



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

ESTUDO DA ADERÊNCIA DA ARGAMASSA PRODUZIDA COM AGREGADO POLIMÉRICO

JOSÉ GINETOM DA SILVA ARAÚJO

Orientadora: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça.

Campina Grande-PB, dezembro/2020

**ESTUDO DA ADERÊNCIA DA ARGAMASSA PRODUZIDA COM
AGREGADO POLIMÉRICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB, 13/12/2020

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

JOSÉ GINETOM DA SILVA ARAÚJO

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

Área de habilitação: Estruturas.

Orientador: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

Dezembro/2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente sou grato ao meu Deus por sempre me guiar em todos os meus caminhos, iluminando minhas escolhas e nunca me deixando só.

Aos meus pais, Maria da Conceição da Silva Araújo e, em especial, José Rui de Araújo (*in memoriam*), que faleceu durante à construção deste trabalho, mas minha gratidão por seu amor, educação e amizade será eterna. Foram desde sempre meus maiores apoiadores, e parte crucial para que esse sonho fosse realizado. Louvo à Deus também por minha esposa, Íris de Souto Silva Araújo, por toda a compreensão e incentivo a mim dado durante a realização deste trabalho e do curso como um todo. Aos meus irmãos, Jabes Henrique da Silva Araújo e Paulo Jedean da Silva Araújo, também deixo meus agradecimentos pela amizade e respeito mútuo existente entre nós.

Agradeço à Universidade Federal de Campina Grande pela estrutura que disponibilizou para o meu efetivo aprendizado, bem como excelente corpo docente que permite ótima formação profissional.

Deixo também expressa minha gratidão à professora Dr. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça pela orientação no presente trabalho, e por seu exemplo de profissional e de pessoa a ser seguido.

Por fim, não poderia deixar de agradecer aos meus amigos que compartilharam comigo durante o curso os apertos para entrega de projetos, para estudos de provas, etc. Sou grato pelo apoio que me deram durante a caminhada realizada até aqui e pela amizade que com certeza levarei para a vida.

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais, José Rui de Araújo (*in memoriam*) e Maria da Conceição da Silva Araújo, aos meus irmãos, Jabes Henrique da Silva Araújo e Paulo Jedean da Silva Araújo, e a minha esposa, Íris de Souto Silva Araújo.

EPÍGRAFE

“Tudo quanto te vier à mão
para fazer, faze-o conforme
as tuas forças [...]”

Eclesiastes 9:10

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Comportamento da resistência da argamassa em função da relação água/cimento..... | 18 |
| Figura 2: Fatores que influenciam na aderência das argamassas sobre os substratos. | 26 |
| Figura 3: Percentagens de reciclagem das embalagens de PET descartadas pelos consumidores entre 2014 e 2019..... | 30 |
| Figura 4: Fluxograma das etapas da pesquisa. | 34 |
| Figura 5: Painéis de argamassa para determinação da resistência a aderência. | 35 |
| Figura 6: Aferição da massa do molde para a obtenção da densidade de massa. | 36 |
| Figura 7: Cortes circulares utilizados no arrancamento dos corpos de prova: a) argamassa de referência; b) argamassa com 5% da areia substituída por PET; c) argamassa com 10% da areia substituída por PET. | 37 |
| Figura 8: Aplicação da tensão de tração nos corpos de prova com o dinamômetro manual. | 38 |
| Figura 9: Visor do dinamômetro manual utilizado para leitura da tensão de tração aplicada nos corpos de prova..... | 39 |
| Figura 10: Formas de ruptura dos corpos de prova para a resistência de aderência à tração. | 40 |

LISTA DE TABELA

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Tipos de cimento encontrados no mercado brasileiro. | 16 |
| Tabela 2: Principais compostos do cimento Portland. | 16 |
| Tabela 3: Tipos de aditivos e as propriedades modificadas na argamassa. | 20 |
| Tabela 4: Traços em função do uso da argamassa. | 21 |
| Tabela 5: Classificação das argamassas de revestimento de paredes e tetos quanto à resistência à compressão. | 25 |
| Tabela 6: Classificação das argamassas de revestimento de paredes e tetos quanto à resistência à tração. | 25 |
| Tabela 7: Classificação de polímeros. | 28 |
| Tabela 8: Características do Politereftalato de etileno. | 29 |
| Tabela 9: Caracterização do cimento. | 41 |
| Tabela 10: Granulometria da areia. | 41 |
| Tabela 11: Granulometria do PET. | 42 |
| Tabela 12: Caracterização da areia e do PET. | 43 |
| Tabela 13: Limites de resistência de aderência à tração (Rat) para emboço e camada única. | 44 |
| Tabela 14: Resultados individuais das amostras do ensaio de RAT – Traço de referência. | 44 |
| Tabela 15: Resultados individuais das amostras do ensaio de RAT – Traço com 5% do agregado miúdo sendo substituído por PET. | 45 |
| Tabela 16: Resultados individuais das amostras do ensaio de RAT – Traço com 10% do agregado miúdo sendo substituído por PET. | 45 |
| Tabela 17: Resultados individuais das amostras do ensaio de RAT – Traço com 15% do agregado miúdo sendo substituído por PET. | 46 |
| Tabela 18: Resultados individuais das amostras do ensaio de RAT – Traço com 20% do agregado miúdo sendo substituído por PET. | 46 |
| Tabela 19: Resultados individuais das amostras do ensaio de RAT – Traço com 25% do agregado miúdo sendo substituído por PET. | 47 |

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland.
Abipet – Associação Brasileira da Indústria do PET.
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ASTM – *American Society for Testing and Materials*.
BC – Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação.
CAGEPA – Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba.
CP I – Cimento Portland Comum.
CP I – S – Cimento Portland Comum com Adição.
CP II – E – Cimento Portland Composto com Escória.
CP II – F – Cimento Portland Composto com Fíler.
CP II – Z – Cimento Portland Composto com Pozolana.
CP III – Cimento Portland de Alto-Forno.
CP IV – Cimento Portland Pozolânico.
CP V – ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial.
CPB – Cimento Portland Branco.
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora.
NM – Norma Mercosul.
PET – Politereftalato de etileno.
Rac – Resistência de aderência ao cisalhamento.
Rat – Resistência de aderência à tração.
RS – Cimento Portland Resistente a Sulfatos.
TCC – Trabalho de Conclusão de Curso.

RESUMO

O crescimento populacional e o desenvolvimento urbano estão intrinsecamente relacionados ao aumento da produção de resíduos, fazendo-se necessário a elaboração de técnicas para que esse crescimento ocorra de maneira sustentável e contribua para a redução da produção de resíduos além de proporcionar uma destinação adequada. Atualmente a indústria é responsável pela geração de diversos resíduos, destacando-se o Politereftalato de etileno (PET) que ocupa um volume de destaque nos lixões. Nesse sentido, é viável dar-lhe destinos que proporcionem um aumento da vida útil sem descartá-lo completamente, como incorporá-lo em materiais de construção. Esta pesquisa objetiva avaliar a aderência de argamassas produzidas com substituição do agregado convencional por agregado polimérico nos teores de 5,10,15, 20 e 25%. A resistência de aderência à tração dos painéis será determinada segundo a NBR 13528 (ABNT, 2010). Os resultados indicaram que as argamassas com teor de substituição de até 5% do agregado miúdo por agregado polimérico podem ser utilizados em revestimento externos e internos, e com teor de até 15% em revestimento interno, podendo o material, antes descartado, ser inserido na cadeia produtiva.

Palavras-chave: Propriedades; material construtivo; sustentabilidade.

ABSTRACT

Population growth and urban development are intrinsically related to increased waste production, and it is necessary to develop techniques for such growth to occur in a sustainable manner and to contribute to the reduction of waste production and to provide adequate disposal. Currently, the industry is responsible for the generation of various wastes, especially ethylene politerephthalate (PET), which occupies a prominent volume in the dumps. In this sense, it is feasible to give it destinations that provide longer service life without completely discarding it, such as incorporating it into building materials. This research aims to evaluate the adhesion of mortars produced with replacement of conventional aggregate by polymeric aggregate in the contents of 5,10, 15, 20 and 25%. The tensile strength of the panels will be determined according to NBR 13528 (ABNT, 2010). The results indicated that mortars with a substitution content of up to 5% of the fine aggregate for polymeric aggregate can be used in external and internal cladding, and with a content of up to 15% in internal cladding, and the material, previously discarded, can be inserted in the productive chain.

Key words: Properties, constructive material, sustainability.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA | 13 |
| 1.2 OBJETIVOS | 13 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 13 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 13 |
| 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC | 13 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 15 |
| 2.1 PRINCIPAIS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSA | 15 |
| 2.1.1 Cimento Portland | 15 |
| 2.1.2 Cal | 17 |
| 2.1.3 Água | 17 |
| 2.1.4 Agregado | 19 |
| 2.1.5 Aditivos | 20 |
| 2.2 TRAÇO | 21 |
| 2.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS | 21 |
| 2.3.1 Propriedades no estado fresco | 22 |
| 2.3.2 Propriedades no estado endurecido | 23 |
| 2.4 POLÍMEROS | 28 |
| 2.4.1 Politereftalato de Etileno (PET) | 29 |
| 2.5 ARGAMASSA COM AGREGADO POLIMÉRICO | 31 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 33 |
| 3.1 MATERIAIS | 33 |
| 3.2 METODOLOGIA | 33 |
| 3.2.1 Caracterização do agregado miúdo | 34 |
| 3.2.2 Caracterização do Cimento | 35 |
| 3.2.3 Dosagem da argamassa | 35 |
| 3.2.4 Densidade de massa e teor de ar incorporado | 36 |
| 3.2.5 Determinação da resistência de aderência à tração | 37 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 41 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 55 |
| REFERÊNCIAS | 56 |

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o desenvolvimento urbano estão intrinsicamente relacionados ao aumento da produção de resíduos, fazendo-se necessário a elaboração de técnicas para que esse crescimento ocorra de maneira sustentável e contribua para a redução da produção de resíduos, além de proporcionar uma destinação adequada. De modo mais específico, destaca-se a geração do Politereftalato de etileno (PET) como um resíduo que vem sendo largamente produzido e ocupando um volume de destaque nos lixões.

Du *et al* (2010) apud Silva (2016b) afirmam que o PET, derivado de petróleo, substância não renovável, produzido a partir da resina de polietileno de baixa densidade, pode levar séculos para se decompor de forma natural.

Paralelamente a isso, a construção civil se mostra como um setor de atividade tecnológica que consome grande volume de recursos naturais e parece ser o mais indicado para receber os resíduos sólidos (MOURA & GONÇALVES & LEITE, 2002).

Dentre os mais variados produtos empregados na construção civil, as argamassas, formadas por agregado(s) miúdo(s), aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adições (ABNT, 2013a), são largamente utilizadas como material de revestimento e de assentamento de tijolos.

Para que a argamassa possa atender aos requisitos para os quais é utilizada, faz-se necessário o cumprimento de alguns parâmetros de suas propriedades. Essas, por sua vez, consistem em propriedades no estado fresco e endurecido.

Como uma das propriedades no estado endurecido, Carasek (2010) destaca a aderência como propriedade fundamental para as argamassas de revestimento, sem a qual a mesma não atenderá a nenhuma de suas funções. Carasek *et al* (2014) apud Campos (2014) comentam que a aderência se relaciona com as características e propriedades da argamassa e do substrato, características e qualidade da execução, idade do revestimento, e das condições climáticas durante a aplicação e ao longo da vida útil da argamassa. Portanto, a referida propriedade não deve ser desprezada quando se analisa a conveniência ou não da utilização de uma argamassa.

Dessa forma, esta pesquisa objetiva avaliar a aderência de argamassas produzidas com substituição do agregado miúdo convencional por agregado polimérico nos teores de 5,10, 15, 20 e 25%.

1.1 JUSTIFICATIVA

A maioria dos processos com atividade econômica, atualmente, são fontes geradoras de resíduos, o que causa grande degradação ambiental e não contribui para um desenvolvimento sustentável. A construção civil é um setor de atividade tecnológica que consome grande volume de recursos naturais e parece ser o mais indicado para receber os resíduos sólidos (MOURA & GONÇALVES & LEITE, 2002).

Deste modo a utilização de um agregado polimérico pós-consumo possibilita a redução do impacto ambiental gerado pelo descarte no meio ambiente e contribui para inserção de um novo material construtivo.

Esta pesquisa se torna importante na medida em que é preciso encontrar meios de reaproveitar os resíduos gerados de modo a prolongar sua vida útil e assim reduzir o impacto que seu uso causa no ambiente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar os efeitos da incorporação do agregado polimérico na aderência de argamassas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as propriedades físicas de argamassas produzidas com agregado polimérico em substituição ao agregado miúdo convencional;
- Avaliar a aderência de argamassas incorporadas com agregado polimérico em substituição ao agregado miúdo convencional.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

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

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

Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados às argamassas, propriedades e aplicações.

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

Resultados e Discussões– São apresentados os resultados obtidos a partir da substituição do agregado miúdo convencional por agregado polimérico.

Considerações Finais – São apresentadas as considerações sobre os resultados dos ensaios realizados na pesquisa.

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

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A argamassa pode ser definida conforme a ABNT NBR 13529 (2013a) como sendo “uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”. Silva *et al* (2016a) afirmam que na atualidade as argamassas geralmente utilizam como aglomerante o cimento e, em algumas regiões do Brasil, a cal juntamente com o cimento. Sua denominação é função do tipo de aglomerante empregado, existindo dessa forma as argamassas de cal, de cimento ou mista de cal e cimento (FIORITO, 2009).

Santiago (2007) destaca que a argamassa é muito importante no emprego de qualquer construção feita com pedras, tijolos ou blocos cerâmicos, pois tem a função de juntar as diversas unidades desses materiais. Ele ainda ressalta uma outra função importante da argamassa, que é a de revestimento, com o objetivo de propiciar uma maior proteção aos vários elementos construtivos.

2.1 PRINCIPAIS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSA

2.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland comum é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio (ABNT, 2018b). É permitido ainda, durante a moagem, incorporar materiais pozolânicos, escórias de alto forno e/ou materiais carbonáticos, resultando nos chamados cimentos compostos (LOPES, 2019). O uso dessas adições, substituindo parcialmente o clínquer ou o cimento, dentre várias outras vantagens, pode reduzir o consumo de energia gasta para a fabricação do material, já que algumas dessas adições não precisam ser calcinadas (AZERÊDO, 2012). No mercado brasileiro, é possível encontrar diferentes tipos de cimentos classificados em função do uso ou não de adições, conforme informa a Tabela 1.

Tabela 1: Tipos de cimento encontrados no mercado brasileiro.

| Nomenclatura | Descrição |
|---------------------|---|
| CP I | Cimento Portland Comum |
| CP I - S | Cimento Portland Comum com Adição |
| CP II - E | Cimento Portland composto com escória granulada de alto forno |
| CP II - Z | Cimento Portland composto com material pozolânico |
| CP II - F | Cimento Portland composto com material carbonático |
| CP III | Cimento Portland de alto-forno |
| CP IV | Cimento Portland pozolânico |
| CP V - ARI | Cimento Portland de alta resistência Inicial |
| RS | Cimento Portland resistente a Sulfatos |
| BC | Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação |
| CPB | Cimento Portland Branco |

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018b).

De acordo com Neville (2016), quatro são os compostos principais do cimento, listados na Tabela 2 com suas abreviaturas. Além destes, ele ainda afirma que existem compostos secundários, como MgO, TiO₂, Mn₂O₃, K₂O, e Na₂O, o que normalmente constituem um pequeno percentual da massa de cimento. O autor chama atenção para o fato de que o termo “compostos secundários” se deve principalmente à sua quantidade, não a sua importância, pois verificou-se que os óxidos de sódio e de potássio afetam a velocidade de ganho de resistência do cimento, por exemplo.

Tabela 2: Principais compostos do cimento Portland.

| Nome do composto | Composição em óxidos | Abreviatura |
|-----------------------------|---|--------------------|
| Silicato tricálcico | 3CaO.SiO ₂ | C ₃ S |
| Silicato dicálcico | 2CaO.SiO ₂ | C ₂ S |
| Aluminato tricálcico | 3CaO.Al ₂ O ₃ | C ₃ A |
| Ferroaluminato tetracálcico | 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ | C ₄ AF |

Fonte: (NEVILLE, 2016).

A notação abreviada utilizada na química do cimento descreve cada óxido por uma letra: CaO = C; SiO₂ = S; Al₂O₃ = A; e Fe₂O₃ = F. Da mesma forma, H₂O no cimento hidratado é representado como H, e SO₃, como S (NEVILLE, 2016).

2.1.2 Cal

A cal, por sua vez, foi o aglomerante mais usado pelo homem antes do surgimento do cimento Portland (AZERÊDO, 2012). Ela é obtida a partir da calcinação do calcário. Segundo Carvalho (2017) apud Soares (2018), o processo de calcinação do calcário pode ocorrer em diversos equipamentos, chamados fornos de calcinação, cuja decomposição térmica resulta na formação da cal virgem (CaO) e no dióxido de carbono (CO₂). Conforme Sathler (2018), a cal virgem precisa descansar por no mínimo 16 horas antes de ser utilizada, apresentando ainda o risco de a hidratação não ser completa e acarretar trincas, quedas e, em consequência, maior desperdício na obra. Essa é uma das razões pelas quais a cal virgem preparada *in loco* tem sido substituída pela cal hidratada.

A cal hidratada é definida pela ABNT NBR 7175 (2003a) como pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio. Ela tem viabilizado a produção de argamassas de cimento, cal e areia em uma única operação de mistura, dispensando a fase de descanso da cal em mistura com água ou da argamassa intermediária (RECENA, 2012). A sua hidratação é feita em hidratadores, com produção contínua ou batelada, onde ao se adicionar água transforma os óxidos de cálcio ou magnésio (MgO) em hidróxidos de cálcio ou magnésio (JOHN *et al*, 2014).

2.1.3 Água

Quanto à água, Recena (2012) diz que em pastas de cal ela viabiliza a reação de carbonatação que ocorre com a liberação de água para o meio ambiente com redução de volume na formação do carbonato de cálcio. Quando as pastas são de cimento Portland, o mesmo autor afirma que a água se apresenta de forma diferente, classificando-a em água não evaporável, água evaporável e água capilar.

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

porque esta água não pode ser removida por simples secagem (RECENA, 2012).

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

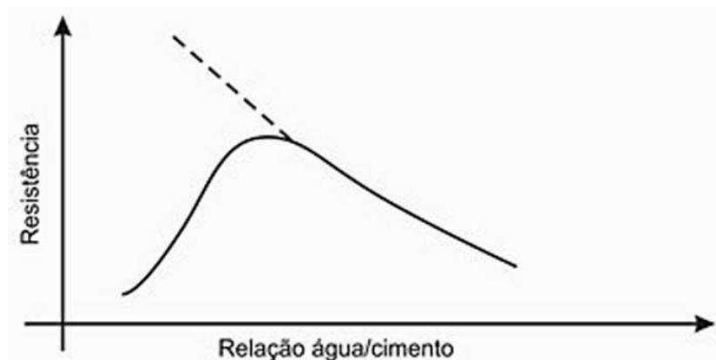
[...] a água encontra-se fixada à superfície sólida do aglomerante pela ligação hidrogênio, servindo como meio de ligação e transporte dos íons liberados durante a dissolução das partículas do cimento ou disponibilizando o hidróxido de cálcio solubilizado à reação de carbonatação. A água, nesta condição,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

No que diz respeito à água capilar,

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

É por esta razão que Fiorito (2009) comenta que a resistência da pasta (definida por Recena (2012) como a mistura de aglomerante, água e ar aprisionado) de cimento está intimamente ligada à relação água/cimento segundo o gráfico da Figura 1. Dessa forma, percebe-se que deve haver um cuidado na dosagem da argamassa de modo a se obter um equilíbrio entre a sua trabalhabilidade e a sua resistência.

Figura 1: Comportamento da resistência da argamassa em função da relação água/cimento.



Fonte: (FIORITO, 2009).

Quando o cimento é disperso em água, o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio formados a alta temperatura tendem a entrar em solução, e a fase líquida torna-se rapidamente saturada em várias espécies de íons. Como resultado da interação entre cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxila, e dentro de poucos minutos da hidratação

do cimento, começam a aparecer cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, conhecido como etringita. Poucas horas mais tarde, grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio e pequenos cristais fibrosos de silicatos de cálcio hidratado começam a preencher os espaços vazios antes ocupados por água e as partículas de cimento em dissolução (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

À essa fase de solidificação da pasta plástica de cimento, segundo Mehta e Monteiro (2008), se utiliza o termo “pega”. O começo da solidificação, ponto no tempo em que a pasta não é mais trabalhável, é chamado de início de pega, enquanto o tempo necessário para a pasta solidificar completamente denomina-se fim de pega (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A ABNT NBR 16607 (ABNT, 2018a) é a norma que rege o ensaio para a determinação dos tempo de início e de fim de pega, importante para que se tenha uma noção de quanto tempo se dispõe para manusear a pasta a partir do momento em que houve a mistura do cimento Portland com a água.

2.1.4 Agregado

Lopes (2019) afirma que agregado é qualquer material granular natural ou sintético, sem forma ou volume definidos. Ele destaca que os agregados de origem natural são encontrados de forma particularizada na natureza, enquanto que os artificiais são produzidos por algum processo industrial. Ainda segundo Lopes (2019), por muito tempo se considerou esse material inerte, entretanto, percebeu-se que a composição mineralógica dos agregados poderia conter substâncias deletérias, prejudiciais à durabilidade do concreto. Pode-se estender esse entendimento, portanto, também para as argamassas. Logo, os agregados devem então ser o mais inerte possível para que não gerem patologias no revestimento ou assentamento de blocos feito com a argamassa.

A ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009a) classifica os agregados miúdos, quanto às dimensões, como aqueles que passam na peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μm .

Neville (2016) afirma que é indubitável que a forma das partículas do agregado miúdo influencia as propriedades da mistura, pois as partículas angulosas exigem maior quantidade de água para uma determinada trabalhabilidade. Porém, continua o autor, ainda não existe um método objetivo de medir e expressar a forma dessas partículas, mesmo que tenham sido feitas

tentativas utilizando medições da área superficial projetada e outras aproximações geométricas.

Uma forma de análise das partículas dos agregados é através da sua granulometria, uma operação simples de classificar uma amostra de agregado em frações, cada uma constituída por partículas de mesma dimensão (NEVILLE, 2016). A ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009a) rege o ensaio para a determinação da granulometria, realizado com peneiras de aberturas nominais predeterminadas pela norma. A curva granulométrica é a representação gráfica das proporções de material passante em cada uma das peneiras, o que facilita a interpretação dos dados.

2.1.5 Aditivos

Os aditivos são compostos adicionados em pequena quantidade à mistura, com a finalidade de melhorar uma ou mais propriedades da argamassa no estado fresco e no estado endurecido, propriedades estas que serão discutidas mais à frente, e a sua quantidade é expressa em porcentagem do aglomerante (ABCP, 2002). Na Tabela 3 estão relacionados os principais tipos de aditivos no mercado com as respectivas propriedades que são modificadas com o seu uso.

Tabela 3: Tipos de aditivos e as propriedades modificadas na argamassa.

| | |
|----------------------------------|--|
| Plastificantes | São utilizados para melhorar a trabalhabilidade da argamassa sem alterar a quantidade de água. |
| Retentores de água | Reduzem a evaporação e a exsudação de água da argamassa fresca e conferem capacidade de retenção de água frente à sucção por bases de absorventes. |
| Incorporador de ar | Formam microbolhas de ar, estáveis, homogeneamente distribuídas na argamassa, aumentando a trabalhabilidade e atuando em favor da permeabilidade. |
| Retardadores de pega | Retardam a hidratação do cimento, proporcionando um tempo maior de utilização. |
| Aumentadores de aderência | Proporcionam a aderência química ao substrato. |
| Hidrofugantes | Reduzem a absorção de água da argamassa, mas não a tornam impermeável e permitem a passagem de vapor de água. |

Fonte: (ABCP, 2002).

2.2 TRAÇO

Entende-se por traço de uma argamassa, conforme define a NBR 7200 (ABNT, 1998), a indicação das proporções de seus constituintes, geralmente referida ao aglomerante principal. Segundo Fiorito (2009), o traço em peso daria uma segurança absoluta quanto a qualidade da argamassa e quantidades no consumo e apropriação de custos. Todavia, é impraticável no canteiro de obras, razão esta que faz com que tradicionalmente os traços da argamassa sejam indicados em volume.

Como bem analisado por Carasek (2010), diferentemente do que ocorre atualmente com o concreto, para as argamassas ainda não se dispõe, no contexto nacional, de métodos totalmente consagrados e difundidos com a finalidade de auxiliar a dosagem e preparo das mesmas. Todavia, pode ser encontrado na literatura contribuições por parte de pesquisadores para suprir essa necessidade.

Isaia (2010 apud Santos, 2014, p. 40) diz que a ABNT NBR 7200:1982 em vigor até 1998 apresentava alguns traços de acordo com o local de aplicação (Tabela 4).

Tabela 4: Traços em função do uso da argamassa.

| Tipo de argamassa | | Traço em volume | | | Referências |
|--|-------------------------------------|-----------------|--------|---------------------------------------|------------------------|
| | | cimento | cal | areia | |
| Revestimento de paredes interno e de fachada | | 1 | 2 | 9 a 11 | NBR 7200 (ABNT, 1982)* |
| Assentamento de alvenaria estrutural | Alvenaria em contato com o solo | 1 | 0 -1/4 | 2,25 a 3 x (volumes de cimento + cal) | ASTM C 270 |
| | Alv. sujeita a esforços de flexão | 1 | 1/2 | | |
| | Uso geral, sem contato com solo | 1 | 1 | | |
| | Uso restrito, interno/baixa resist. | 1 | 2 | | |

* Norma antiga: a versão atual 1998 não apresenta proporções de traços.

Fonte: isaia (2010 apud Santos, 2014, p. 40).

2.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

Para que a argamassa possa atender aos requisitos para os quais é utilizada, faz-se necessário o cumprimento de alguns parâmetros de suas

propriedades. Essas, por sua vez, consistem em propriedades no estado fresco e endurecido.

As propriedades da argamassa no seu estado fresco estão diretamente ligadas à sua trabalhabilidade, manuseio e aplicação enquanto a mesma ainda não iniciou o seu processo de endurecimento (AZERÊDO, 2012). Quanto às propriedades no estado endurecido, estão ligadas com o seu desempenho já depois de findo o tempo de pega (AZERÊDO, 2012).

2.3.1 Propriedades no estado fresco

A trabalhabilidade é a propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea (CARASEK, 2010). Para alcance desejado de tal propriedade, normalmente se adiciona água ou se faz uso de aditivos plastificantes.

A consistência é a propriedade que a argamassa apresenta de ter maior ou menor facilidade de deformar-se sob ação de cargas (DO Ó, 2004). DO Ó (2004) ainda afirma que a influência da consistência se dá pelo fato de a argamassa no estado fresco antes da aplicação prevenir a segregação durante seu transporte, bem como no agarramento à colher de pedreiro durante a etapa de aplicação. Na argamassa recém aplicada, o mesmo autor comenta que sua função é impedir as deformações oriundas do seu peso próprio e da ação da gravidade, evitando, assim, o descolamento. A ABNT NBR 13276 (ABNT, 2005a) apresenta o método para determinação do índice de consistência através do espalhamento, parâmetro pelo qual é possível se ter uma ideia da consistência da argamassa.

A plasticidade, por outro lado, é a propriedade que uma argamassa possui de manter a deformação, causada pela ação de forças externas, mesmo depois de findas essas cargas, sem vir a se romper (DO Ó, 2004).

Carasek (2010) fala que outra propriedade importante em argamassas de revestimento, também ligada à trabalhabilidade, é a adesão inicial, que consiste na capacidade de união entre a argamassa no estado fresco e o substrato. A argamassa, ao ser lançada à parede, deve fixar-se imediatamente à superfície, sem escorrer ou desprender, possibilitando o espalhamento e acomodação correta da mesma.

Baia e Sabbatini (2008) comentam acerca da propriedade conhecida por teor de ar incorporado como a quantidade de ar existente em determinado volume de amostra de material. Como discorre Carasek (2007), o teor de ar incorporado melhora a trabalhabilidade, pois ao diminuir a massa específica reduz o esforço do operário no manuseio com a argamassa. Portanto, uma outra alternativa para melhorar a trabalhabilidade das argamassas é a adição de aditivos incorporadores de ar.

Todavia Recena (2012) afirma que é preciso ressaltar que toda bolha de ar que se situar na interface argamassa/substrato representará uma solução de continuidade diminuindo o contato da argamassa com o substrato. Portanto, nesse sentido, o teor de ar incorporado atua de maneira negativa na resistência de aderência da argamassa ao substrato. Deve-se, porém, fazer a ressalva de que a ASTM C270 (ASTM, 2007) indica que 14% é valor máximo de o ar incorporado de uma argamassa com cal no qual não prejudica demasiadamente a aderência à tração.

A retenção de água é a propriedade que confere a argamassa a capacidade de não alterar seu comportamento reológico que comprometa propriedades de trabalhabilidade, mantendo-se aplicável por um período máximo de tempo quando sujeita a solicitações que provoquem perda de água seja ela por evaporação, sucção do substrato ou reações de hidratação (DO Ó, 2004). Se a argamassa apresenta grande capacidade de retenção de água, a perda da água de amassamento é lenta, sendo desencadeado simultaneamente ao progressivo ganho de resistência (RECENA, 2012). Portanto, argamassas com pouca capacidade de retenção de água gerarão uma alta retração, o que fará com que a argamassa apresente bastante fissuras.

A densidade de massa, também chamada de massa específica, varia com o teor de ar e com a massa específica dos materiais constituintes da argamassa, prioritariamente do agregado. Quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável será a longo prazo, o que reduz o esforço do operário na sua aplicação, aumentando a produtividade ao final da jornada de trabalho (CARASEK, 2010).

2.3.2 Propriedades no estado endurecido

A durabilidade, de acordo com a ABNT NBR 15575 (ABNT, 2013c), é a capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções

ao longo do tempo, considerando as condições de uso e manutenção específicas. A durabilidade das argamassas está condicionada por suas características intrínsecas, pelas condições de agressividade do meio ao qual está exposta e pelo tipo de solicitações de natureza física e mecânica a que estará submetida (RECENA, 2012). Ainda segundo Recena (2012), em condições normais a durabilidade de uma argamassa de assentamento e principalmente de revestimento estará intimamente ligada à presença de umidade e de sais solúveis passíveis de serem lixiviados.

A capacidade de absorver deformações, importante propriedade da argamassa pelo fato desta funcionar em conjunto com diferentes tipos de materiais, está ligada ao seu módulo de elasticidade (CAMPOS, 2014). Este, por sua vez, é definido por Mehta e Monteiro (2008) como a relação entre a tensão aplicada no material e a deformação reversível. Desse modo, quanto maior for o módulo de elasticidade da argamassa maior será sua capacidade de absorver as tensões a ela imposta sem se deformar de modo definitivo.

As argamassas também precisam apresentar resistências mecânicas adequadas à sua utilização, com destaque para a resistência à compressão e à tração na flexão.

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

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

A ABNT NBR 13279 (ABNT, 2005c) estabelece o método para a determinação da resistência à tração na flexão e à compressão de argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos, no estado endurecido.

Na Tabela 5 são encontradas as classificações dadas pela NBR 13281 (ABNT, 2005d) para as argamassas de revestimento de paredes e tetos no que diz respeito à resistência à compressão, e na Tabela 6 as classificações são feitas quanto à resistência à tração na flexão.

Tabela 5: Classificação das argamassas de revestimento de paredes e tetos quanto à resistência à compressão.

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

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005d).

Tabela 6: Classificação das argamassas de revestimento de paredes e tetos quanto à resistência à tração.

| Classe | Resistência à tração na flexão (MPa) | Método de ensaio |
|--------|--------------------------------------|------------------|
| R1 | ≤ 1,5 | ABNT NBR 13279 |
| R2 | 1,0 a 2,0 | |
| R3 | 1,5 a 2,7 | |
| R4 | 2,0 a 3,5 | |
| R5 | 2,7 a 4,5 | |
| R6 | > 3,5 | |

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005d).

Em todos os casos, para determinação da classificação na sobreposição entre as faixas, deve ser considerado o desvio de cada ensaio. Caso o valor fique no meio de duas faixas, adota-se a maior como classificação (ABNT, 2005b).

A aderência é a propriedade fundamental, no estado endurecido, para as argamassas de revestimento, sem a qual o mesmo não atenderá a nenhuma de

suas funções (CARASEK, 2010). O efeito da aderência mecânica pode ser explicado pelo fato de a pasta penetrar o substrato através das rugosidades presentes no mesmo, com posterior endurecimento, induzindo a coesão entre as unidades pelo efeito do intertravamento (CAMPOS, 2014). A propriedade também é resultado de uma argamassa com boa capacidade de retenção de água, propriedade pela qual evita deslocamentos da argamassa quando esta é recentemente aplicada (CARASEK, 2010).

Carasek *et al* (2014) apud Campos (2014) comentam que a aderência se relaciona com as características e propriedades da argamassa e do substrato, características e qualidade da execução, idade do revestimento, e das condições climáticas durante a aplicação e ao longo da vida útil da argamassa. Na Figura 2 pode ser visto um esquema que representa as propriedades de cada um dos elementos acima citados na influência da aderência da argamassa.

Figura 2: Fatores que influenciam na aderência das argamassas sobre os substratos.



Fonte: (CARASEK *et al*, 2014, apud CAMPOS, 2014).

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

Como já mencionado, a capacidade de retenção de água também contribui para que a argamassa apresente boa aderência. Nesse ponto, pode-se

citar a temperatura como um fator importante na resistência final de aderência. Para Lion *et al* (2005) apud Gasperin (2011), a temperatura, além de acelerar o processo de endurecimento da argamassa, influencia na quantidade de água presente nas reações, pois, em função da evaporação ocasionada pelo calor, acelera a perda de água podendo causar hidratação incompleta, mantendo os grãos de cimento anidros. Além da temperatura, outro fator climático que também influencia na evaporação, e conseqüentemente na capacidade de aderência da argamassa, é a umidade relativa do ar, pois considerando a argamassa em seu estado fresco estar saturada, a evaporação ocorre quando há um desequilíbrio de umidade entre a argamassa e o meio ambiente (CAMPOS, 2014). Dessa forma, pode-se concluir que quanto maior for esse desequilíbrio, como no caso de baixa umidade relativa do ar, maior será a taxa de evaporação da água contida na argamassa.

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

Carasek (2010) comenta que a cal, além de ser um material aglomerante, possui, por sua finura, importantes propriedades plastificantes e de retenção de água. Dessa forma, afirma a autora, as argamassas contendo cal preenchem mais facilmente e de maneira mais completa toda a superfície do substrato, proporcionando maior extensão de aderência. A cal ainda melhora a durabilidade da aderência devido a sua habilidade em evitar fissuras e preencher os vazios, o que é conseguido através da reação de carbonatação que se processa ao longo do tempo.

Ainda conforme Carasek (2010) a aderência deriva da conjunção de três propriedades na interface argamassa-substrato, são eles: a resistência de aderência à tração, a resistência de aderência ao cisalhamento e a extensão de aderência, ou seja, a proporção entre a área de contato efetivo e a área total possível de ser unida. Destacando-se a resistência de aderência à tração (RAT), pode-se defini-la, segundo a NBR 13528 (ABNT, 2010), norma que rege o ensaio de resistência de aderência à tração para revestimento de paredes de argamassas inorgânicas, por vezes chamado de ensaio de arrancamento, como a máxima tensão que pode ser suportada por uma área limitada de revestimento, na interface que está sendo avaliada, quando submetido a um esforço normal de tração.

2.4 POLÍMEROS

Os polímeros “são macromoléculas caracterizadas por seu tamanho, estrutura química e interações intra e intermoleculares. Possuem unidades químicas ligadas por covalências, repetidas regularmente ao longo da cadeia denominadas meros” (MANO E MENDES, 2015, p.3). Segundo Mano e Mendes (2015) o número de meros na cadeia do polímero caracteriza o *grau de polimerização*. O autor afirma que foi apenas em 1928 que a comunidade científica reconheceu de maneira definitiva que os polímeros eram substâncias de elevado peso molecular.

Mano e Mendes (2015) ainda apresentam as várias formas de se classificar os polímeros, as quais estão resumidas na Tabela 7. Destaca-se a classificação de acordo com a origem, podendo ser naturais ou sintéticos, e quanto ao número de monômeros envolvidos na cadeia macromolecular, classificados como homopolímeros (que possuem apenas um tipo de mero ou uma quantidade menor que 5% de outro comonômero) e copolímero (possui dois ou mais tipos de meros).

Tabela 7: Classificação de polímeros.

| Critério | Classe do polímero |
|--|--|
| Origem do polímero | <ul style="list-style-type: none"> • Natural • Sintético |
| Número de monômeros | <ul style="list-style-type: none"> • Homopolímero • Copolímero |
| Método de preparação do polímero | <ul style="list-style-type: none"> • Polímero de adição • Polímero de condensação • Modificação de outro polímero |
| Estrutura química da cadeia polimérica | <ul style="list-style-type: none"> • Poli hidrocarboneto • Poliamida • Poliéster |
| Encadeamento da cadeia polimérica | <ul style="list-style-type: none"> • Sequência cabeça-cauda • Sequência cabeça-cabeça, cauda-cauda |
| Configuração dos átomos da cadeia polimérica | <ul style="list-style-type: none"> • Sequência <i>cis</i> • Sequência <i>trans</i> |
| Taticidade da cadeia polimérica | <ul style="list-style-type: none"> • Isotático • Sindiotático • Atático |
| Fusibilidade e/ou solubilidade do polímero | <ul style="list-style-type: none"> • Termoplástico • Termorrígido |
| Comportamento mecânico do polímero | <ul style="list-style-type: none"> • Borracha ou elastômero • Plástico • Fibra |

Fonte: Mano e Mendes (2015).

Segundo Mano (2019) os polímeros podem ser produzidos por três tipos gerais de reação: a poliadição, a policondensação e a modificação química de outro polímero. “Na *poliadição*, os monômeros quase sempre apresentam duplas ligações entre átomos de carbono. Não há formação de subprodutos e os pesos moleculares podem atingir valores muito altos, ficando geralmente na ordem de 10^5 e 10^6 (MANO, 2019). “Na *policondensação*, há formação de subprodutos, que precisam ser removidos do meio reacional. Os pesos moleculares são menores que os pesos dos polímeros obtidos por poliadição, ficando geralmente na ordem de 10^4 ” (MANO, 2019, p.60). “A *modificação de polímeros* resulta de reações químicas sobre polímeros já existentes, sejam eles naturais ou sintéticos” (MANO, 2019, p.60).

2.4.1 Politereftalato de Etileno (PET)

O Politereftalato de Etileno (PET) é definido como um “polímero termoplástico, da família do poliéster, considerado um dos plásticos mais versáteis da engenharia” (PEREIRA, 2016). Sua utilização remonta aos anos 40 do século passado, mais especificamente em 1941 quando John Rex Whinfield e James Tennant Dickson, segundo Teixeira (2013), descobriram o material para a produção de fibras têxteis. Porém, relata o autor, foi apenas em 1973, quando o processo de injeção e sopro com biorientação foi desenvolvido por Du Pont, que se tornou viável a introdução do PET na aplicação de garrafas. Atualmente é a sua principal aplicação, com destaque no uso em bebidas gaseificadas.

Sua obtenção, conforme Mano (2019), é feita por meio da policondensação. Algumas informações pertinentes sobre o PET podem ser observadas na Tabela 8.

Tabela 8: Características do Politereftalato de etileno.

| | |
|---------------------|---|
| Monômeros | HOOC-C ₆ H ₄ -COOH |
| | (H ₃ C) (CH ₃) HO-CH ₂ CH ₂ -OH Tereftalato de dimetila (sólido); Glicol etilênico (líquido) p.f.: 140 °C p.e.: 197 °C |
| Polímero | -(OOC-C ₆ H ₄ COO-CH ₂ CH ₂) _n - |
| Propriedades | <ul style="list-style-type: none"> • Peso molecular: 4×10^4 • Cristalinidade: variável; T_g 70-74°C; T_m: 250-270°C Material termoplástico. Brilho. Alta resistência mecânica, química e térmica. Baixa permeabilidade a gases. |

Fonte: Mano e Mendes (2015).

Onde T_g e T_m são, respectivamente, a temperatura de transição vítrea e a temperatura de fusão cristalina.

A alta produtividade do PET, aliada com o seu longo tempo necessário para biodegradação, que segundo Duarte (2014) pode levar de 100 a 400 anos, faz com que ele se torne um dos poluentes mais agressivos ao meio ambiente que a indústria mundial produz. Dessa forma, a sua reciclagem tem sido uma das maiores reivindicações feitas tanto pelos movimentos de ativistas ambientais como pela própria população aos setores públicos e industriais da sociedade.

O Brasil, de acordo com a associação brasileira da indústria do pet (Abipet), reciclou no ano de 2019 cerca de 55% das embalagens de PET descartadas pela população, o que equivale a 311 mil toneladas do material. Esse valor mostra um crescimento de 12% em relação ao ano de 2018, revelando que a reciclagem tem sido incentivada no país. Todavia, há ainda uma necessidade grande de melhora nesse índice, visto que os 45% de PET não reciclados ainda representam um valor muito grande em termos de impacto ambiental decorrente do descarte inadequado do produto. A Figura 3 ainda mostra que já houve em 2014 uma quantidade, em valores absolutos, de PET reciclados maiores que a atual.

Figura 3: Percentagens de reciclagem das embalagens de PET descartadas pelos consumidores entre 2014 e 2019.



Fonte: ABIPET (2019).

Desse modo, percebe-se que, mesmo com a crescente quantidade de PET sendo reciclado nos últimos anos, há ainda uma necessidade de mais estímulos que proporcionem um aumento ainda mais eficaz na reciclagem do material, promovendo assim um menor impacto ambiental gerado pela indústria do plástico.

2.5 ARGAMASSA COM AGREGADO POLIMÉRICO

Silva *et al.* (2014) destacam que a indústria da construção, reconhecendo a importância das questões ambientais, tem procurado soluções capazes de combinar crescimento econômico e a proteção ao meio ambiente. Uma das formas que vem sendo encontrada, como também destacado pelos autores, tem sido a substituição dos agregados naturais por agregados plásticos em materiais cimentícios (argamassas ou concretos). Isso faz com que se diminuam os impactos ambientais em duas frentes: na diminuição do descarte inadequado dos resíduos plásticos, e na redução do uso da matéria prima que constitui o agregado natural, minorando dessa forma o impacto causado nos leitos dos rios pela retirada da areia.

Os autores acima citados, portanto, avaliaram a resistência de aderência à tração em argamassas poliméricas com dois tipos de PET em substituição ao agregado miúdo convencional. Os agregados denominados PF foram produzidos pela trituração de resíduos de garrafas PET com tamanhos variando de 1 a 4 mm, e os agregados PP foram produzidos nos tamanhos de 1 a 4 mm aplicando um processo térmico ao PET triturado. A substituição foi feita em volume, e somente na fração 1-2 mm. O valor da resistência de aderência da argamassa de referência foi de 0,33 MPa, enquanto para uma substituição de 15% do agregado miúdo por PET foram obtidos os valores de 0,21 MPa e 0,26 MPa para os agregados PF e PP, respectivamente. Os autores atribuíram o comportamento às heterogeneidades microestruturais entre as argamassas e o agregado plástico, especialmente na zona de transição interfacial, que proporcionam uma má conexão entre a matriz cimentícia e os agregados plásticos.

Souza (2019), por sua vez, analisou os efeitos da adição de incorporadores de ar em 10 amostras diferentes de argamassas. Quando analisou a resistência de aderência à tração, obteve resistências acima de 0,30

MPa em amostras com menos 15,63%, exceto uma, que apresentou teor de ar incorporado de 8,39%, e foi classificada como A2 (com resistência de aderência à tração maior ou igual a 0,20 MPa e menor que 0,30 MPa) pela NBR 13281 (ABNT, 2005d). O próprio autor comenta que é normal, em ensaios de aderência, se apresentar variações nos resultados, o que dificulta até mesmo conclusões quanto à essa propriedade. Argamassas com teores de ar incorporado acima de 15,63% enquadraram-se nos critérios de argamassa A1 (resistência de aderência à tração menor que 0,20 MPa) e A2.

O principal fator que apresentam os plásticos para que seja possível o seu uso na substituição de agregados miúdos convencionais é o fato de serem inertes, aproximando-se assim das características recomendadas para os agregados utilizados em argamassas. Todavia, Monteiro (2017) percebeu, na execução de ensaios de compressão, que o agregado plástico não aderiu à pasta cimentícia, atribuindo esse comportamento à característica hidrofóbica do plástico, que não interagiu com os demais componentes da argamassa para formar um composto homogêneo, analisando de maneira macroscópica. Portanto, é necessário serem realizados estudos do material na argamassa de modo que viabilize com segurança a sua inserção na cadeia produtiva da construção civil.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

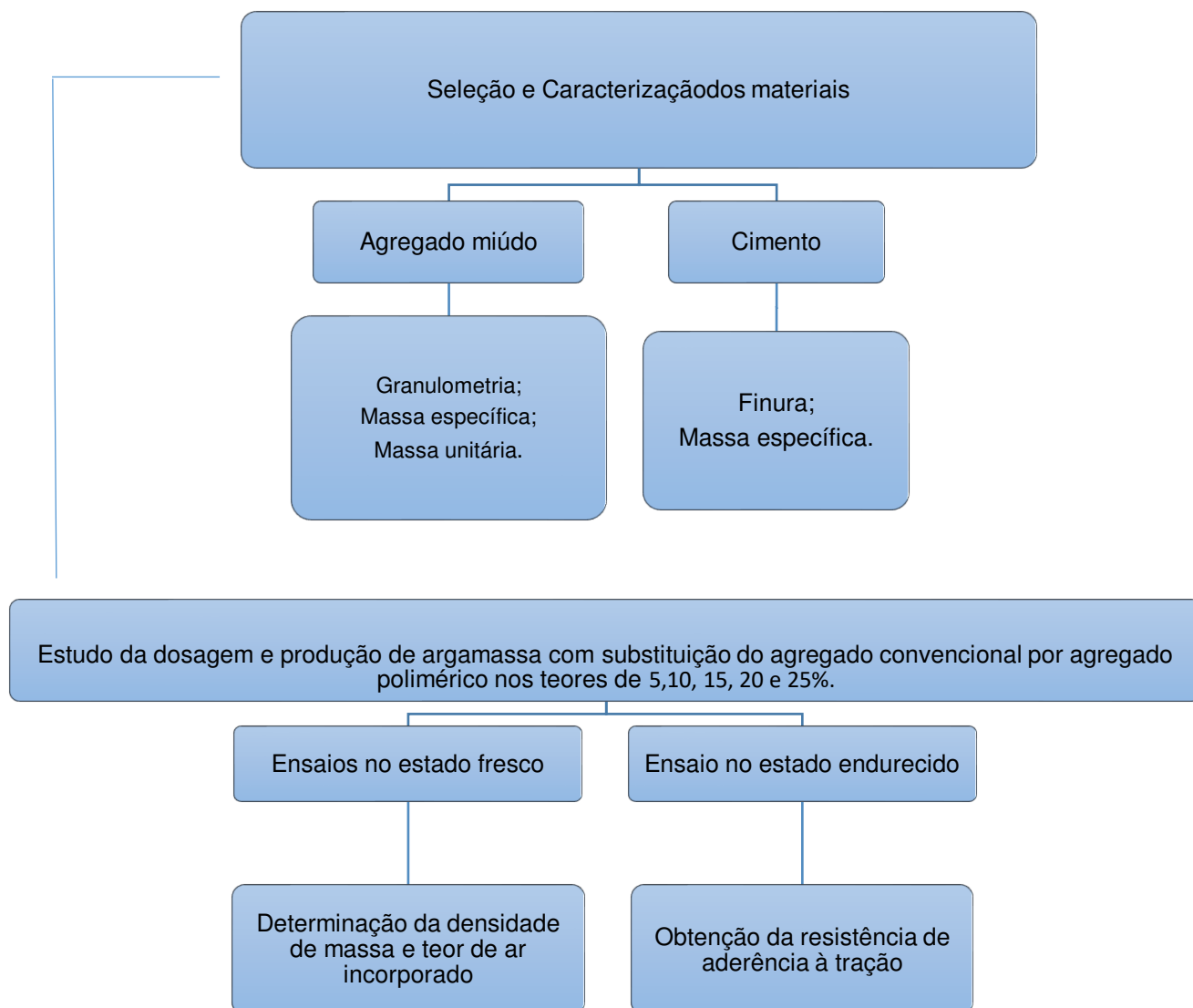
3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para desenvolvimento deste trabalho, foram:

- Agregado miúdo: O agregado miúdo, utilizado na pesquisa, será do tipo natural proveniente de jazida do leito do Rio Paraíba.
- Cimento: Cimento Portland CII-Z 32.
- Cal: CARBOMIL CH-I.
- Agregado polimérico: O polímero utilizado foi do tipo triturado, obtido da reciclagem de garrafas PET, classificado como plastômero, e com a denominação de Politereftalato de Etileno, adquirido na indústria DEPET Reciclagem localizada no município de Campina Grande-PB;
- Água: fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba (CAGEPA).

3.2 METODOLOGIA

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

Figura 4: Fluxograma das etapas da pesquisa.

3.2.1 Caracterização do agregado miúdo

Os agregados foram caracterizados por meio da granulometria, massa específica real e massa unitária. A granulometria é a distribuição dos diâmetros dos grãos do agregado e foi determinada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003b). Com a granulometria, também foi possível obter o módulo de finura, que consiste na soma das porcentagens retidas acumuladas em massa, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

A massa específica real representa a massa de uma unidade de volume, sendo determinada com o uso de picnômetros, segundo prescreve a NBR NM 52 (ABNT, 2009b).

A massa unitária do agregado em estado solto é obtida pelo quociente da massa pelo volume do recipiente em que se encontra, e sua determinação seguiu a NBR NM 45 (ABNT, 2006).

3.2.2 Caracterização do Cimento

O cimento foi caracterizado pela sua finura e massa específica. A finura do cimento é o percentual, em massa, de grãos que ficam retidos na peneira nº 200. Sua determinação foi feita segundo a NBR 11579 (ABNT, 2012).

A massa específica real do cimento, propriedade relacionada à razão entre a massa e o volume dos grãos do cimento, foi determinada com o uso do frasco volumétrico de *Le Chatelier* seguindo os procedimentos da NBR 16605 (ABNT, 2017).

3.2.3 Dosagem da argamassa

Foram executados painéis de emboço com traço 1:1:6 em volume, sendo um para referência e outros com substituição do agregado miúdo por polímero nos teores de 5,10, 15, 20 e 25% sobre uma parede de alvenaria já com chapisco. O volume de água utilizado foi definido como o necessário para dar a trabalhabilidade para a execução do revestimento. A Figura 5 expõe o modelo de painéis executados.

Figura 5: Painéis de argamassa para determinação da resistência a aderência.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020).

Cada painel possuía dimensões de 97 cm de altura, 85 cm de largura e aproximadamente 2 cm de espessura. A projeção da argamassa ao substrato foi feita manualmente.

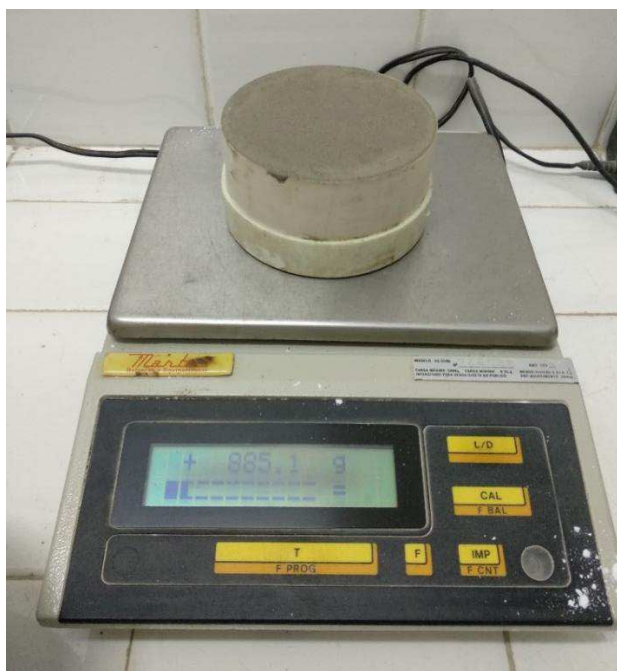
3.2.4 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A obtenção da densidade de massa e do teor de ar incorporado seguiu os procedimentos dados pela NBR 13278 (ABNT, 2005b).

Após o preparo da argamassa, com o auxílio de uma colher ou concha, foram introduzidas porções da mesma em um recipiente cilíndrico calibrado, formando três camadas. Em cada camada, foram aplicados 20 golpes ao longo do perímetro da argamassa fazendo uso de uma espátula.

Terminada a execução de cada camada, promovida uma queda do recipiente a uma altura de 3 cm. Rasou-se a superfície com o uso da espátula, em duas passadas ortogonais entre si, em movimentos de vai-e-vem, com inclinação de 45° com a superfície da argamassa, e então foi realizada a pesagem e o registro da massa do molde com a argamassa, como mostrado na Figura 6.

Figura 6: Aferição da massa do molde para a obtenção da densidade de massa.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020).

A densidade de massa é obtida pela relação entre a massa contida no recipiente, e o volume do mesmo.

O teor de ar incorporado (A) é obtido pela Equação (1):

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

Onde, d é a densidade de massa no estado fresco (g/cm^3) e d_t é o valor da densidade teórica (g/cm^3), obtida por meio da Equação (2).

$$d_t = \frac{m_s + m_{\text{água}}}{\frac{m_s}{\gamma_s} + m_{\text{água}}} \quad (2)$$

Sendo m_s a massa da argamassa anidra, $m_{\text{água}}$ a massa de água que compõe a argamassa, e γ_s a massa específica que, conforme a própria NBR 13278 (ABNT, 2005b) permite, é obtida segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009b).

3.2.5 Determinação da resistência de aderência à tração

A resistência de aderência à tração dos painéis foi determinada segundo a NBR 13528 (ABNT, 2010).

O ensaio consiste em realizar, com auxílio de uma furadeira, cortes circulares com 50 mm de diâmetro, espaçados 50 mm entre si e das extremidades do revestimento, no painel até atingir a alvenaria visando a aferição da resistência de aderência à tração. Esses foram feitos a seco, conforme pode ser visto na Figura 7. Como a própria NBR 13528 (ABNT, 2010) comenta, em nenhum caso o corte deve prejudicar a integridade do revestimento, razão pela qual se percebe um número superior de cortes realizados em relação ao efetivamente aproveitado na pesquisa devido ao fato de que na menor das percepções de prejuízo da integridade da amostra, como falha de colagem ou movimento brusco na execução do corte, descartou-se o uso da mesma de modo a obter um resultado mais próximo da realidade.

Figura 7: Cortes circulares utilizados no arrancamento dos corpos de prova: a) argamassa de referência; b) argamassa com 5% da areia substituída por PET; c) argamassa com 10% da areia substituída por PET.



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Em seguida, foram coladas pastilhas, por onde a argamassa foi arrancada, sobre o revestimento cortado. Antes de ser feita a inserção da cola, foi realizada uma limpeza no painel com o objetivo de eliminar partículas soltas que pudessem interferir no resultado do ensaio. Posteriormente fez-se o arrancamento dos corpos de prova através das pastilhas com um equipamento capaz de aferir a tensão necessária para arrancar o revestimento e que garantisse a aplicação da carga de maneira centrada e ortogonal ao plano do revestimento, conforme descreve a NBR 13258 (ABNT, 2010).

Para isso, utilizou-se um dinamômetro manual, conforme pode ser visto na Figura 8, cuja leitura de tensão aplicada é lida diretamente no visor do equipamento (Figura 9). A aplicação da carga teve que ser constante até a ruptura do corpo de prova.

Figura 8: Aplicação da tensão de tração nos corpos de prova com o dinamômetro manual.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020).

Figura 9: Visor do dinamômetro manual utilizado para leitura da tensão de tração aplicada nos corpos de prova.

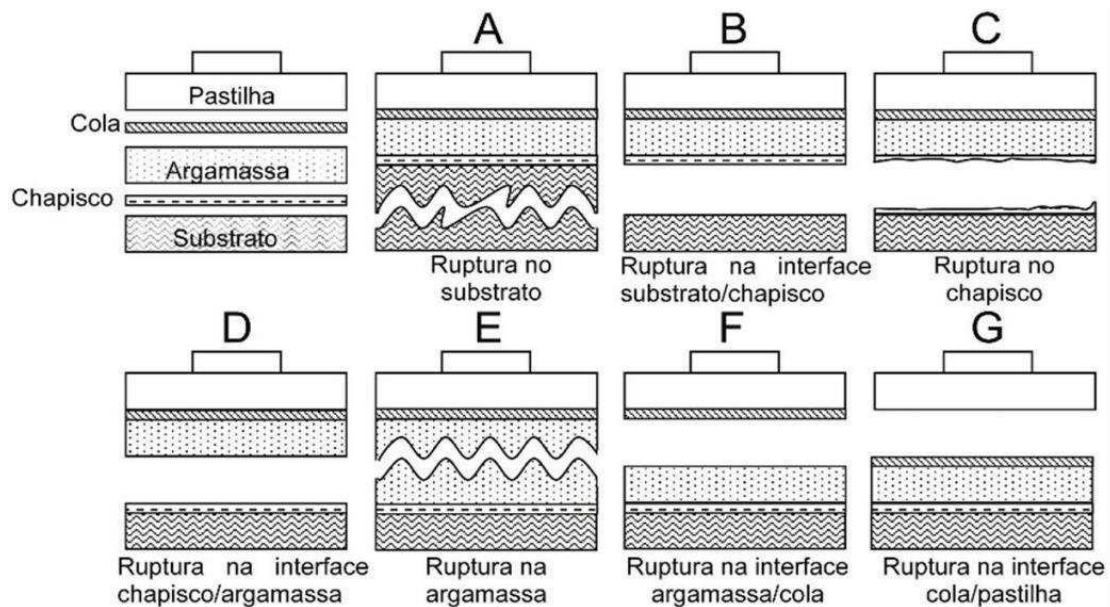


Fonte: Dados da Pesquisa (2020).

A norma prescreve que sejam realizados 12 arrancamentos para a idade de 28 dias no caso de argamassas mistas ou de cimento e areia, ou 56 dias no caso de argamassas executadas com cal e areia. Dessa forma, o ensaio foi realizado aos 28 dias contados após a aplicação da argamassa ao revestimento.

A forma de ruptura foi analisada conforme a Figura 10. A depender da forma como o corpo de prova se romper, pode-se inferir se a resistência medida pelo equipamento aferidor é a real ou está sub mensurada.

Figura 10: Formas de ruptura dos corpos de prova para a resistência de aderência à tração.



Fonte: NBR 13528 (ABNT, 2010).

No caso de ruptura na interface argamassa/substrato, substrato/chapisco e chapisco/argamassa, o valor da resistência de aderência à tração é igual ao obtido no ensaio e apresentado por o sinal “igual” (=) antes do resultado. Nos demais casos de ruptura apresentados na Figura 10 o valor de resistência de aderência é maior do que o obtido, e é apresentado pelo sinal “maior que” (>) também precedendo o valor obtido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios de caracterização do cimento encontram-se na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9: Caracterização do cimento

| Propriedades | Finura (%) | Massa Específica (g/cm ³) |
|--------------|------------|---------------------------------------|
| Resultados | 2,84 | 2,91 |

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

A NBR 16697 (ABNT, 2018b) regulamenta que a finura do cimento CP II-Z deve ser menor ou igual a 10%. Portanto, o cimento ensaiado atende a referida prescrição.

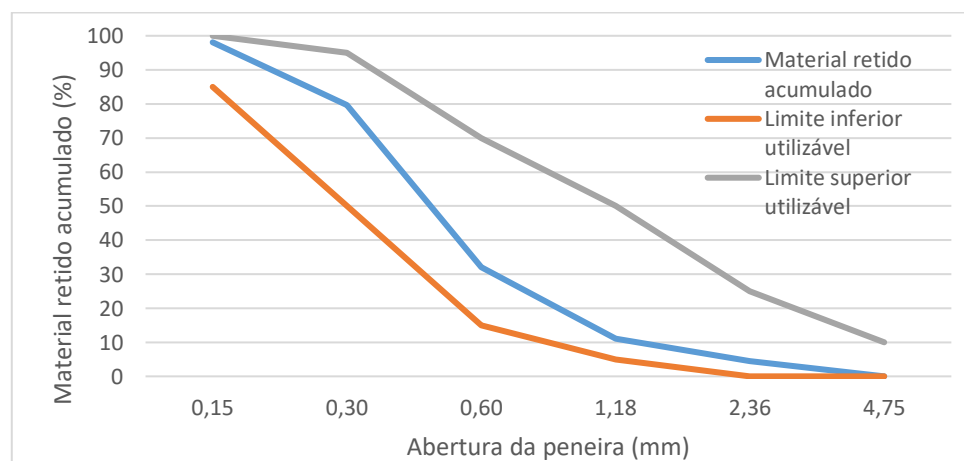
Os resultados do ensaio de granulometria para a areia estão contidos na Tabela 10 e a respectiva curva granulométrica apresentada no Gráfico 1. Para o PET, por sua vez, os resultados são mostrados na Tabela 11 e a curva granulométrica no Gráfico 2.

Tabela 10: Granulometria da areia.

| Abertura (mm) | Material retido | | | Material passante da amostra total (%) |
|---------------|-----------------|---------------------|------------------------|--|
| | Peso (g) | Material retido (%) | Material acumulado (%) | |
| 4,75 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,00 |
| 2,36 | 45,22 | 4,52 | 4,52 | 95,48 |
| 1,18 | 65,73 | 6,57 | 11,09 | 88,91 |
| 0,60 | 208,82 | 20,88 | 31,97 | 68,03 |
| 0,30 | 476,28 | 47,63 | 79,60 | 20,4 |
| 0,15 | 184,27 | 18,48 | 98,08 | 1,92 |

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Gráfico 1: Curva granulométrica da areia e os limites superior e inferior utilizável.

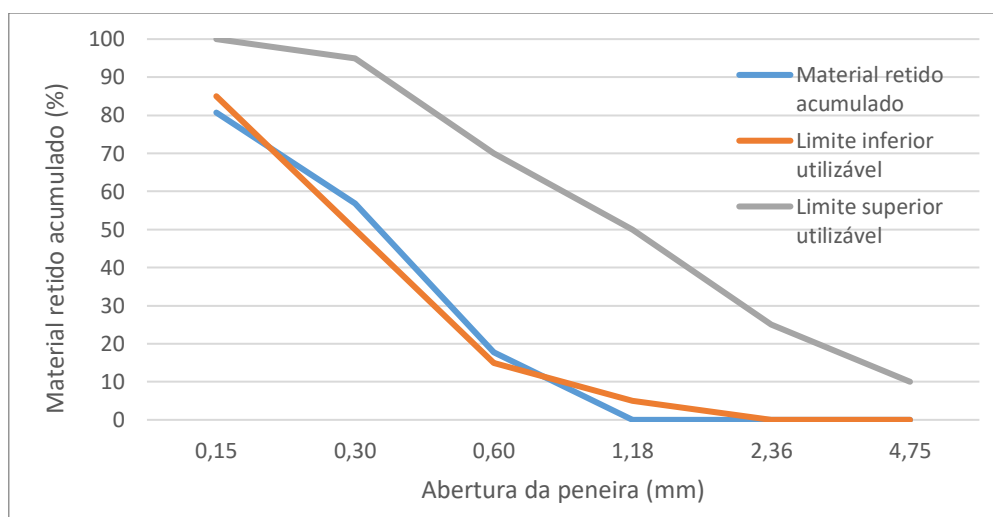


Fonte: Dados da pesquisa (2020) e ABNT (2005c).

Tabela 11: Granulometria do PET.

| Abertura (mm) | Material retido | | | Material passante da amostra total (%) |
|---------------|-----------------|---------------------|------------------------|--|
| | Peso (g) | Material retido (%) | Material acumulado (%) | |
| 4,75 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 2,36 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 1,18 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 0,6 | 176,97 | 17,69 | 17,69 | 82,31 |
| 0,3 | 392,05 | 39,20 | 56,89 | 43,11 |
| 0,15 | 238,24 | 23,82 | 80,71 | 19,29 |

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Gráfico 2: Curva granulométrica do PET e os limites superior e inferior utilizável.

Fonte: Dados da pesquisa (2020) e ABNT (2005c).

Os limites contidos no Gráfico 1 e no Gráfico 2 são os superiores e inferiores utilizáveis estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009a) correspondentes à granulometria para agregados utilizados em concreto.

Como pode ser observado no Gráfico 1, a granulometria da areia se adequa aos limites superior e inferior utilizável. Por outro lado, a granulometria do PET (Gráfico 2) encontra-se muito próxima ao limite inferior utilizável, sendo que em alguns momentos chega a ficar inclusive abaixo do mesmo. Numa situação real, e considerando que a curva citada fosse para a areia, o material seria inadequado ao uso. Porém, como se trata de uma pesquisa, e de uma busca pela inserção de um material alternativo, que, inevitavelmente, tem características diferentes da areia natural, sabendo que os limites da NBR 7211 (ABNT, 2009a) foram feitos levando em consideração a areia, o resultado para

o PET é satisfatório, visto que boa parte da curva granulométrica, mesmo que muito próximo ao limite utilizável inferior, ainda encontra-se dentro dos parâmetros de utilização, sendo, dessa forma, a norma observada apenas com finalidade de comparação.

Os resultados tanto para a areia como para o PET no que diz respeito ao módulo de finura, à massa específica real e à massa unitária podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12: Caracterização da areia e do PET.

| Tipo de agregado | Areia | PET |
|------------------------------|--------------|------------|
| <i>Módulo de finura</i> | 2,25 | 1,55 |
| <i>Massa específica real</i> | 1,76 | 1,45 |
| <i>Massa unitária</i> | 1,4 | 0,54 |

Fonte: Dados da Pesquisa (2020).

Como ambos os módulos de finura resultaram em valores abaixo de 2,40, eles são considerados, conforme indica a NBR NM 248 (ABNT, 2003), agregados finos. A NBR 7211 (ABNT, 2009a) ainda afirma que a zona ótima para o módulo de finura varia entre 2,20 a 2,90; a zona inferior utilizável, entre 1,55 a 2,20; e a zona superior utilizável, entre 2,90 e 3,50. Portanto, a areia encontra-se na zona ótima para o módulo de finura, e o PET, nesse caso, ainda apresentaria características admitidas pela norma, situando-se no limite da zona inferior utilizável.

É possível também analisar, de acordo com os resultados mostrados na Tabela 12, que o PET acaba sendo um material bem mais leve do que a areia, especialmente quando no estado solto, situação na qual a massa unitária da areia é mais de 2,5 vezes maior.

Quanto à resistência de aderência à tração, a NBR 13749 (ABNT, 2013b), que trata das especificações para revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas, estabelece limites em função de sua aplicação, apresentadas na Tabela 13 a seguir.

Tabela 13: Limites de resistência de aderência à tração (Rat) para emboço e camada única.

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

Fonte: NBR 13749 (ABNT, 2013b).

A norma preconiza que para um revestimento ser aceito, é necessário que a cada grupo de 12 ensaios, pelo menos oito apresentem os valores iguais ou superiores aos da tabela acima, ou seja, 67% do total de amostras.

Os valores individuais de resistência de aderência à tração obtidos na realização dos ensaios de que trata a pesquisa estão na Tabela 14, Tabela 15, Tabela 16, Tabela 17, Tabela 18, e Tabela 19 para a argamassa com traço de referência, e com 5, 10, 15, 20 e 25% do agregado miúdo sendo substituído por PET, respectivamente. Seus valores médios podem ser vistos no Gráfico 3.

Tabela 14: Resultados individuais das amostras do ensaio de RAT – Traço de referência.

| Resistência de aderência à tração (MPa) - Traço 1:1:6 (28 dias) | | | | |
|---|----|----------------------------------|------|------------------|
| % de PET | CP | Res. de aderência à tração (MPa) | | Forma de Ruptura |
| 0% | 1 | > | 0,42 | Argamassa |
| | 2 | > | 0,46 | Argamassa |
| | 3 | > | 0,36 | Argamassa |
| | 4 | > | 0,37 | Argamassa |
| | 5 | > | 0,41 | Argamassa |
| | 6 | > | 0,25 | Argamassa |
| | 7 | = | 0,26 | Substrato |
| | 8 | > | 0,41 | Argamassa |
| | 9 | > | 0,28 | Argamassa |
| | 10 | > | 0,38 | Argamassa |
| | 11 | > | 0,39 | Argamassa |
| | 12 | > | 0,28 | Argamassa |

Fonte: Dados da Pesquisa (2020).

Tabela 15: Resultados individuais das amostras do ensaio de RAT – Traço com 5% do agregado miúdo sendo substituído por PET.

| Resistência de aderência à tração (MPa) - Traço 1:1:6 (28 dias) | | | | |
|---|----|----------------------------------|------|------------------|
| % de PET | CP | Res. de aderência à tração (MPa) | | Forma de Ruptura |
| 5% | 1 | > | 0,33 | Argamassa |
| | 2 | > | 0,38 | Argamassa |
| | 3 | > | 0,38 | Argamassa |
| | 4 | > | 0,26 | Argamassa |
| | 5 | > | 0,28 | Argamassa |
| | 6 | > | 0,2 | Argamassa |
| | 7 | > | 0,35 | Argamassa |
| | 8 | > | 0,2 | Argamassa |
| | 9 | > | 0,28 | Argamassa |
| | 10 | > | 0,32 | Argamassa |
| | 11 | > | 0,35 | Argamassa |
| | 12 | > | 0,24 | Argamassa |

Fonte: Dados da Pesquisa (2020).

Tabela 16: Resultados individuais das amostras do ensaio de RAT – Traço com 10% do agregado miúdo sendo substituído por PET.

| Resistência de aderência à tração (MPa) - Traço 1:1:6 (28 dias) | | | | |
|---|----|----------------------------------|------|------------------|
| % de PET | CP | Res. de aderência à tração (MPa) | | Forma de Ruptura |
| 10% | 1 | = | 0,24 | Substrato |
| | 2 | > | 0,22 | Argamassa |
| | 3 | > | 0,3 | Argamassa |
| | 4 | > | 0,29 | Argamassa |
| | 5 | > | 0,26 | Argamassa |
| | 6 | > | 0,21 | Argamassa |
| | 7 | > | 0,23 | Argamassa |
| | 8 | = | 0,27 | Substrato |
| | 9 | > | 0,24 | Argamassa |
| | 10 | > | 0,22 | Argamassa |
| | 11 | = | 0,23 | Substrato |
| | 12 | = | 0,24 | Substrato |

Fonte: Dados da Pesquisa (2020).

Tabela 17: Resultados individuais das amostras do ensaio de RAT – Traço com 15% do agregado miúdo sendo substituído por PET.

| Resistência de aderência à tração (MPa) - Traço 1:1:6 (28 dias) | | | | |
|---|----|----------------------------------|------|------------------|
| % de PET | CP | Res. de aderência à tração (MPa) | | Forma de Ruptura |
| 15% | 1 | = | 0,23 | Substrato |
| | 2 | > | 0,2 | Argamassa |
| | 3 | > | 0,22 | Argamassa |
| | 4 | > | 0,2 | Argamassa |
| | 5 | > | 0,2 | Argamassa |
| | 6 | > | 0,19 | Argamassa |
| | 7 | > | 0,22 | Argamassa |
| | 8 | > | 0,22 | Argamassa |
| | 9 | > | 0,21 | Argamassa |
| | 10 | > | 0,2 | Argamassa |
| | 11 | > | 0,22 | Argamassa |
| | 12 | > | 0,21 | Argamassa |

Fonte: Dados da Pesquisa (2020).

Tabela 18: Resultados individuais das amostras do ensaio de RAT – Traço com 20% do agregado miúdo sendo substituído por PET.

| Resistência de aderência à tração (MPa) - Traço 1:1:6 (28 dias) | | | | |
|---|----|----------------------------------|------|------------------|
| % de PET | CP | Res. de aderência à tração (MPa) | | Forma de Ruptura |
| 20% | 1 | > | 0,18 | Argamassa |
| | 2 | > | 0,18 | Argamassa |
| | 3 | > | 0,18 | Argamassa |
| | 4 | > | 0,16 | Argamassa |
| | 5 | > | 0,16 | Argamassa |
| | 6 | > | 0,17 | Argamassa |
| | 7 | > | 0,16 | Argamassa |
| | 8 | > | 0,17 | Argamassa |
| | 9 | > | 0,18 | Argamassa |
| | 10 | > | 0,18 | Argamassa |
| | 11 | > | 0,18 | Argamassa |
| | 12 | > | 0,18 | Argamassa |

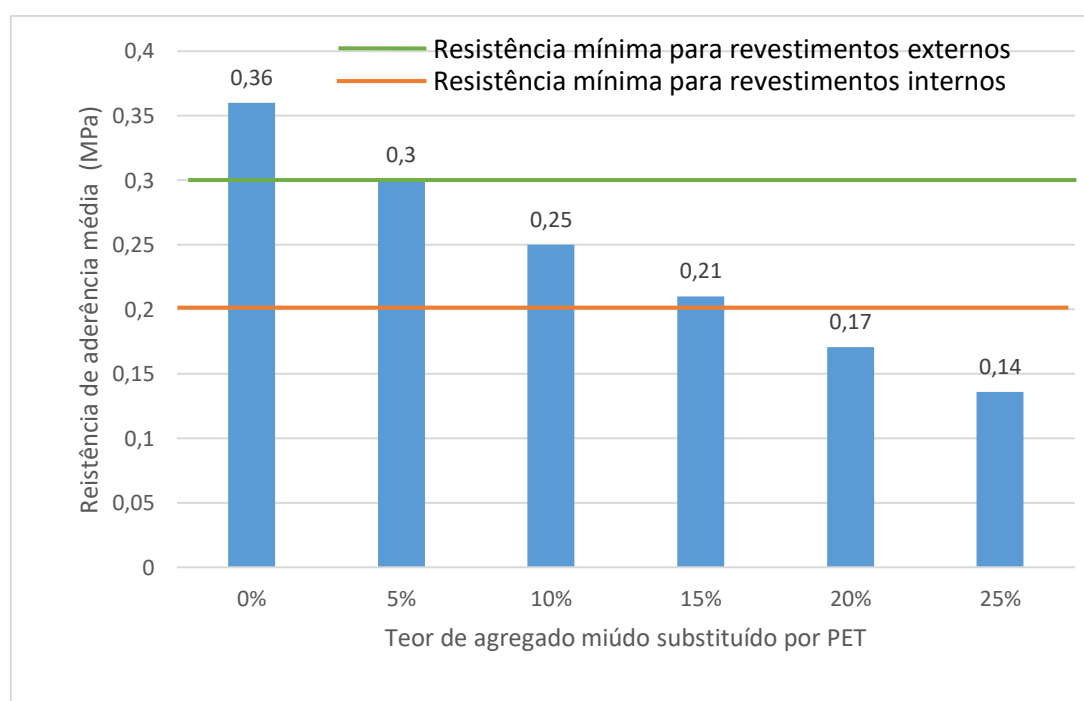
Fonte: Dados da Pesquisa (2020).

Tabela 19: Resultados individuais das amostras do ensaio de RAT – Traço com 25% do agregado miúdo sendo substituído por PET.

| Resistência de aderência à tração (MPa) - Traço 1:1:6 (28 dias) | | | | |
|---|----|----------------------------------|------------------|-----------|
| % de PET | CP | Res. de aderência à tração (MPa) | Forma de Ruptura | |
| 25% | 1 | > | 0,16 | Argamassa |
| | 2 | > | 0,14 | Argamassa |
| | 3 | > | 0,14 | Argamassa |
| | 4 | > | 0,16 | Argamassa |
| | 5 | > | 0,16 | Argamassa |
| | 6 | > | 0,12 | Argamassa |
| | 7 | > | 0,10 | Argamassa |
| | 8 | > | 0,14 | Argamassa |
| | 9 | > | 0,12 | Argamassa |
| | 10 | > | 0,12 | Argamassa |
| | 11 | > | 0,16 | Argamassa |
| | 12 | > | 0,14 | Argamassa |

Fonte: Dados da Pesquisa (2020).

Gráfico 3: Resistência média de aderência à tração para as argamassas ensaiadas.



Fonte: Dados da Pesquisa (2020).

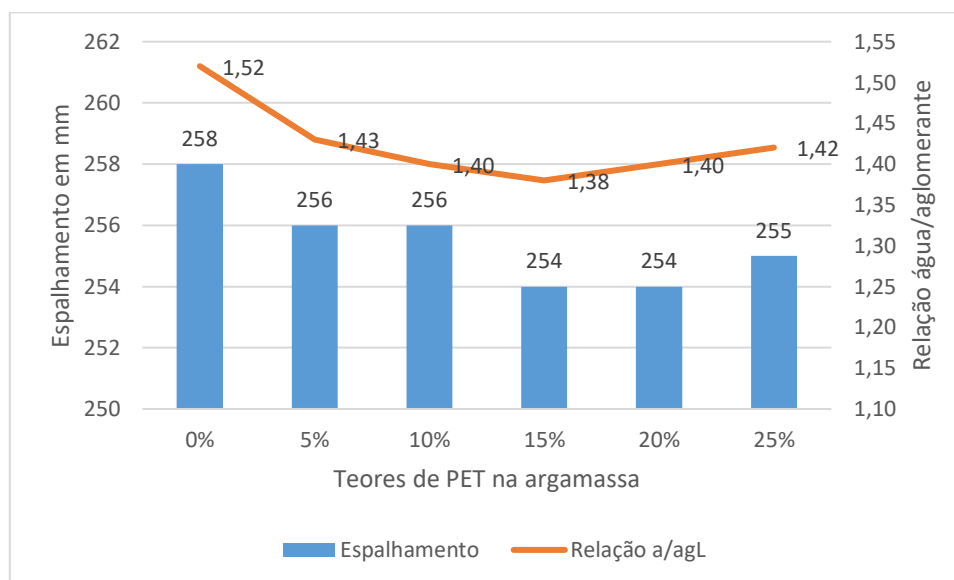
A tendência de diminuição da resistência à medida em que se aumenta o teor de PET na argamassa, como pode facilmente ser observado no Gráfico 3 acima mostrado, revela que o PET influi negativamente na resistência de

aderência à tração, concordando com os resultados encontrados na pesquisa de Silva *et al* (2014). Em vista da proximidade dos resultados obtidos na presente pesquisa com os dos autores citados (0,33 MPa para a argamassa de referência e 0,21 MPa para a argamassa com 15% de PET triturado em substituição do agregado miúdo convencional), pode-se também atribuir o comportamento às heterogeneidades microestruturais entre as argamassas e o agregado plástico, especialmente na zona de transição interfacial, que proporcionam uma má conexão entre a matriz cimentícia e os agregados plásticos

Comparando os dados obtidos, levando em consideração apenas as médias, com os limites requeridos pela norma, percebe-se que a argamassa cujo teor de PET em substituição do agregado miúdo equivale a 5% apresentou a resistência limite para aplicação em revestimento externo, valor este que não foi atendido para os demais teores. Todavia enquadraram-se no requisito para aplicação em revestimentos internos (desde que o acabamento seja pintura ou sirva de base para o reboco) as argamassas com teor de até 15% de PET, ficando abaixo da exigência feita pela ABNT as argamassas com teores de PET de 20 e 25%.

Se for levado em conta o procedimento padrão da NBR 13749 (ABNT, 2013b), que exige pelo menos 8 (oito) das amostras com resistência acima dos valores expostos na Tabela 13 para serem aceitos, apenas a argamassa de referência poderia ser aplicada em revestimento externo, enquanto todas as outras se limitariam à aplicação em revestimento interno, exceto, obviamente, as argamassas com teor de 20 e 25% de PET na composição do agregado miúdo.

O Gráfico 4 apresenta os resultados encontrados para a relação água/aglomerante, necessário para dar uma boa trabalhabilidade na argamassa, obtidos por meio do ensaio de consistência, regularizado pela NBR 13276 (ABNT, 2005a), juntamente com seus respectivos valores de espalhamento na mesa. Optou-se por utilizar a edição de 2005 por indicar o índice de consistência padrão de 255 ± 10 mm.

Gráfico 4: Relação água/aglomerante e espalhamento da argamassa.

Fonte: Dados da Pesquisa (2020).

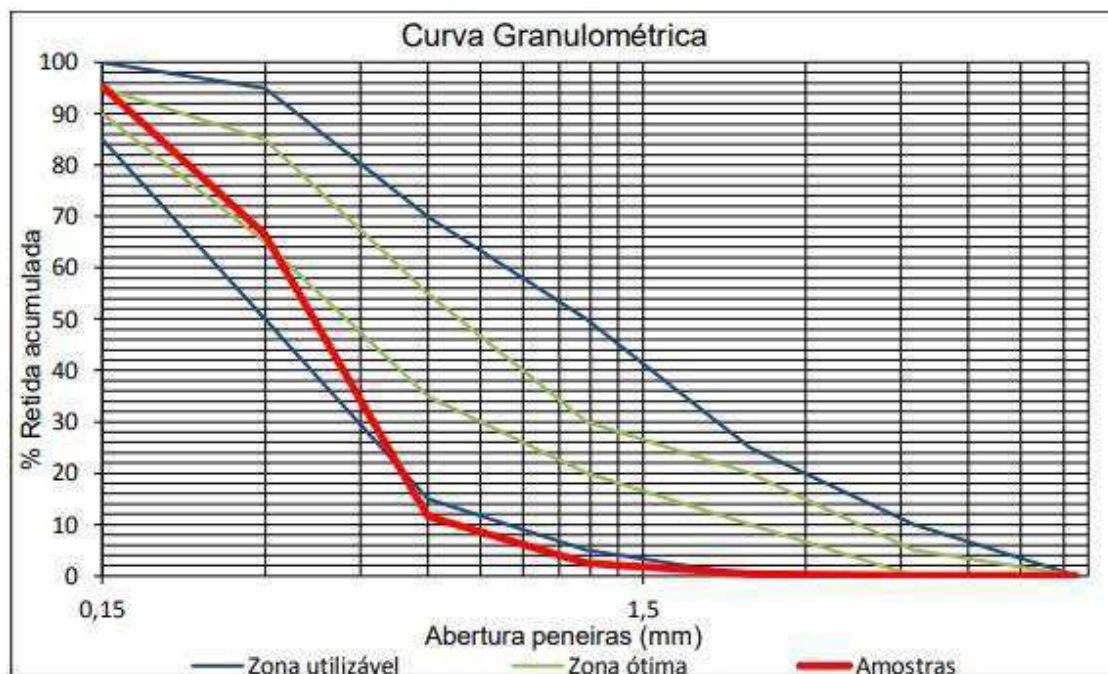
A diminuição na relação água/aglomerante até o teor de 15% de substituição do agregado natural por agregado polimérico pode ser associado ao bom empacotamento resultante da composição obtida, causado pelo fato de os grãos de PET serem bem mais finos do que os da areia, que pode ser comprovado comparando os módulos de finura da areia (2,25) e do PET (1,55) na Tabela 12. Neville (2016, p.188) afirma que a trabalhabilidade melhora quando existe um excesso de pasta em relação à necessária para o preenchimento dos vazios entre os grãos da areia. Dessa forma, um agregado com bom empacotamento, quando comparado com um que não o tenha, exige menos pasta para obter a mesma trabalhabilidade na argamassa, e, portanto, no caso da pesquisa realizada, menos água, visto ser a quantidade de cimento e cal a mesma nos diferentes traços utilizados. Com isso, à medida em que se adiciona PET ao agregado miúdo natural os seus grãos ocupam os vazios que anteriormente seriam preenchidos pela água.

Já o aumento da relação água/aglomerante observado nos teores de 20 e 25% pode ter acontecido pelo fato de o agregado com teor próximo a 15% apresentar seu melhor grau de empacotamento, a partir do qual se começa a haver um excesso de PET que não irá mais ocupar os vazios deixados pela areia. Com isso, começa a se destacar a granulometria fina resultante da união de ambos os agregados devidos às características do PET. Como afirma Neville (2016, p. 163), a área superficial do agregado determina a quantidade de água

necessária à molhagem de todos os sólidos. Portanto, quando mais fino for o agregado miúdo, maior é a área superficial do agregado e mais água é necessária para que essa molhagem aconteça, de modo que proporcione uma melhor trabalhabilidade, o que leva a um aumento na relação água/aglomerante.

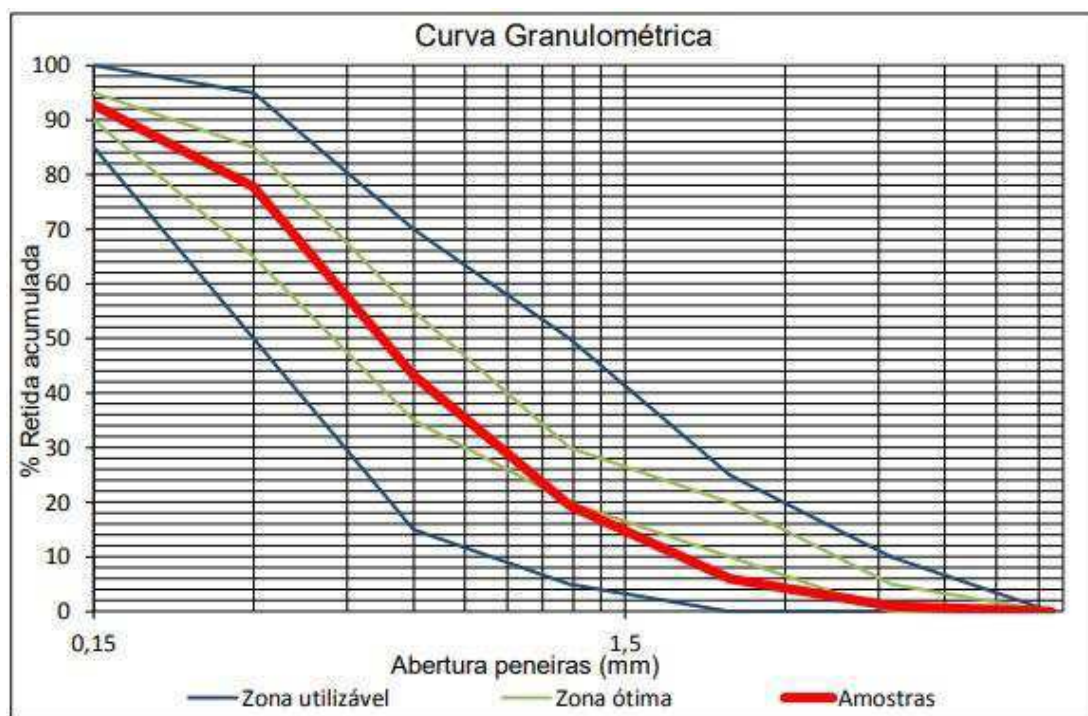
Isso também pode ser percebido ao se observar o trabalho de Duó (2017), onde a relação água/cimento diminuiu de 1,29 referente à amostra de referência para 1,25, 1,17 e 1,07 para as amostras contendo 5, 15 e 30% de PET em substituição do agregado miúdo, respectivamente. As amostras de agregado miúdo natural e polimérico usadas pela autora evidenciaram comportamento granulométrico oposto ao da presente pesquisa: o agregado miúdo natural apresentou granulometria fina, em alguns momentos até abaixo do limite inferior utilizável, (Gráfico 5); e o PET, granulometria mais grossa (Gráfico 6).

Gráfico 5: Curva granulométrica do agregado miúdo natural usado por Duó (2017).



Fonte: Duó (2017).

Gráfico 6: Curva granulométrica do agregado reciclado de PET usado por Duó (2017).



Fonte: Duó (2017).

Isso significa que à medida em que se substituiu o agregado miúdo natural por agregado polimérico, a composição resultou num agregado com granulometria cada vez mais grossa, portanto, com área específica menor, resultando numa relação água/cimento também menor.

No caso da pesquisa de que trata esse trabalho, as argamassas com os primeiros teores de agregado miúdo não aumentaram a relação água/cimento pelo fato de ser o PET quem ocupou os espaços vazios, que por apresentar superfície hidrófuga, fez prevalecer o bom empacotamento da mistura em detrimento da área específica, diferentemente da pesquisa de Duó (2017), em que quem ocupava os vazios eram os grãos de areia, que tendem a absorver a água, portanto a área é quem se destacou. O efeito da superfície específica só se tornou impactante nas amostras do presente trabalho no momento em que o agregado polimérico já não melhorava o empacotamento do agregado resultante, proporcionando assim somente uma maior quantidade de finos na composição.

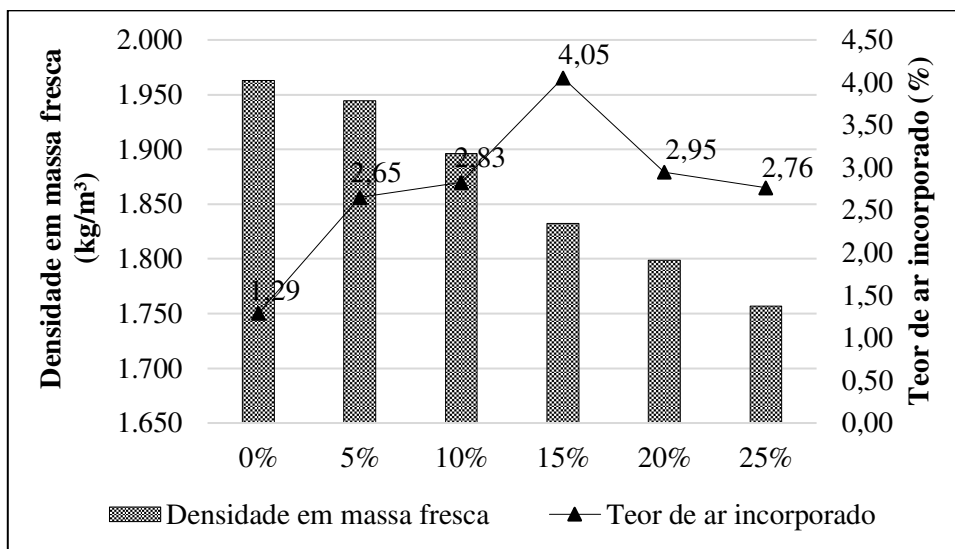
Feita essa observação, contribui de maneira importante para o enfraquecimento da pasta, e conseqüentemente para a diminuição da resistência de aderência à tração, a propriedade hidrofóbica da superfície do

PET. Conforme afirma Jucá (2017), cujo trabalho visa avaliar o tratamento térmico na superfície das fibras de PET e sua influência nas propriedades mecânicas, por apresentar grande cadeia polimérica e a permeabilidade estar ligada ao peso molecular do elemento, o politereftalato de etileno torna-se um poliéster altamente impermeável com superfície extremamente lisa e estanque.

O agregado formado por PET apresentando esse comportamento, permite que a água que anteriormente seria absorvida pela a areia se transforme em água de amassamento. Isso demonstra uma diminuição da capacidade de retenção de água da argamassa, e segundo Recena (2012), o perfeito estabelecimento da microancoragem da argamassa está condicionado, dentre outras características, a capacidade de retenção de água da pasta, já que o que deve ser absorvido para a formação do prego (pequenos insertos) é pasta e nunca somente água, o que aconteceria caso não houvesse, por parte da argamassa, capacidade de reter água. Portanto, nas argamassas ensaiadas, a água de amassamento em excesso enfraqueceu a pasta, o que proporcionou uma sucção maior de água por parte dos poros do substrato, quando comparado com a argamassa de referência, levando assim à diminuição na resistência de aderência à tração.

Com esse raciocínio, é notado que as argamassas com teor acima de 15% têm ainda outro agravante na diminuição da resistência de aderência à tração, pois além da superfície hidrófuga do PET aumentar a água de amassamento, a própria relação água/aglomerante também aumentou, enfraquecendo ainda mais a pasta.

No que se refere ao teor de ar incorporado e a densidade de massa, tem-se os resultados do Gráfico 7.

Gráfico 7: Densidade de massa e teor de ar incorporado.

Fonte: Dados da Pesquisa (2020).

Pelo Gráfico 7 percebe-se que o maior teor de ar incorporado nas argamassas utilizadas na pesquisa foi de 4,43%, valor bem menor do que os 14% de máximo teor de ar incorporado indicados pela ASTM C270 (ASTM, 2007) para que não influencie negativamente a resistência de aderência à tração, o que, aliado com os resultados do estudo de Souza (2019), leva a concluir que esse parâmetro pouco influenciou nos resultados de resistência de aderência à tração, o que também se observa no fato de o teor de ar incorporado ter diminuído nas argamassas com 20 e 25% de PET, quando comparado com a de 15%, e mesmo assim a aderência continuou diminuindo.

Ainda analisando o Gráfico 7, nota-se que a substituição da areia por PET na argamassa diminuiu a densidade de massa da mesma, chegando a uma proporção de até 10,2% menor para a argamassa com 25% de PET. Isso significa que a argamassa fica mais leve, e conseqüentemente mais trabalhável, visto exigir menor esforço na aplicação. Todavia, percebeu-se uma fraca adesão inicial da mesma ao substrato, o que exigiu um esforço maior do pedreiro para a sua aplicação. Esse comportamento mais uma vez pode ser atribuído à superfície lisa do agregado polimérico. Desse modo, a redução na densidade de massa ofereceu uma baixa contribuição para um melhoramento nas características da argamassa.

Diante do que foi exposto, é válido ainda destacar que no painel de referência apenas uma das amostras teve seu arrancamento no substrato, e

todas as outras rupturas ocorreram na argamassa; No painel cuja argamassa foi preparada com 10% de substituição do agregado miúdo por PET, foram quatro amostras que romperam no substrato; e no painel com 15% de PET, apenas uma amostra rompeu também no substrato. Todos os ensaios executados no painel com 5% de PET obtiveram rompimento na argamassa, assim como no caso das argamassas com 20 e 25%. Portanto, como a própria NBR 13528 (ABNT, 2010) afirma, sendo as rupturas predominantemente ocorridas na argamassa, a resistência de aderência à tração é superior à medida.

Além disso, cabe também mencionar o que foi mostrado por uma pesquisa realizada por Carasek *et al* (2017), onde foi feita uma análise de vários resultados de aderência à tração em obras nas cidades de Goiânia e Brasília, evidenciando que, na prática, os valores de resistência de aderência à tração nem sempre atendem às exigências da norma, ainda mais quando se trata de revestimentos cujo substrato é composto por blocos cerâmicos, onde a média para revestimentos internos e externos foi de 0,22 e 0,21 MPa, respectivamente. Quando a análise buscou também avaliar a exigência requerida pela NBR 13749 (ABNT, 2013b) no que diz respeito à proporção de amostras que devem apresentar valores de tensão resistente acima do mínimo estabelecido (oito amostras em um grupo de 12), as proporções de resultados que atenderam aos requisitos exigidos foram ainda menores, tendo como percentual de amostras aprovadas consistindo em 45% e 18% para revestimentos internos e externos, respectivamente. Nessa última avaliação, não se distinguiu o tipo de substrato, apresentando resultados de maneira mais geral.

Desse modo, o valor da resistência de aderência à tração exigido pela norma, avaliam os autores, possivelmente, é muito alto, apontando para uma necessidade de reavaliação dos parâmetros indicados. Com isso, percebe-se que os resultados obtidos para as percentagens de substituição de areia por agregado polimérico a partir da presente pesquisa são satisfatórios, tanto por atenderem aos limites impostos pela norma como também por esses valores estarem, provavelmente, superavaliados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da presente pesquisa, foi possível concluir que a substituição de agregado miúdo natural por agregado miúdo polimérico diminui a resistência de aderência à tração, sendo associado à impermeabilidade da superfície do PET, que promoveu um aumento de água de amassamento na argamassa, às heterogeneidades microestruturais entre as argamassas e o agregado plástico, e, no caso da presente pesquisa, à granulometria muito fina do agregado polimérico quando os teores de substituição de areia por PET ultrapassam 15%.

Todavia, tal diminuição na resistência de aderência à tração, não implica em impedimento para a utilização da argamassa em revestimentos externos, para um teor de até 5% de substituição, e em revestimentos internos, para os demais teores de até 15%, visto que atenderam aos limites normativos. Acima disso, a argamassa não é adequada para uso em revestimento.

Olhando sob o ponto de vista ambiental, conclui-se também que a solução que apresenta o presente trabalho torna-se bastante eficiente, visto que a introdução do PET na cadeia produtiva da argamassa reduz bastante o impacto gerado pelo descarte do material, agrega valor ao mesmo, e não compromete a argamassa de modo que a torne inutilizável para os teores de até 15% de PET na composição do agregado miúdo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C-270**: Standard specification for mortar for unit masonry. United States, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. **11º Censo da Reciclagem do PET no Brasil**. São Paulo, 2019. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>>. Acesso em: 14 de agosto de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de Revestimentos de Argamassa**. 2002. Disponível em: <http://www.comunidade-da-construcao.com.br/upload/ativos/279/anexo/ativosm_anu.pdf>. Acesso em: 29 de out. de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003a.

_____. **NBR 7200**: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **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, 2005b.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005c.

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

_____. **NBR 13528**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Terminologia. Rio de Janeiro, 2013a.

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

_____. **NBR 15575:** Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro, 2013c.

_____. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16607:** Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018a.

_____. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018b.

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

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

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

AZERÊDO, Aline Figueirêdo Nóbrega. **Estudo do resíduo de caulim em argamassas a base de cal quanto às suas propriedades frescas, endurecidas e microestruturais.** Tese. Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 2012.

BAÍA, Luciana Leone Maciel; SABBATINI, Fernando Henrique. **Projeto e execução de revestimento de argamassa.** 4ª edição, O nome da rosa editora Ltda. São Paulo - SP, 2008.

CAMPOS, Marina de Oliveira. **Estudo da resistência de aderência à tração e ao cisalhamento de revestimentos de argamassa em substratos de concreto.** Dissertação. Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, 2014.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2010. Cap. 28.

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

CARASEK, Helena. **Materiais de construção civil e princípios da ciência da engenharia de materiais.** 1ª ed. ISAIA, Geraldo Cechella – São Paulo: IBRACON, 2007, Cap. 26 – Argamassas, pág. 863 a 904. Volume 2.

CARASEK, Helena; MALAGONI, Marina; TERRA, Victor; GIRARDI, Aline; ARAÚJO, Renato. **Análise de resultados de resistência de aderência de revestimentos de argamassa obtidos em obras.** XII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. São Paulo - SP, agosto de 2017.

CARVALHO, P. T. **Estudo da influência da reatividade da cal virgem no poder de cobertura do carbonato de cálcio precipitado tipo extra leve.** Centro Universitário de Formiga – UNIFOR, Formiga - MG, 2017. 66p.

DO Ó, Sávio Wanderley. **Análise da retenção de água em argamassas de revestimento aditivadas.** Dissertação. UnB, Brasília, 2004.

DUÓ, Danielli. **Estudo da aderência e da absorção de água em argamassas de revestimento com agregados reciclados de pet em substratos de blocos cerâmicos.** Dissertação. Universidade Federal do Pampa, Alegrete-RS, 2017.

DU, Peihua; XUE, Bin; SONG, Yihu. “Fracture Surface Characteristics and Impact Properties of Poly(butylene terephthalate)”, Polymer Bulletin, v. 64, pp. 185– 196, 2010.

DUARTE, Eric Brum de Lima. **Resistência à compressão de argamassa composta por resíduo de construção e demolição e politereftalato de etileno (PET) em flocos.** Dissertação, Uninove, São Paulo, 2014.

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

GASPERIN, Josiane. **Aderência de revestimentos de argamassa em substrato de concreto: influência da forma de aplicação e composição do chapisco.** Dissertação. UFRS, Porto Alegre, 2011.

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

JOHN, Vanderley M.; PUNHAGUI, Katia R. Garcia; CINCOTTO, Maria Alba. **Produção de Cal.** Em Economia de Baixo Carbono: Avaliação de Impactos de Restrições e Perspectivas Tecnológicas, Ribeirão Preto - SP, 2014.

JUCÁ, Pedro Henrique de Omena. **Estudo das propriedades mecânicas em diferentes temperaturas do PET e ensaios de arrancamento com tratamento mecânico em matriz cimentícia a base de cimento Portland.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade federal do Pampa, Alegrete – RS, 2017.

LION, M.; SKOCZYLAS, F.; LAFHAJ, Z.; SERSAR, M. Experimental Study on a Mortar. Temperature Effects on Porosity and Permeability. Residual properties or Direct Measurements under Temperature. **Cement and Concrete Research**, n.35, p. 1937-1942. 2005.

LOPES, Herbert Medeiros Torres. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland.** Tese. Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. **Introdução a Polímeros**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.

MANO, Eloisa Biasotto. **Polímeros como materiais de engenharia**. 8ª Reimpressão. São Paulo: Edgard Blücher, 2019.

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

MONTEIRO, Leonardo Libano Csernik. **Uso de Resíduos de Embalagens PET em Betões**. Dissertação. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2017.

MOURA, Washington A.; GONÇALVES, Jardel P.; LEITE, Roneilson da Silva. **Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso**. Sitientibus, Feira de Santana, v. 26, n. 1, p. 49-61, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

RECENA, Fernando Antônio piazza. **Conhecendo a argamassa**. 2 Ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2012. 188p.

SANTIAGO, Cybèle Celestino. Argamassas tradicionais de cal [online]. Salvador: EDUFBA, 2007. 202 p.

SANTOS, White José. **Desenvolvimento de metodologia de dosagem de argamassas de revestimento e assentamento**. Tese. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2014.

SATHLER, Lorena de Melo. **Avaliação do desempenho quanto à estanqueidade à água de sistemas verticais de vedação externa (SVVE) de paredes de blocos cerâmicos**. Dissertação. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2018.

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

SILVA, C.; SOUSA, V.C.; FERREIRA, T.; OLIVEIRA, A. M. **Avaliação de propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas cimentícias produzidas com aditivos químicos plastificantes**. Artigo. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. Natal, 2016a.

SILVA, José Bezerra. **Avaliação do desempenho de blocos de concreto estrutural dosados com politereftalato de etileno (PET) micronizado**. Tese. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal e Campina Grande, Campina Grande-PB, 2016b.

SOARES, Marcos Paulo Rodrigues. **Comparação do teor de óxido de cálcio disponível na cal virgem calcítica em dois métodos analíticos.** Monografia. Centro Universitário de Formiga – UNIFOR, Formiga – MG, 2018.

SOUZA, Alessandra Tolentino. **Análise comparativa de propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas de revestimento mistas e aditivadas.** Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2019.

TEIXEIRA, Magno Felipe Holanda Barbosa Inácio. **Espectroscopia no infravermelho próximo associada à modelagem empírica multivariada para previsão da resistência a tração do poli(tereftalato de etileno)-PET reciclado.** 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

PEREIRA, Jonatha Roberto. . Dissertação. Universidade Estadual de Campinas. Limeira, SP, 2016.