



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

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ARGAMASSA DOSADA COM
POLITEREFTALATO DE ETILENO MICRONIZADO**

PEDRO AZEVEDO DA SILVA NETO

Orientadora: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

Co-orientador: Prof. Dr. José Bezerra da Silva.

Campina Grande-PB, 09/08/2017

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ARGAMASSA DOSADA COM
POLITEREFTALATO DE ETILENO MICRONIZADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB, 09/08/2017.

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

PEDRO AZEVEDO DA SILVA NETO

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

Área de habilitação: Estrutura

Orientadora: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça
Co-orientador: Prof. Dr. José Bezerra da Silva.

CAMPINA GRANDE – PB

AGOSTO/2017.

FOLHA DE APROVAÇÃO

PEDRO AZEVEDO DA SILVA NETO

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS INCORPORADAS COM RESÍDUO OLEOSO DE PETRÓLEO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 19/06/2017 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Profª. PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça
Orientadora
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. José Bezerra da Silva
Examinador Interno
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Profª. Msc. Loredanna Melyssa Costa de Souza
Examinador Externo
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal de Campina Grande

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A Universidade Federal de Campina Grande, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

A minha orientadora PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça e co-orientador Prof. Dr. José Bezerra da Silva, pelas suas correções e incentivos.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

*“O futuro vai mostrar os resultados e julgar
cada um segundo as sua realizações.”
Nikola Tesla*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: História das argamassas: linha do tempo.....	18
Figura 2: Diferentes alternativas de revestimento de paredes.....	20
Figura 3: Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento com chapisco.....	29
Figura 4: Polimerização do PEAD com catalisador Ziegler-Natta nas fases: (a)iniciação; (b) propagação; (c) finalização.....	34
Figura 5: Polimerização do náilon.....	35
Figura 6: Obtenção do náilon.....	35
Figura 7: Estrutura química do PET.....	40
Figura 8: Evolução da reciclagem de PET no Brasil.....	41
Figura 9: Fluxograma das etapas da pesquisa.....	46
Figura 10: Equipamento utilizado para realização de ensaios de análises térmicas.....	47
Figura 11: Equipamento de análise por Fluorescência de Raios-X.....	48
Figura 12: Determinação da massa específica do agregado miúdo - Frasco Chapman.....	49
Figura 13: Execução do ensaio de determinação da massa unitária no estado solto.....	49
Figura 14: Pesagem dos materiais constituintes da argamassa.....	52
Figura 15: Homogeneização da mistura.....	52
Figura 16: Produção da argamassa e moldagem dos corpos de prova.....	53

Figura 17: Cura dos corpos de prova.....	54
Figura 18: Rompimento dos corpos de prova.....	54
Figura 19: Resistência à compressão simples para a argamassa de referência e para a argamassa com 10% de PET incorporado.....	55
Figura 20: Resistência à compressão simples para a argamassa de referência e para a argamassa com 15% de PET incorporado.....	56
Figura 21: Resistência à compressão simples para a argamassa de referência e para a argamassa com 10 e 15% de PET incorporado.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de argamassas e suas funções.....	
19	
Tabela 2: Classificação dos cimentos.....	
21	
Tabela 3: Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas.....	
25	
Tabela 4: Classificação das argamassas segundo a densidade de massa aparente no estado fresco	
(γ_t).....	27
Tabela 5: Classificação das argamassas segundo a densidade de massa aparente no estado endurecido (γ_e).....	28
Tabela 6: Quantitativo de materiais para moldagem de um corpo de prova.....	
51	
Tabela 7: Resistência a compressão simples.....	55

RESUMO

A construção civil é responsável pela transformação do ambiente natural em ambiente construído, devido a esse impacto causado no meio ambiente, na economia e na sociedade, é necessário a aplicação de novos conhecimentos para a manutenção do equilíbrio no planeta. A grande quantidade de recursos deixados por construções tem preocupado diversos países, devido as questões ambientais e de sustentabilidade. Outro fator preocupante é o descarte de embalagens plásticas, que ocupa uma grande quantidade de espaço em aterros sanitários e tem uma difícil decomposição, com apenas 51% desses materiais sendo reciclados. Portanto, a utilização do politereftalato de etileno (PET) micronizado em argamassas, é uma forma de combater o descarte desses materiais, com o incentivo a coleta e a reciclagem com geração de mais empregos nesse setor, por ter um baixo valor comercial seria menos custoso, e reduziria os impactos ambientais. Com o aumento da construção civil, a busca por materiais inovadores e métodos construtivos tem se intensificado, e um dos mais utilizados é a argamassa, que deve possuir características e propriedades compatíveis com as condições a que estará exposta, condições de execução, com o desempenho e com o acabamento final. Assim, o objetivo deste projeto é determinar a resistência a compressão simples de argamassas incorporadas com PET micronizado. Para a realização deste estudo foi realizado a seleção dos materiais e sua caracterização, sequencialmente foi realizada a moldagem dos corpos de prova contendo PET micronizado nos teores de 10% e 15%, nas dimensões de 5cmx10cm, para determinação da resistência à compressão simples, de acordo com a norma da ABNT NBR 7215/1996, nas idades de 7, 14 e 28 dias. Verificou-se que a incorporação do PET micronizado na argamassa aos 28 dias, proporcionou um aumento da resistência à compressão em torno de 9,1% para o teor de 10% e 0% para o teor de 15%, em comparação com a argamassa de referência. Estes valores se apresentam satisfatórios, tanto tecnicamente como economicamente, pois alteram o custo de produção do mesmo, tornando-o mais barato e dando destino à um resíduo que não seja ao meio ambiente, agregando assim mais valor ao material.

Palavras-chave: Material alternativo, propriedades, argamassa.

ABSTRACT

Civil construction is responsible for transforming the natural environment into a built environment, due to this impact on the environment, economy and society, it is necessary to apply new knowledge to maintain the balance on the planet. The large amount of resources left behind by buildings has worried several countries, due to environmental and sustainability issues. Another worrying factor is the disposal of plastic packaging, which occupies a large amount of space in landfills and has a difficult decomposition, with only 51% of these materials being recycled. Therefore, the use of micronized polyethylene terephthalate (PET) in mortars is a way to combat the disposal of these materials, with the incentive to collect and recycle with the generation of more jobs in this sector, because having a low commercial value would be less costly, and reduce environmental impacts. With the increase in civil construction, the search for innovative materials and construction methods has intensified, and one of the most used is mortar, which must have characteristics and properties compatible with the conditions to which it will be exposed, conditions of performance, performance And with the final finish. Thus, the objective of this project is to determine the resistance to simple compression of mortars incorporated with micronized PET. In order to carry out this study, a selection of materials and their characterization were carried out. The samples were prepared with 10% and 15% micronized PET in 5 cm x 10 cm sizes for determination of the resistance to simple compression, According to the norm of ABNT NBR 7215/1996, at the ages of 7, 14 and 28 days. It was found that the incorporation of the micronized PET in the mortar at 28 days provided an increase in compressive strength of about 9.1% for the content of 10% and 0% for the content of 15% compared to the mortar of reference. These values are satisfactory, both technically and economically, as they change the cost of production of the same, making it cheaper and targeting a waste other than the environment, thus adding more value to the material.

Keywords: Alternative material, properties, mortar.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3. JUSTIFICATIVA	18
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
4.1 Argamassa	19
4.1.1 História da argamassa	19
4.1.2 Características gerais	21
4.1.3 Materiais constituintes	23
4.1.4 Propriedades da argamassa no estado fresco	26
4.1.5 Propriedades no estado endurecido	30
4.2 Polímeros	33
4.2.1 História dos polímeros	34
4.2.2 Classificação dos polímeros	35
4.2.3 Propriedades dos polímeros	39
4.2.4 Politereftalato de etileno (PET)	42
4.2.5 Reciclagem de garrafas PET	44
4.3 Agregado plástico reciclado em argamassa	45
5. MATERIAIS E METODOLOGIA	47
5.1 Materiais	47
5.2 Métodos	48
5.2.1 Seleção de materiais	48
5.2.2 Caracterização dos Materiais	49
5.2.2.1 Caracterização Química, Física e Mineralógica do Politereftalato De Etileno – PET	49

5.2.2.2 Caracterização Física dos Agregados e do Cimento	50
5.3 Estudo da dosagem e moldagem dos corpos de prova	52
5.3.1 Dosagem dos materiais	52
5.3.2 Produção e preparação dos corpos de prova.....	54
5.3.3 Processo de cura	55
5.4 Determinação da Resistência à Compressão Simples	56
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
6.1 Resistência à compressão	57
7. CONCLUSÃO.....	60
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS	62
ANEXOS	70

1. INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da construção civil é responsável pela transformação do ambiente natural em ambiente construído que precisa ser permanentemente atualizado e mantido. Dada a complexidade e extensão de seu impacto no meio ambiente, na economia e na sociedade, a construção de políticas, o desenvolvimento e aplicação de novos conhecimentos (inovação) de forma sistêmica são de suma importância à manutenção do equilíbrio do planeta que vem sendo alterado significativamente pelo desenvolvimento promovido pela humanidade (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Questões ambientais tem sido preocupação crescente, seja em países desenvolvidos ou não, e a quantidade de resíduos deixados por construções (atualmente mensurados em cinco vezes mais do que de produtos), tornou-se um dos centros das discussões da sustentabilidade. Como se pode perceber, uma postura consciente nas mais diversas etapas da construção civil, além de financeiramente viável, demonstra a preocupação da empresa com a situação do meio ambiente junto ao público (YEMAL et al., 2011).

No Brasil, em 2015, foram produzidos cerca de 537,2 Ktons (ABIPET, 2016) de produtos feitos de PET, apenas 51% dessas embalagens foram recicladas, ocasionando um dos piores problemas originados no descarte de materiais plásticos que é a elevada ocupação de espaço nos aterros sanitários, além de ser um material de difícil decomposição (SANTOS, 2014).

A ABNT NBR 13.281:2005 define as argamassas como uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosadas em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada). Elas podem ser utilizadas em vários locais com função diferenciada, cada um dos empregos faz jus a uma série de propriedades que corresponde a um tipo de argamassa específico (SANTOS, 2014).

As argamassas devem apresentar características, como: permitir deformações necessárias para os diversos tipos de ambientes/situações; suportar/aderir aos blocos; resistir às cargas atuantes sem apresentar rupturas; complementar sistemas de isolamento acústico e térmico; ter adequada resistência à compressão, à tração e ao ataque de agentes químicos oriundos de materiais de limpeza (se alvenaria à vista), dentre outros (MARTINELLI, 1989; SÁNCHEZ, 2013).

É do conhecimento geral que, na antiguidade, e na ausência de pozolanas naturais, os resíduos de cerâmica eram introduzidos em argamassas de cal aérea, conferindo-lhes assim alguma hidráulica e maior durabilidade. Atualmente sabe-se também, como já referido, que esta incorporação permite valorizar os resíduos do ponto de vista económico e ambiental, promovendo o conceito de sustentabilidade pela diminuição da quantidade de material depositado em aterro. A introdução deste tipo de resíduos nas argamassas pode fazer-se por adição a formulações de referência, na prática substituindo parcialmente o agregado ou substituindo parcialmente o ligante, e vai conduzir à diminuição de consumo (e extração) de areia e rocha e a uma diminuição de consumo (e de energia no fabrico) de ligante (TORRES, 2016).

Vários estudos têm sido realizados com a utilização de resíduos plásticos em concretos e argamassas, seja como modificadores da pasta de cimento, ou como materiais inertes, nesse último caso, com função de fibras de reforço ou de agregados leves. O resíduo pós-consumo mais utilizado experimentalmente foi o de garrafas PET, substituindo a areia percentualmente, em peso ou volume (CANELLAS, 2005; MARZOUK, 2006; CHOI et al, 2009; MODRO et al, 2009). Outros resíduos poliméricos também foram usados, embora em menor número, como o polietileno de alta densidade e o polipropileno (NAIK et al, 1996; ZAINAB et al, 2007). Os resultados indicam que a adição de agregado leve de resíduos plásticos na argamassa ou concreto ocasionou uma relativa perda de resistência mecânica, aumento do teor de ar incorporado e redução da trabalhabilidade. Por outro lado, ocorreram também redução do peso específico e do módulo de elasticidade e aumento da ductilidade das amostras com agregado leve de resíduo plástico. Desse modo, a adição de tais resíduos como agregados em compósitos cimentícios não se restringe apenas à questão ambiental, mas também à possíveis modificações nas propriedades desses compósitos, as quais, entre outros efeitos, pode reduzir a propagação de fissuras em decorrência de esforços mecânicos (MELLO et al., 2012).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal, determinar a resistência a compressão de argamassas incorporadas com PET micronizado.

2.2 Objetivos Específicos

- Estabelecer um traço com substituição do agregado miúdo por PET micronizado;
- Determinar a resistência a compressão da argamassa com incorporação de PET micronizado nos teores de 10% e 15%;
- Reduzir a quantidade de PET depositado de forma inadequada no meio ambiente.

3. JUSTIFICATIVA

Devido ao crescente consumo de materiais na construção civil, como também a necessidade de políticas ambientais, a utilização de Politereftalato de etileno (PET) reciclado, é uma alternativa para diminuir os prejuízos oriundos do descarte desse material no ambiente, tem um baixo valor comercial e pode alterar algumas propriedades das argamassas.

Do ponto de vista ambiental, a reutilização do PET, pode ajudar a reduzir os impactos e os prejuízos decorrentes da disposição desses resíduos em aterros sanitários, como também dos impactos provocados pela extração de matéria-prima, como a areia que é essencial ao desenvolvimento econômico da sociedade capitalista atual. No ponto de vista socioeconômico, este incremento alavancaria o setor de reciclagem mecânica de plásticos nas indústrias e, teria uma geração de mais empregos pela ampliação da participação de catadores e de mão de obra nos processos de separação e reciclagem de plásticos. Além disso, a reciclagem da totalidade das embalagens de PET reduziria os custos provenientes da disposição inadequada destes resíduos.

Seguindo esta nova perspectiva a construção civil permite agregar valor ao mesmo e contribuir para uma melhor forma de destinação do PET, além de trazer uma redução no custo das argamassas

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Argamassa

A argamassa é um material de construção constituído por uma mistura homogênea de um ou mais aglomerantes (cimento ou cal), agregado miúdo inorgânicos (areia) e água. Podem conter alguns produtos especiais, como aditivos, com a finalidade de melhorar ou conferir determinadas propriedades aderência e endurecimento.

Os revestimentos de argamassa, devem possuir características e propriedades que sejam compatíveis com as condições a que estarão expostos, com as condições de execução, com a natureza da base, com as especificações de desempenho, e com o acabamento final previsto.

4.1.1 História da argamassa

As argamassas são conhecidas há mais de 10000 anos, tendo sido produzidas e utilizadas inicialmente pelos Azetecas e pelas populações presentes na Galileia. Eram tradicionalmente usadas para montar paredes e muros e para revestir paredes (MONTEIRO, 2008).

O uso de aditivos e adjuvantes foi iniciado pela civilização Romana. Estes utilizavam argamassas constituídas essencialmente por cinzas vulcânicas ou pozolanas, pó de tijolo ou telha, cal hidratada, areias e matérias orgânicas (gorduras) (MONTEIRO, 2008). Até ao final do século XIX os sistemas construtivos mais comuns eram as estruturas em madeira e em alvenaria. Desde as primeiras utilizações da alvenaria de pedra que se tenta otimizar um material que una as pedras de forma coesa, sendo inicialmente utilizadas argamassas de barro e posteriormente argamassas de cal e cimento. É assim que se inicia a história da cal e do cimento como ligantes para argamassas (CARVALHO, 2008).

A cal é um dos materiais mais antigos utilizados na construção, sendo antecedida apenas por materiais como a pedra, o barro, a terra e a madeira. Podem ser referidos restos da utilização de argamassas de cal empregues na Palestina (7.000 a.C.), aplicações de cal apagada na Turquia (6.000 a.C.) e estuque nas pirâmides do Egito (4000 a 2000 a.C.) (MARGALHA, 2011).

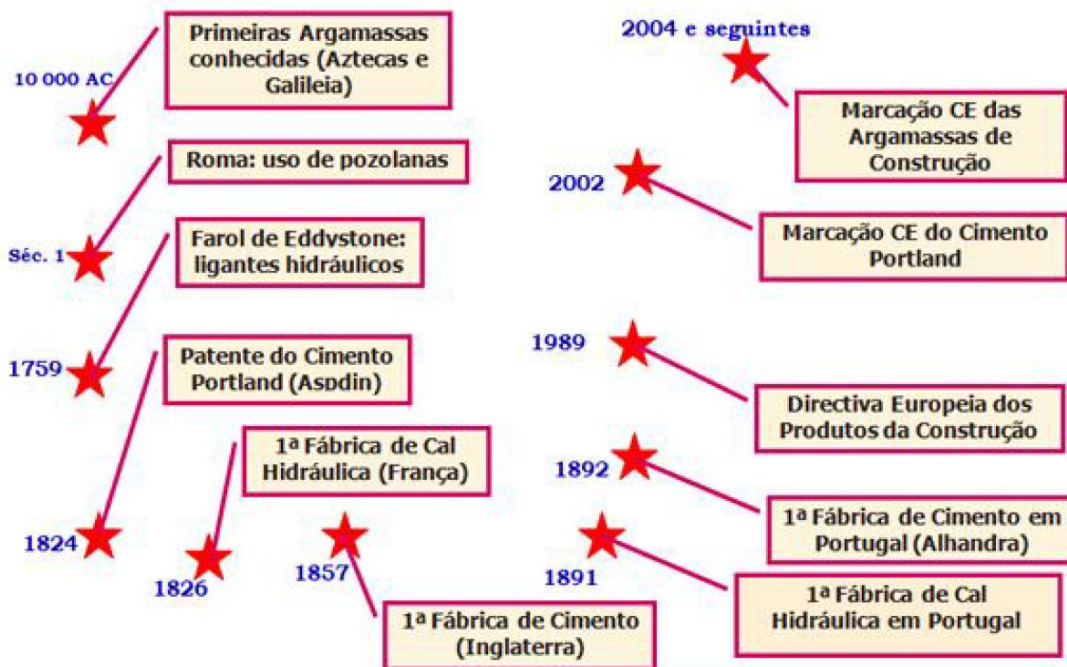
Julga-se que os gregos foram os primeiros a utilizar a cal como argamassa de revestimento, mas foram os romanos que aplicaram de forma mais eficaz estas argamassas. São de referir os enormes anfiteatros, basílicas e aquedutos, para as quais foram adotadas soluções técnicas como o arco de volta perfeita, a cúpula e a abóbada (MARGALHA, 2011).

Os romanos já usavam a cal como ligante, mas foi a descoberta do Opus Caementicium que alavancou a engenharia romana. O principal componente deste material era uma cinza pozolânica que misturada à argamassa de cal produzia um material de características semelhantes às do cimento atual (CARVALHO, 2008).

Essa argamassa com caementum foi usada em construções do Fórum Romano, como o Coliseu, os Banhos Romanos, a Basílica de Constantino e o Panteão, obtendo-se com este material a impermeabilidade, estanquidade e resistência que os romanos procuravam. No entanto, na Idade Média este conhecimento foi esquecido, reaparecendo no século XVIII (ROCHA, 2015).

A Figura 1 ilustra a história das argamassas através de uma linha do tempo, onde estão indicados alguns dos mais relevantes factos que lhes dizem respeito ao longo dos tempos, tanto a nível mundial como em Portugal (MONTEIRO, 2008).

Figura 1: História das argamassas: linha do tempo



Fonte: SECIL (2005).

Até o período do pós-guerra, todas as argamassas eram produzidas na obra onde iriam ser aplicadas. Isto implicava que as matérias-primas teriam de ser transportadas para a obra individualmente, onde seriam armazenadas até o momento da sua utilização, sendo então misturadas, nas proporções pretendidas e em seguida aplicadas, antes de acabar o seu tempo aberto (MONTEIRO, 2008).

Assim, o velho método de preparação em obra das argamassas, o método tradicional, torna-se, cada vez menos adequado, e como resposta a estas questões foi desenvolvida, a partir dos anos 1950, a tecnologia para a produção industrial de argamassas de construção. No entanto, hoje em dia ainda se verifica que uma grande percentagem de argamassas utilizadas na construção é produzida em obra, o que é uma das principais causas para o aparecimento de avarias (MONTEIRO, 2008).

4.1.2 Características gerais

A argamassa de revestimento tem diversas funções, que vão desde o revestimento das paredes de ambientes internos, revestimentos de fachadas, assentamento de alvenaria, emboço, reboco, como serve também para fins decorativos, sendo classificada de acordo com sua função, como mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Tipos de argamassas e suas funções

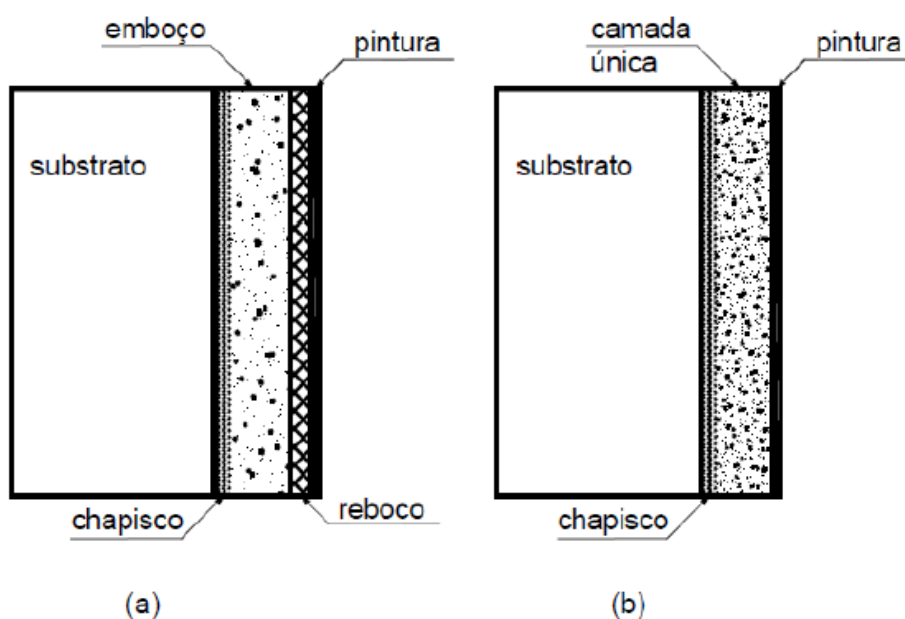
TIPO	FUNÇÃO
Argamassa de Assentamento	
1.1 Assentamento em alvenaria de vedação:	Ligação de componentes de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função de vedação.
1.2 Assentamento em alvenaria de estrutural:	Ligação de componentes de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função estrutural.
1.3 Argamassa para complementação da alvenaria (encunhamento):	Fechamento da alvenaria de vedação, após a última fiada de componentes.
Argamassa para Revestimento de Paredes e Tetos	
2.1 Revestimento interno:	Revestimento de ambientes internos da edificação, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única).
2.2 Revestimento externo:	Revestimento de fachadas, muros e outros elementos da edificação em contato com o meio externo, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única).
Argamassa de uso geral:	Assentamento de alvenaria sem função estrutural e revestimento de paredes e tetos internos e externos.
Argamassa para reboco:	Cobrimento de emboço, propiciando uma superfície fina que permita receber o acabamento;

Argamassa decorativa em camada fina:	Revestimentos com fins decorativos, em camada fina.
Argamassa decorativa em monocamada:	Revestimento de fachadas, muros e outros elementos de edificação em contato com o meio externo, aplicada em camada única e com fins decorativos.

Fonte: Adaptada da NBR 13281 (ABNT, 2005).

Segundo Mello (2011) os sistemas de revestimento agem em conjunto com o substrato e podem ser constituídos por mais de uma camada (Figura 2), com diferentes características e propriedades:

Figura 2: Diferentes alternativas de revestimento de paredes



Fonte: CARASEK (2007).

- O substrato é a superfície sobre a qual é aplicada a argamassa, influenciando diretamente na qualidade do revestimento devido à variação de suas características como absorção e rugosidade, refletindo na aderência argamassa-substrato.
- A camada de chapisco é aplicada no substrato para servir de elemento de ligação deste com o revestimento. Dessa forma, o chapisco tem a função de cobrir e uniformizar a superfície da base, melhorando a aderência com o revestimento.
- Carasek (2007) define emboço com a camada que serve para cobrir e regularizar a base, propiciando uma superfície que permita receber outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo.
- O reboco é a camada aplicada diretamente sobre o emboço e propicia uma superfície para receber o revestimento decorativo ou se constitua no acabamento final.

- O revestimento de camada única é popularmente conhecido como “massa única”, constituindo-se de um único tipo de argamassa sobre a qual é aplicada, por exemplo, a pintura.

4.1.3 Materiais constituintes

Os aglomerantes são substâncias finamente pulverizadas que, pela mistura com a água, são capazes de formar uma pasta com poder cimentante. O endurecimento geralmente ocorre de forma lenta, resultante de uma reação entre o aglomerante e a água, de caráter físico, químico ou físico-químico (ISAIA, 2010).

Tem-se como classificações segundo as propriedades do aglomerante, em aéreos (conservam suas propriedades somente em presença do ar, como por exemplo, a cal aérea e o gesso) e os hidráulicos (além do ar conservam suas propriedades também na água, com por exemplo os cimentos) (SANTOS, 2014).

a) Cimento

Segundo Fiorito (2009) o cimento Portland possui propriedade aglomerante desenvolvida pela reação de seus constituintes com a água, sendo assim denominado aglomerante hidráulico. A contribuição do cimento nas propriedades das argamassas está voltada sobretudo para a resistência mecânica. Além disso, o fato de ser composto por finas partículas contribui para a retenção da água de mistura e para a plasticidade. Se, por um lado, quanto maior a quantidade de cimento presente na mistura, maior é a retração, por outro, maior também será a aderência à base. De acordo com suas características, os cimento são classificados em diferentes tipos por normas específicas, relacionadas na Tabela 2:

Tabela 2: Classificação dos cimentos

Denominação	Sigla	Norma
Portland comum	CP I	NBR – 5732
Portland composto com escória	CP II - E	NBR – 11578
Portland composto com pozolana	CP II – Z	NBR – 11578
Portland composto com filler	CP II – F	NBR – 11578
Portland de alto forno	CP III	NBR – 5735

Portland pozolânico	CP IV	NBR – 5736
Portlando de alta resistência inicial	CP C - ARI	NBR – 5733

Fonte: FIORITO (2009).

O Cimento Portland é composto de clínquer e de adições finamente moídas. As adições podem variar e são elas que definem os diferentes tipos, segundo a normalização brasileira. A seguir descreve-se a composição do cimento Portland (ISAIA, 2010 e ISAIA, 2011):

- Clínquer: possui o calcário e a argila como matérias-primas, ambos obtidos de jazidas situadas, geralmente, nas proximidades das fábricas de cimento. São inseridos em um forno com temperatura interna de aproximadamente 14500°C gerando o clínquer (nódulos de 5 a 25 mm de diâmetros de material sinterizado), que se apresenta em nódulos. Na saída do forno, o clínquer incandescente é bruscamente resfriado, posteriormente é moído e adicionadogesso e/ou outras adições especificadas pela normalização brasileira, transforma-se no cimento.
- Adições: são as matérias-primas que misturadas ao clínquer na fase de moagem, segundo os requisitos prescritos na normalização brasileira, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland disponíveis no mercado.
- Gesso: tem a função de aumentar o tempo de endurecimento do clínquer moído (o cimento, em contato com a água, endureceria instantaneamente), inviabilizando o seu emprego nas obras de construção civil. Sendo assim, ele esta presente em todos os cimentos no teor de aproximadamente 3%.
- Escória: as escórias de alto-forno são obtidas durante a produção do ferrogusa, nas indústrias siderúrgicas e consistem em um tipo de material cimentante que atende plenamente aos usos mais comuns e que apresenta melhoria em algumas propriedades, como: menor calor de hidratação, maior durabilidade, em especial em ambientes agressivos.
- Pozolana: os materiais pozolânicos são as rochas vulcânicas, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas (entre 550 0C a 900 0C) e, também, as cinzas provenientes da queima de carvão mineral em usinas termelétricas, dentre outros. As reações deste materiais ocorrem, somente, se além da água, forem colocados na presença de clínquer, tornando-se viável sua adição até um determinado limite, especificado pela normalização. Os cimentos com essas adições oferecem a vantagem de maior impermeabilidade.

- Sílica Ativa: trata-se de um produto obtido nos filtros durante a fabricação do silício-metálico. Ao sair do forno elétrico onde é gerado na forma de gás SiO, oxida-se passando a SiO₂, formando partículas sólidas extremamente finas (menor que a do cimento) na ordem de 0,2 µm e em condição amorfa.
- Carbonatos: os materiais carbonáticos são minerais moídos, tais como o calcário. Essa adição torna os concretos e as argamassas mais trabalháveis, porque os grãos moídos possuem dimensões adequadas para se alojar entre as partículas dos demais componentes do cimento, funcionando como um lubrificante. Quando presentes nos cimentos são conhecidos como filler calcário.

b) Areia

O agregado utilizado para a produção de argamassas é a areia, com diâmetro menor do que 2,0 mm. Apresentando um custo bem menor do que o cimento, a areia assume um papel importante em termos econômicos para argamassa e o concreto, todavia, a influência dos agregados não se restringe apenas à questão da redução de custos, pois suas características físicas também são relevantes no estudo das propriedades desses compósitos (MELLO, 2011).

Em concreto, a forma e a textura do agregado miúdo têm um efeito significativo sobre a demanda de água na mistura, considerando que partículas angulosas exigem mais água para uma mesma trabalhabilidade. A aderência entre o agregado e a pasta de cimento, importante fator da resistência do concreto, é devido ao intertravamento do agregado na pasta, onde a textura superficial exerce influência. Em geral, partículas mais moles e porosas apresentam melhor aderência. Desse modo, a resistência mecânica do agregado não é o único fator a ser considerado na resistência do concreto/argamassa, mas também, às suas características de absorção e aderência à pasta de cimento (MELLO, 2011).

c) Cal

A cal hidratada é definida como o pó obtido pelo tratamento da cal virgem pela água, em quantidade suficiente para satisfazer a sua afinidade química nas condições de hidratação. Assim como a cal virgem, ela pode ser do tipo cálcica ou dolomítica, sendo que esta pode apresentar-se como cal mono-hidratada dolomítica (quando hidratada a pressões normais) e

cal di-hidratada dolomítica, quando o processo ocorre a pressões mais elevadas (ISAIA, 2010).

Na hidratação completa da cal virgem alta em cálcio são necessários 32,1% de água, mas o volume empregado para a hidratação industrializada varia segundo as características físicas, químicas e mineralógicas da cal. Sendo assim, alguns autores indicam 45% ou 52% (ISAIA, 2010). Este autor afirma que a hidratação é um processo contínuo, com velocidade que depende das condições de calcinação da matéria-prima. Comparativamente, é sempre mais lenta para o óxido de magnésio. Quando esta reação não é completa durante a extinção em fábrica, pode continuar após o ensacamento. O inconveniente é o aumento de volume que acompanha a reação de hidratação que é de 100% para o CaO e 110% para o MgO (SANTOS, 2014).

De acordo com a normalização brasileira (ABNT NBR 6473:2003 e ABNT NBR 7175:2003), as principais determinações a serem realizadas numa cal para verificação de sua qualidade são a composição química e a finura. A quantidade de óxidos presentes numa cal representa o seu grau de pureza, e os teores de anidrido carbônico e resíduo insolúvel que demonstram o nível de impureza (SANTOS, 2014).

4.1.4 Propriedades da argamassa no estado fresco

Para o bom desempenho da argamassa, tendo em vista a função a que ela se destina, seja de vedação, regularização, proteção ou união, é necessário que uma série de propriedades sejam garantidas e mantidas durante a vida útil da construção. A avaliação de tais propriedades passa pelo estudo sistemático de seus materiais constituintes e proporcionamento adequado, sua qualidade, condições de preparo e forma de aplicação (MARTINELLI E HELENE, 1991), englobando métodos para determinação de propriedades desde o estado fresco ao endurecido, como a trabalhabilidade, retenção e exsudação de água (MELLO, 2011).

a) Trabalhabilidade, Índice de consistência e Plasticidade

A trabalhabilidade pode ser considerada como uma propriedade subjetiva das argamassas, uma vez que não existe uma trabalhabilidade padrão a ser utilizada, sendo caracterizada pela consistência e plasticidade que descrevem a facilidade de mobilidade e a

coesão, representada pela resistência à exsudação ou à segregação (SANTOS, 2014). Sousa e Lara (2007) afirmam que a trabalhabilidade é uma das propriedades mais importantes no estado fresco, visto que indica convenientemente sua utilização.

A trabalhabilidade é considerada a principal propriedade da argamassa no estado fresco (BAUER, 2005; GOMES, 2008). Tal propriedade está relacionada com a facilidade em manusear, transportar e aplicar uma argamassa ou um concreto, e tem como resultado o agrupamento de outras propriedades como: consistência e plasticidade, retenção de água, coesão das partículas, exsudação e adesão inicial, como Carasek (2007) define essas propriedades no Tabela 3:

Tabela 3: Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas

Propriedades	Definição
Consistência	É a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob a aplicação de cargas
Plasticidade	É a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões
Retenção de água	É a capacidade da argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita à solicitações que provocam a perda de água
Coesão	É o Grau de atração física existente entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante
Exsudação	É a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, de modo que a água sobe e os agregados descem por efeito da gravidade
Adesão inicial	União inicial da argamassa no estado fresco ao substrato

Fonte: CARASEK (2007).

A consistência é a propriedade na qual a argamassa no estado fresco tende a resistir às deformações. A quantidade de água existente na argamassa é o principal fator que influencia esta propriedade; além da relação água/aglomerante, aglomerante/agregado, granulometria do agregado, natureza e qualidade do aglomerante. Esta consistência está associada à trabalhabilidade (facilidade de manusear) a argamassa durante a sua aplicação (SANTOS, 2014).

Segundo Cincotto et al. (1995) classificam as argamassas quanto à consistência em:

- Argamassas secas: é necessária a aplicação de energia para conformá-las em sua forma final, sendo que a pasta preenche os vazios entre os grãos;

- Argamassas plásticas: a aplicação de um pequeno esforço, atingem a sua forma final, em que a pasta forma uma fina película e atua como lubrificante na superfície dos grãos dos agregados;
- Argamassas fluidas: escorrem e se auto nivelam, dispensando qualquer esforço, além da força da gravidade. Neste caso, os grãos ficam imersos na pasta.

A plasticidade é a propriedade que permite à argamassa deformar e reter certas deformações após a redução das tensões a que foi submetida, estando diretamente ligada a sua consistência, coesão, retenção de água e a reologia (CARDOSO, 2009). Uma argamassa terá boa plasticidade quando se espalhar facilmente sobre o substrato e aderir à sua superfície ou, no caso de revestimentos, quando proporcionar facilidade no seu acabamento final (SANTOS, 2014).

b) Retenção de água

A retenção de água da argamassa está relacionada com a capacidade de aprisionamento do líquido, especialmente pelas partículas finas do agregado, de modo a não alterar a trabalhabilidade quando submetida à condições de perda de água, seja por evaporação ou por sucção da base. Carasek (2007) e Gomes (2008) consideram que essa propriedade exerce influência sobre o comportamento da argamassa, desde à intensidade da retração por perda de água no estado plástico, até as propriedades no estado endurecido como a resistência mecânica, a porosidade e a aderência à base (MELLO, 2011).

A NBR 13277/2005 prescreve o método de avaliação da retenção de água, que consiste em medir a massa de água retida pela argamassa após a sucção realizada por meio de uma bomba à vácuo à baixa pressão em um funil de filtragem (funil de Buchner).

c) Coesão e exsudação de água

A coesão, segundo Freitas (2010), pode ser entendida como união e aglutinação. Esta propriedade está diretamente ligada aos constituintes mais finos, isto é, à área específica dos sólidos, sendo a pasta a responsável pela coesão das argamassas. Assim sendo, pode-se dizer que a coesão no estado fresco vai refletir no estado endurecido, mais especificamente na resistência à tração, podendo ser avaliada através do ensaio de tração pura. Cabe destacar que,

até o momento, não há um método de ensaio no Brasil que determine essa característica em laboratório.

A exsudação pode ser definida como, o fenômeno de separação de parte da água de amassamento de uma argamassa fresca devido a incapacidade dos materiais sólidos fixarem essa água, quando esta é mantida em repouso, sem vibração ou choque, de uma forma espontânea. Em geral, a exsudação pode ocorrer tanto em argamassas plásticas como em argamassas fluidas. Esta propriedade interfere diretamente na trabalhabilidade, com alternativas como o aumento do teor de finos nos agregados, a redução do teor de água, o uso de aditivos incorporadores de ar ou retentores de água para atenuar esse fenômeno.

d) Densidade de Massa e Teor de Ar Incorporado

O ensaio de densidade de massa e do teor de ar incorporado na argamassa fresca é determinado a partir da massa específica das argamassas, conforme prescreve a ABNT NBR 13.278:2005. A avaliação dos resultados pode revelar que o teor de ar influencia a trabalhabilidade, e pode impactar nos valores de resistência mecânica das argamassas, contudo, pode beneficiar na melhoria de sua deformabilidade. Além disso, o teor de ar incorporado contribui para o impedimento da passagem de água para o interior pelo fenômeno da capilaridade, pois as bolhas de ar incorporado podem interromper parte dos poros capilares das argamassas (FREITAS, 2010). A ABNT NBR 13.281:2005 classifica as argamassas, segundo a densidade de massa aparente no estado fresco (γ_t), conforme ilustrado na Tabela 4.

Tabela 4: Classificação das argamassas segundo a densidade de massa aparente no estado fresco (γ_t).

Classe	Densidade de massa aparente no estado fresco (kg/m ³)
D1	≤ 1400
D2	1200 a 1600
D3	1400 a 1800
D4	1600 a 2000
D5	1800 a 2200
D6	>2000

Fonte: ABNT NBR 13.281: 2005.

O ensaio de densidade de massa no estado endurecido está prescrito na norma ABNT NBR 13280:2005, representando a relação entre a massa e o volume aparente da argamassa. O valor da densidade de massa da argamassa é um indicativo da compacidade resultante da

proporção de mistura agregado/aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto; determina indiretamente o volume de vazios incorporados pelos aditivos e a quantidade de água de amassamento perdida por evaporação, (FREITAS, 2010).

A ABNT NBR 13.281:2005 classifica as argamassas, segundo a densidade de massa aparente no estado endurecido (γ_e), Tabela 5, sendo avaliação feita pela ABNT NBR 13.280:2005.

Tabela 5: Classificação das argamassas segundo a densidade de massa aparente no estado endurecido (γ_e).

Classe	Densidade de massa aparente no estado fresco (kg/m ³)
M1	≤ 1200
M2	1000 a 1400
M3	1200 a 1600
M4	1400 a 1800
M5	1600 a 2000
M6	>1800

Fonte: ABNT NBR 13.281: 2005.

4.1.5 Propriedades no estado endurecido

A argamassa, logo após a mistura dos seus materiais, apresenta-se no estado plástico, e, à medida que se processam as reações de hidratação do cimento e a formação de produtos cristalinos, ocorre a mudança do estado fluido para um estado rígido, denominado de pega. Após esse período, a argamassa apresenta-se no estado endurecido, com propriedades que lhes são inerentes como capacidade de absorção e deformação, resistência mecânica e resistência de aderência (MELLO, 2011).

a) Resistência mecânica

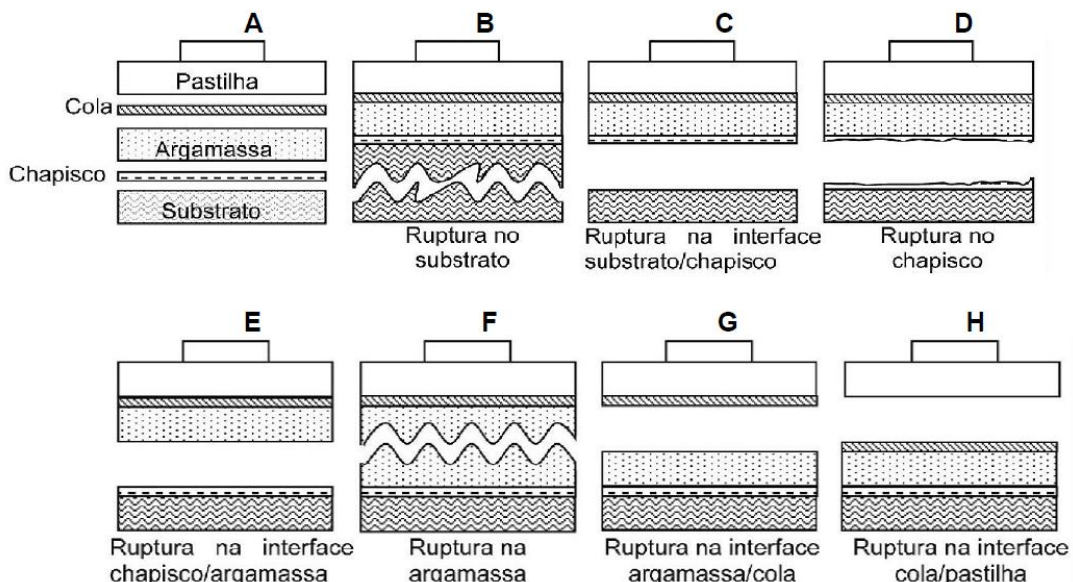
A resistência de um material pode ser definida como a sua capacidade de resistir à tensão sem ruptura, as quais são identificadas algumas vezes com o aparecimento de fissuras. A natureza da resistência dos sólidos da pasta de cimento caracteriza-se pelas forças de atração de Van Der Waals entre superfícies sólidas, as quais dependem da extensão e natureza

de tais superfícies. Assim, os pequenos cristais de C-S-H, de sulfoaluminatos de cálcio hidratados e de aluminatos de cálcio hidratados hexagonais, possuindo área específica elevada, tem alta capacidade de aderência, não somente uns aos outros, mas também aos cristais de hidróxidos de cálcio e aos agregados (MELLO, 2011).

Santos (2008) menciona que essa propriedade depende, basicamente, do consumo e da natureza dos agregados e aglomerantes empregados e da técnica de execução, sendo que esta última visa compactar as argamassas durante a sua aplicação e acabamento. Tem significativa influência da temperatura e da umidade no desempenho e vida útil das argamassas, bem como a resistência, que é inversamente proporcional ao consumo de água (relação água/cimento) devido ao aumento do índice de vazios (SANTOS, 2014).

Baía e Sabbatini (2008) definem a resistência potencial de aderência à tração como a capacidade que a argamassa possui de se manter fixa ao substrato, através da resistência às tensões normais e tangenciais que surgem na interface substrato-argamassa. Logo, é resultado de aderência ao cisalhamento e da extensão de aderência da argamassa. A Figura 3 ilustra os mecanismos de ruptura da aderência, sendo o ensaio prescrito pela norma ABNT NBR 13.528:2010.

Figura 3: Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento com chapisco.



Fonte: ABNT NBR 13.528:2010.

Santos (2008) conceitua o desenvolvimento da aderência pelos mecanismos:

- Aderência mecânica: formada pelo intertravamento mecânico dos produtos da hidratação do cimento, transferidos para a superfície dos poros do substrato;
- Aderência química: advêm de forças covalentes ou forças de Van der Waals, desenvolvidas entre o substrato e os produtos da hidratação do cimento.

b) Absorção de água por capilaridade e permeabilidade

O excesso de água pode sair da mistura por exsudação, evaporação ou sucção da base (FREITAS, 2010). O aumento da absorção de água da argamassa pode ser conseguido com aumento da superfície específica dos constituintes ou com aditivos que, por suas características, absorvem a água ou impedem sua percolação através da massa sólida (SANTOS, 2014).

A permeabilidade é definida como a facilidade com que um fluido escoar através de um sólido. No caso da argamassa de revestimento, relaciona-se com a função de estanqueidade, propriedade muito importante para os revestimentos de fachada. Os vazios capilares são formados pela saída da água excedente e que não foi consumida pelas reações de hidratação do cimento. Já a aderência da argamassa endurecida ao substrato é um fenômeno que ocorre devido à rugosidade da base de aplicação ou da penetração em seus poros da pasta aglomerante ou da própria argamassa (MELLO, 2011).

Segundo Baía e Sabbatini (2008) a permeabilidade está relacionada com a passagem de água pela camada de argamassa, que é um material poroso e permite a percolação da água tanto no estado líquido como no vapor. Neste sentido, depende da quantidade e do tipo de que o revestimento deve ser estanque à água, mas permeável ao vapor. A permeabilidade não é função simples da porosidade, mas depende, também, das dimensões, distribuição e continuidade dos poros (SANTOS, 2014).

c) Retração

Retração é o fenômeno que está associado ao processo de redução de volume aparente que sofrem as pastas de cimento, as argamassas e os concretos antes, durante e depois da pega, quando expostos a condições de secagem ambiental, sem que haja qualquer tipo de carregamento. Deve-se lembrar que a perda de água é considerada a principal causa da retração quando não se leva em consideração o efeito de contração térmica (PEREIRA, 2007).

Segundo Bastos (2001) a retração pode ser classificada em:

- Plástica: caracteriza-se pela perda de água antes da pega do cimento, quando a fração sólida da mistura dispõe de mobilidade, nesta a diminuição do volume do sistema corresponde ao volume de água perdida;
- No estado endurecido, ocorre após a pega do cimento, sendo conhecida por retração na secagem. Depende do tamanho e do tipo de vazios que perde água e da forma como a água está ligada às superfícies sólidas da pasta endurecida: livre, se adsorvida nas paredes internas de sua estrutura; entre as camadas do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) ou combinada quimicamente.

d) Módulo de Elasticidade

O grau de deformação de uma estrutura depende da magnitude da tensão imposta. O regime de deformação onde a tensão é proporcional à deformação é denominado de regime elástico, e a constante de proporcionalidade dessa relação é denominada de módulo de elasticidade. Esse módulo pode ser considerado como uma resistência do material à deformação elástica (CALLISTER, 2002).

O módulo de elasticidade da argamassa sob tração ou compressão é dado pela declividade da curva tensão-deformação sob carga uniaxial, não sendo linear, o que permite dividir este módulo em três tipos (MEHTA e MONTEIRO, 2008): módulo tangente, módulo secante e módulo cordal.

4.2 Polímeros

A palavra polímero origina-se do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) de unidades de repetição denominadas meros, ligados por ligação covalente. A matéria-prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição (CANEVAROLO, 2002).

Dependendo do tipo de monômero (estrutura química), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, poderemos dividir os polímeros em três grandes classes: Plásticos, Borrachas (ou Elastômeros) e Fibras (CANEVAROLO, 2002). Uma classificação mais abrangente cita ainda os Revestimentos, os Adesivos, as Espumas e as Películas (CALLISTER 2002).

4.2.1 História dos polímeros

O primeiro contato do homem com materiais resinosos e graxas extraídas e/ou refinadas se deu na Antiguidade, com os egípcios e romanos que os usaram para carimbar, colar documentos e vedar vasilhames. No século XVI, com o advento dos descobrimentos, espanhóis e portugueses tiveram o primeiro contato com o produto extraído de uma árvore natural das Américas (*Havea Brasiliensis*). Este extrato, produto da coagulação e secagem do látex, apresentava características de alta elasticidade e flexibilidade desconhecidos até então. Levado para a Europa, adquiriu o nome de borracha pela sua capacidade de apagar marcas de lápis. Sua utilização foi bastante restrita até a descoberta da vulcanização por Charles Goodyear, em 1839 (CANEVAROLO, 2006).

Em 1839, Charles Goodyear descobriu um processo no qual o enxofre reagia com a borracha bruta durante o aquecimento e resfriamento. A borracha se tornava elástica com o resfriamento, pois podia esticar, mas voltava à forma original. Também manteve a elasticidade com o aquecimento. Assim, ficou comprovado que o enxofre formava ligações químicas entre as fibras adjacentes de polímero de borracha, ocorrendo assim ligações cruzadas nas fibras de polímero, permitindo que elas voltem para o formato original quando esticadas. Charles Goodyear havia descoberto o processo conhecido atualmente como vulcanização, que torna a borracha mais durável (WIEBECK e HARADA, 2005)

Até o final da Primeira Grande Guerra Mundial, todas as descobertas nesta área foram por acaso, por meio de regras empíricas. Somente em 1920, Hermann Staudinger (1881-1965), cientista alemão, propôs a teoria da macromolécula. Esta nova classe de materiais era apresentada como compostos formados por moléculas de grande tamanho. E esta ideia foi fortemente combatida na época, levando algumas décadas para que fosse definitivamente aceita (CANEVAROLO, 2006).

No início da década de 1950, Karl Ziegler (1898-1973), na Alemanha, desenvolveu catalisadores organometálicos que foram utilizados por Giulio Natta (1903-1979), na Itália, para a produção de polímeros estereoregulares (ditos também estereoespecíficos), produzindo primeiramente polipropileno isotático. Até então, este polímero só tinha sido obtido na forma atática, um produto viscoso com poucas aplicações comerciais. O novo produto, um plástico sólido, iniciou o que atualmente é uma imensa área de síntese, dita estereoespecífica, ou seja aquela que produz estruturas químicas de forma controlada (CANEVAROLO, 2006).

4.2.2 Classificação dos polímeros

Atualmente os polímeros encontram aplicações em diversas áreas pela variabilidade de suas características, possibilitada pelo desenvolvimento científico. Assim, os materiais poliméricos podem ser classificados sob diferentes aspectos.

a) Quanto à estrutura química

Dentro desta classificação, analisa-se o polímeros através da estrutura química do seu mero. Duas subdivisões são possíveis em princípio: polímeros de cadeia carbônica e polímeros de cadeia heterogênea. Nesta classe de polímeros, a cadeia principal possui, além do carbono, um outro átomo, conhecido por heteroatomo, cujos exemplos são o oxigênio, nitrogênio, enxofre, silício, etc. (CANEVAROLO, 2006).

b) Quanto ao método de preparação

O método de preparação distingue os polímeros pelo tipo de reação de polimerização pelo qual foi sintetizado.

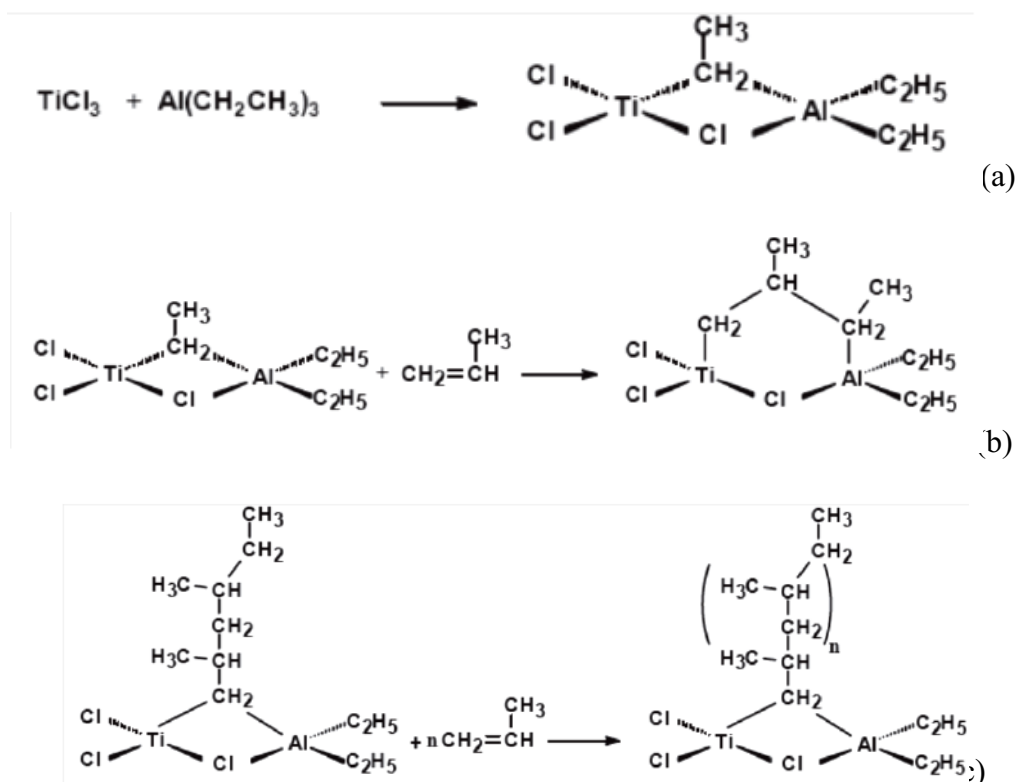
I – Polímeros de adição

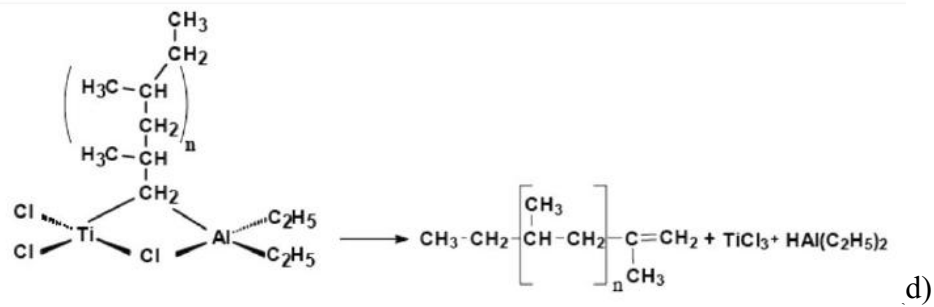
Na poliadição iônica, a substância iniciadora catiônica ou aniônica promove a anexação das moléculas polares dos monômeros, terminando com a formação de uma ligação dupla do carbono na extremidade da cadeia. Na polimerização por catálise, um catalisador de metal de transição participa das reações de união dos monômeros, sendo eliminado no final. Na polimerização radicalar usa-se um iniciador, geralmente um peróxido com fórmula geral $R-CO-O-O-CO-R$, onde o fornecimento de energia por radiação ou aumento de temperatura rompe a ligação entre dois átomos de oxigênio, gerando dois radicais livres como o tipo $R-CO-O^*$, o qual possui um elétron desemparelhado. Esses radicais, muito reativos, quando se aproxima de uma ligação dupla, uma das ligações é perturbada, um dos elétrons da ligação

dupla é atraído para o radical e uma nova ligação simples é formada. Esta etapa constitui a iniciação desse tipo de polimerização (MELLO, 2011).

A figura 5 ilustra a polimerização do polietileno de alta densidade com catalisador heterogêneo do tipo Ziegler-Natta. Na etapa de iniciação (figura 4a) um sal de titânio ($TiCl_3$) é ativado por um composto organometálico de alumínio, formando o catalisador propriamente dito, no qual uma molécula insaturada do monômero é inserida na ligação titânio-carbono. Na etapa de propagação (Figura 4b), várias moléculas do monômero são inseridas entre as ligações titânio-carbono, formando a cadeia com n moléculas do monômero (MELLO, 2011). De Paoli (2008) ressalta que há várias propostas para esse processo de catálise e sua finalização e que, em geral, a reação terminará com a quebra da ligação titânio-carbono, surgindo uma ligação dupla do carbono na extremidade da cadeia (Figura 4c).

Figura 4: Polimerização do PEAD com catalisador Ziegler-Natta nas fases: (a) iniciação; (b) propagação; (c) finalização



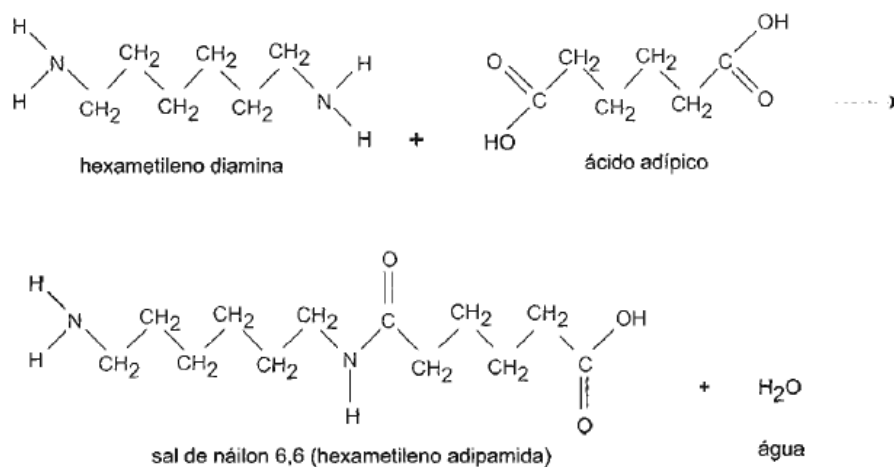


Fonte: MELLO (2011).

II – Polímeros de condensação

São aqueles originários da reação de dois grupos funcionais reativos com a eliminação de moléculas de baixo peso molecular (água, amônio, HCl, etc.). Como exemplo na Figura 5, podemos citar a polimerização do náilon 6,6 (hexametileno adipamida) em que há a condensação, em meio aquoso, do radical amina com o radical ácido dos materiais iniciais (hexametileno diamina e ácido adípico) formando uma ligação amida e a eliminação de uma molécula de água (CANEVAROLO, 2006).

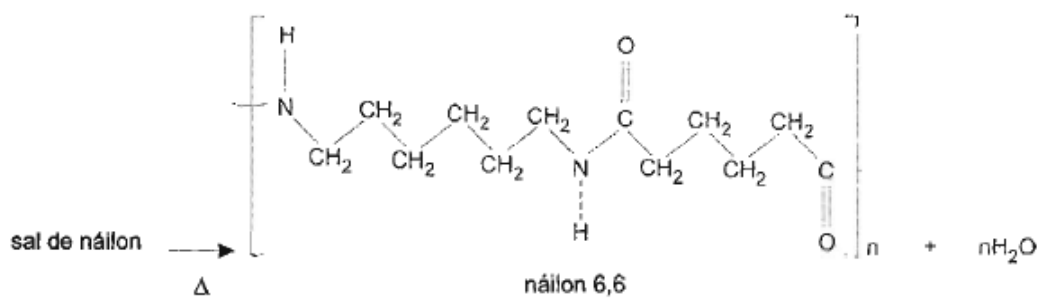
Figura 5: Polimerização do náilon



Fonte: CANEVAROLO (2006).

Desta reação, obtém-se o sal de náilon, que é insolúvel no meio aquoso precipitando da solução. Este é retirado, secado e a seguir polimerizado em altas temperaturas para a obtenção do náilon 6,6 (polihexametileno adipamida), como mostrado na Figura 6.

Figura 6: Obtenção do náilon



Fonte: CANEVAROLO (2006).

b) Quanto ao comportamento mecânico

Os polímeros podem ser subdivididos em plásticos, elastômeros e fibras.

I – Plásticos

Segundo Mello (2011) plásticos são materiais poliméricos de alta massa molecular, sólido em temperatura ambiente. São subdivididos em:

- Termoplásticos - Plásticos capazes de fluir ou amolecer quando aquecidos, retornando ao estado sólido quando resfriados. São exemplos de termoplásticos: Polietileno Tereftalato (PET), polietileno de alta densidade (PEAD) e de baixa densidade (PEBD), cloreto de polivinila (PVC), poliestireno (PS), polipropileno (PP);
- Termofixos ou termorrígidos - São sintetizados com ligações cruzadas entre as cadeias, tornando-se, após a cura ou endurecimento, infusíveis, insolúveis e não recicláveis.

II – Elastômeros

Segundo Canevarolo (2006), são polímeros que na temperatura ambiente podem deformar-se no mínimo duas vezes o seu comprimento inicial, retomando ao comprimento original rapidamente depois de retirado o esforço. Para apresentar estas características, os elastômeros normalmente possuem cadeias flexíveis amarradas uma às outras, com uma baixa densidade de ligação cruzada. Isso define as seguintes propriedades básicas:

- aceitar grandes deformações ($> 200\%$), mantendo boa resistência mecânica e módulo de elasticidade quando deformado;
- recuperar rapidamente a deformação, após retirado o esforço;
- ter recuperação total da deformação.

III – Fibras

Termoplástico orientado (com um sentido longitudinal dito eixo principal da fibra) satisfazendo a condição geométrica de $L/D \geq 100$. A orientação das cadeias e dos cristais, feita de modo forçado durante a fiação, aumenta a resistência mecânica desta classe de materiais, tornando-os possíveis de serem usados na forma de fios finos. Como exemplos, têm-se as fibras de poliacrilonitrila (PAN), os náilons, o poliéster (PET), etc (CANEVAROLO, 2006).

c) Quanto ao desempenho mecânico

MELLO (2011) classifica os plásticos de acordo com o desempenho mecânico, como:

Termoplásticos convencionais: Plásticos de uso comum caracterizado pela alta produção (commodities), baixo custo da resina, baixo nível de exigência mecânica e facilidade de processamento. Os polietilenos de alta e baixa densidade, o polipropileno e o policloreto de vinila são exemplos desse tipo de polímero.

Termoplásticos especiais: Possuem um custo levemente superior e características um pouco melhores do que os plásticos convencionais, adequando-se à sua aplicação, como no caso do polimetacrilato de metila (PMMA), com alta transparência

Termoplásticos de engenharia: Possuem propriedades de engenharia como rigidez, dureza, boa resistência mecânica. O PET e o policarbonato são exemplos deste tipo de plástico.

Termoplásticos especiais de engenharia: São plásticos desenvolvidos para atender a um determinado nível de serviço, como o poliéter-éter-cetona, que possui boa estabilidade térmica devido aos anéis aromáticos presentes em sua cadeia.

4.2.3 Propriedades dos polímeros

Os materiais poliméricos apresentam propriedades que os tornam, em alguns casos, os mais apropriados para determinados usos, conforme Mello (2011) classifica a seguir:

I – Propriedades mecânicas

Os polímeros apresentam baixos valores de resistência à tração e à compressão em relação aos materiais de engenharia convencionais. Com exceção do PET, não ultrapassam

100 MPa de resistência à tração, por outro lado apresentam grandes alongamentos na ruptura, como o PEBD, com até 900%. Em geral, o módulo de elasticidade dos materiais poliméricos não excede 5 GPa, bem inferior ao dos materiais cerâmicos e metálicos.

As propriedades físicas e mecânicas do polietileno são muito influenciadas pelo grau de cristalinidade, que é proporcional ao grau de linearidade de suas cadeias, pois este arranjo permite melhor acomodação e compacidade da estrutura molecular, o que significa que o aumento do número de cadeias por unidade de espaço provocado pelo incremento da cristalinidade, aumentará a densidade do polietileno. A acomodação linear das cadeias também propicia maior atração intermolecular, o que explica o aumento da rigidez do polietileno com maior cristalinidade, o que também provocará redução na capacidade de alongamento. A maioria das propriedades térmicas e elétricas não são influenciadas pela cristalinidade do polietileno.

II – Propriedades térmicas

A capacidade de armazenar calor é avaliada pelo calor específico, na qual os polímeros apresentam baixos valores, entre 0,2 e 0,5 cal/g°C, pouco acima, portanto, dos metais, que está abaixo de 0,1 cal/g°C.

A condutividade térmica, propriedade que avalia a característica de o material ser bom ou mau condutor de calor, medida em cal/cm.s.°C, apresenta valores da ordem de 10^{-3} para os polímeros, sendo tipicamente maus condutores.

As características do estado físico dos materiais poliméricos estão relacionadas com a mobilidade de suas cadeias. Esta mobilidade, por sua vez, está relacionada com a agitação dos átomos, que é diretamente proporcional à temperatura. As temperaturas de transição definem, portanto, as mudanças no estado físico dos polímeros.

Temperatura de transição vítrea (T_g) – Ao aquecer uma massa polimérica resfriada, a região amorfa das cadeias moleculares adquire mobilidade, passando pela transição chamada de temperatura de transição vítrea. A partir desta temperatura, o material tem comportamento viscoelástico e, em seguida, borrachoso. Em temperaturas menores do que a de transição vítrea, o polímero apresenta-se rígido e quebradiço, como um vidro.

Temperatura de fusão cristalina (T_m) – Prosseguindo com o aquecimento, sendo um polímero semi-cristalino, passa-se a uma transição de primeira ordem, onde ocorre a fusão dos cristalitos, desaparecendo a região cristalina. Nestas condições, o polímero apresentar-se-á no estado viscoso.

III – Propriedades elétricas

Os polímeros são maus condutores de eletricidade, assim com são maus condutores de calor. A resistividade volumétrica desses materiais, que mede a resistência à passagem de corrente elétrica, é superior à dos metais e do vidro.

IV – Propriedades químicas

A resistência química é uma das propriedades mais importantes dos materiais poliméricos. Essa propriedade pode ser subdividida em resistência à oxidação, à degradação térmica, às radiações ultravioletas, à ácidos e bases. Entretanto, em função da sua estrutura molecular, alguns polímeros podem estar sujeitos à degradação, conforme descrito a seguir:

- Resistência à oxidação: Essa resistência é mais acentuada nas macromoléculas que contem apenas ligações simples entre os átomos de carbono, como o polietileno e o polipropileno. Em polímeros insaturados, isto é, que possuem dupla ligação entre os átomos de carbono, particularmente as borrachas, a oxidação pelo ataque direto do oxigênio nos pontos vulneráveis da cadeia, que são as ligações insaturadas, acarretando em redução ou aumento do seu peso molecular, e os efeitos são a descoloração, perda de brilho superficial e de propriedades mecânicas;
- Resistência à degradação térmica: Essa degradação ocorre pela exposição do polímero ao calor na presença do ar, na qual os radicais livres de oxigênio promovem a ruptura de ligações covalentes insaturadas ou de ligações contendo carbono terciário, criando pontos com maior facilidade de formação de hidroperóxidos, os quais causam cisão nas cadeias do polímero. Os polímeros clorados são suscetíveis a esse tipo de degradação devido à fácil ruptura da ligação carbono-cloro;
- Resistência às radiações ultravioleta: Ligações insaturadas da estrutura da macromolécula apresentam baixa resistência à radiações ultravioleta, que, ao ser absorvida, geram radicais livres que atuam nas reações de cisão e oxidação, causando efeitos deletérios no polímero;

- Resistência à ácidos e bases: A resistência do polímero ao ataque de ácidos depende da presença em sua estrutura molecular de grupamentos sensíveis a essas substâncias, como, por exemplo, as resinas melamínicas e os produtos celulósicos que sofrem alteração em meio ácido.

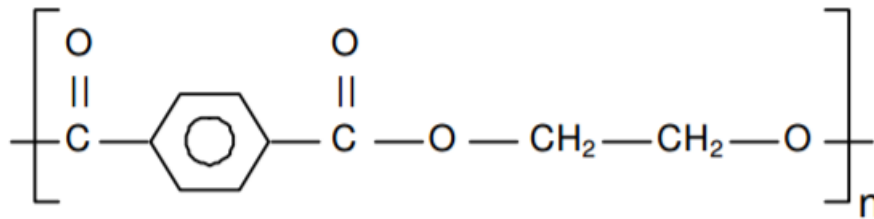
Segundo Torres (2007) o polietileno apresenta boa resistência a agentes químicos, citando as seguintes propriedades:

- São insolúveis em água, da qual absorve menos de 0,01%, mesmo em temperatura elevada, apresentando comportamento hidrofóbico;
- Possui alta resistência à ácidos e bases;
- Não é solúvel em nenhum solvente conhecido à temperatura ambiente;
- Possui resistência a qualquer corrosão microbiana;
- Apresenta combustibilidade mesmo após a retirada da fonte de calor, liberando CO, CO₂ e água, mas nenhum gás corrosivo;
- Possui temperatura de transição vítrea (temperatura de fragilidade) muito baixa.

4.2.4 Politereftalato de etileno (PET)

O PET – poli (etileno tereftalato) ou poli (tereftalato de etileno) (Figura 7), é um polímero desenvolvido em 1941 pelos químicos ingleses Winfield e Dickson (BELLIS, 2005). Este polímero, obtido com alto peso molecular foi reconhecido na época como tendo potencial para aplicações como fibra e, somente na década de 60, com o filme de PET biorientado, passou a ter grande aceitação para acondicionamento de alimentos. Em 1973, o processo de injeção e sopro com biorientação, desenvolvido pela Du Pont, introduziu o PET na aplicação como garrafa, o que revolucionou o mercado de embalagens, principalmente o de bebidas carbonatadas. Ele chegou ao Brasil apenas em 1989 (FORMIGONI E CAMPOS, 2006).

Figura 7: Estrutura química do PET



Fonte: MANO E MENDES (1999).

Garrafa de Poli-Tereftalato de Etileno (PET): Possui alta resistência mecânica e química, é excelente barreira para gases e odores, e por seu peso ser muito menor que as embalagens tradicionais (vidro), tornou-se o recipiente ideal para as indústrias de bebidas, reduzindo custos de transporte e produção (GUELBERT et al., 2007). Como também é um produto 100% reciclável.

A opção pela PET apresenta vantagens consideráveis. Quando o consumidor opta por um produto, o que realmente interessa é o que está dentro da embalagem, porém, a embalagem naturalmente vai junto. Ela faz parte do produto e muitas vezes não pode ser separada antes do término do consumo daquilo que realmente interessa; neste momento o consumidor pode optar entre simplesmente jogar sua embalagem no lixo ou dar a ela o destino correto, para o qual foi concebida, a reciclagem (COSTA, 2016). Segundo a ABIPET (2016) as embalagens PET são 100% recicláveis e de ótima performance ambiental, podem ser facilmente separadas de outros produtos, e representam o mais moderno conceito de embalagem e oferecem inúmeros benefícios ao longo da cadeia de produção e consumo.

Para o consumidor são extremamente leves, permitindo que grandes volumes sejam carregados com facilidade; são transparentes, permitem visualizar o produto que será consumido; possuem sistemas de fechamento eficientes; inquebráveis, permitem que crianças possam usá-las; preservam o produto até o fim do consumo; evitam desperdício; democrática, está presente em artigos destinados a todas as classes; com o barateamento dos custos de produção, os produtos tornaram-se mais acessíveis (ABIPET, 2016).

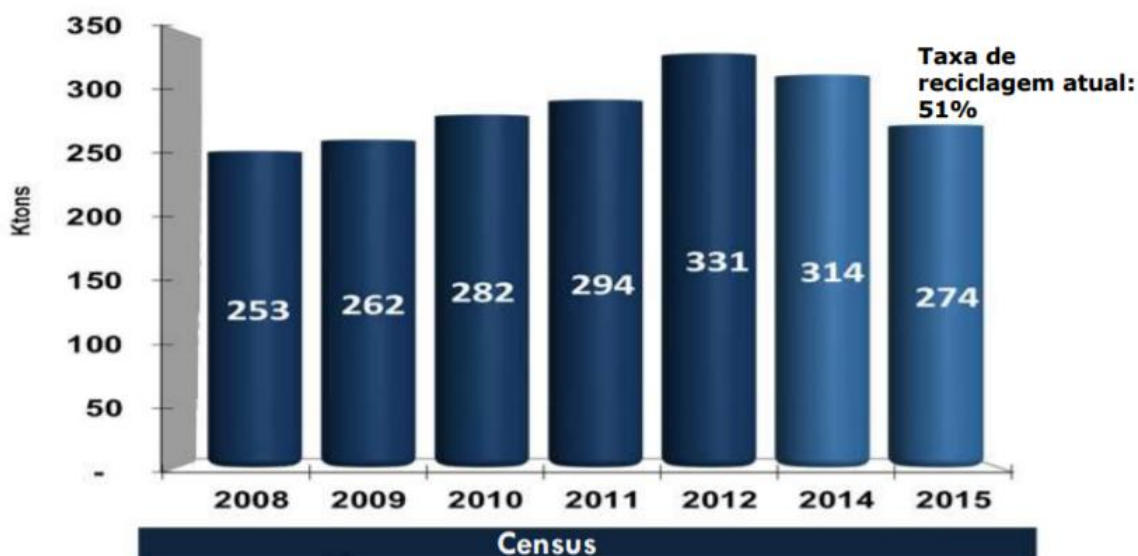
Para a indústria e o comércio: São brilhantes e chamativas; o sistema produtivo versátil permite variedade de formas; não quebram na linha de produção; evitam desperdício de material, embalagem e produto; possuem ótima resistência química, permitindo o envase dos mais variados produtos; leves, tornam o transporte mais eficiente (ABIPET, 2016).

Para o meio ambiente: a resistência permite carregar muito mais produto que embalagem – as garrafas de PET têm a melhor relação peso/conteúdo do mercado; num caminhão carregado, as embalagens de PET ocupam apenas 2% da carga, enquanto algumas embalagens ocupam até 48% do peso – ocupando desnecessariamente o lugar do produto; nos

sistemas retornáveis, esse peso morto ainda tem que voltar para a fábrica do produto, gerando ainda mais emissões de CO2 e outros gases de efeito estufa; a garrafa de PET para dois litros de refrigerante tem, em média, apenas 47 gramas; uma garrafa de vidro de 01 litro para refrigerante pesa 950 gramas. (ABIPET, 2016).

A Figura 8 ilustra os dados sobre reciclagem de embalagem PET no Brasil nos últimos anos.

Figura 8: Evolução da reciclagem de PET no Brasil



Fonte: ABIPET (2016).

Conforme apresentado, a reciclagem de PET no Brasil teve uma queda a partir de 2012, devido a diminuição da atividade econômica (queda da demanda) e uma acentuada redução do preço do petróleo, fatores como esses reduzem a rentabilidade e portanto a atratividade.

4.2.5 Reciclagem de garrafas PET

Com a crescente evolução do mercado e os avanços tecnológicos, existe uma necessidade para novas aplicações para o PET reciclado, sua reciclagem, além de desviar lixo dos aterros, é utilizado uma quantidade mínima de energia, cerca de 0,3% da total, para a produção da resina virgem. E têm a vantagem de poder ser reciclado várias vezes sem prejudicar a qualidade do produto final (CEMPRE 1992). Segundo Cempre, os processos de reciclagem do PET, são, recuperação, revalorização e transformação.

Na fase da Recuperação, as embalagens que seriam atiradas no lixo comum ganham o status de matéria-prima. As embalagens recuperadas serão separadas por cor e prensadas. A separação por cor é necessária para que os produtos que resultarão do processo tenham uniformidade de cor, facilitando assim, sua aplicação no mercado. A prensagem, por outro lado, é importante para que o transporte das embalagens seja viabilizado (CEMPRE, 2016).

Na fase de Revalorização, as garrafas são moídas (flake), ganhando valor no mercado. O produto que resulta desta fase é o floco da garrafa. Pode ser produzido de 13 maneiras diferentes e, os flocos mais refinados, podem ser utilizados diretamente como matéria-prima para a fabricação dos diversos produtos que o PET reciclado dá origem na etapa de transformação. No entanto, há possibilidade de valorizar ainda mais o produto, produzindo os pellets. Desta forma o produto fica muito mais condensado, otimizando o transporte e o desempenho na transformação (CEMPRE, 2016).

Na Transformação, os flocos, ou o granulado, serão transformados num novo produto, fechando o ciclo. Os transformadores utilizam PET reciclado para fabricação de diversos produtos, inclusive novas garrafas para produtos não alimentícios (CEMPRE, 2016).

4.3 Agregado plástico reciclado em argamassa

Canellas (2005) substituiu a areia da argamassa por partículas floculadas de garrafas PET nos percentuais de 10, 30 e 50%, usando o traço de cimento e areia na proporção de 1:4 como referência. Os resultados mostram uma forte redução na resistência mecânica à medida que aumenta o teor de partículas de plástico na argamassa. A argamassa com 50% de substituição do agregado apresentou resistência à compressão cerca de seis vezes menor do que aquela verificada para o traço de referência. Salienta-se a importância de se efetuar a substituição dos agregados em volume dada a diferença entre seus pesos específicos. Assinala também que é importante considerar o tamanho e a forma das partículas do resíduo plástico como fatores que podem reduzir as perdas nas propriedades mecânicas.

O trabalho de Marzouk (2006) demonstra uma ligeira redução nas resistências à compressão e à flexão, 15,7% e 32,8%, respectivamente, quando foi efetuada a substituição de até 50% em volume da areia por resíduos de PET, apresentando forte redução quando o percentual de substituição superou 50%. A substituição por partículas de PET com tamanho máximo de 5 mm formaram os compósitos com melhores propriedades mecânicas. A absorção capilar reduziu com o aumento do teor de resíduos de PET nos corpos de prova, da

mesma forma que o módulo de elasticidade, com 50% de redução para um percentual de substituição foi 50%. A análise microestrutural por microscopia por varredura eletrônica revelou uma matriz mais compacta quando o percentual de substituição do agregado foi até 50%. O trabalho demonstrou a importância do tamanho das partículas de plástico e das percentagens de substituição da areia para a modificação das propriedades mecânicas do compósito (MELLO, 2011).

Choi et al (2009) desenvolveram agregados leves produzidos pela mistura de PET triturado, com dimensões 5 a 15 mm, e areia fina, passando na peneira 0,15 mm, que foram colocados em um misturador circular com temperatura interna de $250 \pm 30^\circ$ C. Foram realizados ensaios com argamassa com relação cimento/agregado 1:2,44 e água/cimento 0,60, substituindo a areia por agregado leve em 25%, 50%, 75% e 100%. Os ensaios realizados foram de absorção, consistência e resistência à compressão. Na última etapa foram produzidas amostras de concreto com relações a/c 0,45 – 0,49 – 0,53 (MELLO, 2011).

Hannawi, Kamali-Bernard e Prince (2010) estudaram as propriedades físicas e mecânicas da argamassa utilizando resíduos de policarbonato (PC) e de polietileno tereftalato (PET), com dimensões máximas de 3,15 mm e 6,3 mm, respectivamente, em substituição a areia em 3%, 10%, 20% e 50%. E verificou em seus resultados que a densidade da argamassa, no estado fresco e endurecido foi reduzido com o aumento do teor de agregados poliméricos, não houve alteração da porosidade e a absorção de água com 3% de substituição da areia pelos resíduos utilizados, ocorrendo aumento em teores maiores do que 3%, a resistência à compressão ocorreu uma redução de 9,8%, 30,5%, 47,1% e 69% para as misturas contendo 3%, 10%, 20% e 50% de agregados de PET, respectivamente. Com os mesmos teores de PC a redução foi de 6,8%, 27,2%, 46,1% e 63,9%. O módulo de elasticidade diminuiu de 37,3 GPa da referência para 11,8 e 14,2 GPa para a argamassa com 50% de PET e PC. As curvas carga-deflexão observadas no ensaio à flexão mostram um aumento da ductilidade com o aumento do teor de agregados plásticos, pela habilidade do agregado plástico em prolongar o intervalo de propagação das fissuras. Os resultados do cálculo da tenacidade na flexão mostram um aumento concomitante com o teor de agregados de PET e PC (MELLO, 2011).

5. MATERIAIS E METODOLOGIA

5.1 Materiais

Os materiais utilizados nesse trabalho foram:

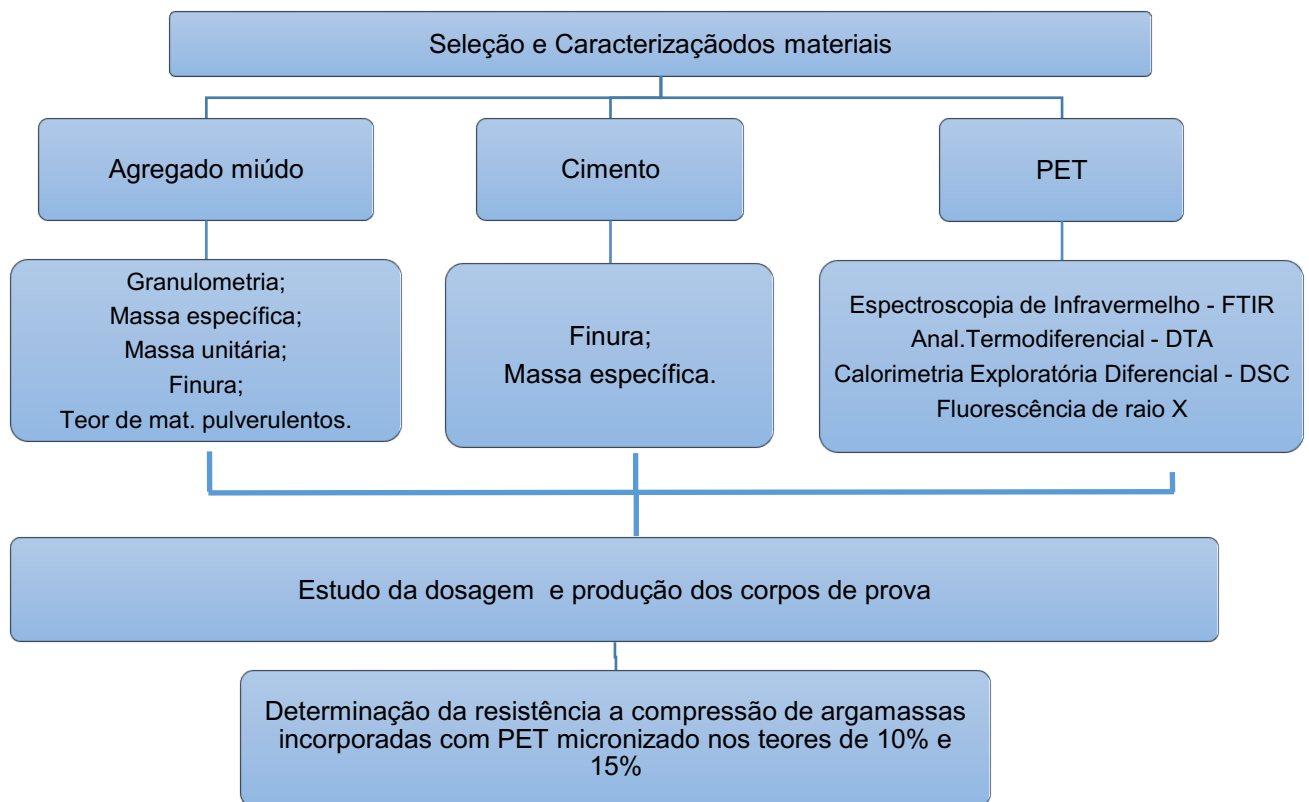
- **Agregado miúdo:** O agregado miúdo, utilizado na pesquisa, foi do tipo natural proveniente de jazida do leito do Rio Paraíba, apresentando diâmetro máximo de 4,8mm, finura igual a 2,78%, massa específica de $2,618\text{g/cm}^3$, massa unitária solta igual a $1,429\text{g/cm}^3$, e teor de materiais pulverulentos de 0,07%;
- **Cimento Portland CII Z:** O cimento Portland foi obtido no comércio local do município de Santa Rita-PB, apresentando massa específica igual a $2,91\text{ g/cm}^3$ e finura igual 2,84%;
- **Politereftalato de etileno:** apresenta um pico exotérmico de 200°C , indicando a ocorrência de modificações físicas e químicas na composição do material; pico endotérmico de aproximadamente $82,64^\circ\text{C}$, indicando a mudança de estado físico do material (sólido para líquido), havendo uma pequena perda de massa; pico exotérmico de $129,62^\circ\text{C}$ indicando uma nova mudança de estado físico (líquido para vapor); perda de massa total de 0,24%; bandas características: em aproximadamente 3000cm^{-1} , identificada pela vibração de deformação axial do grupo (=C–H), presentes em compostos aromáticos (benzeno); em 1709cm^{-1} estiramento C=O de ácido carboxílico,; em 1247cm^{-1} estiramento C(O)–O de grupos éster; em 1091 e em 1018cm^{-1} indicativo de estiramento da ligação C–O e aproximadamente 726cm^{-1} , deformação angular dos carbonos dis-substituídos no anel aromático;
- **Água:** fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba (CAGEPA);
- **Cal hidratada:** obtida no comércio local de Campina Grande-PB, apresentando teor de 49,35% de cálcio (CaO), 26,45% de óxido de magnésio, e granulometria com diâmetro médio de $9,87\mu\text{m}$, com D10 de $0,47\mu\text{m}$, D50 de $4,28\mu\text{m}$ e D90 de $30,84\mu\text{m}$. Para esta cal não existe partículas superiores a $100\mu\text{m}$.

5.2 Métodos

Os métodos de ensaios utilizados baseiam-se em normas, entre elas, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e normas internacionais da ASTM e da AASHTO.

A Figura 9 ilustra o Fluxograma das etapas da pesquisa, atividades e ensaios a serem realizados.

Figura 9: Fluxograma das etapas do projeto



5.2.1 Seleção de materiais

Neste subitem são enumerados os critérios e descritos os tipos de materiais utilizados neste trabalho. Os critérios para escolha dos materiais foram baseados nas especificações e normas da ABNT, da ASTM e da AASHTO.

Os materiais utilizados se dividem em três grupos, o primeiro composto materiais granulares (agregados), o segundo de cimento (Portland CII Z) e o terceiro de Politereftalato de etileno (PET) micronizado.

5.2.2 Caracterização dos Materiais

5.2.2.1 Caracterização Química, Física e Mineralógica do Politereftalato De Etileno – PET

Análise Térmica Diferencial (DTA) E Termogravimétrica (TG)

As análises térmicas diferenciais (DTA) e termogravimétricas (TG) de PET foram realizadas em equipamento BP Engenharia, Modelo RB 3000, operando a 12,5°C/min. A temperatura máxima utilizada nas análises térmicas foi de 300°C e o padrão utilizado nos ensaios de DTA foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado (Figura 10).

Figura 10: Equipamento utilizado para realização de ensaios de análises térmicas



Fonte: Autoria própria.

Fluorescência de Raio-X

Para determinação da composição química dos materiais utilizou-se a técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) (Figura 11). Esta técnica baseia-se no princípio de que a absorção de raios-X pelo material provoca a ionização interna dos átomos, gerando uma radiação característica conhecida como “fluorescência”. Nesta análise são obtidos os óxidos presentes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Ti_2O , entre outros).

Figura 11: Equipamento de análise por Fluorescência de Raios-X



Fonte: Autoria própria.

5.2.2.2 Caracterização Física dos Agregados e do Cimento

A seguir estão descritos os ensaios de caracterização do agregado miúdo e do cimento utilizados na pesquisa.

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.

O ensaio de composição granulométrica para o agregado miúdo foi realizado segundo o método de ensaio da ABNT NBR 7217 (ABNT, 1987).

Determinação da massa específica

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

A determinação da massa específica da areia foi realizada por meio do frasco de Chapman (Figura 12), segundo a norma ABNT NBR 9776 (ABNT, 1987). Para o agregado graúdo a determinação da massa específica foi obtida utilizando-se a norma ABNT NBR NM 53 (ABNT, 2003) e para o cimento, o ensaio foi realizado seguindo a norma DNER – ME 085/1994.

Figura 12: Determinação da massa específica do agregado miúdo - Frasco Chapman



Fonte: Autoria própria.

Determinação da massa unitária

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

O ensaio foi realizado com o agregado miúdo segundo o método de ensaio ABNT NBR 7251 (ABNT, 1982), conforme ilustra a Figura 13.

Figura 13: Execução do ensaio de determinação da massa unitária no estado solto



Fonte: Autoria própria.

Determinação do teor de materiais pulverulentos

Os materiais pulverulentos são partículas minerais que passam na peneira de malha de nº 200 com abertura de 75µm, inclusive os materiais solúveis em água, presente nos agregados.

Este ensaio, que tem como objetivo a determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados destinados ao preparo de concreto, foi realizado para o agregado miúdo de acordo com a norma ABNT NBR 7219 (ABNT, 1987).

Absorção

É o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de um líquido em seus poros permeáveis, em relação a sua massa no estado seco.

A determinação da absorção dos agregados foi realizada segundo o método de ensaio ABNT NBR NM 53 (ABNT, 2003). Dependendo do valor da absorção pode ser feito o reajuste nos cálculos da relação água/cimento dos traços de concreto.

Ensaio de finura

É a determinação da porcentagem, em massa, de cimento Portland cujas dimensões de grãos são superiores a 75 µm através do método de peneiramento manual de acordo com a norma ABNT NBR 11579 (ABNT, 2012).

É importante se conhecer o valor da finura dos cimentos, pois quando esse valor é elevado, indica que ocorreu hidratação do cimento e conseqüentemente, perda de suas características. Quanto mais fino for o cimento melhor será a sua reação de hidratação e a resistência mecânica da argamassa.

5.3 Estudo da dosagem e moldagem dos corpos de prova

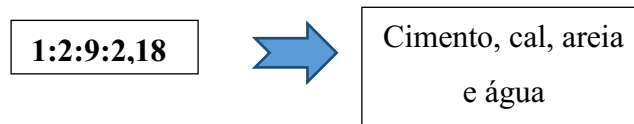
5.3.1 Dosagem dos materiais

Utilizando-se o traço proposto pela pesquisa **1:3:9**, a qual foi necessário se obter o fator água/cimento ($f_{a/c}$). Desta forma, utilizamos o método de Selmo e uma simplificação do Ensaio de Consistência.

Método de Selmo: propõe a dosagem racional de adições argilosas em argamassa de revestimento e assentamento a partir de curvas de trabalhabilidade que correspondem à relação entre agregados/cimento em misturas experimentais: ao variar a relação areia/cimento obtém-se empiricamente, a quantidade mínima de adição capaz de plastificar a argamassa.

Simplificação do Ensaio de Consistência: o ensaio de Consistência é regido pela NBR 13279 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência) ABNT (2005).

Utilizando-se os dois métodos obteve-se o fator água/cimento ($f_{a/c}$) igual a 2,18, a qual atende as condições de boa moldagem da argamassa. Assim obteve-se o seguinte traço:



Com o traço finalizado, iniciamos o procedimento de cálculo das quantidades de materiais necessários para confecção dos corpos de prova. Algumas informações importantes par iniciar os cálculos: dimensões 5cmx10cm (diâmetro x altura).

Inicialmente realizou-se o cálculo do consumo de cada material pela Equação (01).

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\delta_c} + \frac{a}{\delta_a} + \frac{b}{\delta_b} + x} \quad \text{Eq. (01)}$$

Onde:

δ_c , δ_a e δ_b são respectivamente, as massas específicas reais do cimento, areia e da brita;

1:a:b:x é o traço do concreto expresso em massa;

C é o consumo de cimento por metro cúbico de concreto, 1000 dm³.

Assim, para os corpos de prova de referência e com os teores de substituição tem-se o quantitativo apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Quantitativo de materiais para moldagem de um corpo de prova

Traço	Misturas		Materiais				
			Cimento Portland (g)	PET (g)	Cal (g)	Agregado miúdo (g)	Água (g)
1:2:9	Referência		33	-	66	296,96	71,93
	PET	10%	33	29,70	66	267,26	71,93

	15%	33	44,54	66	252,42	71,93
--	-----	----	-------	----	--------	-------

Fonte: Autoria própria.

5.3.2 Produção e preparação dos corpos de prova

Inicialmente foi realizada a pesagem dos elementos constituintes do material a saber, o cimento, areia e PET micronizado, conforme ilustra na Figura 14.

Figura 14: Pesagem dos materiais constituintes da argamassa



Fonte: Autoria própria.

Sequencialmente foi realizada a homogeneização da mistura conforme mostra a Figura 15.

Figura 15: Homogeneização da mistura



Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova foram moldados segundo norma da ABNT NBR 13279 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência) ABNT (2005).

Inicialmente foi passado o óleo lubrificante nos moldes para facilitar a desmoldagem. Posteriormente colocou-se 3 camadas de material, com aplicação de 25 golpes com soquete para cada camada. Em seguida regularizou-se a superfície com régua para uma melhor distribuição das tensões e procedeu-se com a identificação dos corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16: Produção da argamassa e moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria.

Par esta etapa foram moldados corpos de prova nas dimensões de 5cmx10cm para a argamassa de referência e para a argamassa incorporada com 10% e 15% de PET segundo a NBR 13279 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência) ABNT (2005).

5.3.3 Processo de cura

Realizado todo procedimento de preparo e moldagem dos corpos de prova, estes permaneceram inicialmente 24hrs à temperatura ambiente e posteriormente foram levados a câmara úmida até serem retirados para ensaio, conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17: Cura dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria.

5.4 Determinação da Resistência à Compressão Simples

Para a caracterização mecânica dos corpos de prova de argamassa incorporadas com PET, nas dimensões de 5x10cm, será realizado o ensaio de resistência à compressão simples, de acordo com a norma ABNT NBR 7215 (ABNT 1996), nas idades de controle de 7, 14 e 28 dias. O equipamento utilizado para realização do ensaio está ilustrado na Figura 18.

Figura 18: Rompimento dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Resistência à compressão

Os resultados referentes ao ensaio de resistência à compressão para a argamassa de referência e para a argamassa incorporada com PET micronizado nos teores de 10 e 15%, estão apresentados na tabela 7.

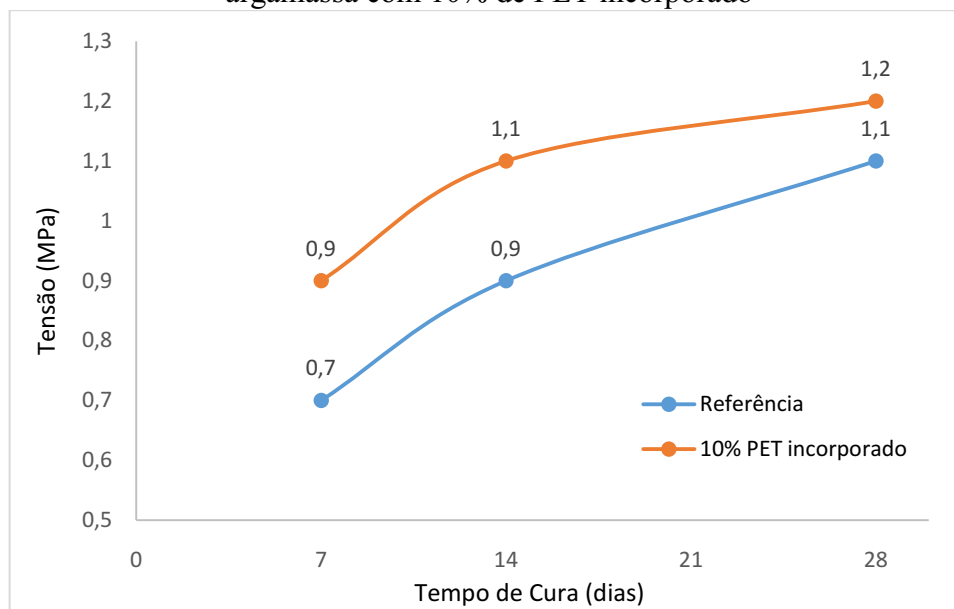
Tabela 7: Resistência a compressão simples

Teor de Pet incorporado	Resistência (MPa)		
	7 dias	14 dias	28 dias
Referência	0,70	0,90	1,10
10%	0,90	1,10	1,20
15%	0,95	0,95	1,10

Fonte: Autoria própria.

A Figura 19 ilustra a resistência a compressão da argamassa incorporada com 10% de PET em substituição ao agregado miúdo em comparação com a argamassa de referência.

Figura 19: Resistência à compressão simples para a argamassa de referência e para a argamassa com 10% de PET incorporado



Fonte: Autoria própria.

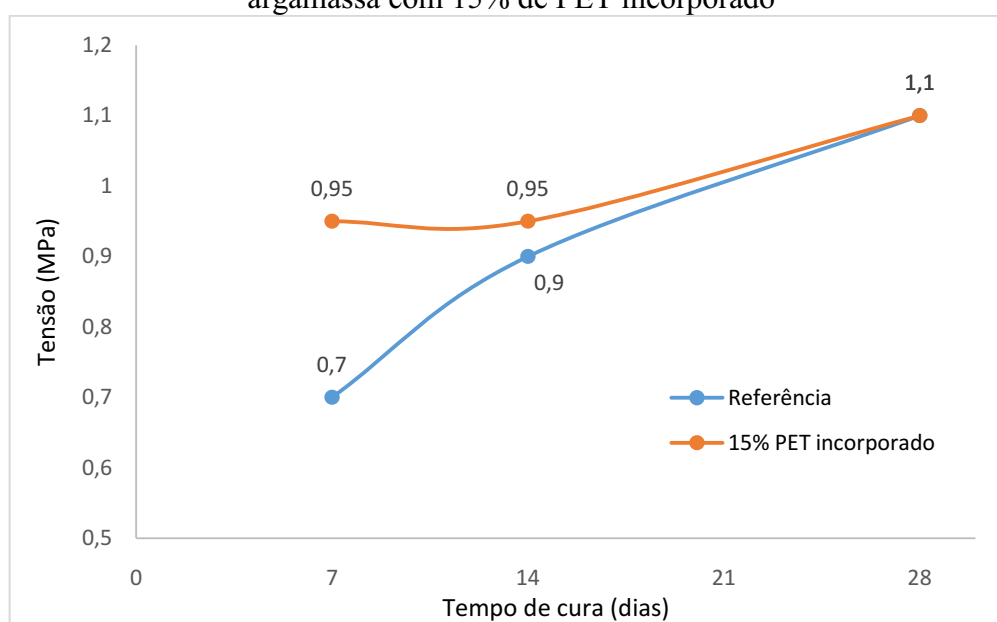
De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que a argamassa com 10% de PET incorporado em substituição do agregado miúdo, a tensão de compressão é maior durante

todas as fases de cura, tanto para 7, 14 e 28 dias, com um aumento percentual de 28,6%, 22,2% e 9,1% respectivamente, em comparação com a argamassa de referência.

De acordo com a NBR 13281 (Tabela 2) a partir do resultado de resistência à compressão (1,20 MPa) aos 28 dias, podemos classificar esta argamassa como sendo do tipo I, sendo $\geq 0,1$ e $< 4,0$, para assentamento e revestimento.

A Figura 20 ilustra a resistência a compressão da argamassa incorporada com 15% de PET em substituição do agregado miúdo em comparação com a argamassa de referência.

Figura 20: Resistência à compressão simples para a argamassa de referência e para a argamassa com 15% de PET incorporado



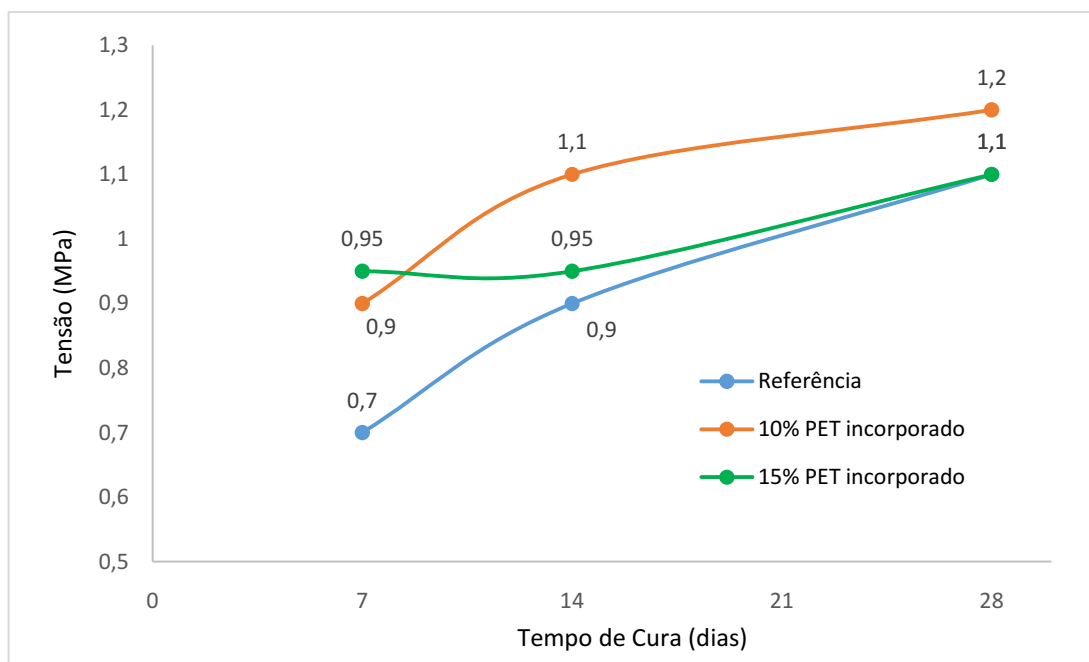
Fonte: Autoria própria.

Ao analisar os resultados obtidos para a argamassa com 15% de PET em substituição do agregado miúdo, verifica-se que a resistência de compressão em comparação com a de referência é maior para as fases de cura para 7 e 14 dias, se tornando igual a de referência aos 28 dias, com um aumento atípico da resistência aos 7 dias, isso deve-se ao fato do PET micronizado proporcionar um maior empacotamento. Porém com o decorrer do tempo, esse material não tende a elevar tanto sua resistência, fazendo com que tenha um ganho de resistência de 35,7% para 7 dias, de 5,6% para 14 dias e aos 28 dias se iguala a resistência da argamassa de referência.

De acordo com a NBR 13281 (Tabela 2) a partir do resultado de resistência à compressão aos 28 dias, podemos classificar esta argamassa como sendo do tipo I, sendo $\geq 0,1$ e $< 4,0$, para assentamento e revestimento.

A Figura 21 ilustra a resistência a compressão da argamassa incorporada com 10% e 15% de PET em substituição do agregado miúdo em comparação com a argamassa de referência.

Figura 21: Resistência à compressão simples para a argamassa de referência e para a argamassa com 10 e 15% de PET incorporado



Fonte: Autoria própria.

Analisando os resultados obtidos para a resistência das argamassas ao longo dos 28 dias, podemos observar que a incorporada com 10% de PET obteve um melhor resultado comparado com 15% de PET e com a de referência, indo de encontro com a maioria dos resultados na literatura que diminuem a resistência da argamassa.

Os resultados de Canellas (2005), que substituiu a areia da argamassa por partículas floculadas de garrafas PET nos percentuais de 10, 30 e 50%, mostraram uma forte redução na resistência mecânica à medida que aumenta o teor de partículas de plástico na argamassa. Os de Marzouk (2006) demonstram uma ligeira redução nas resistências à compressão e à flexão, 15,7% e 32,8%, respectivamente, quando foi efetuada a substituição de até 50% em volume da areia por resíduos de PET. Choi et al (2009), mostrou que a resistência a compressão decresceu em 5%, 15% e 30%, com a incorporação de agregado plástico em 25%, 50% e 75%, respectivamente.

Outro fator importante a levar em consideração nos experimentos foi a diminuição da trabalhabilidade de acordo com o aumento do teor de PET incorporado na argamassa, segundo Mello (2011) é ocasionada pela redução da homogeneidade das misturas, redução da

consistência, retenção de água e uma maior segregação das partículas da argamassa. Como também pelo fato do agregado de polietileno ter menor peso e maior volume comparado com o agregado natural e que os traços produzidos em peso apresentam um volume de PET bastante elevado.

7. CONCLUSÃO

Foi avaliado no presente trabalho a utilização de Politereftalato de etileno micronizado como alternativa ao agregado miúdo em argamassas, visando buscar outros meios para a destinação desse material, reduzindo os impactos ambientais gerados pela elevada produção e pelo descarte e acumulação nos aterros sanitários e lixões, como também reduzir custos na preparação de argamassas, atendendo todos os parâmetros estabelecidos nas normas. A partir dos resultados obtidos no estudo experimental, podemos concluir que:

- Para a resistência à compressão simples das argamassas, notou-se que para os teores de substituição (10% e 15%), obteve-se resistência superior a argamassa de referência para todas as idades (7,14 e 28 dias). Analisando-se a resistência à compressão aos 28 dias, nota-se que é possível destacar que em relação à argamassa de referência, a combinação 10% PET é 9,1% superior em resistência e se tornou igual a de referência para 15% PET.

- Para os resultados obtidos pode-se classificar esta argamassa como sendo do tipo I segundo a ABNT NBR 13281.

- Solução ambiental no que diz respeito ao descarte e acumulação de material no meio ambiente, incentivando a utilização pela indústria da Construção Civil ocasionado pela redução de custos na produção da argamassa.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no presente trabalho, sugere-se algumas recomendações para trabalhos futuros:

- Avaliar a ductilidade na compressão para os teores de 10 e 15% de PET micronizado incorporado;
- Avaliar a resistência à tração na flexão para os teores de 10 e 15% de PET micronizado incorporado;
- Avaliar o modulo de elasticidade para os teores de 10 e 15% de PET micronizado incorporado;
- Avaliar a absorção de água por capilaridade para os teores de 10 e 15% de PET micronizado incorporado;
- Avaliar a resistência de aderência à tração para os teores de 10 e 15% de PET micronizado incorporado;
- Avaliar a densidade aparente no estado endurecido para os teores de 10 e 15% de PET micronizado incorporado.
- Avaliar a resistência à compressão simples para os teores de 10 e 15% de PET micronizado incorporado com cimento pozolânico CP II-F-32;

REFERÊNCIAS

ABIPET – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. **10º Censo da Reciclagem de PET no Brasil.** Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>>. Acesso em 10/01/2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro/RJ, 1996.

_____. **NBR 7217:** Determinação de composição granulométrica dos agregados. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 7219:** Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7251:** Agregados no estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 9776:** Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 11579:** Cimento Portland Comum – Determinação do módulo de finura. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13528:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro/RJ, 2010.

_____. **NBR 13277:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro/RJ, 2005.

_____. **NBR 13278:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 1995

_____. **NBR 13280:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro/RJ, 2005.

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

_____. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2012.

AGOPYAN, V; JOHN, V. M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil.** Ed. Edgard Blucher, v.5, 2011.

BAÍA, L. L. M; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimentos de argamassa.** 4ª edição. Editora O Nome da Rosa. 2008.

BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento.** São Paulo, 172 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2001.

BAUER, E. **Revestimentos de argamassa: Características e peculiaridades.** Brasília: LEM-UnB. Sinduscon-DF, 2005 p7-49.

BELLIS, M. The History of Polyester. Polyester – PET. 2005.

CALLISTER Jr., William D. **Ciência e Engenharia dos Materiais – Uma Introdução.** LTC –Livros Técnicos e Científicos S.A. Rio de Janeiro, 2002.

CANELLAS, S. S. **Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassas.** 78p. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CARASEK, H. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** Ed. G.C. Isaia – São Paulo: IBRACON, 2007.

CARVALHO, J. **Sobre as origens e desenvolvimento do concreto.** Revista Tecnológica, 2008.

CANEVAROLO Jr., Sebastião V. **Ciência dos Polímeros – Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros.** Artliber Editora. São Paulo, 2002.

CANEVAROLO Jr, S. V. **Ciência dos Polímeros.** 2ª Edição. Editora Artliber, 2006.

CARDOSO, Fábio Alonso. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico.** Tese para doutorado na EPUSP. São Paulo, São Paulo 2009.

CEMPRE – **Compromisso Empresarial para a Reciclagem.** Reciclagem de PET no Brasil, s.d. 1992.

CEMPRE. **O sucateiro e a coleta seletiva.** Reciclagem & Negócios – Mercado de Sucatas, CEMPRE, São Paulo, 2005. 32 p.

CEMPRE. Disponível em: < <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/8/pet> > acesso em: 31 mar. 2016.

CHOI, Y. W.; MOON, D. J.; KIM, Y. J.; LACHEMI, M. **Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles.** Constr Build Mater, 2009.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Boletim Técnico n. 68. 1995.

COSTA, G. K. S. **Reciclagem de PET: Potencialidades para sustentabilidade e inclusão social.** Dissertação (Mestrado) – Fundação Universidade Federal de Rondônia. Cacoal, 2016.

DE PAOLI, M. A. **Degradação e Estabilização de Polímeros**. 2ª versão on-line (revisada). Editada por João Carlos de Andrade, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 085: Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real**. 1994.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. 2ª edição – São Paulo: PINI, 2009.

FORMIGONI, A. CAMPOS, I.P.A de. **Reciclagem de PET no Brasil**. UNESP. 2006.

FREITAS, Cleverson de. **Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da região metropolitana de Curitiba: propriedades no estado fresco e endurecido**. Dissertação para o Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, da Universidade Federal do Paraná, Mestre em Construção Civil. Curitiba, Paraná, Abril de 2010.

GOMES, A.O. Propriedades das argamassas de revestimentos de fachadas. **Comunidades da construção – sistemas à base de cimento**. Salvador-Bahia, 2008. Disponível

GUELBERT, T. F.; e outros. ENEGEP – XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **A Embalagem PET e a Reciclagem: Uma Visão Econômica Sustentável para o Planeta**. Foz do Iguaçu, 2007.

HANNAWI, K.; BERNARD, S.K.; PRINCE, W. Physical and mechanical properties os mortars conating PET and PC waste aggregates. **Waste Management**. 2010.

IBERRESINAS <<http://www.iberresinas.com/>>.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Editora IBRACON. 2 volumes. São Paulo. 2ª Edição. 2010.

ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. Editora IBRACON. V. 2. 2 volumes. São Paulo. 2011.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. Polímeros de Interesse Industrial – Fibras. **Introdução a Polímeros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Edgar Blücher, 1999. p. 107-119.

MARGALHA, M. **Argamassas**. Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património. Universidade de Évora. Évora, 2011.

MARTINELLI, F.A.; HELENE P.R.L. **Usos e funções das argamassas mistas destinadas ao revestimento de alvenarias**. Boletim técnico da escola politécnica da USP. Departamento de engenharia de construção civil. São Paulo: EPUSP, 11p. 1991.

MARZOUK, O. Y.; DHEILLY, R. M.; QUENEUDEC, M. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. **Waste Management**, 2006, v. 27, p. 310-318.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: **Microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: PINI, 2008.

MELLO, A.L. **Utilização de resíduos de PEAD como alternativa aos agregados naturais em argamassa**. 172p. Dissertação (Mestrado), Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

MELLO, A. L.; CARVALHO, R. F.; SILVA, V. S. **Características da argamassa de revestimento contendo resíduos de plástico como alternativa aos agregados naturais**.XIV ENTAC, Juiz de Fora, 2012.

.MODRO, N.L.R.; MODRO, N.R.; OLIVEIRA, A.P.N. Avaliação de concreto de cimento portland contendo resíduos de PET. **Revista matéria**, v.14, n.1, p. 725-736, 2009.

MONTEIRO, D. M. P. **Avárias em argamassas – causas, prevenção e reparação**. Monografia -Universidade Fernando Pessoa. Porto, 2008.

NAIK, T. R.; SINGH, S.S.; HUBER, C. O.; BRODERSEN, B. S. Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites. **Cement and concrete research**, 1996. v. 26, n° 10, p. 1489 – 1492.

PEREIRA, C. H. A. F. **Contribuição ao estudo da fissuração, da retração e do mecanismo de descolamento do revestimento à base de argamassa**. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília. Brasília. 2007.

ROCHA, D. V. **Argamassas de cimento romano utilizadas em edifícios do início do século XX**. Dissertação – Universidade de Aveiro. Portugal, 2015.

SANTOS, M. L. L. de O. **Aproveitamento de Resíduos Minerais na Formulação de Argamassas para a Construção Civil**. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande no Norte. Natal, Agosto de 2008.

SANTOS, W. J. **Desenvolvimento de metodologia de dosagem de argamassas de revestimento e assentamento**. Tese (Doutorado), Viçosa, Minas Gerais. 2014.

SECIL, M. **Apresentação Universidades**. Aveiro, 2015.

SOUSA, José Getúlio Gomes de; LARA, Patrícia Lopes de Oliveira. **Reologia e trabalhabilidade das argamassas**. In: BAUER, Elton (Coord.). Revestimentos de argamassa: Características e peculiaridades. Brasília, [2007]. p. 23-29.

TORRES, A. A. U. **Envelhecimento físico químico de tubulações de polietileno de alta densidade empregadas em redes de distribuição de derivados de petróleo**. 180f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

TORRES, I.; MATIAS, G.; FARIA, P. **Argamassas com introdução de resíduos: Análise do seu comportamento mecânico**. 2º Encontro nacional sobre qualidade e inovação na construção. Lisboa. 2016.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de engenharia**. 1ª Edição. São Paulo: ArtLiber Editora, 2005.

YEMAL, J. A.; TEIXEIRA, N. O. V.; NÄÄS, I. A. **Sustentabilidade na Construção Civil**. 3º Workshop International Advances in Cleaner Production. São Paulo. 2011.

ZAINAB, I. Z. ; AL-HASHMI, E.A., Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement, **Waste Management**, 2007, doi:10.1016/j.wasman.2007.08.023

ANEXOS

As Tabelas A, B e C, apresentam os resultados detalhados para confecção da Tabela 18.

Tabela A: Resistência à compressão simples de argamassa aos 7 dias.

Teor de substituição (%)	Corpo de Prova - nº	Carga Aplicada (kg)	Carga média (t)	Carga Aplicada (KN)	Resistência (MPa)
0	1	140	140	1,37	0,70
	2	140			
10	3	140	180	1,76	0,90
	4	220			
15	5	180	190	1,86	0,95
	6	200			

Fonte: Autoria própria.

Tabela B: Resistência à compressão aos 14 dias.

Teor de substituição (%)	Corpo de Prova - nº	Carga Aplicada (kg)	Carga média (t)	Carga Aplicada (KN)	Resistência (MPa)
0	1	180	180	1,77	0,90
	2	180			
10	3	240	220	2,16	1,10
	4	200			
15	5	180	190	1,86	0,95
	6	200			

Fonte: Autoria própria.

Tabela C: Resistência à compressão aos 28 dias.

Teor de substituição (%)	Corpo de Prova - nº	Carga Aplicada (kg)	Carga média (t)	Carga Aplicada (KN)	Resistência (MPa)
0	1	200	220	2,16	1,10
	2	240			
10	3	240	240	2,35	1,20
	4	240			
15	5	220	220	2,16	1,10
	6	220			

Fonte: Autoria própria.