. A. P. **Mecanismos Físico-Químicos de Aderência na Interface Argamassa Modificada com Polímeros/Cerâmica de Revestimento**. 2007. 357 f. 2007. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em engenharia metalúrgica, materiais e de minas)-Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo Jose Melaragno. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Ibracon, 2008.

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.

MENEZES, R. R. et al. **Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas (Granite sawing waste recycling for mortar production)**. Cerâmica, v. 55, p. 263-270, 2009.

MODRO, NLR. **Desenvolvimento e Caracterização de Concreto de Cimento Portland Contendo Resíduos Poliméricos de PET**. 2008. Tese de Doutorado. Dissertação (mestrado)-Universidade da Região de Joinville. 102p. Joinville/SC;

PÉREZ-VILLAREJO, L. et al. **Manufacturing new ceramic materials from clay and red mud derived from the aluminium industry**. Construction and Building Materials, v. 35, p. 656-665, 2012.

PEZZIN, APT. **Reciclagem química de embalagens de PET pós-consumo: Síntese de novos co-polímeros biodegradáveis**. Notas de aula, UNIVILLE, Joinville-SC, Brasil, 2007.

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

RESENDE, Paulo Sérgio de Oliveira et al. **Efeito do Ar Incorporado em Argamassas de Revestimentos**. 2010.

ROMÃO, Wanderson et al. **Poli (tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem**. Polímeros, 2009.

SAIKIA, Nabajyoti et al. **Use of Pb blast furnace slag as a partial substitute for fine aggregate in cement mortar. Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 14, n. 2, p. 102-112, 2012.

SANTOS, White José dos et al. **Argamassa de alto desempenho**. 2011.

SCHANKOSKI, Rudiele Aparecida et al. **Influência do tipo de argamassa nas propriedades mecânicas de alvenarias estruturais de blocos de concreto de alta resistência**. 2012.

SILVA, João; DE BRITO, J.; VEIGA, R. **Recycled red-clay ceramic construction and demolition waste for mortars production. Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 3, p. 236-244, 2010.

SILVA, Narciso Gonçalves da et al. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica**. 2011.

SILVA, Janaina Salustio da. **Estudo de concretos de diferentes resistências à compressão submetidos a altas temperaturas sem e com incorporação de fibras de politereftalato de etileno (PET)**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

STOLZ, Carina Mariane. **Influência da interação entre os parâmetros reológicos de argamassas e a área potencial de contato de substratos na aderência de argamassas de revestimento**. 2011.

TORRES AGREDO, Janneth; TROCHEZ SERNA, Jenny J.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby. **Reutilización de un residuo de la industria petroquímica como adición al cemento portland. Ingeniería y Ciencia**, v. 8, n. 15, 2012.

VAZ, Camila Escaramusa. **Avaliação de desempenho de argamassa modificada: com areia de pet.** 2016.

ANEXOS

Anexo A: Resistência a compressão simples de corpos de prova para a idade de 7 dias.

Resistência à compressão simples (Mpa) - 7 dias					
% PET	CP	Res. Compr. (Mpa)	Res. Comp. Média (Mpa)	Desvio abs. (%)	Nova média (Mpa)
0%	1	1,14	1,21	3%	1,21
	2	1,32		6%	
	3	1,16		2%	
20%	1	1,31	1,24	4%	1,33
	2	1,07		9%	
	3	1,34		5%	
30%	1	1,16	0,99	9%	0,97
	2	0,97		1%	
	3	0,83		8%	

FONTE: Autoria própria (2017).

Anexo B: Resistência a compressão simples de corpos de prova para a idade de 14 dias.

Resistência à compressão simples (Mpa) - 14 dias					
% PET	CP	Res. Compr. (Mpa)	Res. Comp. Média (Mpa)	Desvio abs. (%)	Nova média (Mpa)
0%	1	1,43	1,43	0%	1,43
	2	1,33		5%	
	3	1,54		5%	
20%	1	1,13	1,04	4%	1,12
	2	0,89		8%	
	3	1,11		3%	
30%	1	1,26	1,08	9%	0,99
	2	1		4%	
	3	0,98		5%	

FONTE: Autoria própria (2017).

Anexo C: Resistência a compressão simples de corpos de prova para a idade de 28 dias.

Resistência à compressão simples (Mpa) -28 dias					
% PET	CP	Res. Compr. (Mpa)	Res. Comp. Média (Mpa)	Desvio abs. (%)	Nova média (Mpa)
0%	1	1,67	1,73	3%	1,73
	2	1,62		6%	
	3	1,91		9%	
20%	1	1,21	1,13	4%	1,13
	2	-		-	
	3	1,05		4%	
30%	1	1,044	1,20	8%	1,14
	2	1,14		3%	
	3	1,43		11%	

FONTE: Autoria própria (2017).

Obs.:

	Segundo a NBR 7215 (1997), se o desvio absoluto for superior a 6%, desconsiderar amostra e fazer média com demais amostras.
--	---

Anexo D: Absorção de água por imersão de corpos de prova para a idade de 7 dias.

Absorção de água - 7 dias												
% PET	CP	Msat(g)	Ms (g)	Mi (g)	Absorção de água por imersão (%)	Absorção média (%)	Índice de vazios (%)	Índice de vazios médio (%)	Massa específica da amostra seca	Massa esp. da amostra seca média	Massa específica da amostra saturada	Massa esp. da amostra saturada média
0%	1	418,55	367,01	203,97	14%	14%	24%	24%	1,71	1,69	1,95	1,93
	2	434,48	380,29	208,75	14%		24%		1,68		1,92	
	3	378,74	329,03	180,79	15%		25%		1,66		1,91	
20%	1	348,75	295,71	141,76	18%	16%	26%	24%	1,43	1,48	1,68	1,72
	2	353,14	305,3	151,42	16%		24%		1,51		1,75	
	3	407,9	353,3	173,29	15%		23%		1,51		1,74	
30%	1	404,52	343,4	162,08	18%	18%	25%	25%	1,42	1,43	1,67	1,68
	2	381,17	324,3	153,9	18%		25%		1,43		1,68	
	3	386,88	328,5	157,95	18%		26%		1,43		1,69	

FONTE: Autoria própria (2017).

Anexo E: Absorção de água por imersão de corpos de prova para a idade de 14 dias.

Absorção de água - 14 dias												
% PET	CP	M _{sat} (g)	M _s (g)	M _i (g)	Absorção de água por imersão (%)	Absorção média (%)	Índice de vazios (%)	Índice de vazios médio (%)	Massa específica da amostra seca	Massa esp. da amostra seca média	Massa específica da amostra saturada	Massa esp. da amostra saturada média
0%	1	385,15	337,16	188,96	14%	14%	24%	24%	1,72	1,72	1,96	1,96
	2	384,42	336,71	188,9	14%		24%		1,72		1,97	
	3	425,01	373,06	208,52	14%		24%		1,72		1,96	
20%	1	347,91	300,36	154,52	16%	16%	25%	25%	1,55	1,56	1,80	1,81
	2	406,37	351,91	181,57	15%		24%		1,57		1,81	
	3	399,71	345,36	180,31	16%		25%		1,57		1,82	
30%	1	403,21	341,94	165,32	18%	17%	26%	25%	1,44	1,47	1,69	1,72
	2	342,96	295,94	146,65	16%		24%		1,51		1,75	
	3	404,14	344,49	169,26	17%		25%		1,47		1,72	

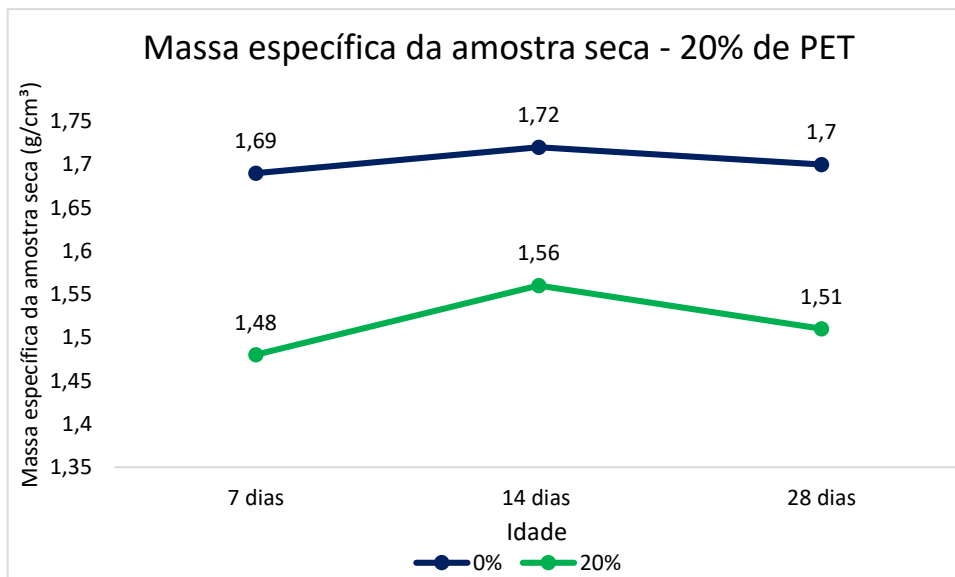
FONTE: Autoria própria (2017).

Anexo F: Absorção de água por imersão de corpos de prova para a idade de 28 dias.

Absorção de água - 28 dias												
% PET	CP	M _{sat} (g)	M _s (g)	M _i (g)	Absorção de água por imersão (%)	Absorção média (%)	Índice de vazios (%)	Índice de vazios médio (%)	Massa específica da amostra seca	Massa esp. da amostra seca média	Massa específica da amostra saturada	Massa esp. da amostra saturada média
0%	1	470,78	412,3	226,61	14%	14%	24%	24%	1,69	1,70	1,93	1,94
	2	469,85	412,24	228,17	14%		24%		1,71		1,94	
	3	383,65	335,21	187,84	14%		25%		1,71		1,96	
20%	1	351,63	301,22	155,86	17%	17%	26%	25%	1,54	1,51	1,80	1,76
	2	392,17	335,78	167,58	17%		25%		1,50		1,75	
	3	404,06	345,94	171,1	17%		25%		1,48		1,73	
30%	1	387,68	323,42	153	20%	20%	27%	28%	1,38	1,37	1,65	1,64
	2	333,61	274,61	128,21	21%		29%		1,34		1,62	
	3	401,23	336,78	157,86	19%		26%		1,38		1,65	

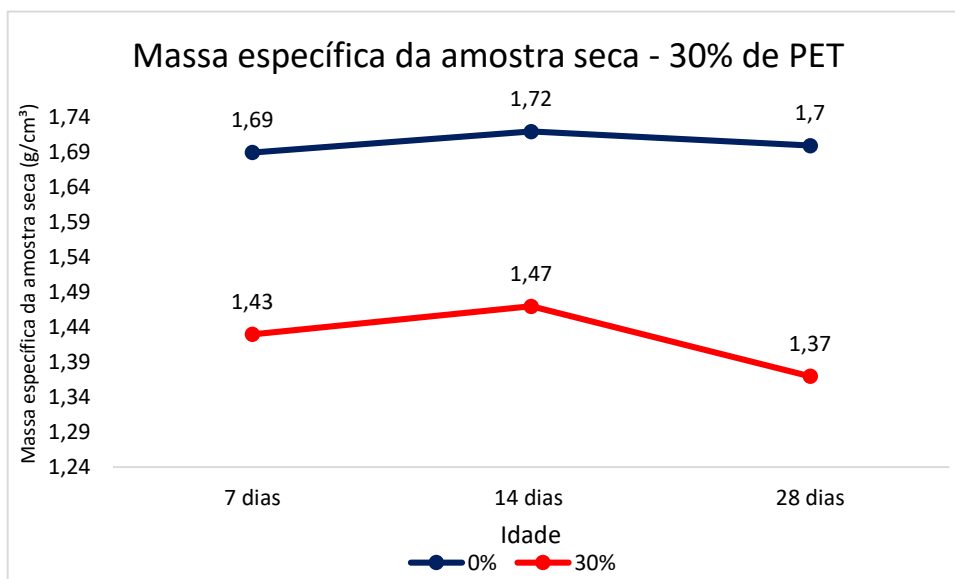
FONTE: Autoria própria (2017).

Anexo G: Massa específica da argamassa seca incorporada com 20% de PET micronizado.



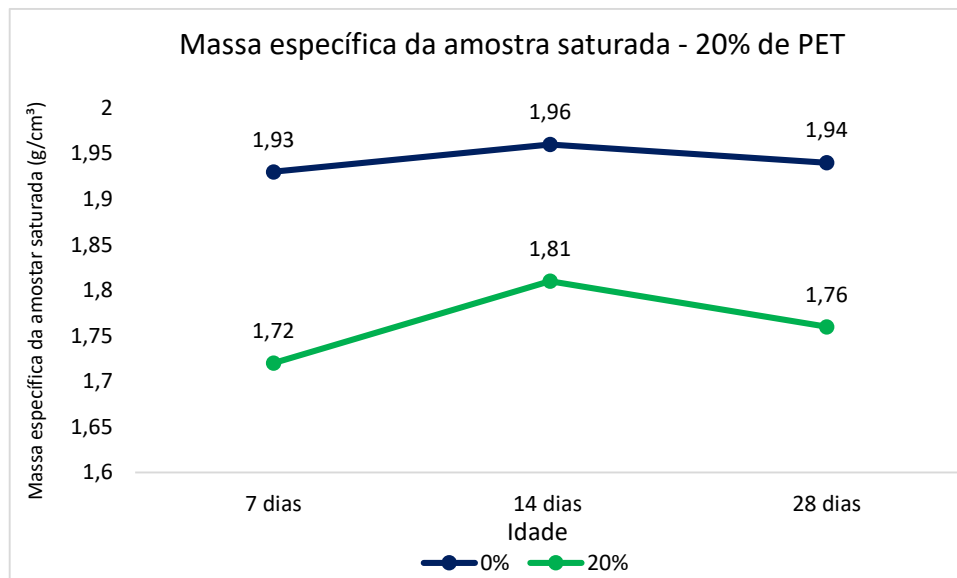
FONTE: Autoria própria (2017).

Anexo H: Massa específica da argamassa seca incorporada com 30% de PET micronizado.



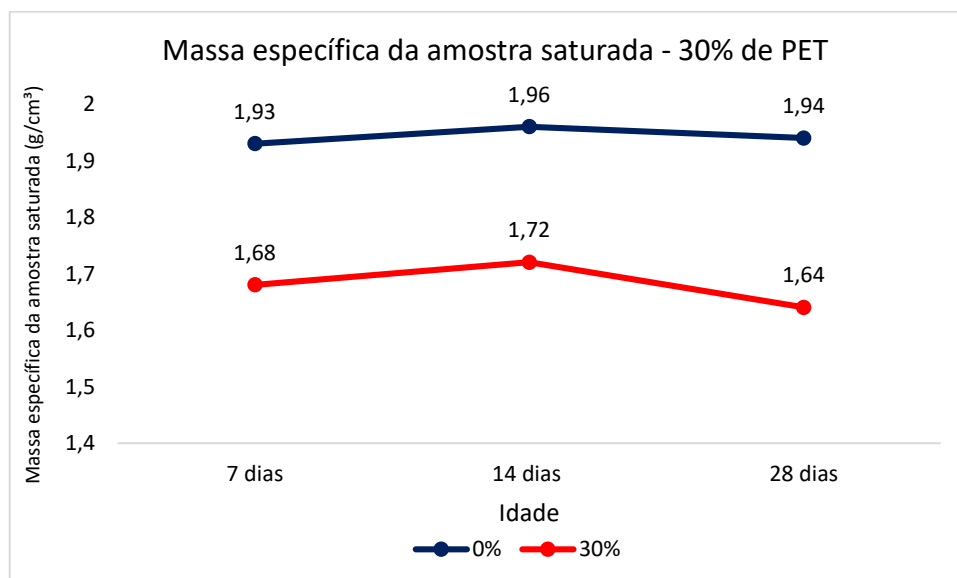
FONTE: Autoria própria (2017).

Anexo I: Massa específica da argamassa saturada incorporada com 20% de PET micronizado.



FONTE: Autoria própria (2017).

Anexo J: Massa específica da argamassa saturada incorporada com 30% de PET micronizado.



FONTE: Autoria própria (2017).

