MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
IMED - FACULDADE MERIDIONAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ARGAMASSA PARA REVESTIMENTO COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE EPS

SÍLVIO MARQUES DE FARIAS
Engenheiro Civil

Orientador: Prof. Dr. Richard Thomas Lermen

Passo Fundo, 2021

SÍLVIO MARQUES DE FARIAS

ARGAMASSA PARA REVESTIMENTO COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE EPS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade Meridional - IMED como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Richard Thomas Lermen

Passo Fundo, 2021

CIP – Catalogação na Publicação

F224a FARIAS, Sílvio Marques de

Argamassa para revestimento com adição de resíduos de EPS / Sílvio Marques de Farias. – 2021.

97 f., il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade IMED, Passo Fundo, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Richard Thomas Lermen.

1. Argamassa de revestimento. 2. Resíduos – Poliestireno expandido. 3. Propriedade mecânica. I. LERMEN, Richard Thomas, orientador. II. Título.

CDU: 624

Catalogação: Bibliotecária Angela Saadi Machado - CRB 10/1857

Autor/a: Sílvio Marques de Farias

Título: Argamassa para revestimento com adição de resíduos de EPS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* – Mestrado em Engenharia Civil – da IMED, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Passo Fundo, RS, 24 de maio de 2021.

Dr. Richard Thomas Lermen – Presidente

Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro – Membro

Dra. Francieli Tiecher Bonsembiante – Membro

Dr. Rodrigo de Almeida Silva – Membro

Página de assinaturas

Richard Lermen
IMED
Signatário

Luciana Cordeiro
752.122.772-72
Signatário

Francieli Bonsembiante
825.105.800-78
Signatário

RODRIGO SILVA
914.757.750-91
Signatário

HISTÓRICO

25 mai 2021 16:09:31 **Richard Thomas Lermen** criou este documento. (Empresa: IMED, E-mail: richard.lermen@imed.edu.br, CPF: 925.065.500-20)

25 mai 2021 16:09:39 **Richard Thomas Lermen** *(Empresa: IMED, E-mail: richard.lermen@imed.edu.br, CPF: 925.065.500-20)* visualizou este documento por meio do IP 131.221.12.209 localizado em Passo Fundo - Rio Grande do Sul - Brazil.

25 mai 2021 16:09:41 **Richard Thomas Lermen** *(Empresa: IMED, E-mail: richard.lermen@imed.edu.br, CPF: 925.065.500-20)* assinou este documento por meio do IP 131.221.12.209 localizado em Passo Fundo - Rio Grande do Sul - Brazil.

25 mai 2021 16:10:10 **Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro** *(E-mail: lucianapc@ufpa.br, CPF: 752.122.772-72)* visualizou este documento por meio do IP 177.17.127.243 localizado em Belém - Para - Brazil.

25 mai 2021 16:11:55 **Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro** *(E-mail: lucianapc@ufpa.br, CPF: 752.122.772-72)* assinou este documento por meio do IP 177.17.127.243 localizado em Belém - Para - Brazil.

25 mai 2021 21:31:57 **Francieli Tiecher Bonsembiante** *(E-mail: francieli.bonsembiante@imed.edu.br, CPF: 825.105.800-78)* visualizou este documento por meio do IP 186.207.236.110 localizado em Passo Fundo - Rio Grande do Sul - Brazil.

25 mai 2021 21:34:34 **Francieli Tiecher Bonsembiante** *(E-mail: francieli.bonsembiante@imed.edu.br, CPF: 825.105.800-78)* assinou este documento por meio do IP 186.207.236.110 localizado em Passo Fundo - Rio Grande do Sul - Brazil.

08 jun 2021 10:16:35 **RODRIGO SILVA** *(E-mail: rodrigo.silva@imed.edu.br, CPF: 914.757.750-91)* visualizou este documento por meio do IP 179.154.153.208 localizado em Passo Fundo - Rio Grande do Sul - Brazil.

08 jun 2021 10:17:05 **RODRIGO SILVA** *(E-mail: rodrigo.silva@imed.edu.br, CPF: 914.757.750-91)* assinou este documento por meio do IP 179.154.153.208 localizado em Passo Fundo - Rio Grande do Sul - Brazil.

Dedico este trabalho aos meus familiares, minha esposa
e todos que se fizeram presentes neste momento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Capes e Fundação Meridional, pelo apoio financeiro e pelos laboratórios usados para realização dos ensaios.

Agradeço ao Prof. Dr. Richard Thomas Lermen, orientador deste trabalho, pela paciência, orientação e ajuda para realização do mesmo.

Agradeço a todos os professores, que estiveram em minha passagem de estudos, até chegar neste momento.

Agradeço a banca examinadora pelas considerações para o melhoramento continuo do estudo realizado.

Agradeço minha família, pelo apoio e incentivo para seguir os estudos com garra e dedicação.

Por fim, minha esposa, Gabriela Cristina Scopel, por estar no meu lado me acompanhando em várias as etapas de minha vida.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou
sobre aquilo que todo mundo vê.”
Arthur Schopenhauer

RESUMO

A incorporação de resíduos no desenvolvimento de materiais da construção civil vem sendo estudada há muito tempo. Esses estudos buscam alternativas para diminuir cada vez mais o consumo de agregados naturais e também buscam desenvolver materiais energeticamente mais eficientes. Nesse contexto, as argamassas de revestimento desenvolvidas com resíduo de poliestireno expandido (EPS) vêm como alternativas para suprir essas necessidades do setor da construção civil, na substituição do agregado natural. O presente estudo teve como principal objetivo desenvolver argamassa de revestimento com resíduo de EPS em substituição à areia natural. Os corpos de prova foram feitos com os seguintes percentuais de substituição: 0% (referência), 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. A caracterização dos corpos de prova foi realizada com diferentes tipos de ensaios, tais como: resistência à compressão; resistência à tração na flexão; resistência à aderência; densidade (saturada e seca); índices de vazios; absorção de água; resistência à incêndio; condutividade térmica; avaliação por imagens; e retração. Os resultados mostraram uma argamassa com menor densidade em relação à argamassa de referência, variando de 1444,5 a 1938,4 kg/m³. As resistências mecânicas, compressão e tração na flexão, foram de 1,73 a 7,93 MPa e 0,89 a 1,24 MPa, respectivamente. A retração com uma variação dimensional de 0,61 a 4,15 mm/m, absorção de água variando entre 12% e 16,5%, índice de vazios entre 20,1% e 23,1%, resistência à aderência com resultados de 0,20 a 0,33 MPa, a condutividade térmica variando de 0,43 a 1,23 W/m.K. A resistência à incêndios foi realizado com diferentes temperaturas, obtendo perdas de densidade variando de 1,52% a 3%, de 2,23% a 4,93% e 3,05% a 5,79%, com resistências mecânicas à tração na flexão 2,18 a 2,50 MPa, 0,33 a 0,59 MPa e 0,04 a 0,22 MPa, resistência à compressão de 2,57 a 5,32 MPa, 1,03 a 3,99 MPa e 0,68 a 1,52 MPa, para as temperaturas de 300 ºC, 500 ºC e 700 ºC, respectivamente. Portanto, foi possível desenvolver uma argamassa de revestimento utilizando resíduos de EPS em substituição ao agregado natural. O estudo mostrou que esse material atendeu as normas em relação as propriedades de resistências e durabilidade, a exigência de aderência para revestimentos internos e obteve-se baixa condutividade térmica em relação ao material de referência. Também foram observadas limitações quanto ao uso em situações de incêndio.

Palavras-chave: Argamassa de revestimento; Resíduo de Poliestireno Expandido – EPS; Propriedades mecânicas; Condutividade térmica; resistência ao incêndio.

ABSTRACT

The incorporation of waste in the development of construction materials has been studied for a long time. These studies seek alternatives to increasingly reduce the consumption of natural aggregates and also seek to develop more energy efficient materials. In this context, the coating mortars developed with expanded polystyrene (EPS) residue come as alternatives to supply these needs of the civil construction sector, in the substitution of the natural aggregate. The present study had as main objective to develop coating mortar with EPS residue to replace natural sand. The specimens were made with the following replacement percentages: 0% (reference), 10%, 20%, 30%, 40% and 50%. The characterization of the specimens was carried out with different types of tests, such as: compressive strength; flexural tensile strength; adhesion resistance; density (saturated and dry); air void; water absorption; fire resistance; thermal conductivity; image evaluation; and retraction. The results showed a mortar with lower density according to the reference mortar, varying from 1444.5 to 1938.4 kg / m³. Mechanical strength, compressive strength and flexural tensile strength, were from 1.73 to 7.93 MPa and 0.89 to 1.24 MPa, respectively. The shrinkage resistances for durability with a dimensional variation from 0.61 to 4.15 mm / m, water absorption varying between 12% and 16.5%, voids index between 20.1% and 23.1%, resistance to adhesion with results from 0.20 to 0.33 MPa, thermal conductivity ranging from 0.43 to 1.23 W/m.K. Fire resistance was carried out at different temperatures, obtaining density losses ranging from 1.52% to 3%, from 2.23% to 4.93% and 3.05% to 5.79%, with mechanical tensile strengths in flexion 2.18 to 2.50 MPa, 0.33 to 0.59 MPa and 0.04 to 0.22 MPa, compressive strength of 2.57 to 5.32 MPa, 1.03 to 3.99 MPa and 0.68 to 1.52 MPa, for temperatures of 300 ºC, 500 ºC and 700 ºC, respectively. Therefore, it was possible to develop a coating mortar using EPS residues to replace the natural aggregate. The study showed that this material met the standards regarding resistance and durability properties, the adhesion requirement for internal coatings and low thermal conductivity in relation to the reference material. Limitations were also observed regarding the use in fire situations.

Keywords: Coating mortar; Natural sand; Expanded Polystyrene Residue - EPS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Linha no tempo da história das argamassas 21
Figura 2: Área de contato superficial do revestimento 23
Figura 3: Espessura do Revestimento 26
Figura 4: Movimento relativo das partículas do fluido na presença de tensão de cisalhamento. 27
Figura 5: Macro e microestrutura de uma argamassa. 28
Figura 6: Resultados de variação dimensional (retração). 31
Figura 7: Tipos de ancoragem no revestimento. 34
Figura 8: Modo de ruptura de argamassas de revestimento. 34
Figura 9: Resultados tração na aderência em argamassas com EPS. 35
Figura 10: Ensaio de resistência ao fogo em argamassas. 36
Figura 11: Monitoramento das fases das pastas em diferentes temperaturas. 37
Figura 12: Fluxograma experimental. 40
Figura 13: Curva granulométrica areia natural. 42
Figura 14: Partículas da areia natural 43
Figura 15: Curva granulométrica resíduo de EPS. 44
Figura 16: Resíduo de EPS 44
Figura 17: Fluxograma de amassamento da mistura. 45
Figura 18: (a) EPS adicionado à pasta cimentícia e (b) EPS misturado 46
Figura 19: Etapas do ensaio de consistência 48
Figura 20: Ensaio de aderência. 50
Figura 21: (a) Corpos de prova para o ensaio de condutividade térmica e (b) aparato experimental. 51
Figura 22: Ensaio de resistência à incêndios. 51
Figura 23: Resultados de densidade de massa em estado fresco. 53
Figura 24: Densidade de massa em estado endurecido em relação a diferentes idades e percentuais de substituição. 54
Figura 26: Resistência à compressão aos 28 dias. 55
Figura 28: Resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias. 57
Figura 29: Ruptura dos moldes nos ensaios à tração na flexão. 58
Figura 30: Resultados de variação dimensional. 59
Figura 31: Resultados de absorção de água. 61

Figura 32: Resultados de índice de vazios.....62
Figura 33: Resultados de Massa específica. 63
Figura 34: Resultados de resistência à aderência na tração. 65
Figura 35: Ruptura do molde no ensaio de aderência com a argamassa com 20% de EPS. 66
Figura 36: Análise visual da falha aparente do chapisco no substrato com a argamassa com 20% de EPS 66
Figura 37: Resultados de Condutividade Térmica 68
Figura 38: Porcentagem de perda de massa da argamassa em altas temperaturas. 70
Figura 39: Resistência à compressão em temperatura ambiente (25 °C). 71
Figura 40: Resistência à compressão em temperatura de 300 ºC. 71
Figura 41: Resistência à compressão em temperatura de 500 ºC. 72
Figura 42: Resistência à compressão em temperatura de 700 ºC. 72
Figura 43: Resistência à tração na flexão em moldes expostos em altas temperaturas. 74
Figura 44: Argamassa com 0% de EPS com temperaturas (a) 300 ºC, (b) 500 ºC e (c) 700 ºC. 76
Figura 45: Argamassa com 10% de EPS com temperaturas de (a) 300 ºC, (b) 500 ºC e (c) 700 ºC. 76
Figura 46: Argamassa com 20% de EPS com temperaturas de (a) 300 ºC, (b) 500 ºC e (c) 700 ºC. 77
Figura 47: Argamassa com 30% de EPS com temperaturas de (a) 300 ºC, (b) 500 ºC e (c) 700 ºC. 77
Figura 48: Argamassa com 40% de EPS com temperaturas de (a) 300 ºC, (b) 500 ºC e (c) 700 ºC. 77
Figura 49: Argamassa com 50% de EPS com temperaturas de (a) 300 ºC, (b) 500 ºC e (c) 700 ºC. 78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados de estudos relevantes para densidade de massa em estado endurecido. 29
Tabela 2: Resultados de resistências mecânicas em argamassas com EPS. 30
Tabela 3: Resultados de condutividade térmica em argamassas com EPS. 33
Tabela 4: Relação de cor e resistência à tração na flexão (RT) e à compressão (RC) nas argamassas expostas à altas temperaturas. 38
Tabela 5: Redução de resistência à compressão de diferentes modos de resfriamento após aquecimento. 39
Tabela 6: Caracterização do cimento 41
Tabela 7: Caracterização da cal hidratada. 42
Tabela 8: Propriedades da areia natural 43
Tabela 9: Propriedades do resíduo de EPS. 45
Tabela 10: Composição dos traços experimentais. 46
Tabela 11: Ensaios experimentais. 47
Tabela 12: ANOVA para a densidade de massa. 55
Tabela 13: ANOVA para a resistência à compressão 57
Tabela 14: ANOVA para a resistência à tração na flexão. 59
Tabela 15: ANOVA para a variação dimensional. 60
Tabela 16: ANOVA para a absorção de água por imersão total. 61
Tabela 17: ANOVA para o índice de vazios. 63
Tabela 19: ANOVA para massa específica seca. 64
Tabela 20: ANOVA para a massa específica saturada. 64
Tabela 22: ANOVA para resistência à aderência à tração. 67
Tabela 23: ANOVA para condutividade térmica. 68
Tabela 24: ANOVA para perda de massa. 70
Tabela 25: ANOVA para resistência à compressão em argamassas expostas em altas temperaturas 73
Tabela 26: ANOVA para resistência à tração na flexão – diferentes temperaturas. 75

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de Variância

ºC – Grau Celsius

cm – Centímetro

CP’s – Corpos de prova

CSH -Silicato de cálcio hidratado

CT – Condutividade térmica

EPS – Poliestireno expandido

FRP – Revestimento argamassado

G – Grama

K – Kelvin

kg – Quilograma

MPa – Mega pascal

m – Metro

m^2 – Metro quadrado

m^3 – Metro cúbico

mm – Micrometro

mm – Milímetro

% – Porcentagem

RC – Resistência à compressão

rpm – Rotações por minuto

RT –Resistência à tração na flexão

TRRF – Tempo referido de resistência ao fogo

W – Watt

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 16

1.1. Objetivos 19

1.1.1. Objetivo Geral 19

1.1.2. Objetivo Específico 19

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20

2.1. Argamassa 20

2.2. Argamassas de Revestimento 22

2.3. Argamassas de Revestimentos com Agregados Leves 23

2.4. Propriedades das Argamassas 26

2.4.1. Reologia 26

2.4.2. Porosidade 28

2.4.3. Densidade 29

2.4.4. Resistência à compressão e a tração na flexão 30

2.4.5. Variação dimensional 30

2.4.6. Absorção de água por imersão total e índice de vazios 32

2.4.7. Condutividade Térmica 32

2.4.8. Aderência 33

2.4.9. Resistência à incêndios 35

3. MATERIAIS E MÉTODOS 40

3.1 Materiais 41

3.1.1. Cimento 41

3.1.2. Cal Hidratada 41

3.1.3. Agregado Miúdo 42

3.1.4. Resíduo de EPS 43

3.2. Produção da argamassa 45

3.3. Caracterização da Argamassa – Estado Fresco 48

3.3.1. Índice de consistência 48

3.3.2. Densidade de Massa - fresco 48

3.4. Caracterização da Argamassa – Estado Endurecido 48
3.4.1. Resistência mecânica à compressão e tração na flexão 48
3.4.2. Variação dimensional 49
3.4.3. Densidade de massa no estado endurecido 49
3.4.4. Absorção de água, índice de vazios, massa específica seca e saturada 49
3.4.5. Resistência de aderência à tração 49
3.4.6. Condutividade térmica 50
3.4.7. Desempenho em situações de incêndio 51
3.4.8. Análise por imagem 52
3.4.9. Análise estatística 52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 53
4.1. Densidades de Massa no Estado Fresco 53
4.2. Densidades de Massa no Estado Endurecido 54
4.3. Resistência à Compressão 55
4.4. Resistência à Tração na Flexão 57
4.5. Variação Dimensional 59
4.6. Absorção de Água por Imersão Total 60
4.7. Índice de vazios 62
4.8. Massa Específica Seca e Saturada 63
4.1 Aderência à tração 64
4.2 Condutividade Térmica 67
4.3 Resistência à Incêndios 69
4.3.1 Densidade em altas temperaturas 69
4.3.2 Resistência à compressão em altas temperaturas 70
4.3.3 Resistência à tração na flexão em altas temperaturas 73
4.3.4 Análise de imagens em altas temperaturas 75
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 79
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 81
7. REFERÊNCIAS 82

APÊNDICE A – Resultados de densidade em estado endurecido 90
APÊNDICE B – Resultados de resistência à compressão 90
APÊNDICE C – Resultados de resistência à tração na flexão 91
APÊNDICE D – Resultados de variação dimensional 91
APÊNDICE E – Resultados de absorção de água por imersão total 91
APÊNDICE F – Resultados de índice de vazios 92
APÊNDICE G – Resultados de massa específica seca 92
APÊNDICE H – Resultados de massa específica saturada 92
APÊNDICE I – Resultados de aderência na tração 93
APÊNDICE J – Resultados de condutividade térmica 95
APÊNDICE K – Resultados de perda de massa em corpos de prova expostos em altas temperaturas 95
APÊNDICE L – Resultados de resistência à compressão em corpos de prova expostos em altas temperaturas 96
APÊNDICE M – Resultados de resistência à tração na flexão em corpos de prova expostos em altas temperaturas 97

1. INTRODUÇÃO

A qualidade e desempenho das edificações tem sido uma exigência cada vez mais presente no setor da construção civil. A eficiência dos setores construtivos para o isolamento térmico das edificações vem sendo maior a cada ano, com uma busca insaciável por materiais que possam atender exigências mínimas da norma de desempenho NBR 15.575 (ABNT, 2013), a qual esclarece os quesitos de conforto e qualidade da edificação em seus sistemas construtivos. Esses materiais podem surgir através de resíduos de descarte, que possuam características essenciais, tais como: baixa condutividade térmicas, resistências mecânicas que atendam as normas e possuam uma alta durabilidade. Também, uma quantidade significativa para atender a demanda do setor da construção civil é esperada, podendo diminuir a extração de recursos naturais.

Um tipo de material empregado na construção civil que tem papel fundamental na eficiência das construções é a argamassa. O desempenho das argamassas de revestimento pode reduzir significativamente a temperatura interna de edificações, isto é, diminuindo a condutividade térmica desse material a absorção de radiação solar nas fachadas diminui. (PASSOS E CARASEK, 2018). O uso de materiais alternativos nas argamassas, como agregados leves (vermiculita expandida, poliestireno expandido, argila expandida, dentre outros) contribui para redução da condutividade térmica e, consequentemente, aumenta a eficiência energética das edificações.

A utilização de resíduos como matéria-prima para o desenvolvimento de novos materiais vem sendo uma alternativa eficaz, frente à escassez de materiais naturais (MACEDO et al., 2019). Nesse contexto, o uso do resíduo de poliestireno expandido (EPS) no desenvolvimento de materiais da construção civil vem sendo estudado por diversos autores (BROOKS et al; PASSOS E CARASEK, 2018; BOITA et al., ZHANG et al., 2019; SILVA et al.; HUANG et al., 2020).

Segundo Ayse et al. (2016) e Brooks et al. (2018), para reduzir a demanda de energia no conforto térmico, é indispensável o uso de materiais mais isolantes, com reduzida massa específica, melhorando as propriedades de isolamento térmico em substituição parcial ou total dos agregados naturais. Esses materiais possuem grande parte de ar em suas composições que favorecem está aplicação.

Um material leve que pode ser utilizado para diminuir a densidade e melhorar a eficiência térmica das argamassas é o resíduo de EPS. Esse material pode ser aplicado em

substituição parcial ou total aos agregados, principalmente a areia natural. Geralmente argamassas com densidades menores que 2000 kg/m^3 podem ser obtidas. Alguns autores destacam resultados promissores, que incidem significativamente na redução de cargas desnecessárias nas estruturas e nas sessões transversais dos fundamentos estruturais, (em exemplo, vigas, colunas placas e suportes) e dimensão da fundação, além do melhoramento do desempenho térmico das edificações, atendendo as exigências mínimas das normas vigentes (BRÁS et al, 2013; FERNADIZ-MÁS et al., 2014; TITTARELLI, 2016; PASSOS E CARASEK, BROOKS et al., 2018; SILVA et al., HUANG et al., ZHANG et al., MILLING et al., 2020).

O EPS possui uma alta demanda em vários setores como automobilísticos (acabamentos), eletroeletrônico (isolamento, proteção para transporte), saúde ((isolamento, proteção para transporte), embalagens (alimentos), construção civil (lajes pré-moldadas, forros, isolamentos), entre outros. Devido às inúmeras aplicações de EPS, sua produção em nível mundial no ano de 2020 foi em torno de 5 milhões de metros cúbicos (SILVA et al.; MILLING et al., 2020).

O descarte do resíduo do EPS tem sido visto como uma ameaça ambiental, pois embora seja um material 100% reciclável, sua taxa de reciclagem não ultrapassa 40% de seu volume total. Poletto (2009) descreve como sendo uma rotina diária da população gaúcha descartar resíduos de embalagens de EPS em lixeiras comuns, e em embalagens desapropriadas para a eliminação. O mesmo autor também destaca que o resíduo de EPS, mesmo sendo descartado corretamente, ao chegar aos centros de triagem, o material é classificado como lixo. Essa classificação está relacionada à baixa densidade e grande volume, que torna inviável o transporte para as recicladoras desse material. O resíduo quando descartado de forma inadequada, tende a ser transportado por meio de correntes de ar, até leitos dos rios e oceanos, prejudicando o meio ambiente. (MILLING et. al.; SILVA et al., 2020). Desta forma estudos que utilizam o resíduo de EPS no desenvolvimento de materiais para a construção civil podem contribuir na solução desse problema.

No estudo desenvolvido por Brás et al. (2013), os resultados obtidos com as argamassas com a utilização do EPS diminuíram os desempenhos mecânicos, porém obteve-se melhor durabilidade, diminuição da porosidade e da condutividade térmica quando confrontado com misturas de referências.

Nas pesquisas relacionadas com uso de materiais leves, o uso do EPS quando incorporado em pequenas quantidades, em substituição do agregado miúdo, na composição da

argamassa, mostra-se eficaz, pois reduz a condutividade térmica (DIXIT, 2019). Tadesmir et al. (2017) apresentaram resultados promissores nos quesitos densidade e condutividade térmica ao usar EPS no desenvolvimento de concreto leve. Densidades de 1600 a 300 kg/m³ e condutividade térmica de 0,45 a 0,067 W/m.K foram encontradas. Esses resultados foram menores e melhores que a argamassa comum, a qual, de acordo com a norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005), tem uma condutividade térmica de 1,15 W/m.K e densidades entre 1800-2100 kg/m^3.

Segundo Chung et al. (2018), em análises realizadas com adições de EPS em misturas cimentícias leves, o efeito da dimensão dos grãos e a forma irregular do EPS influencia significativamente as propriedades mecânicas da mistura, isto é, quanto menor o tamanho do grão de EPS, maior o preenchimento de vazios e melhor preenchimento da matriz cimentícia. Nas argamassas produzidas com o resíduo do EPS, as dimensões de partículas de EPS, podem assim contribuir para aumentar a resistência à compressão da argamassa leve, contribuindo para uma menor condutividade térmica na mistura em estado endurecido.

Barroca (2014) destaca em seu estudo, com o EPS (industrializado e reciclado) em argamassas de revestimento, tem-se obtido propriedades similares, sendo verificada quedas nos resultados das mecânicas à compressão e tração na flexão e aumento de retração e poros capilares, contudo com uma proporção e granulometria adequada das partículas de EPS, tem-se vantagens de redução de densidades, melhora dos desempenhos térmicos, e diminuição da utilização dos agregados naturais.

. Afim de analisar o efeito da incorporação de EPS nas propriedades em estado fresco e endurecido das argamassas de revestimento com a substituição do agregado natural, o presente estudo apresenta resultados obtidos através da confecção de moldes de argamassas de revestimento com diferentes dosagens de resíduos de EPS, buscando o melhor resultado nas propriedades em estado fresco e endurecido, avaliando o índice de consistência, densidades, resistências mecânicas, de durabilidade, aderência, condutividade térmica e um estudo das argamassas em situações de exposição em altas temperatura.

Nas pesquisas mais relevantes realizadas recentemente, é possível observar a pouca utilização do resíduo do EPS, sendo observado alguns estudos científicos reportando a adição de partículas industrializadas naturais do EPS em adição de misturas cimentícias, essencialmente para diminuir as densidades, e obter melhoramentos na propriedades de isolamento térmico, contudo é necessário o aprofundamento dos estudos na utilização de

resíduos, analisando suas propriedades, e verificando quais as proporções são adequadas para atender as exigências normativas vigentes para a utilização em argamassas de revestimento.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral a avaliação das propriedades das argamassas de revestimento desenvolvidas com a substituição parcial do agregado natural pelo resíduo de EPS.

1.1.2. Objetivo Específico

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são necessários:

- Desenvolver uma argamassa de revestimento leve com diferentes percentuais de substituição de areia natural pelo resíduo de EPS;
- Avaliar as propriedades mecânicas (resistência à compressão e tração na flexão) e densidade, variação dimensional, aderência à tração das argamassas de revestimento desenvolvidas com o resíduo de EPS;
- Avaliar as propriedades térmicas (condutividade térmica) e a resistência da argamassa exposta em altas temperaturas (perda de massa, resistência à compressão e tração na flexão);
- Determinar quais os melhores percentuais de substituição dos resíduos que atendam as normas para sua utilização.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Argamassa

A argamassa é uma mistura plástica e homogênea composta por aglomerantes (cimento, cal e/ou mistura de ambos), agregados miúdos (areia), água e aditivos. A função desta mistura é unir os elementos de alvenaria, distribuir e resistir à esforços laterais, absorver deformações da parte da alvenaria e selar juntas contra penetração de águas na alvenaria (ZAPARTE, 2020).

As primeiras argamassas foram produzidas e utilizadas há mais de 10.000 anos, sendo confeccionada pelos homens primitivos da época, que tinham por objetivo à necessidade de construir abrigos com os materiais disponíveis em suas regiões. Esse material criado tinha como característica principal a aglutinação com os demais materiais existentes, criando uma mistura mais resistente (LEAL, 2012).

A introdução de adições e adjuvantes nas argamassas foi iniciada pela civilização romana, através da utilização de argamassas de cal aérea constituídas, fundamentalmente, por cinzas vulcânicas ou outras pozolanas, pó e agregados de tijolo ou telha e matérias orgânicas (gorduras), a quais tinham o objetivo de controlar o tempo de pega, conferir hidraulicidade e aumentar a durabilidade das construções (SOUZA, 2010).

As argamassas de cal passaram a ser utilizadas na construção em diversos países desde os tempos imemoriais até o início do século XX (ALMEIDA et al., 2017). As argamassas de cal começaram a ser esquecidas, com a chegada do cimento (VEIGA, 2018).

Nos edifícios históricos as argamassas contem grandes variedades de composições, são ricas em ligantes, tem diferentes formas volumétricas, encontram-se usualmente nos traços mais ricos em construções, tais com: edificações religiosas, militares ou apalaçados (VELOSA; VEIGA, 2016).

Para aplicar argamassas em obras, antigamente era necessário realizar transporte e armazenamento de suas matérias-primas in loco, onde iriam ser aplicadas. Sendo necessário reservar uma equipe de mão-de-obra unicamente para a tarefa de doseamento de matérias-primas e preparação das argamassas. Mesmo com mão-de-obra encarregada para a tarefa, não era possível haver garantias quanto à similaridade e qualidade das argamassas produzidas, devido à difícil quantificação das matérias-primas introduzidas na mistura (LEAL, 2012).

Monteiro (2008) salienta que o intuito de minimizar as preocupações quanto a custos, prazos e durabilidade dos serviços em obra com argamassa, o método tradicional de produção *in loco* começou a cair em desuso, passando em 1950 o desenvolvimento das argamassas industrializadas para as construções, garantindo um padrão de qualidade.

Na Figura 1 consta uma breve linha de tempo da história das argamassas, nomeadamente referente aos fatos mais relevantes após à patente do cimento Portland, não só a nível mundial, mas também relativamente a Portugal (SOUSA, 2010). A partir do ano de 2002, o comitê europeu determinou o selo de qualidade *"CE"*, promovido através de normas europeias que especificavam os requisitos mínimos para aceitação e comercialização nos países da europa para a produção do cimento Portland, e após no ano de 2004, essa certificação passou a ser exigida para as argamassas de construção industrializadas.

Figura 1: Linha no tempo da história das argamassas

Fonte: Adaptado de Monteiro, 2008

2.2. Argamassas de Revestimento

A argamassa de revestimento é uma mistura plástica e homogênea composta por aglomerantes (cimento, cal, cimento + cal), agregados miúdos (areia natural) e água. Esse tipo de argamassa pode ser dividido em camadas, sendo chapisco, emboço, reboco ou camada única, além do revestimento decorativo monocamada (RDM). Thomaz (2020), cita que as espessuras de camadas de revestimento podem varias de 1,5 a 2,0 cm, para revestimento internos, e 3,0 a 4,0 cm para revestimentos externos, sendo o mais usual nas regiões do sudeste e sul do país.

Os revestimentos contribuem para o desempenho das edificações. Atualmente a norma NBR 15.575 (ABNT, 2013), possui exigências dos desempenhos de edificações para seu correto funcionamento, sendo requisitos fundamentais que atestam a qualidade da mistura para suas aplicações.

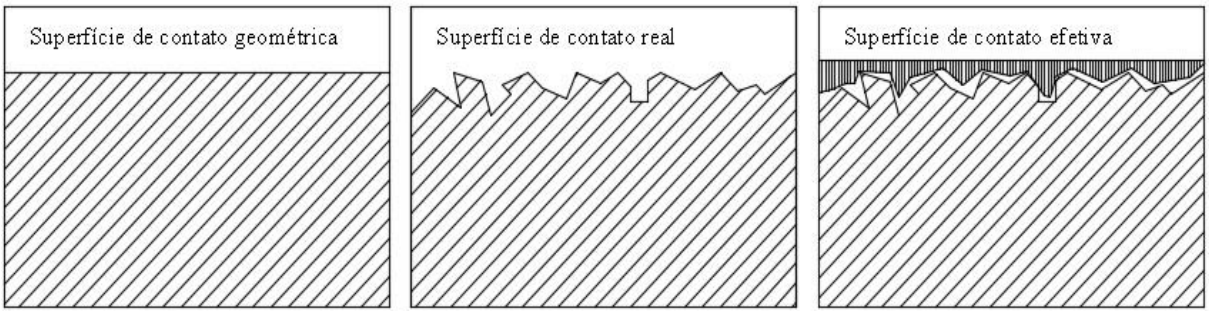
As argamassas de revestimento possuem como principal função a proteção dos elementos estruturais (estrutura de concreto armado), de alvenaria e de vedação (painéis). A proteção é feita, principalmente, contra a ação de agentes agressivos, intemperismo. Esse tipo de material aumenta a resistência ao desgaste e prolongando a vida útil da edificação, além de dar forma e estética as edificações (BAIA E SABBATINI, 2008; CARASEK, 2007).

Uma das propriedades mais importantes da argamassa de revestimento é a aderência ao substrato, sendo que essa zona de aderência é responsável por absorver e suportar todas as tensões e esforços oriundos das estruturas e esforços extrínsecos e intrínsecos (CAMPOS, 2014).

Passos e Carasek (2018), cita que a aderência e vida útil do revestimento estão diretamente ligadas a qualidade da argamassa e do substrato. Silfwerbrand et al. (2011) afirmam que a resistência ao arrancamento depende da área geométrica da superfície e do contato real da superfície, resultando no contato efetivo da mistura com o substrato e/ou chapisco da superfície aplicada o revestimento argamassado, tendo uma melhor resistência a maior área de apoio da argamassa.

O contato da área geométrica da parede é entendido como sendo uma área plana na superfície, já a área real leva em consideração a rugosidade do substrato ou sobre o chapisco aplicado, visto isso, tem-se a área efetiva, onde ocorre a absorção dos líquidos da mistura, preenchendo os poros existentes e endurecendo, na área efetiva pode conter vazios, que podem prejudicar o ancoramento da argamassa de revestimento, conforme observado na Figura 2.

Figura 2: Área de contato superficial do revestimento



Fonte: Autor, 2021; (Adaptado de SILFWERBRAND, BEUSHAUSEN E COURARD, 2011).

A aderência entre argamassa e substrato podem ser verificados na argamassa fresca e endurecida, sendo denominadas adesão inicial e a aderência final (CARASEK, 1996, MOURA 2007). A resistência à aderência do revestimento se dá pela penetração da pasta nos poros do substrato e, posteriormente, pelo endurecimento da mistura (CINCOTTO, 1995).

Nos revestimentos podem ocorrer falhas, podendo ser definidas por patologias, que diminuem e prejudicam a qualidade e funcionalidade dos revestimentos. Essas falhas muitas vezes, são relacionadas um ou uma soma de fatores, contemplando a qualidade dos materiais constituintes na argamassa, composição da mistura (traço), execução do revestimento, intempéries, bactérias, dentre outros, que podem auxiliar na formação de vesículas, deslocamentos, fissuras, eflorescências, fantasmas, manchas de umidade (TCATCH E PIOVESAN, 2019;). Segundo Moura et al. (2009) as causas mais frequentes das vesículas estão relacionadas com a hidratação retardada da cal e a presença de impurezas nos agregados, tais como: matérias orgânicas, argilas, que podem prejudicar a vida útil da argamassa.

2.3. Argamassas de Revestimentos com Agregados Leves

A utilização de agregados leves, em substituição ou adição, no desenvolvimento de argamassas, pode melhorar o desempenho das edificações, principalmente nos desempenhos térmicos e acústicos, porém, Barroca (2013) cita que não basta que estas melhorias sejam verificadas, sendo importante primeiramente analisar como e de que forma a sua inserção em argamassas influência nas propriedades e desempenho dos revestimentos em termos de propriedades mecânicas e reológicas.

Nas argamassas leves podem ser aplicados agregados leves unitários ou em conjuntos, com propriedades distintas, tais como a argila expandida, xisto expandido, vidro expandido,

perlita expandida, escória expandida, vermiculita expandida, agregados de cinza volante e grânulos de poliestireno expandido - EPS (HUANG et al., 2018).

Cabe salientar, que os agregados leves são muitas vezes oriundos de reaproveitamento de materiais de descarte, com pouco aproveitamento em outros meios e que tendem a causar problemas ambientais pelo seu descarte inapropriado (PASSOS E CARASEK, 2018).

Quando incorporado em pequenas e médias quantidades em substituição do agregado miúdo na composição da argamassa, o EPS mostra-se eficaz quanto ao isolamento térmico de ambientes, visto que as partículas são compostas essencialmente por ar no interior de suas células fechadas. Com o ar enclausurado no interior do EPS, a argamassa passa a ter pequenos vazios em seu interior, melhorando consideravelmente as propriedades de isolamento térmico e diminuição da densidade da mistura, contudo em grandes quantidades ocasionam grandes percas de resistências mecânicas e de durabilidade em misturas não estruturais (DIXIT, 2019).

Silva (2017), cita que de acordo com a EN 998-1:2010, as argamassas térmicas são aquelas com condutibilidades térmicas inferiores a 0,2 W/m.K, podendo ainda ser definidas pela classe 1 quando têm valores inferiores a 0,1 W/m.K, já na norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005), trata a argamassa convencional comum com valor referencial mínimo de atendimento para a condutividade térmica em edificações habitacionais de 1,15 W/m.K.

Tadesmir (2017) apresentou resultados satisfatórios quando usadas em misturas cimentícias com EPS, obteve densidades 1600 a 300 kg/m³, apresentando resultados 0,45 a 0,067 W/m.K de condutividade térmica. Já Kulbhushan et al. (2018), descreve que a mistura cimentícia leve, com uma baixa densidade (320 – 1920 kg/m³) possui uma maior absorção de ruídos (isolamento acústico) e melhor isolamento térmico (baixa condutividade térmica – geralmente inferior a 0,40 W/m.K), sendo uma alternativa que pode vir a ser utilizada em assentamentos de tijolos em pavimentos e como revestimento argamassado em paredes e painéis de vedação vertical.

Sob o ponto de vista técnico, Passos e Carasek (2018), analisaram a microestrutura de argamassas com EPS, através de imagens térmicas em sistemas de vedação, os resultados demonstram potencial de utilização e de isolamento térmico com a inconveniente carência de resistência mecânica, sendo obtido resultados de condutividade térmica com valores entre 0,33 e 0,01 W/m.K, a partir de argamassas com densidade aparente entre 1290 e 341 kg/m³.

Miled et al. (2007), estudaram as misturas cimentícias com adição de partículas de EPS de diâmetro variado (1, 2,5 e 6,5 mm) observaram que o efeito do tamanho das partículas de

poliestireno expandido é observado nas misturas com baixa porosidade, tornando-se insignificante em compósitos de alta porosidade, exibindo macro porosidades entre 10 – 50%.

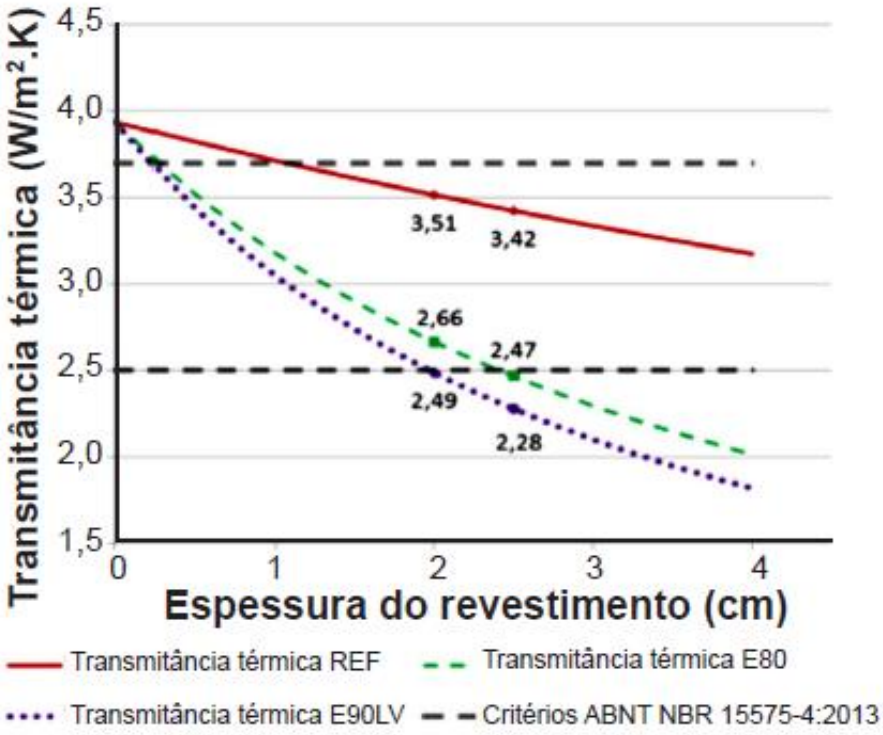
Kaya e Kar (2016) utilizaram uma mistura de cimento e EPS para produzir misturas cimentícias. Nos experimentos foram utilizadas as quantidades de EPS de 20%, 40%, 60% e 80%, em volume, concluindo que quanto maior a quantidade de EPS, menor a resistência mecânica, menor porosidade e menor a condutividade térmica. Por exemplo, o menor valor encontrado para a condutividade foi de 0,048 W/m.K, com 80% de EPS em substituição ao agregado natural. Quando comparado com os valores normatizados de argamassa convencionais, observa-se uma redução de 95,8%.

Em outro trabalho, Leal (2012) apresenta resultados que melhoram as propriedades de condutividade térmica das argamassas, mas é verificado uma redução nos resultados das resistências mecânicas. Nesse estudo foram utilizadas esferas de EPS em substituição da areia nas seguintes proporções: 0% (referência), 10%, 20%, 40%, 50%, 70% e 80%. O autor obteve redução de 72% da condutividade para a substituição de 80%, e redução de resistência à compressão de 52%, quando comparado com a mistura de referência.

Passos e Carasek (2018), observaram em seu trabalho a variação de espessuras da argamassa de revestimento produzidas com altas quantidades de EPS (0%, 80%, 90%) em substituição da areia natural, comparando-as com os limites de transmitâncias térmicas exigidos pela norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013). As variações da espessura do revestimento com o resíduo de EPS são observadas, quando comparados com o traço de 0%, com uma espessura de 2,0 cm, os resultados com 80% de substituição obteve reduções de 24,21%, podendo ser diminuída as espessuras para atender a norma quanto a sua transmitância térmica. Na Figura 3, são observados os resultados do estudo, juntamente com limites de transmitância da norma 15.575-4 (ABNT, 2013).

Nos estudos que foram analisados, todos apresentam parâmetros favoráveis na utilização de EPS, com um desempenho acima dos estabelecidos pelas normas vigentes para o isolamento térmico. Nas argamassas de revestimento o experimento a ser avaliado e desenvolvido, esperando para melhorar as propriedades térmicas, sem prejudicar consideravelmente as características mecânicas e funcionais das argamassas, podendo atender os padrões estabelecidos pelas normas de desempenho 15575 (ABNT, 2013), e aos requisitos na norma NBR 13281 (ABNT, 2005), para os revestimentos de regularização em paredes de vedação.

Figura 3: Espessura do Revestimento



Fonte: Passos e Carasek, 2018.

2.4. Propriedades das Argamassas

2.4.1. Reologia

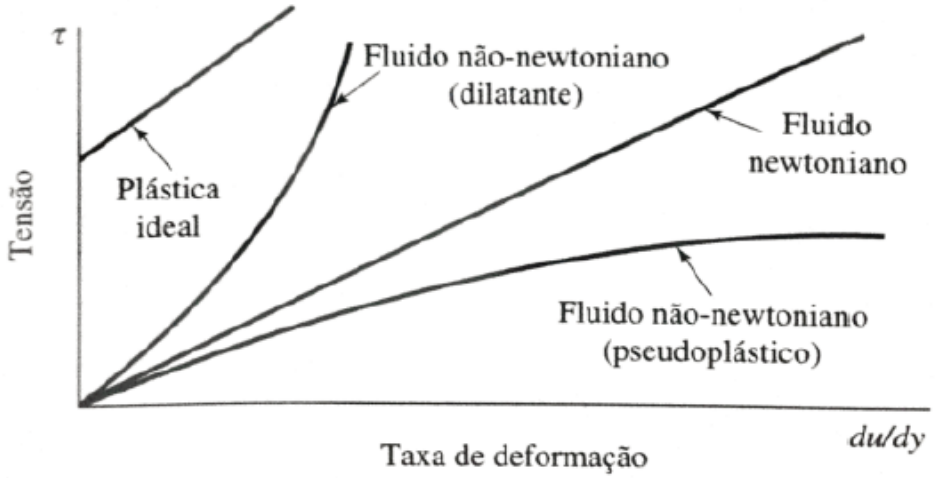
As características das argamassas em geral, são afetadas diretamente pelas características físicas das partículas (granulometria, densidade, área superficial e rugosidade do material) e pelo tipo de interação das partículas no estado de dispersão. (OLIVEIRA et al., 2000). As partículas sólidas na mistura em estado fluido perturbam as linhas do fluxo, com isso a viscosidade da mistura aumento tendo uma resistência maior ao escoamento (CARDOSO, 2009).

Em estado fresco as partículas maiores estão normalmente sujeitas a fenômenos de atrito e impacto, enquanto os finos da pasta tendem a se movimentar para superfície por meio do transporte da água presente na mistura, ou seja, podem ser afetados por ocorrências de superfície e reflexos de hidratação (COSTA, 2007).

Na mesa de consistência, quando a tensão de cisalhamento ocorre na proporção da tensão é aplicada, é definida pelo modelo ideal de Newton ou o modelo de fluídos, chamado de newtonianos. Já com altas quantidades de líquidos, passam a interagir mais intensamente, fazendo com que haja um desvio do modelo, podendo ser definidas como um modelo não linear

pseudoplástico (uma viscosidade menor, mais fluida com uma deformação maior quando aplicada a carga de cisalhamento). Para uma mistura com alta concentração de partículas e pouca quantidade de liquido é observado o comportamento dilatante, ou seja, viscosidade maior que resiste mais a tensão de cisalhamento (RODRIGUES, 2017), conforme verificado na Figura 4.

Figura 4: Movimento relativo das partículas do fluido na presença de tensão de cisalhamento.



Fonte: RODRIGUES, 2017.

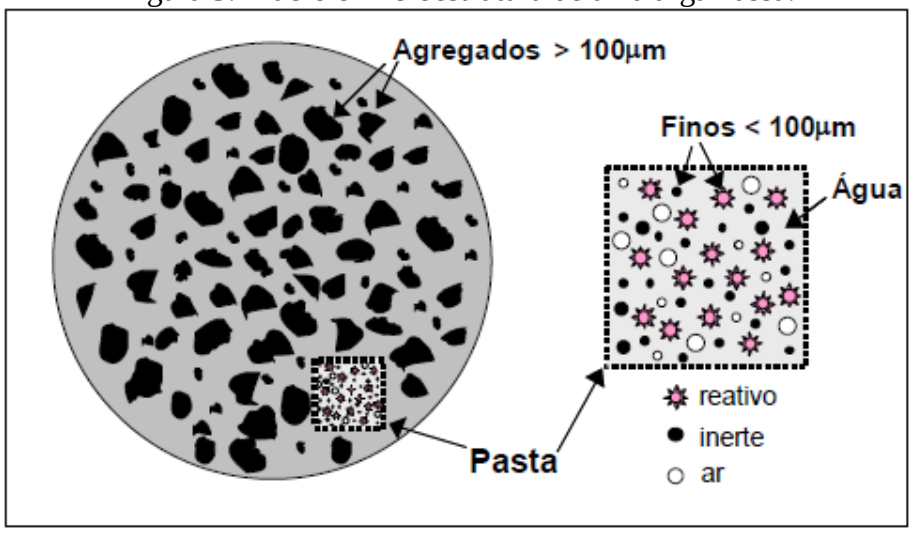
Quando se utiliza resíduos no desenvolvimento das argamassas, o comportamento reológico sofre alterações em função de diversos fatores, tais como: aglomeração, dissolução, precipitação da hidratação dos ligantes, ação de aditivos (incorporadores de ar, retardadores, dispersantes, etc.), cujas propriedades podem ser determinadas com interação dos grãos grossos imersos na matriz fluida (CARASEK, 2014).

O resíduo de EPS, devido sua baixa densidade, tendem a segregar das misturas. Chen e Liu (2014) afirmam que a consistência da argamassa com a adição do EPS tende a ser maior, visto que o resíduo não absorve o liquido inserido formando apenas uma fina camada de liquido envolvendo o resíduo do EPS (OLIVEIRA, 2012). O EPS pode gerar um comportamento não linear pseudoplástico na matriz cimentícia (estado fresco), fluindo com maior rapidez a medida dos impactos realizados na mesa de consistência. Desta forma, é necessário ajustar a relação água/aglomerante, diminuindo a quantidade de água na mistura, afim de atingir a consistência desejada para a aplicação em revestimentos argamassados em paredes.

Segundo Brás (2013), as composições de argamassa com partículas pequenas de EPS geram um aumento do tempo aberto para a aplicação, entre 5 e 15 min, sem que prejudique a trabalhabilidade. As partículas de EPS, embora não absorventes de água, retêm água em seu

entorno, formando uma película, esse liquido é retido e absorvido pela fração de finos (diâmetro <100 μm) contido na argamassa. A fração grossa, variando de diâmetro entre 100 μm e 2 mm, geralmente são inertes, visto que os agregados não são reativos com os aglomerantes presentes na mistura (CARDOSO, 2009). Na figura 5, é observado a macro e microestrutura da mistura da argamassa, nela é possível visualizar a dispersão das frações de agregados (inertes) e aglomerantes (reativos).

Figura 5: Macro e microestrutura de uma argamassa.



Fonte: CARDOSO, 2009.

2.4.2. Porosidade

A granulometria dos agregados naturais, agregados leves e o volume de materiais finos na mistura desempenham propriedades fundamentais na microestrutura morfológica das argamassas. Barroca (2013), cita que a dimensão, quantidades e forma dos seus poros, fazem com que a estrutura porosa das argamassas leves seja maior do que as argamassas convencionais, melhorando o desempenho térmico das misturas.

O excesso de líquidos aumenta consideravelmente a quantidade de poros na mistura em estado endurecido. Com o calor de hidratação a água tende a evaporar, fazendo surgir espaços vazios dentro da mistura que, consequentemente, diminui a densidade (KOKSAL et al., 2020). Esses espaços geralmente são encontrados entre as zonas de ligação do aglomerante e o agregado, resultantes da cura da pasta e evaporação dos líquidos (SILVA, 2008).

Segundo Brás et al. (2013), a argamassa com a adição de EPS apresenta uma porosidade menor. Os resultados apontam o traço referencial com 0% de substituição com 30% de poros e

com substituição de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80%, com uma variação de 19% a 21% da porcentagem de poros na mistura endurecida com idade de 28 dias.

Koksal et al. (2020), descreve em seu estudo que a porosidade variou de 20% a 35% de poros para a argamassa com adição de 100% de partículas de EPS, em substituição do agregado natural. Além disso, há uma influência direta na proporção de poros com a quantidade de aglomerantes (cimento e cal) na mistura, sendo que com a inserção de uma proporção maior de finos, tendem a fechar a quantidade de poros na argamassa.

2.4.3. Densidade

As argamassas com agregados leves tendem a ter uma baixa densidade, quando comparadas com misturas com agregados normais. A adição de resíduo de EPS em proporções de substituição da areia natural faz com que a mistura aumente o volume, diminuindo sua densidade, por meio da partícula que contém em sua célula fechada uma sua composição 98% de ar incorporado (MILLING et al., 2020, DIXIT et al., 2019).

Miled et al. (2007) e Brás et al. (2013), descrevem que além da quantidade de EPS aplicada na mistura de argamassa, o diâmetro da partícula de EPS também tem influência na densidade da mistura de argamassa. Partículas de EPS com diâmetros menores preenchem os vazios e, consequentemente, proporcionam um leve aumento a densidade.

Um comparativo de alguns estudos com o uso do resíduo de EPS em diferentes proporções em substituição da areia natural em argamassas pode ser observado na Tabela 1. Os resultados evidenciam argamassas com densidade menores, proporcionalmente relativas à quantidade de EPS inserida na mistura, atingindo as menores densidade de massa a proporção de substituição de 84,50%, com uma densidade de 243 kg/m³, desenvolvido por Zhang et al. (2019), sendo atribuído diretamente a densidade específica do EPS, variando de 10-35 kg/m³, e a areia natural em média de 1500 kg/m³.

Tabela 1: Resultados de estudos relevantes para densidade de massa em estado endurecido.

Autor/ano	Agregado leve/Ø médio utilizado	Mistura	% de agregado leve	Densidade (kg/m³)
Brooks et al./ 2018	EPS/2,5mm	Argamassa	0 - 28,50	2044,15 - 1310,72
	EPS/1,0mm			2084,49 - 1300,15
Brás et al./ 2013	EPS/2mm		0 - 80	2050 – 1520
Boita et al. / 2019	EPS/≤ 3mm		0 - 40	1795 – 1404

Fonte: Autor, 2021.

2.4.4. Resistência à compressão e a tração na flexão

A resistência à compressão e a resistência a tração na flexão são usadas como parâmetros para determinar a classificação das argamassas quanto às diferentes aplicações. Essa classificação e aplicações podem ser consultadas na norma NBR 23281 (ABNT, 2005).

As partículas de EPS, quando aplicados em médias quantidades – em até 50%, os resultados mostram uma queda nas resistências mecânicas, porém ainda são considerados como aceitáveis para a utilização, atendendo os limites de resistências existentes na norma NBR 13281 (ABNT, 2005). Na Tabela 2, é possível observar alguns resultados para a resistência à compressão (RC) e a resistência à tração na flexão (RT).

Tabela 2: Resultados de resistências mecânicas em argamassas com EPS.

Autor/ano	Agregado leve/Ø médio utilizado	Mistura	% de agregado leve	RT (MPa)	RC (MPa)
Brás et al./ 2013	EPS/2mm	Argamassa	0 – 80	5,20 - 2,70	24,40 - 10,70
Boita et al. / 2019	EPS/≤ 3mm		0 – 40	1,08 - 0,90	3,84 - 3,42
Passos e Carasek/ 2018	EPS/≤ 5mm		0 – 90	1,78 - 0,71	4,13 - 0,70

RC – Resistência à compressão; RT – Resistência à tração na flexão.
Fonte: Autor, 2021.

Nos estudos recentes, há uma diminuição das resistências à compressão e à tração na flexão, contudo, Boita e Bellei (2019), apresentaram resultados com acréscimo de resistência para a argamassa com resíduo de EPS, em substituição do agregado miúdo. As proporções utilizadas no estudo foram de 10% e 20% de substituição, encontrando um aumento de 28,6% e 19,70%, respectivamente para à compressão e 18,50% e 1,85% para a resistência à tração na flexão. Já com porcentagens maiores foi encontrado redução dos resultados, quando comparados com o traço com percentual de substituição de 0%.

2.4.5. Variação dimensional

A expansão e a contração de argamassas com agregados leves podem ser relacionadas com algumas propriedades dos agregados como absorção e retenção de água (BAUER et al., 2015). Essas propriedades são relacionadas a quantidade de água inserida na mistura, sendo que quanto maior quantidade de água, maior a proporção de vazios, com isso, é observada uma força de retração, oriunda pela sucção que ocorre com a evaporação de líquidos dentro da mistura (VEIGA, 1998). A expansão da argamassa pode ser provocada por reações químicas,

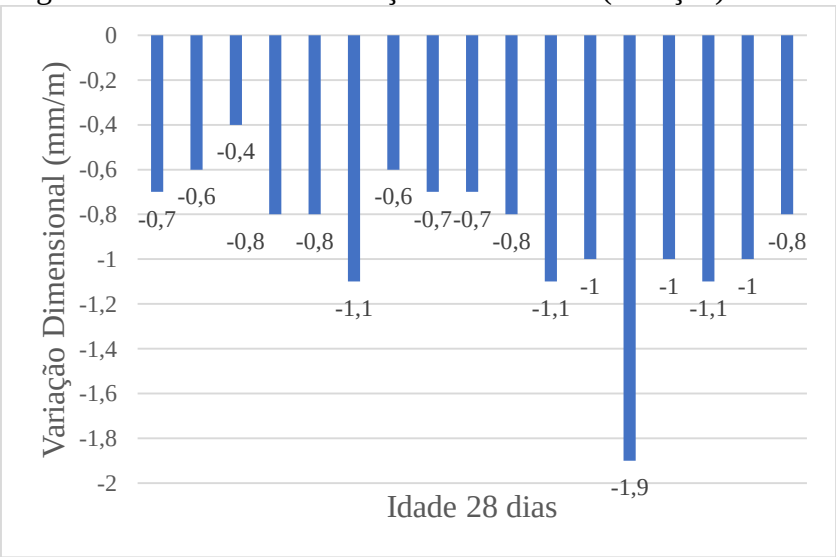
tais como excesso de finos, hidratação retardada da cal, excesso de umidade, dentre outros (BAUER et al., 2015).

Barroca (2013) descreve em seu estudo que o aumento do teor de finos, do aglomerante (cimento ou cal) ou da quantidade de água de amassadura são fatores fundamentais para melhorar a trabalhabilidade, porém seu efeito poderá afetar diretamente as propriedades da argamassa em estado endurecido, gerando fenômenos de calor de hidratação, fazendo com que haja uma variação de dimensões no revestimento, podendo ser de expansão ou retração.

Veiga (1998), descreve que as argamassas devem resistir às tensões induzidas pelos esforços de retração e expansão, sendo necessária para ter uma à resistência à fissuração do revestimento. Segundo o mesmo autor, esses esforços são devidos às partículas finas reativas dentro da mistura, onde ocorre um calor maior de hidratação, fazendo com que água se evapore rapidamente e gere esforços internos na mistura.

Bauer et al. (2015), apresenta resultados de variação dimensional para argamassas mistas para revestimento. Na Figura 6 é possível observar o gráfico da variação dimensional para a idade de 28 dias, para os quais os resultados mostraram uma variação dimensional média de 0,88 mm/m. Desta forma, essas argamassas podem ser enquadradas na faixa de 0,70 a 0,94 mm/m da norma NBR 13.281 (ABNT, 2005), sendo consideradas adequadas aos requisitos de desempenho para a aplicação em revestimentos.

Figura 6: Resultados de variação dimensional (retração).



Fonte: Autor, 2021; (Adaptado de Bauer et al., 2015).

2.4.6. Absorção de água por imersão total e índice de vazios

Segundo a norma NBR 9778 (ABNT, 2005), a absorção da água por imersão e índice de vazios caracterizam-se pela imersão dos corpos de prova, afim de determinar a porcentagem de poros permeáveis que contém no molde poroso, analisando a quantidade de água que tende a ocupar os vazios permeáveis do molde de argamassa em relação a sua massa seca. A absorção de água e o índice de vazios tendem a ter um mesmo comportamento em argamassas convencionais, pois os moldes tenderão a absorver mais água quando submerso, proporcionalmente ao índice de vazios presentes no molde de argamassa (ZAPARTE; OLIVO, 2020).

Olivo (2020), encontrou valores de absorção de água e de índice de vazios para a argamassa convencional, variando de 15,70% a 17,80% e 27,50% a 29,50%, respectivamente. Esses resultados com a idade de 28 dias, e moldes com dimensões de 40x40x160 mm.

Zaparte (2020), afirma que o tamanho das partículas influência na quantidade de água absorvida, sendo quanto menor a partícula do agregado incorporado, maior o preenchimento e acomodação das partículas dentro da mistura. Desta forma, o menor tamanho das partículas dos agregados influencia na absorção de água e índice de vazios, isto é, diminuindo o tamanho das partículas a absorção de água e indicies de vazios diminuem.

Nas argamassas com resíduo de EPS, Pczieczek et al. (2018), verificou em seu estudo as propriedades de absorção de água por imersão total e o índice de vazios. Com as proporções de substituição de 7,5% e 15%, e com partículas <1mm, apresentou resultados superiores ao traço referencial em 11,38% e 21,06%, para absorção de água e 9,09% e 12,12%, para o índice de vazios. Esse comportamento é observado é nos estudos de Torres et al. (2009).

2.4.7. Condutividade Térmica

A condutividade térmica é uma característica presente em todos os materiais, sendo atribuída a capacidade de condução de calor definida pelo fluxo de calor e a diferença de temperatura atribuída (WENDT, 2006).

A condutividade térmica tem sido uma propriedade fundamental em argamassas de revestimento, sendo uma característica essencial para atender as exigências de desempenho das edificações na norma NBR 15.575 (ABNT, 2013). Diversos autores (BRÁS et al., 2013; PASSOS E CARASEK, BROOKS et al., 2018, BOITA et al., 2019; SILVA et al., 2019, entre outros) tem usado resíduos de materiais com propriedades térmicas em substituição de

agregados em argamassas, com um de seus objetivos principais melhorar o desempenho de isolamento térmico presente na argamassa.

A adição de partículas de EPS em misturas cimentícias tem sido utilizado em alguns estudos (HUANG, 2020; PASSOS E CARASEK, 2018, GOMES, 2018; WENDT, 2006), pois suas características induzem à uma baixa condutividade térmica, visto que em suas partículas são formadas por 98% de ar, formando vazios enclausurados dentro da mistura da argamassa. Wendt (2006), cita que a substituição de um agregado de origem mineralógica, pelo resíduo de EPS reduz consideravelmente a condutividade térmica, visto que a areia natural possui conduz de 3,5 W/m.K., enquanto o EPS conduz apenas 0,04 W/m.K, tendo uma redução de 98,85%.

Na Tabela 3 é possível observar alguns resultados de estudos realizados recentemente.

Tabela 3: Resultados de condutividade térmica em argamassas com EPS.

Autor/ano	Agregado leve/Ø médio utilizado	Mistura	% de agregado leve	Condutividade Térmica (W/m.K)
Brooks et al./ 2018	EPS/2,5mm	Argamassa	0 - 28,50	2,45 - 0,86
	EPS/1,0mm			2,50 - 0,69
Brás et al./ 2013	EPS/2mm		0 - 80	1,70 - 0,65
Passos e Carasek / 2018	EPS/≤ 5mm		0 - 90	1,19 - 0,14

Fonte: Autor, 2021.

2.4.8. Aderência

A aderência é uma propriedade responsável pela fixação e pelo suporte do revestimento no substrato e pode ser considerada como a principal característica das argamassas de revestimento (PASSOS E CARASEK, 2018).

Barroca (2014) e Veiga (1998) descrevem que uma aderência eficiente é fundamental, para combater a fissuração dos revestimentos, absorvendo as tensões geradas por esforços externos, além de influenciar na impermeabilização e durabilidade do revestimento.

Na execução do revestimento é necessário observar a superfície de apoio, sendo necessária uma retirada de impurezas presentes na área de contato para não prejudicar a aderência (BARROCA, 2014). Para obter uma maior aderência, é necessária uma maior área de contato entre o revestimento e o substrato, podendo ser realizadas ranhuras, para aumentar a rugosidade da parede e melhorar absorção (porosidade) da fase entre o revestimento e o substrato (PASSOS E CARASEK, 2018).

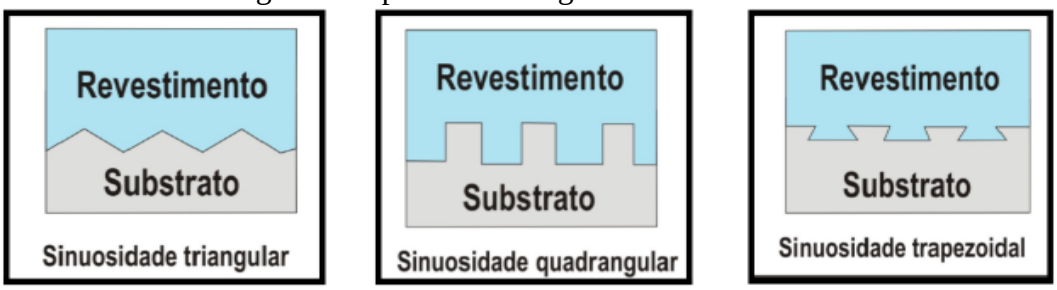
Martins (2008) descreve que a aderência pode ser prejudicada quando há uma baixa e uma alta absorção de água do substrato, sendo que quando possui um excesso de poros, a água

é absorvida demais fazendo com que haja um ressecamento na zona de suporte, e quando possui baixa porosidade, o líquido não penetrado nos poros, prejudicando a aderência.

Com a inserção de resíduos de EPS, a aderência é prejudicada devido ao contato do resíduo na zona de suporte do substrato (BARROCA, 2014). Sendo assim, quanto maior o incremento de EPS, menor a área de contato do substrato com o revestimento, diminuindo a ligação de revestimento e comprometendo a resistência à aderência.

Costa (2007) evidenciou a existência de, basicamente, três tipos de ancoragem: triangular, quadrangular e trapezoidal, conforme visto na Figura 7. A área superficial é aumentada em função dos três tipos de ancoramento. O travamento quadrangular provoca o atrito que gera tensões na interface entre o revestimento e o substrato. O travamento trapezoidal é representado na forma de ancoragem mecânica mais eficientes, cujos travamentos ocorrem no substrato, dificultando o arrancamento de revestimento, sendo que os efeitos das forças são transmitidos de acordo com as propriedades mecânicas dos materiais.

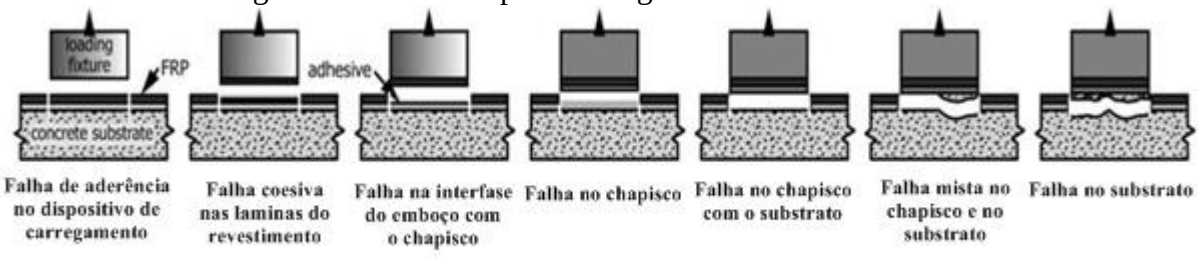
Figura 7: Tipos de ancoragem no revestimento.



Fonte: Costa, 2007; Passos e Carasek, (2018)

A ruptura da argamassa de revestimento do ensaio de aderência à tração normalmente pode ser classificada em diversas formas de rupturas, conforme observado na Figura 8, a diferentes formas de arrancamento no teste de aderência, conforme a norma D7522 e D7522M-15 (ASTM, 2015)

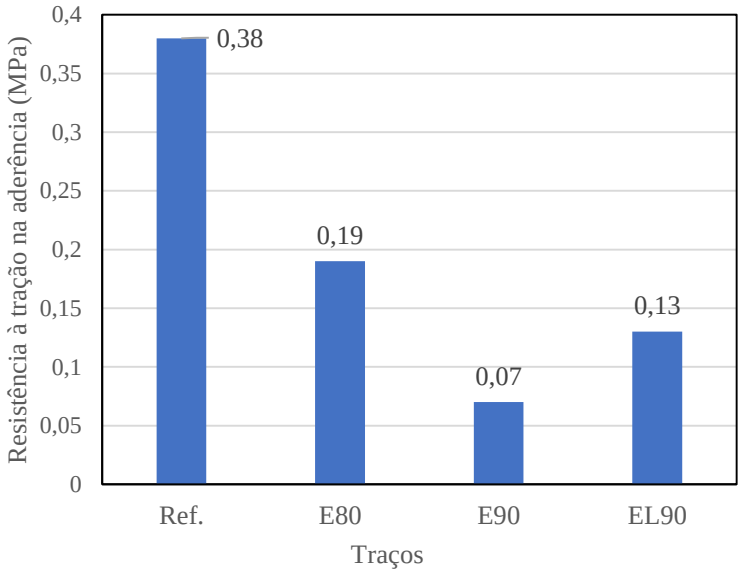
Figura 8: Modo de ruptura de argamassas de revestimento.



Fonte: ASTM D7522/D7522M-15, 2015.

Passo e Carasek (2018) mostram, em seu estudo, que as adições de partículas de EPS na argamassa de revestimento alteraram significativamente a propriedade de aderência. Esse estudo utilizou 3 principais traços, sendo um traço de referência, e os outros dois com 80% e 90% de EPS em substituição ao agregado natural. Também, um traço com 90% de EPS reforçado com fibras de vidro foi estudado. Os resultados obtidos, os quais podem ser observados na Figura 9, não estão de acordo com os resultados previstos para a aplicação em argamassas de revestimento.

Figura 9: Resultados tração na aderência em argamassas com EPS.



Fonte: Passos e Carasek, 2018.

2.4.9. Resistência à incêndios

As argamassas de revestimento possuem papel importante em situações de incêndios, pois uma de suas funções é de isolamento dos elementos de vedação e estruturais (RAMÍREZ et al., 2020; FOMOSA et al., 2011). O TRRF (tempo requerido de resistência à incêndios) é fundamental para que o calor atuante retarda o aquecimento das estruturas, que por sua vez promova o colapso das edificações. O TRRF mínimo exigido para edificações habitacionais com até 5 pavimentos, pelo Corpo de Bombeiro é 30 minutos, conforme estabelecido na tabela A na IT 08 (CB, 2011).

Jimenez et al. (2006) destaca, que a proteção da argamassa é fundamental para os elementos estruturais, sendo que o aço estrutural tem uma perda considerável de capacidade de carga quando atinge a temperatura de 500 ºC. Sayadi (2016), descreve que a adição do EPS na

pasta de cimento provoca uma queda de densidades e diminuição das resistências mecânicas em temperaturas acima de 160ºC, devido ao derretimento das partículas de EPS. O EPS do tipo F, em contato com altas temperaturas (acima de 100 ºC) tende a se encolher ou derreter e inibir a propagação do fogo (ZHOU et al., 2018).

No Brasil, não existe uma normatização especifica para as argamassas em situação de incêndio, já para concretos existe a norma NBR 15200 (ABNT,2012), a qual especifica as perdas de resistências mecânicas em percentuais de massa do concreto, de acordo com a temperatura e tempo de exposição do material no fogo. A mesma norma descreve, para um TRRF de 30 min, uma diminuição de resistências características de 15%, 40% e 70%, com temperaturas de 300 ºC, 500 ºC e 700 ºC, respectivamente. Nas normatizações estrangeiras, tais como a EN 1366-3 (ES, 2009) e BS 476 (ISC, 2011), citam o tempo de resistência à incêndios entre a faixa de tempo entre 20 e 240 min.

Jimenez et al. (2006) observou uma diminuição de densidade das argamassas em diferentes faixas de temperaturas, sendo a primeira entre 100 ºC a 180 ºC com uma queda de densidade de 15%, a segunda faixa entre 180 ºC a 500 ºC, uma queda de densidade de 25%, e uma terceira faixa de 500 ºC a 800 ºC, com uma queda de densidade de 35%.

Os resultados obtidos por Ramírez et al. (2020) sobre a resistência ao fogo em argamassas convencionais expostas a temperatura média de 700 ºC, mostram diminuição de resistência à tração na flexão de 92,8%. Já nos resultados de resistência à compressão houve uma diminuição de resistências de 30,25%. O ensaio realizado pelo autor pode ser observado na Figura 10.

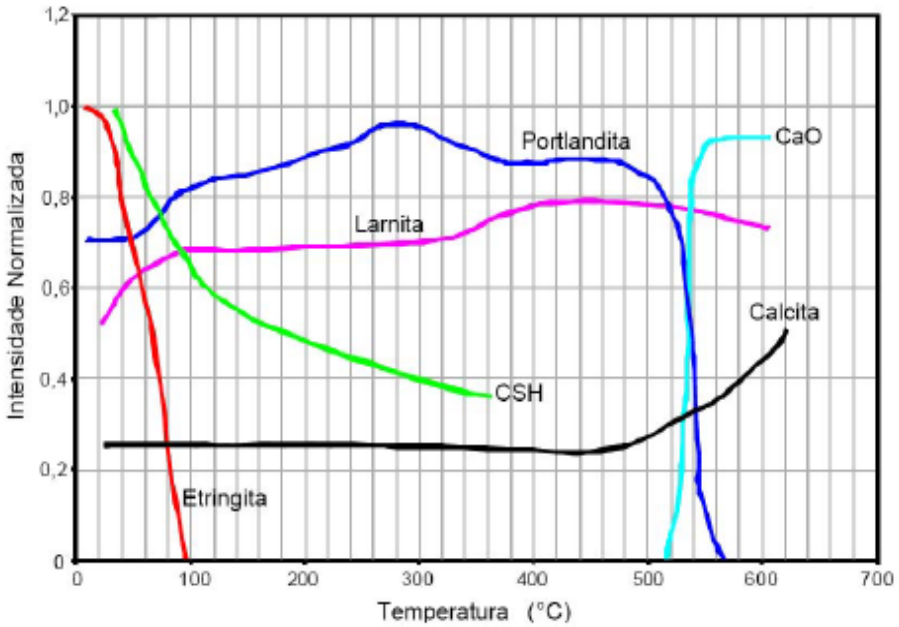
Figura 10: Ensaio de resistência ao fogo em argamassas.

Fonte: Ramírez et al., 2018.

Formosa et al. (2011), descreve o processo de liberação de líquidos e decomposição das argamassas expostas em diferentes faixas de temperaturas, sendo acima de 100 ºC, tendem a liberar a água livre presente nos poros da mistura, na faixa de temperatura entre 100 ºC e 300 ºC, ocorre a liberação da água presente na química da mistura, já com a exposição com a temperatura acima de 450 ºC, ocorre a decomposição da portlandita. Contudo, Wendt (2006) cita que com uma exposição à uma temperatura acima de 480 ºC ocorre a desidratação do hidróxido de cálcio, sendo responsável pela mudança de volumes na argamassa, essa retração pode chegar a 33%, podendo causar fissuras que contribuem para a diminuição das resistências mecânicas da mistura.

Wendt (2006) identificou 6 tipos de fases cristalinas durante o aquecimento de pastas de cimentícias: a portlandita, etringita, calcita, oxido de cálcio, CSH e larnita. Essas fases foram identificadas por difrações de nêutron. Os resultados, apresentados na Figura 11, indicam, após a decomposição da portlandita e a partir da temperatura 480 ºC, uma diminuição do CSH da mistura e o surgimento do óxido de cálcio.

Figura 11: Monitoramento das fases das pastas em diferentes temperaturas.



Fonte: Wendt, 2006.

Bessey (1950) estudou as cores das argamassas em situações de incêndio. Os resultados apresentados retratam 4 faixas de temperaturas em que são visíveis diminuições de resistência mecânicas à tração na flexão e à compressão e mudanças de coloração e das argamassas, sendo:

- 300 ºC, onde é predominante uma cor cinza;

- 500 ºC e 600 ºC, a cor passa para um cinza avermelhado.
- 1000 ºC, a cor passa-se a ser amarelada;
- Acima de 1200 ºC, é variável, de acordo com a porcentagem de oxido de ferro presente na mistura.

Na Tabela 4, é apresentado uma relação da coloração de argamassas com a resistência mecânica, conforme descrito por Bessey (1950), assim como demais autores (WENDT, 2006; LUA E LIN, 2005; YUZER, AKOZ E OZTURK, 2004) descrevem resultados dos estudos para as argamassas expostas em altas temperaturas.

Tabela 4: Relação de cor e resistência à tração na flexão (RT) e à compressão (RC) nas argamassas expostas à altas temperaturas.

Temperatura (ºC)	Argamassa A (areia com baixo teor de ferro)		Argamassa A (areia com alto teor de ferro)	
	Aparência	Perda de resistência à RT e RC	Aparência	Perda de resistência à RT e RC
Sem aquecimento	Cinza	-	Amarelado	-
200	Cinza escuro	<5%	Nenhuma mudança	<5%
250	Cinza escuro	10%	Nenhuma mudança	8%
300	Rosa claro	25%	Rosa	15%
400	Rosa um pouco mais intenso do que a 300 ºC	35%	Rosa intenso	24%
600	Idêntico aos 400ºC	70%	Rosa intenso	55%
800	Escuro, mas não rosa	>90%	Vermelho intenso	75%
900	Cinza claro	>90%	Vermelho intenso	>90%
1000	Cinza mais claro	>90%	Rosa muito claro	>90%

Fonte: Autor, 2021; Adaptado de Bessey (1950).

O modo de resfriamento citado por Formosa (2011) e Wendt (2006), tem um fator importante, podendo ter perdas mais visíveis de resistência com o tipo de resfriado, no qual, pode ser lento ou brusco. O resfriamento lento é realizado por meio da troca de calor com o ar ambiente, diminuindo a temperatura lentamente, enquanto o resfriamento brusco é realizado

por meio de água, ocasionando numa perca grande de temperatura em contato com o liquido. Carvalho (2011), descreve que situações de incêndio, a ação do corpo de bombeiro em apagar o fogo, tende a utilizar água fria no combate às chamas de fogo, ocasionando num resfriamento brusco das argamassas e concreto nas edificações, podendo ter reduções significativas nas resistências mecânicas, conforme apresentado as reduções de resistências mecânicas à compressão em moldes com resistência característica de 15 MPa e 25 MPa na Tabela 5.

Tabela 5: Redução de resistência à compressão de diferentes modos de resfriamento após aquecimento.

	Temperatura (ºC)				
15 MPa	400	500	600	700	800
Ruptura à quente	70,9%	62,5%	59,7%	59,1%	49,1%
Resfriamento brusco	73,6%	58,7%	55,3%	48,3%	30,7%
Resfriamento lento	84,1%	82,3%	76,8%	56,7%	38,5%
25 MPa					
Ruptura à quente	70,1%	72,9%	63,8%	56,0%	47,0%
Resfriamento brusco	76,6%	72,3%	64,2%	58,7%	47,7%
Resfriamento lento	87,7%	79,2%	73,8%	71,7%	44,4%

Fonte: Autor, 2021; Adaptado de Carvalho (2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram produzidas argamassas de revestimento com adição de resíduos de EPS em substituição à areia natural. A execução do trabalho foi subdividida em uma etapa preliminar, em que foi feita a coleta, preparação e caracterização dos materiais utilizados e, posteriormente, a etapa de confecção dos corpos de prova para análises das argamassas de revestimento. Para melhor compreensão, as etapas podem ser visualizadas no fluxograma experimental da Figura 12.

Figura 12: Fluxograma experimental.

Fonte: Autor, 2020.

3.1 Materiais

3.1.1. Cimento

A argamassa de revestimento foi produzida utilizando o cimento Portland CPII–Z 32. Esse cimento foi escolhido porque, segundo a NBR 1669, possui adição de material pozolânico, com 18,5% de sua massa, e sua finura é menor ou igual a 12%. Essas propriedades garantem menor permeabilidade, que é ideal para revestimentos, e uma hidratação mais lenta que proporciona uma menor fissuração. Também, segundo Brooks (2013), o material pozolânico confere ao cimento um menor calor de hidratação, sendo fundamental para diminuir os efeitos de retração por secagem e a fissuração.

As especificações do cimento utilizado, conforme dados obtidos pelo fabricante, juntamente com os limites normatizados (NBR 16.697 (ABNT, 2018)) são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Caracterização do cimento.

Propriedades	Parâmetros		Unidade	Exigência (NBR 16697:2018)	Cimento Utilizado (Dados do fabricante)
Química	Óxido de Magnésio (MgO)		%	-	3,9
	Trióxido de Enxofre (SO_3)		%	≤ 4,5	3,5
	Perda ao fogo		%	≤ 8,5	6,6
	Resíduo Insolúvel		%	≤ 18,5	16,8
Física e Mecânica	Finura	0,075	%	≤ 12,0	10,8
	Tempo de pega	Início de pega	Min	≥ 60	240
		Fim de pega	Min	≤ 600	456
	Resistência à compressão	03 dias	MPa	≥ 10,0	13,53
		07 dias	MPa	≥ 20,0	24,88
		28 dias	MPa	≥ 32,0	36,4

Fonte: Autor, 2020.

3.1.2. Cal Hidratada

A cal hidratada utilizada foi a CH – III, a qual é atestada pelos requisitos exigidos pela NBR 7175 (ABNT, 2003). A cal hidratada foi utilizada para obter mais trabalhabilidade, diminuição da absorção de água e diminuição dos índices de vazios na argamassa (SILVA e CAMPITELI, 2006). Também, a cal hidratada foi usada para aumentar a plasticidade das argamassas, permitindo maiores deformações sem formação de fissuras, e para aumentar a

retenção de água no amassamento, proporcionando uma melhor aderência em argamassas de revestimento (SANTOS, 2014).

As especificações da cal hidratada são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Caracterização da cal hidratada.

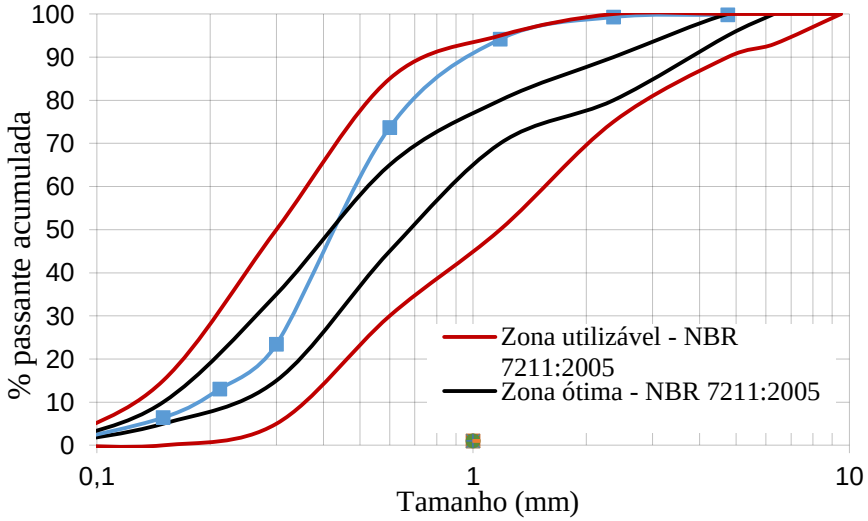
Propriedades	Parâmetro		Unidade	Exigência (NBR 7175:2003)	Cal hidratada CHIII Utilizada (Dados do fabricante)
Química	Anidrido carbônico (na fábrica)		%	≤ 13,00	11,53
	Óxido de cálcio e magnésio não hidratado		%	≤ 15,00	14,06
	Óxido totais não voláteis		%	≥ 88,00	93,52
Física	Finura	0,600	%	≤ 0,50	0,47
		0,075	%	≤ 15,00	14,88
	Retenção de água		%	≥ 70,00	75,00
	Incorporação de areia		%	≥ 2,2	3,00
	Plasticidade		%	≥ 110,00	114,50

Fonte: Autor, 2020.

3.1.3. Agregado Miúdo

Foi selecionada a areia natural extraída na região de Santa Maria/RS para a confecção da argamassa de revestimento. A curva de distribuição granulométrica da areia foi obtida seguindo-se os procedimentos da NBR 7211 (ABNT, 2005), estando dentro da zona utilizável. A curva granulométrica pode ser observada na Figura 13.

Figura 13: Curva granulométrica areia natural.



Fonte: Autor, 2020.

O formato dos grãos da areia natural pode ser visto na Figura 14. As partículas desse agregado apresentam um formato arredondados, com uma textura porosa, possuindo grande quantidade de materiais com dimensões <500 ɥm em sua porção.

Figura 14: Partículas da areia natural

Fonte: Autor, 2020.

As características da areia, quanto seu módulo e finura e massa específica são observadas na Tabela 8, os valores podem ser comparados com as exigências normativas.

Tabela 8: Propriedades da areia natural

Propriedades	Utilizada	Valores normativos tabelados
Módulo de Finura	3,10	2,40 - 3,30
Massa Unitária (kg/m³)	1530	1300-1600

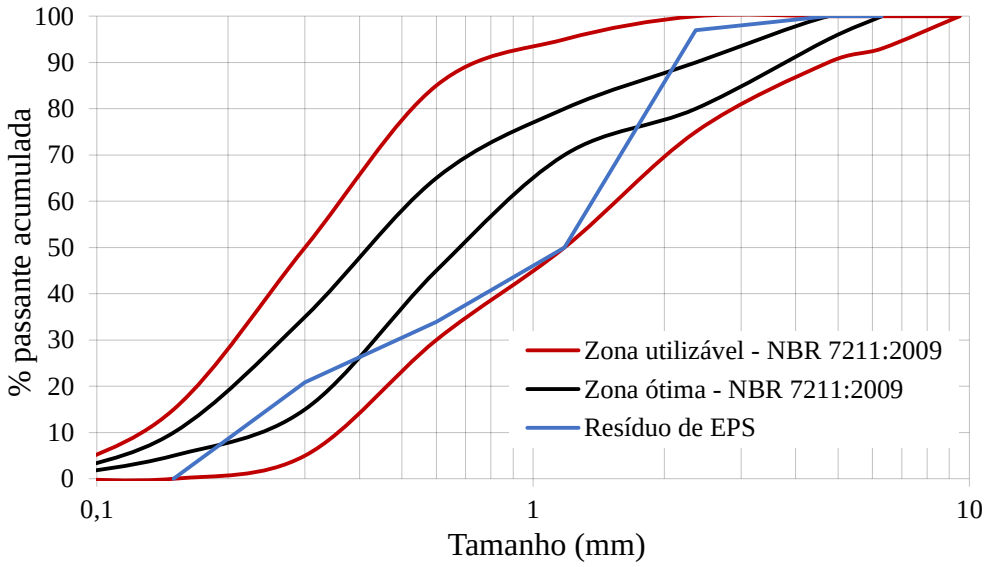
Fonte: Autor, 2020.

3.1.4. Resíduo de EPS

O resíduo de EPS empregado no estudo foi coletado na cidade de Passo Fundo, sendo classificado como o tipo F, retardante ao fogo. Esse resíduo é proveniente de embalagens de produtos eletroeletrônicos. O resíduo foi processado com um moinho de facas, em intervalos de 2 minutos e peneirado até que atingisse uma granulometria passante na peneira 2,36 mm de diâmetro. A Figura 15 mostra a curva granulométrica do resíduo processado (como foi

empregado na pesquisa). A curva expõe os limites utilizados em agregados conforme a norma NBR 7211 (ABNT, 2005).

Figura 15: Curva granulométrica resíduo de EPS.



Fonte: Autor, 2020.

O resíduo de EPS *in natura* pode ser observado na Figura 16(a), sendo retirado impurezas (poeira, resíduos orgânicos, dentre outros) por com uma espátula e posteriormente triturado, conforme visto na Figura 16(b). A Figura 16(c) mostra uma imagem ampliada das partículas do resíduo. Esse resíduo apresenta uma partícula com formas irregulares e com uma textura rugosa e uniforme, podendo potencializar a aderência com a pasta cimentícia.

Figura 16: Resíduo de EPS

(a) (b) (c)

Fonte: Autor, 2020.

As características do resíduo do EPS, quanto seu módulo e finura e massa especifica, é observado na Tabela 9, os valores podem ser comparados com as exigências normativas.

Tabela 9: Propriedades do resíduo de EPS.

Propriedades	Utilizada	Valores normativos tabelados
Módulo de Finura	2,55	2,40 - 3,30
Massa Unitária (kg/m³)	12	-

Fonte: Autor, 2020.

3.2. Produção da argamassa

A mistura dos materiais foi realizada de acordo com a especificação da norma NBR 16541 (ABNT, 2016). Experimentos prévios foram realizados para determinar as proporções (traço) de materiais para a argamassa de revestimento com adição de resíduos de EPS. Um traço de 1:1:6 (cimento, cal e areia), em volume, foi utilizado. A quantidade de água foi adicionada ajustando o índice de consistência em 240 ± 10 mm. A sequência da mistura dos materiais pode ser observada no fluxograma da Figura 17.

Figura 17: Fluxograma de amassamento da mistura.

Fonte: Autor, 2020 (Adaptado de Silva, 2020).

Na Figura 18(a) pode ser observado o EPS adicionado na argamassa e na Figura 18(b) observa-se a o EPS homogeneizado após o amassamento da mistura.

Figura 18: (a) EPS adicionado à pasta cimentícia e (b) EPS misturado

(a) (b)

Fonte: Autor, 2021.

O traço utilizado como referência para o experimento foi de 1: 1: 6 (cimento: cal: agregado miúdo), sendo substituído porções (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) do agregado miúdo (areia natural), por resíduos de EPS triturados (<2,26 mm). Os materiais utilizados, em volume, são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Composição dos traços experimentais.

Descrição	Cimento	Cal	Areia Natural	R-EPS	Relação a/a
	(Volume)	(Volume)	(Volume)	(Volume)	(Massa)
RF	1	1	6	-	1,0
E10	1	1	5,4	10%	0,95
E20	1	1	4,8	20%	0,90
E30	1	1	4,2	30%	0,85
E40	1	1	3,6	40%	0,80
E50	1	1	3	50%	0,75

Fonte: Autor, 2021

No estudo foi realizada a caracterização dos agregados quanto à sua granulometria e forma dos grãos. As análises foram realizadas por meio de inspeção visual, através de um microscópio ótico.

Para os ensaios em estado fresco foi fixado o índice de consistência em 240 ± 10 mm, medindo-se a densidade das argamassas. No estado endurecido foram observadas as resistências mecânicas à compressão e à tração na flexão, densidade, massa específica saturada, seca e real, a variação dimensional, a absorção de água por imersão total e o índice de vazios dos CP's.

Para avaliar a utilização em revestimento, foi realizado o ensaio de aderência à tração em paredes. Para o desempenho térmico foi realizado o ensaio de condutividade térmica, através do método do fio quente, capaz de determinar o fluxo de calor em função do tempo que o material conduz.

A análise do material em situação de incêndios, avalia o comportamento do material em exposição em diferentes temperaturas por tempo determinado, sendo verificada a perca de massa e a perda de resistência mecânica à compressão e tração na flexão.

Uma análise visual por meio de imagens registradas com o auxílio de um microscópio ótico foi realizada para a verificação da ligação do resíduo com a pasta cimentícia, dispersão do material nos moldes e verificação do comportamento da argamassa exposta em altas temperaturas.

Por meio de uma análise de estatística nos resultados obtidos é possível afirmar com 95% de confiança a predominância das variáveis que são significantes para alteração dos resultados obtidos.

Os ensaios foram seguidos conforme as normas brasileiras vigentes, e com o auxílio de algumas normas estrangeiras. Os ensaios desenvolvidos no estudo, assim como o número de ensaios, tipo de molde utilizado e a norma utilizada é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Ensaios experimentais.

Variáveis respostas	Tipo de corpo de prova	Dimensão (mm)	Nº de Ensaios	Norma Utilizada
Índice de Consistência	Fresco	-	6	ABNT NBR 13276/2016
Densidade em estado fresco	Fresco	-	18	ABNT NBR 13278/2005
Resistência à compressão	prismático	40x40x160	96	ABNT NBR 13279/2005
Resistência à tração na flexão	prismático	40x40x160	192	ABNT NBR 13279/2005
Absorção de água por imersão	prismático	40x40x160	18	ABNT NBR 9778/2005
Índice de vazios/Densidade seca e saturada	prismático	40x40x160	54	ABNT NBR 9778/2005
Densidade em estado endurecido	prismático	40x40x160	96	ABNT NBR 13280/2005
Variação dimensional	prismático	25x25x285	18	ABNT NBR 15261/2005
Aderência	cilíndrico	50	72	ABNT NBR 13528/2019
Condutividade térmica	prismático	100x300x30	18	DIN EN 51046/1976
Resistência à incêndios/perca de massa/resistência à compressão e tração na flexão	prismático	40x40x160	72	ABNT NBR 15200/2012, CB IT 08/2011
		TOTAL	**678**	

Fonte: Autor, 2021

3.3. Caracterização da Argamassa – Estado Fresco

3.3.1. Índice de consistência

Foram realizados ensaios para fixação de parâmetros da argamassa de revestimento, sendo fixado o índice de consistência em 240 ± 10 mm. O ensaio de espalhamento, realizado com base na NBR 13276 (ABNT, 2016).

A Figuras 4 apresenta as etapas do ensaio de consistência, o molde de tronco cônico, mistura e adensamento após os golpes de adensamento. Na Figura 19(a), a mistura é colocada no cone padronizado e adensado em camadas com 30 golpes. Na Figura 19(b) foi retirado o molde cônico e com auxílio da mesa de consistência é gerado energia na mistura através de impactos. Na Figura 19(c) é feita a medição dos diâmetros da mistura após aplicação dos impactos gerados pela mesa de consistência.

Figura 19: Etapas do ensaio de consistência

(a) (b) (c)

Fonte: Autor, 2020.

3.3.2. Densidade de Massa - fresco

A densidade de massa foi realizada conforme especificação da norma NBR 13281 (ABNT, 2005). Para medição foi utilizado uma balança de precisão 0,01g, registrando a densidade do corpo de prova vazio e posteriormente com a argamassa, obtendo os resultados através da relação entre seu volume e uma densidade de massa.

3.4. Caracterização da Argamassa – Estado Endurecido

3.4.1. Resistência mecânica à compressão e tração na flexão

Para esse ensaio foram moldados 4 corpos de prova por traço, com dimensões de 40x40x160 mm, os quais foram adensados manualmente e rompidos aos 7, 14, 21 e 28 dias, conforme norma NBR 13279 (ABNT, 2005). A prensa hidráulica, marca EMIC modelo PC 100 C (EMIC-PC100C, Instron, Norwood, MA, EUA) foi utilizada para o ensaio de resistência à

compressão. Para os ensaios de resistência à tração na flexão foi utilizada uma máquina universal de ensaio Instron EMIC EL 2000.

3.4.2. Variação dimensional

Para esse ensaio foram moldados 3 corpos de prova por traço, com dimensões de 25x25x285 mm. As leituras da variação dimensional foram realizadas nas idades de 1, 7 e 28 dias, com o equipamento digital com precisão de 0,01 mm, conforme especificação da norma NBR 15261 (ABNT, 2005). O equipamento utilizado no ensaio pode ser observado na Figura 21.

3.4.3. Densidade de massa no estado endurecido

O ensaio de densidade de massa no estado endurecido foi realizado com 4 CP's para cada uma das misturas, sendo os moldes com dimensões de 40x40x160 mm e idades de ensaio de 7, 14, 21 e 28 dias. Para medição foi utilizado uma balança de precisão 0,01g, registrando a massa dos CP's e, sequencialmente, calculando a densidade de acordo com o volume dos corpos de prova.

3.4.4. Absorção de água, índice de vazios, massa específica seca e saturada

Os corpos de prova desenvolvidos para os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios, massas específicas (seca e saturada) tinham dimensões de 40x40x160 mm. Essas propriedades foram determinadas de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2005) para uma idade de 28 dias.

3.4.5. Resistência de aderência à tração

Para verificar a resistência de aderência à tração, as argamassas foram aplicadas em uma parede com tijolos de vedação de 6 furos, com dimensões de 14x19x11,5 cm. Entre o revestimento e o substrato foi aplicado um chapisco rolado com o traço de 1:2,5 (cimento e areia) até o cobrimento total do substrato. A argamassa de revestimento foi aplicada após 3 dias em relação à aplicação do chapisco. Um gabarito de madeira foi utilizado para garantir uma espessura de 2,5 cm de revestimento e a regularização da superfície. Após 27 dias foram realizados os cortes circulares no revestimento e a colagem das partilhas metálicas com uma cola epóxi. O arrancamento foi realizado, na idade de 28 dias, com um equipamento de torque

manual conforme mostrado na Figura 20. O ensaio foi realizado de acordo com as especificações da norma NBR 13528 (ABNT, 2010).

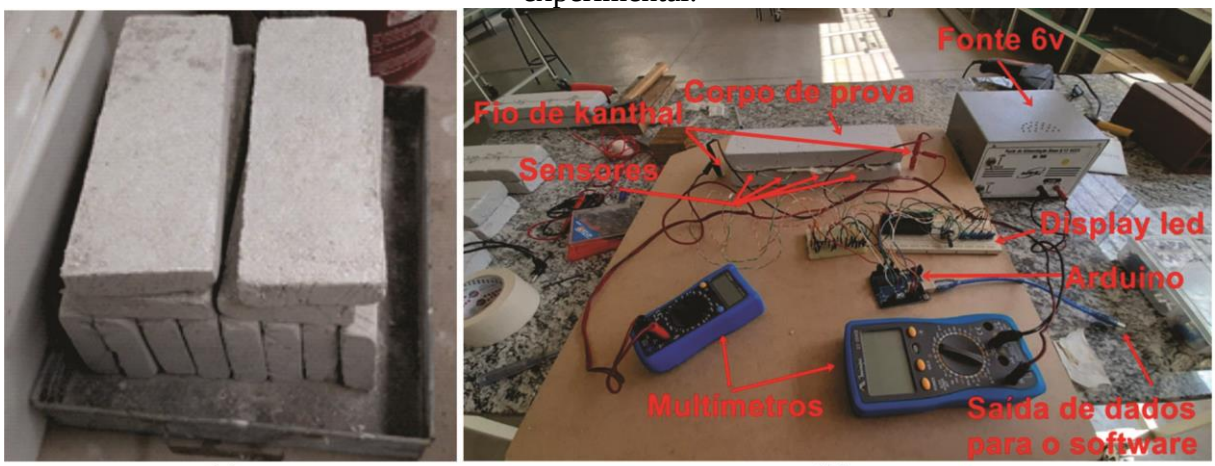
Figura 20: Ensaio de aderência.

Fonte: Autor, 2020

3.4.6. Condutividade térmica

Os corpos de prova para o ensaio de condutividade térmica foram confeccionados com dimensões de 300x100x30 mm (Figura 21(a)). Na Figura 21(b), tem-se o aparato experimental utilizado. A condutividade térmica foi determinada através da técnica de fio quente superficial. Esta técnica já foi corroborada como uma variante do fio quente paralelo por vários autores (FRANCO, 2007; SACHT et al., 2010; AKIYOSHI et al., 2001; GRAZZINI, et al., 2005; SANTOS, 2002; LERMEN et al., LERMEN et al., 2019), e caracteriza-se por ser um método direto que detecta a temperatura transiente. O Sistema experimental consiste em dois multímetros para determinar a corrente elétrica e a voltagem, dois corpos de prova em forma de paralelepípedos, um fio quente (kanthal de 0,5 mm de diâmetro) conectado a uma fonte de potência, quatro sensores de temperatura (NTC) e um sistema de aquisição de dados. Os sensores de temperatura foram calibrados para um intervalo de 0 °C a 100 °C.

Figura 21: (a) Corpos de prova para o ensaio de condutividade térmica e (b) aparato experimental.



(a) (b)

Fonte: Autor, 2020.

3.4.7. Desempenho em situações de incêndio

Para a verificação do desempenho em situações de incêndio, os CPs foram expostos a temperaturas de 300ºC, 500ºC e 700 ºC em uma mufla. As densidades foram medidas antes e depois da exposição. Para esses ensaios foi determinado um tempo de exposição (TRRF) de 30 minutos, conforme especificação na IT 08 (CB, 2011). Três corpos de prova para cada traço foram produzidos com dimensões de 40x40x160 mm e foram ensaiados com a idade de 28 dias. O resfriamento foi realizado em temperatura ambiente (25 °C) por 6 horas. Após verificação da perda de massa, os corpos de prova foram encaminhados para o ensaio destrutivo de resistência à tração na flexão e à resistência à compressão. Na Figura 22 pode ser observada mufla com os corpos de prova inseridos.

Figura 22: Ensaio de resistência à incêndios.

Fonte: Autor, 2021

3.4.8. Análise por imagem

Após os ensaios destrutivos foram registradas imagens por meio de uma lupa digital. Essas imagens foram feitas para verificar as zonas de transição entre o resíduo de EPS e a pasta cimentícia, a dispersão do EPS e os agregados naturais, a porosidade e o cobrimento da pasta cimentícia.

3.4.9. Análise estatística

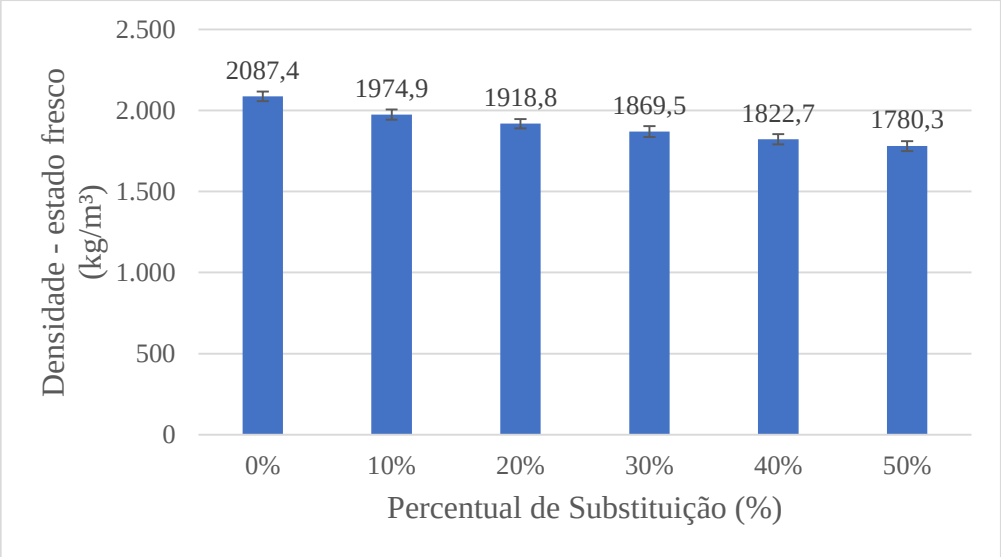
Para cada projeto experimental foram aplicados testes de normalidade e análise de variância. Também, o teste de Tukey foi utilizado para determinar se havia diferença entre os valores encontrados das variáveis respostas. Na análise de variância foram determinados os valores de F e p-valor, os quais são utilizados para testar estatisticamente a igualdade entre médias e verificar o nível de significância, respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Densidades de Massa no Estado Fresco

As densidades de massa mostram que os resultados esperados foram atendidos, isto é, uma densidade abaixo de 2000 kg/m³ foi alcançada ao adicionar partículas de EPS. Isso pode ser observado no gráfico da Figura 23.

Figura 23: Resultados de densidade de massa em estado fresco.



Fonte: Autor, 2021

Observa-se que à medida que o volume de agregado natural é substituído por EPS, a mistura tende a ficar com uma densidade menor, obviamente pelo fato do resíduo de EPS ser um material com menor densidade que a areia natural.

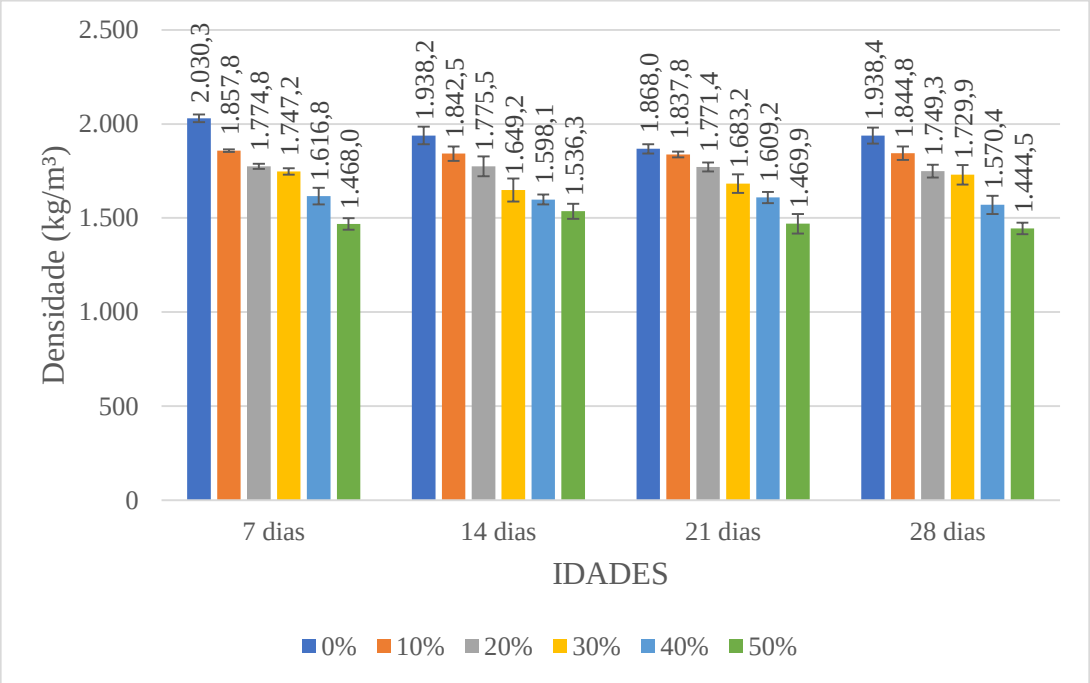
Para a classificação de densidades em estado fresco, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), as argamassas com a proporção de 0%, podem ser classificadas como D5 (1800 a 2200 kg/m³), já com 10%, 20% e 30%, 40% como D4 (1600 a 2000 kg/m³), e com 50% são classificadas como D3 (1400 a 1800 kg/m³).

Os resultados encontrados estão de acordo com estudos anteriores por diversos autores (BROOKS et al., PASSOS E CARASEK, 2018; BRÁS et al., 2013; FERRÁNDIZ-MAS et al., 2014; SILVA et al., HUANG et al., MILLING et al., KOKSAL et al., 2020; TITTARELLI et al., 2016) que pesquisaram sobre a incorporação de EPS em substituição à areia natural nas argamassas de revestimento.

4.2. Densidades de Massa no Estado Endurecido

Na Figura 24 pode ser observado o gráfico da densidade de massa no estado endurecido em função das idades e para os diferentes percentuais de substituição. Observa-se que as diferentes idades tiveram pequena influência sobre a densidade, isto é, pequenas variações da densidade foram encontradas. Variações significativas dos valores de densidade foram encontrados para os diferentes percentuais de substituição. Aumentando o percentual de substituição, a densidade diminui. Para a idade de 28 dias e, em relação a argamassa de referência, a densidade diminuiu 4,8%, 9,8%, 10,8%, 19,0% e 25,5% para os percentuais de substituição de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, respectivamente. Os resultados brutos do ensaio de densidade de massa são observados do Apêndice A.

Figura 24: Densidade de massa em estado endurecido em relação a diferentes idades e percentuais de substituição.



Fonte: Autor, 2021

Para a classificação de densidades em estado endurecido, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), com idade de 28 dias as argamassas com a proporção de 0%, 10% podem ser classificadas como M5 (1600 a 2000 kg/m³), já com 20% e 30%, como M4 (1400 a 1800 kg/m³), e com 40% e 50% são classificadas como M3 (1200 a 1600 kg/m³). Essa classificação é fundamental para a definição dos lugares de aplicação da mistura argamassada.

A Tabela 12 mostra os resultados da análise de variância para densidade de massa no estado endurecido. Pode-se afirmar, com 95%, ou mais, de confiabilidade, que os fatores (idade e percentual de substituição) influenciam significativamente na densidade, pois o valor de P é menor que 0,05. Também, pelo valor de F e soma dos quadrados, pode-se afirmar que o percentual de substituição é o fator que mais influencia a densidade.

Tabela 12: ANOVA para a densidade de massa.

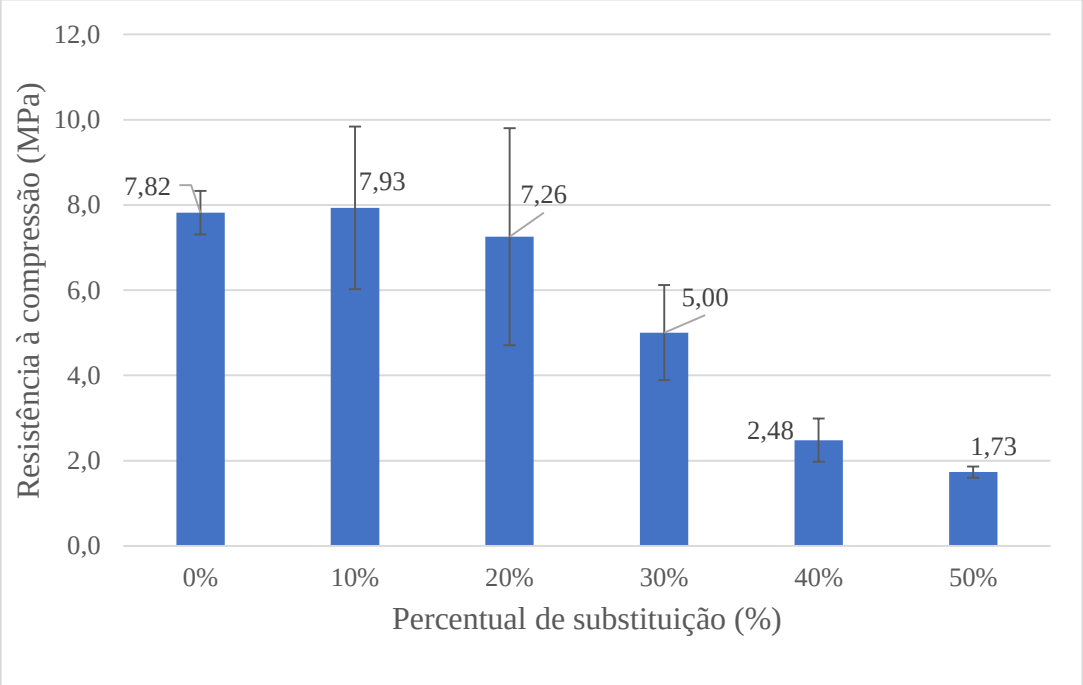
Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
Idade	25298	3	8433	4,07	0,009	Sim
% de substituição	2254311	5	450862	217,76	0,000	Sim
Erro	180131	87	2070			

Fonte: Autor, 2021

4.3. Resistência à Compressão

Nos resultados verifica-se, que o aumento do percentual de substituição de EPS, faz com que, a resistência à compressão aos 28 dias diminui em relação ao material referencial, contudo, o traço com 10% e 20% de substituição permanecem semelhantes ao material de referência, dentro do limite do desvio padrão, conforme observado na Figura 26.

Figura 25~~26~~: Resistência à compressão aos 28 dias.



Fonte: Autor, 2021

Para a classificação da resistência à compressão, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), com idade de 28 dias as argamassas com a proporção de 0%, 10% e 20%, como P5 (5,5 a 9,0 MPa), com 30%, como P4 (4,0 a 6,5 MPa), e com 40% e 50% são classificadas como P2 (1,5 a 3,0 MPa).

Os resultados demonstram um grande potencial do resíduo como substituto parcial do agregado natural. O EPS, quando inserido em proporções de até 20%, possui similaridade de resultados dentro do desvio padrão dos resultados obtidos com o traço referencial. Algumas variações de resultados podem ser vistas em alguns estudos (BRÁS et al., 2013; SILVA et al.; BUSSOLO, 2020), atribuídas diretamente ao índice de vazios da mistura, que tende a enfraquecer a zona de transição entre a pasta e o agregado, agindo sobre a resistência à compressão.

As porcentagens de substituição seguiram uma proporção da relação água/aglomerante 5% menor a cada 10% de substituição da areia natural pelo EPS triturado, ou seja, o traço com 0% de resíduo resultou uma relação água/aglomerante de 1,00, já com o traço com 50% de EPS foi ajustado a relação em 0,75, mantendo-se a plasticidade ideal da mistura para a aplicação em revestimentos. A resistência à compressão tende a aumentar em função da diminuição da relação água/aglomerante, visto que ocorre a diminuição do índice de poros capilares na mistura, tendendo há uma melhor compactação das partículas finas

Observou-se que nos CPs com maior quantidade de resíduo de EPS atuou um esmagamento no centro do molde onde foi realizada a aplicação da carga, fazendo com que parte das laterais do se desprendesse. Esse comportamento é de um compósito mais plástico, tendendo a ter maior capacidade de deformação, já o CP referencial tem-se uma ruptura mais frágil. Esse tipo de ruptura é evidenciado por Brooks et al. (2018), que cita o esmagamento interno decorrente dos vazios de ar contidos dentro das células do resíduo, evidenciados de forma mais clara com proporções maiores de inserção do EPS na pasta da argamassa.

Através da análise de variância e Teste de Tukey, com 95% de confiança, os fatores idade e percentual de substituição influenciam nos resultados de resistência mecânica à compressão. A Tabela 13 mostra a análise de variância para a resistência à compressão, onde pode ser observado que a idade foi o fator que mais influenciou, pois, o valor de F é maior.

Tabela 13: ANOVA para a resistência à compressão.

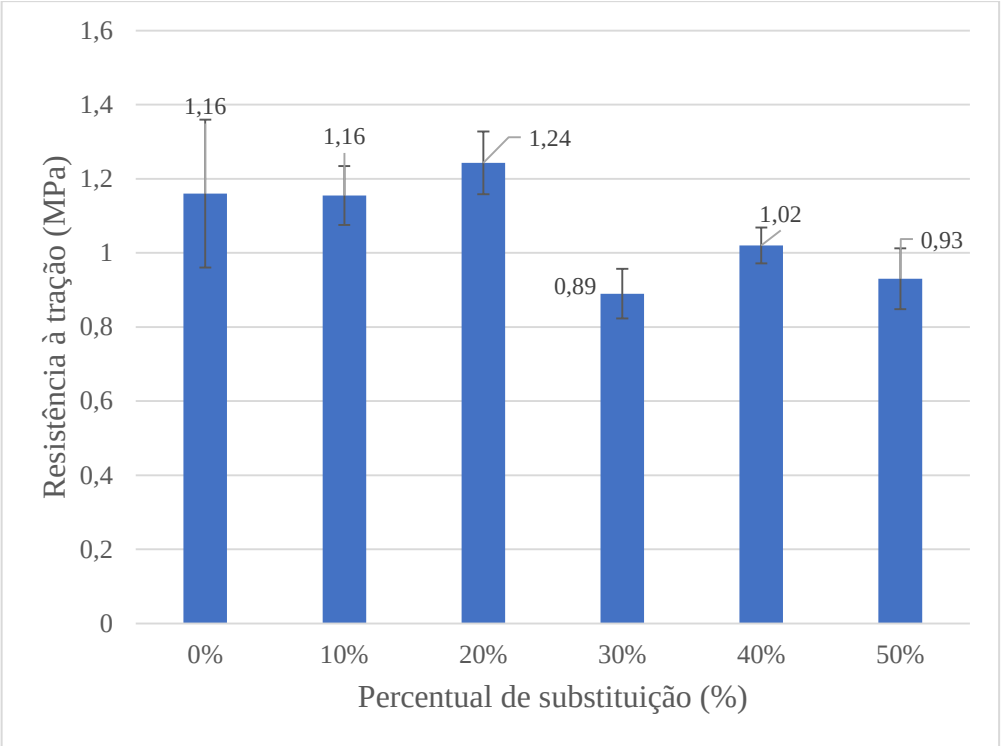
Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
Idade	55,38	3	18,460	5,04	0,003	Sim
% de substituição	65,065	5	13,013	3,55	0,006	Sim
Erro	318,681	87	3,663			

Fonte: Autor, 2021

4.4. Resistência à Tração na Flexão

Quando observados os resultados com idade de 28 dias, conforme apresentado na Figura 28, nota-se que existe uma linha de tendência descendente em relação à porcentagem de substituição do agregado, tendo uma redução média de 19,83% com o maior teor de EPS na mistura, porém os resultados podem ser considerados similares devido à variabilidade dos resultados do ensaio.

Figura 26~~28~~: Resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias.



Fonte: Autor, 2021

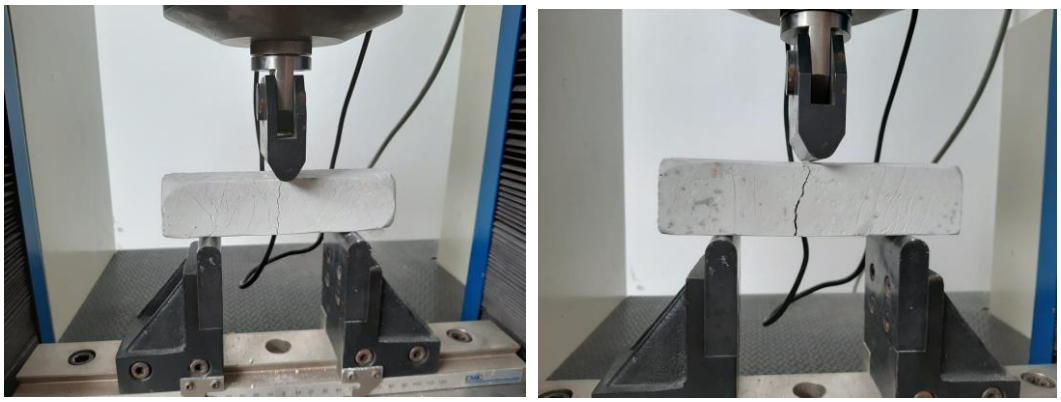
Os resultados desse ensaio, quando comparados com outros estudos recentes (PASSOS E CARASEK, 2018; BOITA et. al., 2019; KOKSAL et al., 2020), apresentaram-se mais ‘atrativos’, evidenciando que o EPS possui grande potencial de utilização para percentuais de

até 20% de substituição, sem que haja diferenças significativas de resultados em relação à argamassa referencial, sem EPS.

No ensaio de tração na flexão foi verificado que as rupturas ocorreram em forma de trincas verticais no centro dos CPs, onde concentrou-se a maior tensão de flexão. Com uma porcentagem maior de resíduo, é possível verificar que a trinca tende a um formato em diagonal, desenhando o local onde possui maior concentração das partículas de EPS, sendo o ponto mais frágil do CP, onde é aplicada a maior tensão para a ruptura. Esse ponto maior frágil é considerado onde está localizado a menor quantidade de ligações cimentícias entre a pasta e o agregado, porém com o resíduo de EPS como agregados no molde, são representados por pequenas quantidades de ar inseridos na mistura, os quais estão enclausurados dentro das moléculas do EPS, formando pequenos vazios não absorventes no molde (DIXIT et al., 2019). Na Figura 29 é possível verificar os modos de ruptura da proporção referencial (a) e com a proporção de 50% de EPS (b).

Figura 27~~29~~: Ruptura dos moldes nos ensaios à tração na flexão.

(a) (b)



Fonte: Autor, 2020

Através da avaliação da variância e pelo Método de Tukey, com 95% de confiança, é possível afirmar que há evidencias que os fatores de idade e percentual de substituição influenciam nos resultados de resistência mecânica à tração na flexão, conforme observado na Tabela 14, os fatores idade e percentual de substituição possui alto índice de influência dos resultados de resistência à compressão, onde pode ser observado que a idade foi o fator que mais influenciou, pois, o valor de F é maior.

Tabela 14: ANOVA para a resistência à tração na flexão.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
Idade	2,13749	3	0,71250	47,52	0,000	Sim
% de substituição	0,31419	5	0,06284	4,19	0,002	Sim
Erro	1,30451	87	0,01499			

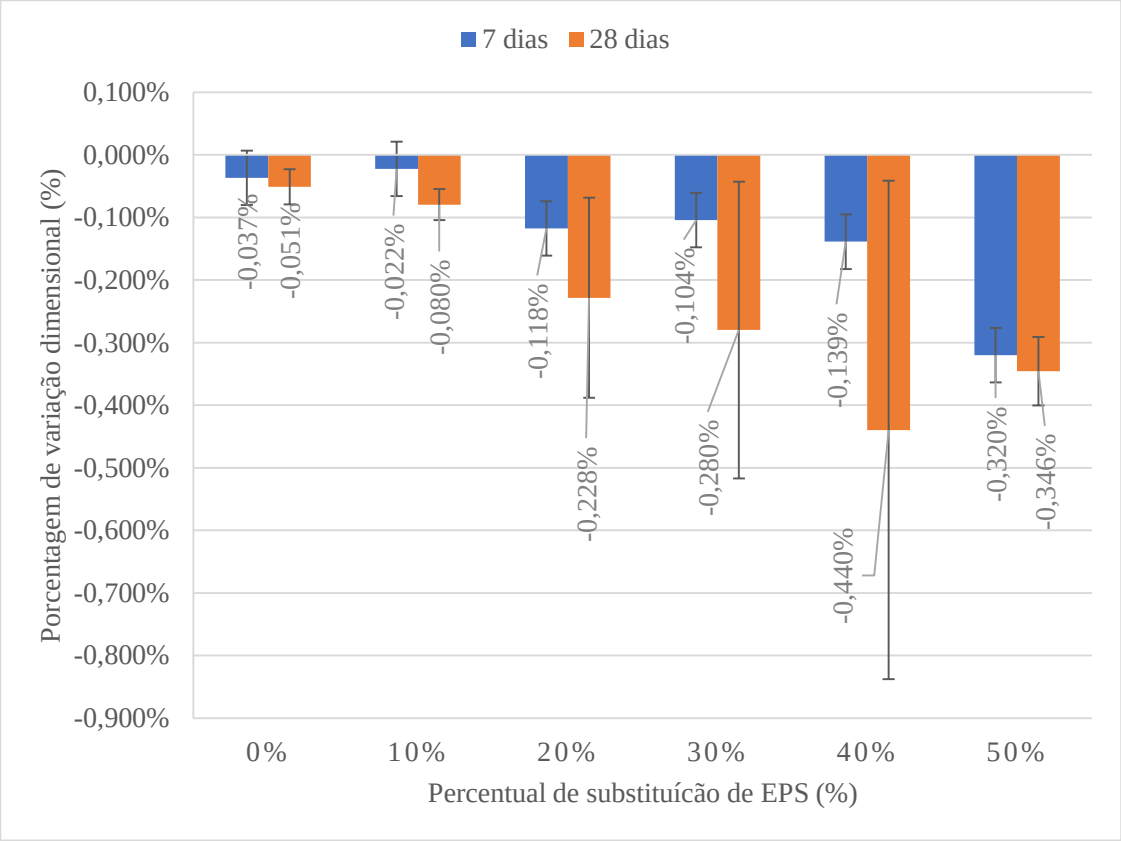
Fonte: Autor, 2021

4.5. Variação Dimensional

Conforme o esperado, as variações dimensionais foram geradas devido a adição do resíduo de EPS, isto é, aumentando o percentual de substituição de EPS, a retração aumenta. Os comportamentos de todos os traços foram semelhantes, com idade de 28 dias.

Os resultados obtidos evidenciam variações maiores para os traços com maior quantidade de EPS para os percentuais de substituição de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, comparados com o traço referencial, conforme apresentados na Figura 30. Os resultados brutos do ensaio de variação dimensional são observados no Apêndice D.

Figura 2830: Resultados de variação dimensional.



Fonte: Autor, 2020.

Os valores do traço sem substituição apresentam retração 30% menor, quando comparado com os resultados de Bauer et al. (2015). Segundo Carasek et al. (2018), o aumento da retração de argamassas é proporcional ao volume de vazios (argamassas convencionais), e à relação água/aglomerante. Contudo, o EPS tende a sofrer um esmagamento de suas partículas quando empregado como agregado na mistura. Embora as misturas com EPS resultem menor relação água/aglomerante, , à medida ocorre a evaporação da água aumenta a retração dos CP's. A variação maior é observada nos traços com maior quantidade de resíduo (BROOKS et al., 2018; DIXIT et al., 2019).

Através da análise de variância e pelo Método de Tukey, com confiabilidade de 95% ou mais, é possível afirmar que o fator percentual de substituição influencia a variação dimensional. Em relação às idades, não é possível afirmar a influência, pois os resultados não apresentaram evidência significativa (valor de p maior que 0,05) da ação desse fato sobre a variação dimensional. A análise de variância pode ser observada na Tabela 15.

Tabela 15: ANOVA para a variação dimensional.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
Idade	4,490	2	2,245	0,95	0,392	Não
% de substituição	508,552	5	101,710	43,25	0,002	Sim
Erro	108,166	46	2,351			

Fonte: Autor, 2021.

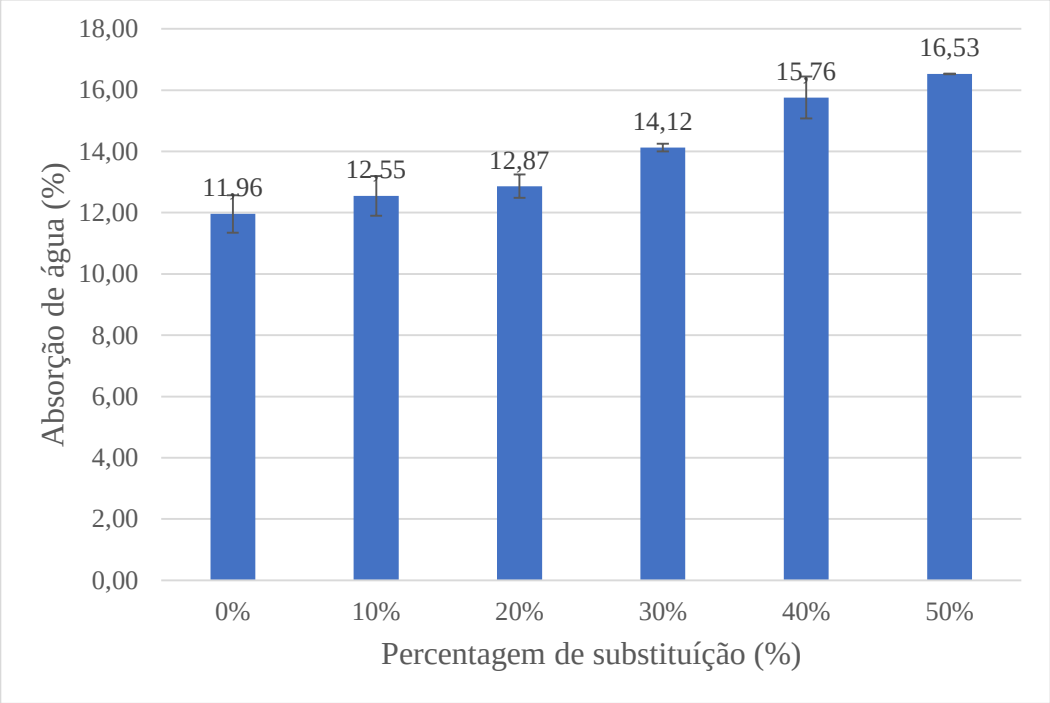
4.6. Absorção de Água por Imersão Total

A partir dos resultados obtidos na absorção de água por imersão total é possível observar que esta foi proporcionalmente maior nos traços com maior adição de resíduo em relação ao traço referencial.

Os resultados médios para a absorção de água nos traços com 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de EPS mostraram-se 4,93%, 7,60%, 18,06%, 31,77% e 38,21% maiores que o traço com sem EPS, conforme observado na Figura 36. Os resultados encontrados para a absorção de água por imersão estão abaixo dos encontrados em argamassas sem resíduos, quando comparados a outros estudos. Zaparte (2020) encontrou redução de 15,50%, e nos estudos de Olivo (2020), uma redução de 16%. Esse comportamento pode ser atribuído neste estudo a curva granulométrica da areia e do resíduo de EPS, que se enquadrou na zona utilizável, porém com grande predominância de materiais finos em sua composição para o agregado natural e

partículas maiores no resíduo. Na Figura 31, é apresentado os resultados obtidos para a absorção de água. Os resultados brutos do ensaio de absorção de água por imersão total podem ser observados no Apêndice E.

Figura 29~~31~~: Resultados de absorção de água.



Fonte: Autor, 2020.

Através da análise de variância e pelo Método de Tukey (confiabilidade de 95%) é possível afirmar que há evidencias que o fator percentual de substituição, influencia nos resultados de absorção de água por imersão total, conforme observado na Tabela 16, apresentando o valor de P menor que 0,05. Em uma análise individual dos traços, verifica-se que os traços com 0%, 10% e 20% estão com resultados estatisticamente iguais, dentro dos limites do desvio padrão. Já os demais traços, nota-se um distanciamento dos resultados, quando comparados com o traço referencial.

Tabela 16: ANOVA para a absorção de água por imersão total.

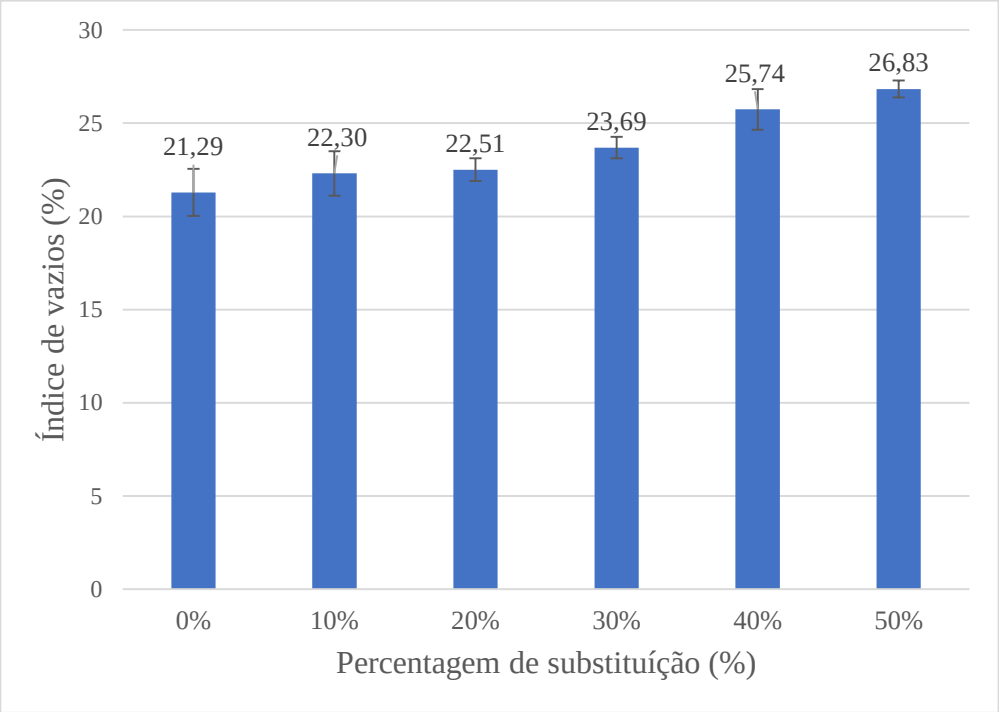
Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
% de substituição	51,159	5	10,232	42,98	0,000	Sim
Erro	2,857	12	0,238			

Fonte: Autor, 2020.

4.7. Índice de vazios

Os resultados observados refletem um maior índice de poros com o aumento da quantidade de resíduo, proporcionalmente ao aumento de resíduo, conforme apresentado na Figura 32. Os resultados brutos do ensaio de índice de vazios são observados no Apêndice F.

Figura 3032: Resultados de índice de vazios.



Fonte: Autor, 2020.

Os resultados de índice de vazios obtidos neste estudo, embora com valores maiores para as argamassas com o resíduo de EPS, quando comparado ao traço referencial apresentam resultados inferiores há pesquisas realizadas recentemente (GOMES et al.; ZHANG et al., 2019, ZAPARTE; OLIVO, 2020). Os índices de vazios encontrados foram de 4,74%, 5,73%, 11,27%, 20,90%, 26,02%, para os percentuais de substituição de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, respectivamente. Essa redução em relação aos estudos pesquisados, pode ser atribuído ao tamanho menor e acomodação das partículas de EPS na mistura de argamassa, tendo um melhor preenchimento na mistura.

Através da análise de variância pelo Método de Tukey, com confiabilidade de 95%, há evidencias que o fator de percentual de substituição, influenciam no índice de vazios, conforme observado na Tabela 17. Em uma análise individual dos traços, verifica-se que os traços com 0%, 10% e 20% estão com resultados estatisticamente iguais, dentro dos limites do desvio

padrão. Já os demais traços, nota-se um distanciamento dos resultados, quando comparados com o traço referencial.

Tabela 17: ANOVA para o índice de vazios.

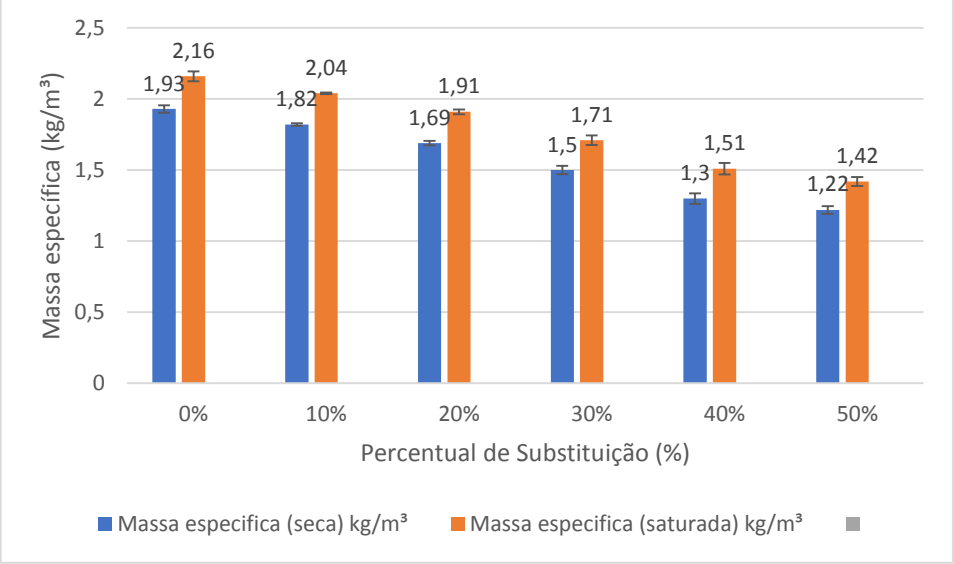
Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
% de substituição	69,410	5	13,882	16,31	0,000	Sim
Erro	10,215	12	0,851			

Fonte: Autor, 2021.

4.8. Massa Específica Seca e Saturada

Os resultados obtidos para a massa específica seca e saturada são apresentados na Figura 33. Esses resultados são comparados com a argamassa de referência, sendo observado que a quantidade de resíduo tende à uma redução de massas específicas. Esse resultado é atribuído à baixa densidade do resíduo. Zaparte (2020), encontrou resultados inferiores, em seu estudo com a argamassa referência, ficando 10,88% menor que o resultado encontrado nesse estudo.

Figura 31~~33~~: Resultados de Massa específica.



Fonte: Autor, 2020

Os resultados brutos do ensaio de massa específica seca e saturada são observados nos Apêndices G e H, respectivamente.

Através do ensaio de variância pelo Método de Tukey, com a análise de variância nos resultados obtidos é possível afirmar com 95% de confiança, que há evidencias que o fator de

percentual de substituição, influenciam na massa específica seca e saturada, conforme observado na Tabela 19, o resultado de variância com a tabela ANOVA para a massa específica seca, na Tabela 20, o resultado de variância com a tabela ANOVA para a massa especifica saturada. Em uma análise individual dos traços, verifica-se que os traços com 0%, 10% e 20% estão com resultados estatisticamente iguais. Já os demais traços, nota-se um distanciamento dos resultados, quando comparados com o traço referencial.

Tabela 18~~19~~: ANOVA para massa específica seca.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
% de substituição	0,080083	5	0,016017	24,09	0,000	Sim
Erro	0,007979	12	0,000665			

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 19~~20~~: ANOVA para a massa específica saturada.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
% de substituição	0,0421188	5	0,0084238	9,29	0,001	Sim
Erro	0,0108863	12	0,0009072			

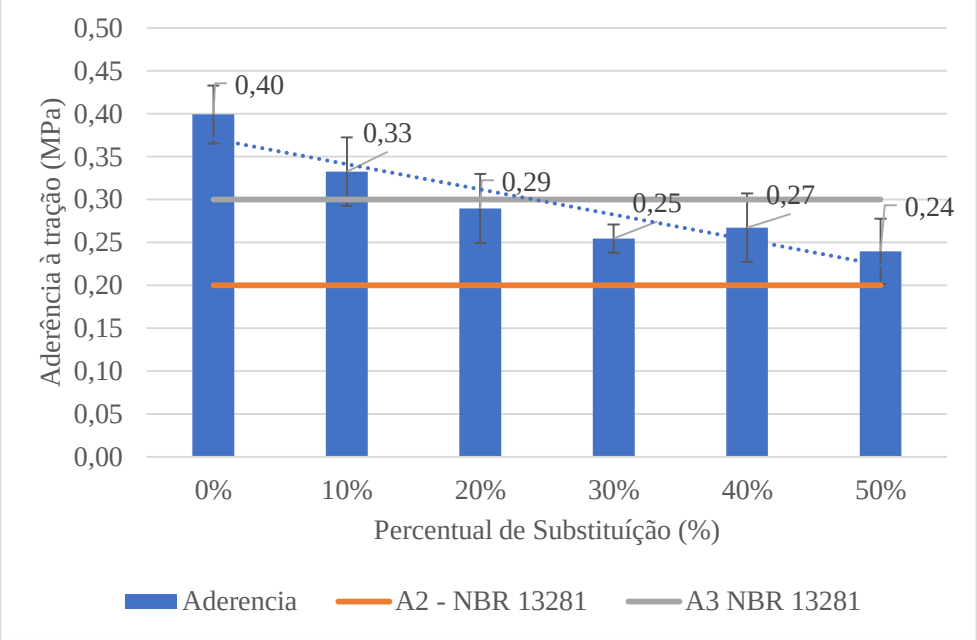
Fonte: Autor, 2021.

4.1 Aderência à tração

Segundo a norma NBR 13281 (ABNT, 2005), os resultados apresentados indicam atratividade para a aplicação da argamassa em revestimentos. Embora os percentuais de substituição tenham ficado abaixo do traço referencial, todos atenderam as resistências mínimas exigidas para a resistência na aderência à tração. Quando comparado com o traço referencial, os percentuais de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, obtiveram reduções de 17,50%, 27,50%, 37,50%, 32,50% e 40,00%, respectivamente. Essa redução de resistência de aderência na tração é atribuída à diminuição da área de contato da mistura, isto é, quanto maior a proporção de substituição, menor será a área de contato da matriz cimentícia da argamassa com o substrato.

Na Figura 34 pode ser observado o gráfico da aderência à tração em função dos percentuais de substituição para a idade de 28 dias. Também podem ser observadas as resistências exigidas para revestimentos na norma NBR 13281 (ABNT, 2005), sendo A2 (0,20 – 0,30 MPa) para a classe de aplicação de revestimentos internos e A3 (> 0,30 MPa) para a classe de aplicação de revestimentos em áreas externas. Os dados brutos para o ensaio de resistência à aderência na tração podem ser avaliados no Apêndice I.

Figura 3234: Resultados de resistência à aderência na tração.



Fonte: Autor, 2020.

Os resultados de aderência com o resíduo demonstram grande potencial para adição de pequenas quantidades em substituição ao agregado natural, atendendo os requisitos mínimos para a aplicação em revestimentos internos, com a classificação A2, já que para externos apenas os resultados com 10% de substituição atendem o requisito normativo, com a classificação A3.

Os corpos de prova sofreram rupturas, principalmente, na região entre o chapisco e a argamassa (ruptura da argamassa – A) e entre o substrato e chapisco (Ruptura na interface substrato/argamassa – S/A). Nos corpos de prova, após o ensaio de arrancamento, observar-se que partículas de resíduo estão dispersas na mistura e estão em contato direto com o chapisco aplicado sob a argamassa de revestimento, diminuindo a área de contato da argamassa com o substrato, e, consequentemente, uma área menor para o ancoramento do revestimento no substrato. Na Figura 37, para o traço de 20%, pode ser observado o resíduo de EPS disperso na parte inferior do revestimento, sendo possível notar que parte do chapisco permanece aderido ao molde após a realização do ensaio de aderência. Neste mesmo molde, também é possível verificar pequenos poros e partes de chapisco arrancado na parede, podendo ser atribuídas às falhas oriundas do chapisco rolado não aderentes no substrato.

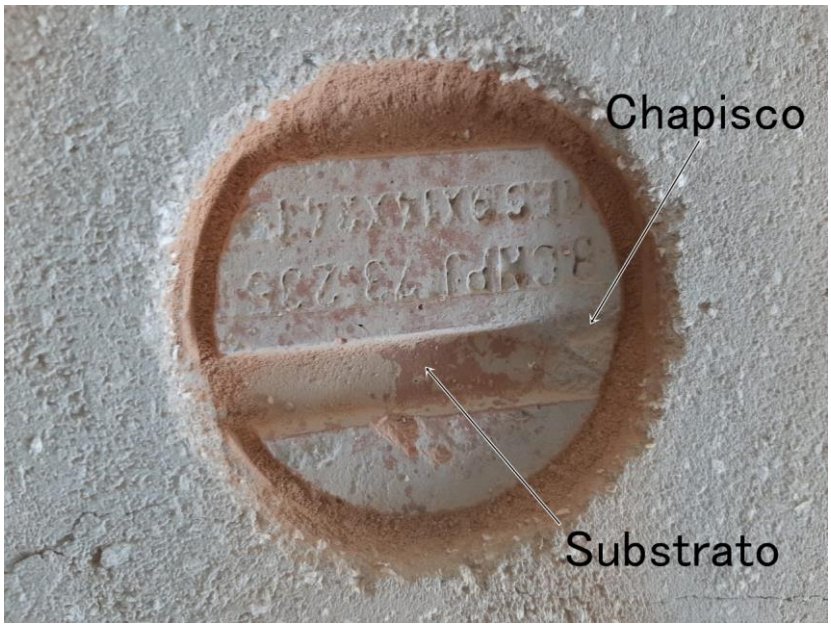
No substrato onde foi extraído o CP anterior (Figura 35), é possível observar que grande parte do chapisco aplicado sobre o substrato foi extraído juntamente com o molde no ensaio,

conforme verificado na Figura 36, tendo uma possível falha de aderência diretamente na fase entre o substrato e o chapisco.

Figura 3335: Ruptura do molde no ensaio de aderência com a argamassa com 20% de EPS.

Fonte: Autor, 2020.

Figura 3436: Análise visual da falha aparente do chapisco no substrato com a argamassa com 20% de EPS



Fonte: Autor, 2020.

Passos e Carasek (2018), usaram percentuais maiores e atingiram, consequentemente, uma resistência menor para o ensaio de aderência, tendo como resultados com a adição de 80% e 90% a resistência média de 0,19 MPa e 0,07 MPa, respectivamente. Quando analisado o traço referencial, os resultados ficaram acima dos limites normativos, contudo, abaixo dos resultados encontrados por Almeida et al. (2005) e Bernardo et al. (2020), que obtiveram uma redução de 212% e 295%, respectivamente.

Através do ensaio de variância pelo Método de Tukey, com a análise de variância nos resultados obtidos é possível afirmar com 95% de confiança, que há evidencias que o fator de percentual de substituição, influenciam nos resultados de resistência à aderência à tração, conforme observado na Tabela 22. Nos resultados analisados nota-se uma grande diferença nos resultados dos corpos de prova com 0% e com 50%, nos demais os resultados são similares, com pouca influência no percentual de substituição. Em uma análise individual dos traços, verifica-se que os traços com 20%, 30%, 40% e 50% estão com resultados estatisticamente iguais, dentro dos limites do desvio padrão. Já os demais traços, nota-se resultados distintos entre si.

Tabela 2022: ANOVA para resistência à aderência à tração.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
% de substituição	0,14767	5	0,02953	9,23	0,000	Sim
Erro	0,21115	12	0,00320			

Fonte: Autor, 2021.

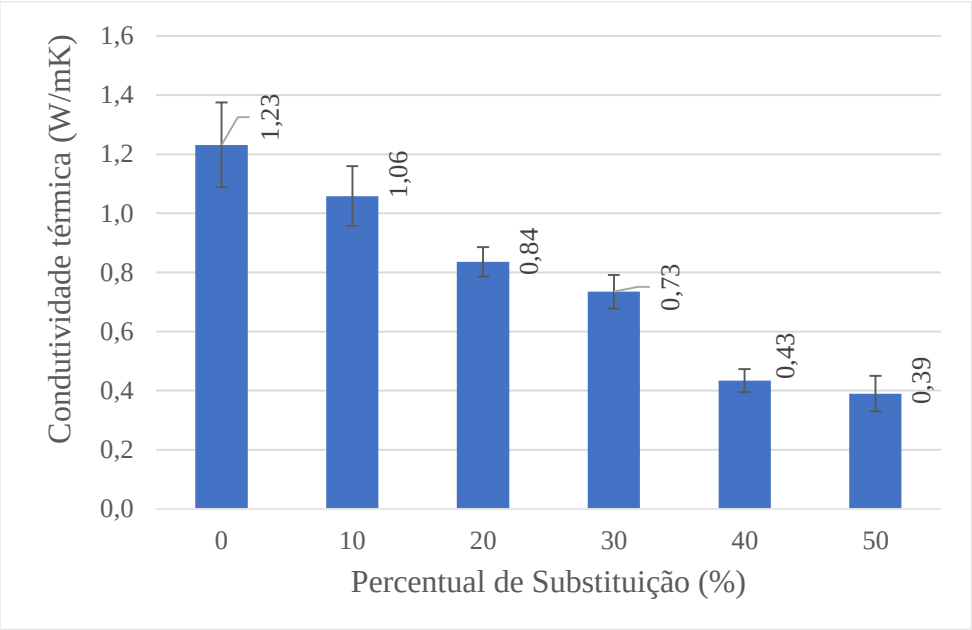
4.2 Condutividade Térmica

Os resultados, como esperado, mostraram que a inserção de porcentagens de resíduo de EPS em substituição á areia natural diminui a condutividade térmica do compósito. A Figura 37 mostra o gráfico da condutividade térmica em função do percentual de substituição. Pode ser observado que os percentuais de substituição de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, obtiveram reduções de condutividade térmica de 13,82%, 31,70%, 40,65%, 65,04% e 68,29%, respectivamente, quando comparados com o traço referencial. Os dados brutos das medições de condutividade térmica estão alocados no Apêndice J.

Quando comparados os resultados médios com EPS em relação ao traço referencial, as argamassas obtiveram reduções de condutividade térmica de 14,63%, 31.70%, 40,65%, 65,04% e 68,29%. São resultados atrativos para isolamento térmico de edificações, mostrando-se abaixo

dos valores referenciais presentes na tabela B.3 da norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005), na qual trata a argamassa convencional comum com valor referencial de 1,15 W/m.K.

Figura 3537: Resultados de Condutividade Térmica



Fonte: Autor, 2020.

Através do ensaio de variância pelo Método de Tukey, com a análise de variância nos resultados obtidos é possível afirmar com 95% de confiança, que há evidencias que o fator de percentual de substituição, influenciam nos resultados de condutividade térmica, conforme observado na Tabela 23. Nos resultados analisados nota-se uma grande diferença nos resultados dos moldes com 0%, 40% e 50%, nos demais os resultados são similares, com pouca influência no percentual de substituição.

Tabela 2123: ANOVA para condutividade térmica.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
% de substituição	1,68513	5	0,33703	47,87	0,000	Sim
Erro	0,08449	12	0,00704			

Fonte: Autor, 2021.

Com 0% de EPS a mistura obteve um resultado abaixo dos resultados encontrados por Brooks et al. (2018) em 50,8% e abaixo dos resultados de Brás et.al (2013) em 27,65%, contudo, acima dos resultados encontrados por Passos e Carasek (2018) em 86,36%, atingindo uma condutividade de 1,23 W/mk. Com porcentagem de 28,50% Brooks et al. (2018) encontrou 0,86

W/m.K, ficando 17,80% superior ao encontrado no presente estudo com a proporção de 30% de EPS. Em resultados de Brás et al. (2013) para as porcentagens de 10%, 20%, 40% e 50%, encontrou valores de 1,15 W/m.K, 1,05 W/m.K, 0,96 W/m.K e 0,85 W/m.K, superiores em 9,52%, 25%, 123,25% e 117,95%.

Nos resultados com 10%, 20%, 30% e 40% e 50%, quando comparados aos resultados de outros autores, assemelham-se pelo comportamento visto nas argamassas e, mesmo em concretos com a EPS triturado como parte parcial do volume de agregados da mistura, atuando como um inibidor de condução térmica. No estudo realizado por Ferrándiz-Más et al. (2014), encontrou-se resultados superiores de condutividade térmica com a porcentagem de 60% de EPS, encontrando 0,85 W/m.K, conforme citado anterior no estudo Brás et al. (2013), um resultado superior ao deste estudo com a porcentagem de 50%, podendo-se concluir na comparação que está dentro dos resultados aceitáveis para essa porcentagem.

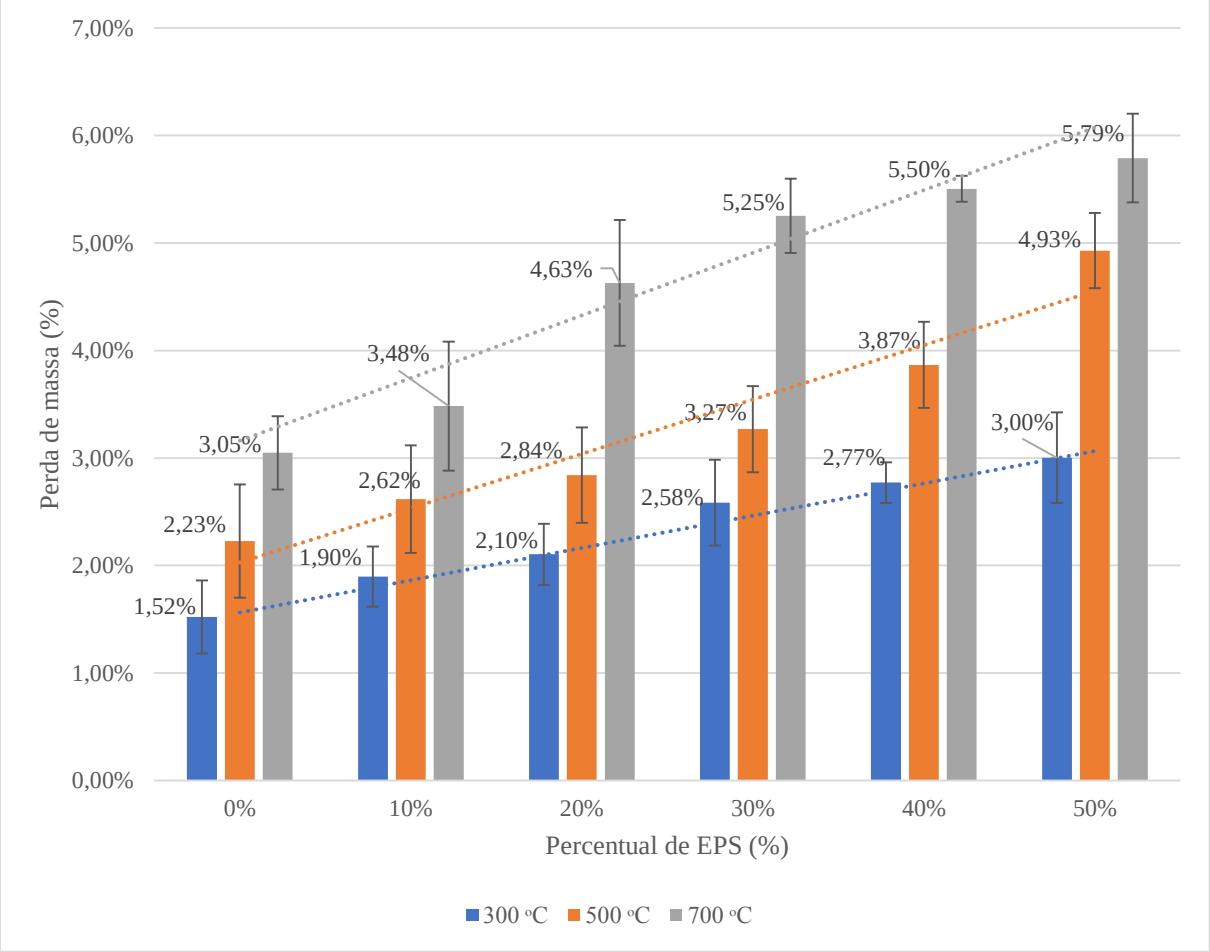
4.3 Resistência à Incêndios

4.3.1 Densidade em altas temperaturas

Os resultados de perda de densidade em diferentes temperaturas são observados na Figura 38. Esses resultados mostram uma perda maior de massa nos moldes com uma maior concentração de resíduo de EPS e em maiores temperaturas, porém essa perca de massa ficou abaixo dos resultados encontrados nos estudos recentes de argamassas resistentes ao fogo (JIMENEZ et al., 2006; FORMOSA et al., 2011; VYAS et al., RAMIREZ et al., 2020) , podendo ser atribuído ao melhor empacotamento das partículas e, principalmente, à inserção de resíduo de EPS, que pertence à classe F, que se configura como um EPS retardante ao fogo. Os resultados brutos, obtidos pelo ensaio de perda de densidade, podem ser verificados no Apêndice K.

Através do ensaio de variância pelo Método de Tukey, com a análise de variância nos resultados obtidos é possível afirmar com 95% de confiança, que há evidencias que os fatores de temperatura e percentual de substituição, influenciam nos resultados de perca de massa, conforme observado na Tabela 24, os fatores de temperatura e percentual de substituição possui alto índice de influência dos resultados de resistência à compressão, onde pode ser observado que o percentual de substituição de EPS foi o fator que mais influenciou, pois, o valor de F é maior.

Figura 3638: Porcentagem de perda de massa da argamassa em altas temperaturas.



Fonte: Autor, 2020.

Tabela 2224: ANOVA para perda de massa.

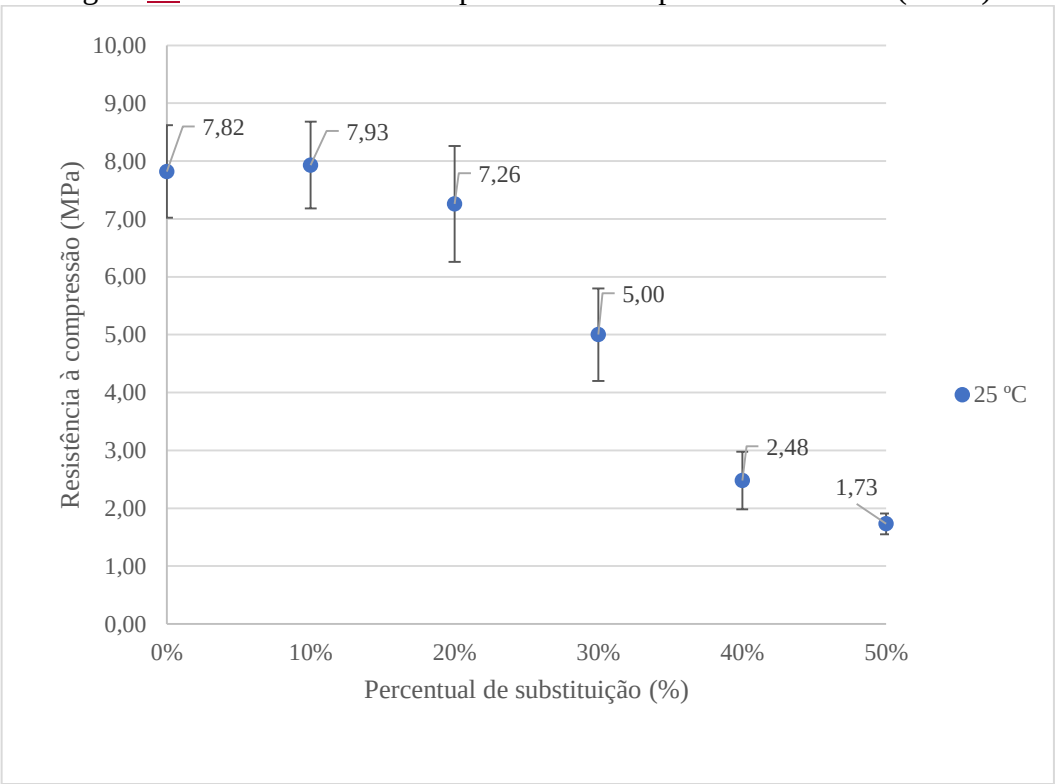
Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
Temperatura	49890	3	16560	15,37	0,000	Sim
% de substituição	1799286	5	359857	334,06	0,000	Sim
Erro	67865	87	1077			

Fonte: Autor, 2020.

4.3.2 Resistência à compressão em altas temperaturas

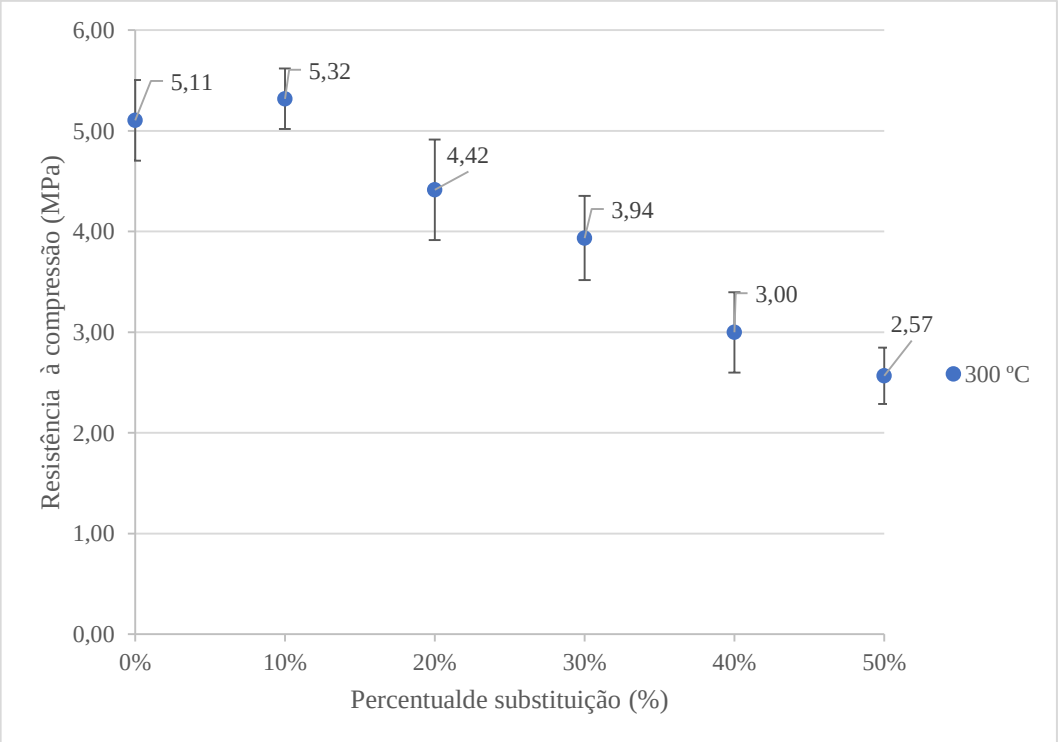
Os resultados mecânicos de resistência à compressão obtidos pós exposição das argamassas a altas temperaturas são apresentados na Figura 39, para temperatura ambiente em 25 ºC, na Figura 40, para temperatura de 300 ºC, na Figura 41, para a temperatura de 500 ºC, e na Figura 42, para a temperatura de 700 ºC. Os valores brutos obtidos nos ensaios são observados no Apêndice L.

Figura 3739: Resistência à compressão em temperatura ambiente (25 °C).



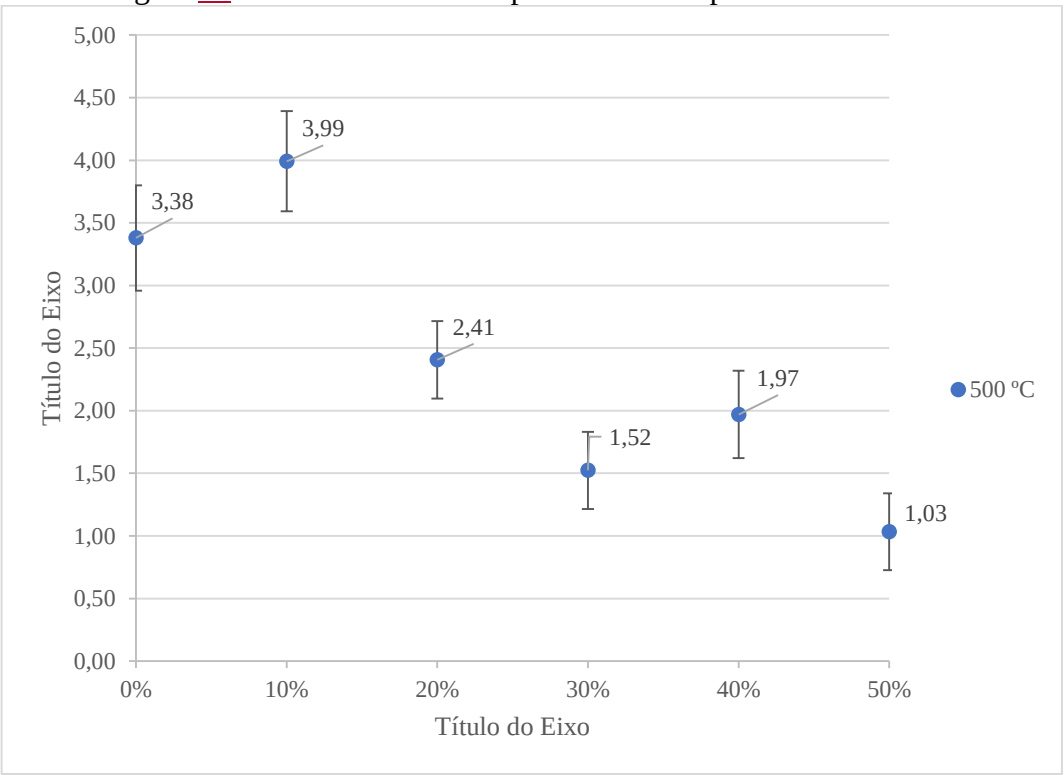
Fonte: Autor, 2020.

Figura 3840: Resistência à compressão em temperatura de 300 ºC.



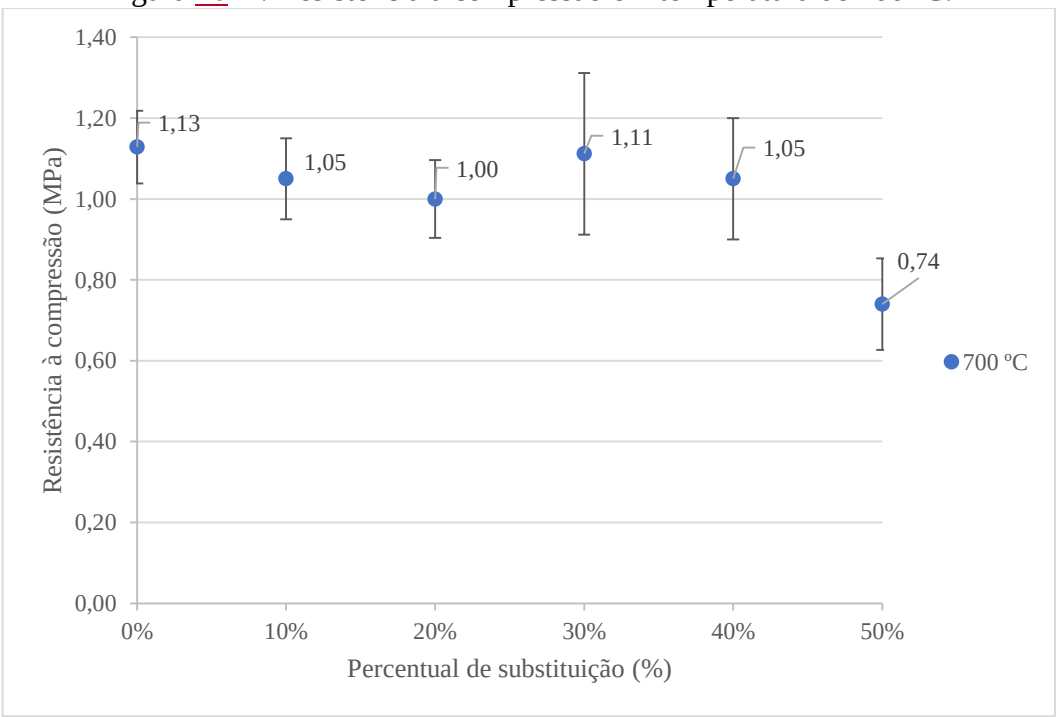
Fonte: Autor, 2020.

Figura 3941: Resistência à compressão em temperatura de 500 ºC.



Fonte: Autor, 2020.

Figura 4042: Resistência à compressão em temperatura de 700 ºC.



Fonte: Autor, 2020.

Para a temperatura de 300 ºC, as resistências à compressão reduzem com o aumento da temperatura, e com o aumento na quantidade de resíduo inserido na mistura para as porcentagens de 10%, 20% e 30%. Para os resultados com 0%, 40% e 50%, nota-se um aumento de resistência com 300 ºC, quando comparados com a temperatura ambiente de 25 ºC, em cerca de 98,86%, 28,20% e 52,97%, respectivamente. A maior queda de resistência registrada no ensaio foi verificada com 10%, reduzindo 25,28%.

Nos resultados obtidos com o ensaio à compressão com a 500 ºC, o traço referencial mostrou resistência maior, quando comparado com as misturas à temperatura ambiente, em 31,51%, já os apresentaram quedas em suas resistências, sendo atribuída à fragilidade do resíduo em suportar altas temperaturas. A maior perca observada no ensaio com redução de 60,03% na proporção de substituição com 20% de EPS.

Para a temperatura de 700 ºC, no ensaio de compressão, todos os corpos de prova obtiveram perdas em sua resistência mecânica, tendo uma maior perda com a porcentagem de 20%, que foi de aproximadamente 88,72% de sua resistência com temperatura ambiente.

Através do ensaio de variância pelo Método de Tukey, com a análise de variância nos resultados obtidos é possível afirmar com 95% de confiança, que há evidencias que os fatores de temperatura e percentual de substituição, influenciam nos resultados de resistência à compressão, conforme observado na Tabela 25, os fatores de temperatura e percentual de substituição possui alto índice de influência dos resultados de resistência à compressão, onde pode ser observado que a temperatura de exposição da argamassa foi que mais influenciou, pois o valor de F é maior.

Tabela 2325: ANOVA para resistência à compressão em argamassas expostas em altas temperaturas.

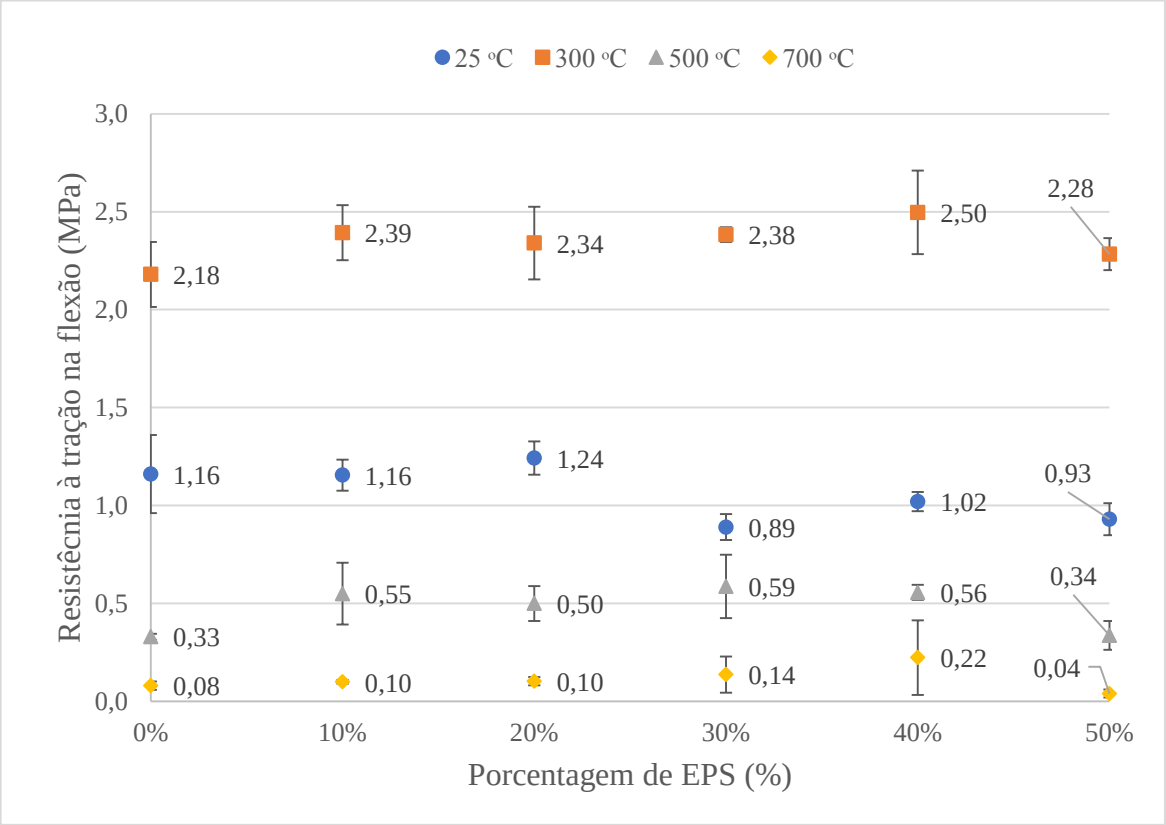
Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
Temperatura	142,644	3	47,548	40,73	0,000	Sim
% de substituição	80,074	5	359857	13,72	0,000	Sim
Erro	73,551	87	1077			

Fonte: Autor, 2020.

4.3.3 Resistência à tração na flexão em altas temperaturas

Os resultados de resistência à tração na flexão após a exposição em situações de incêndio com temperatura de 300ºC, 500ºC e 700 ºC, pode ser observada na Figura 43, e os valores brutos obtidos com o ensaio são apresentados no Apêndice M.

Figura 41~~43~~: Resistência à tração na flexão em moldes expostos em altas temperaturas.



Fonte: Autor, 2020.

Os resultados mecânicos de resistência à tração na flexão com a temperatura de 300 ºC, pode-se observar um aumento de resistência em todas as proporções de substituição do agregado natural pelo resíduo de EPS. Os resultados apresentaram-se superiores em 87,93%, 106,03%, 88,70%, 167,41%, 145,09% e 145,16%, obtidos nas proporções de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, respectivamente.

Para a exposição com uma temperatura de 500 ºC, o ensaio à tração na flexão, observa-se uma queda de resistência em todas as proporções nos moldes. Tendo uma maior porcentagem de perda de resistência o traço referencial, com uma queda de 71,55%, e a menor queda de resistência foi verificado na proporção de 30%, com perca de 33,70% de sua resistência com a temperatura ambiente.

Os resultados obtidos com o ensaio à tração na flexão, após a exposição na temperatura de 700 ºC, mostram uma queda ainda maior, com uma porcentagem de perda de 93,10%, 91,37%, 91,93%, 84,26%, 78,43% e 95,69%, para os traços com 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, respectivamente.

Com as porcentagens de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de EPS é possível observar uma diminuição do cobrimento da pasta cimentícia sobre os agregados em temperaturas mais altas, esse comportamento é descrito por Formosa et al. (2011) e Wendt (2006), ocorrendo uma perda maior na faixa entre 500ºC e 700ºC. Essa perda pode ser atribuída à decomposição da portlandita, ocasionando um aumento da porosidade e uma perda de resistências mecânicas na argamassa.

Na faixa entre 300 ºC e 500 ºC não são observadas diferenças de porosidade e cobrimento de pasta sobre os agregados, apenas uma coloração mais clara da pasta. A partir de 500 ºC, até os 700 ºC, nota-se uma coloração cinza avermelha, conforme visto na análise de imagens no item 4.3.4, sendo citado pela liberação dos constituintes ferrosos presentes nos agregados, conforme descrito por autores em seus estudos (BESSEY, 1995; WENDT, 2006; FORMOSA et al., 2011). O EPS mostra-se decomposto nos moldes, gerando vazios com proporções maiores nos traços com maior inserção do resíduo.

Através do ensaio de variância pelo Método de Tukey, com a análise de variância nos resultados obtidos é possível afirmar com 95% de confiança, que há evidencias que os fatores de temperatura e percentual de substituição, influenciam nos resultados de resistência à compressão, conforme observado na Tabela 26, os fatores de temperatura e percentual de substituição possui alto índice de influência dos resultados de resistência à compressão, onde pode ser observado que a temperatura de exposição da argamassa foi o fator que mais influenciou, pois o valor de F é maior.

Tabela 24~~26~~: ANOVA para resistência à tração na flexão – diferentes temperaturas.

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Valor de F	Valor de P	Significante
Temperatura	51,7175	3	17,2392	1108,07	0,000	Sim
% de substituição	0,3292	5	0,0658	4,23	0,002	Sim
Erro	0,9801	87	0,0156			

Fonte: Autor, 2021.

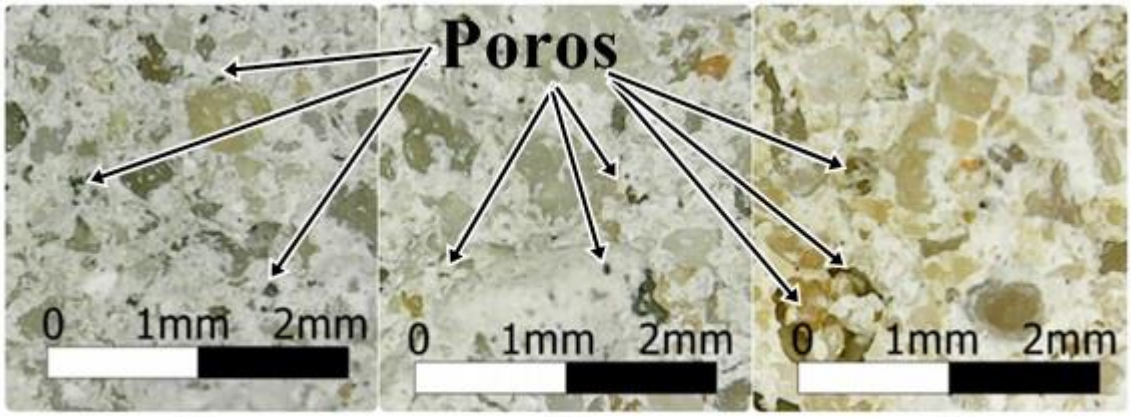
4.3.4 Análise de imagens em altas temperaturas

Nas macrografias registradas com lupa digital é possível visualizar os diferentes comportamentos internos das argamassas expostas em diferentes temperaturas de aquecimento registradas para a proporção de 0% na Figura 44.

Com o aumento da temperatura nota-se um aumento na porosidade, devido a diminuição de massa, atribuída à decomposição cimentícia na portlandita, assim como uma mudança da

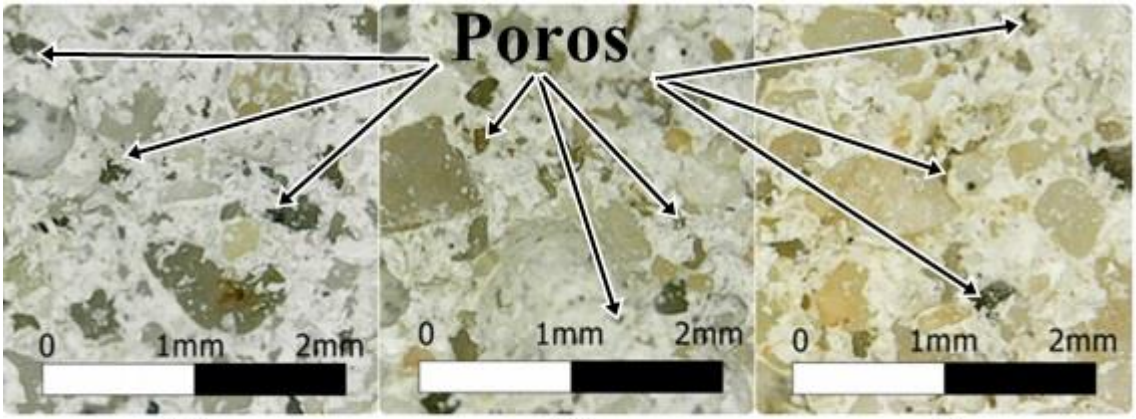
coloração, devida a liberação de elementos presentes no agregado natural. Nos demais traços, observados na Figura 45, com 10% de substituição, na Figura 46, para 20% de substituição, na Figura 47, para 30% de substituição, na Figura 48, para 40% de substituição e na Figura 49, para 50% de substituição, observa-se o mesmo comportamento, porém com um acréscimo de poros, devido a fusão do resíduo de EPS (>100ºC), sendo que quanto maior a proporção do EPS, maior a porosidade da mistura exposta em altas temperaturas.

Figura 4244: Argamassa com 0% de EPS com temperaturas (a) 300 ºC, (b) 500 ºC e (c) 700 ºC.



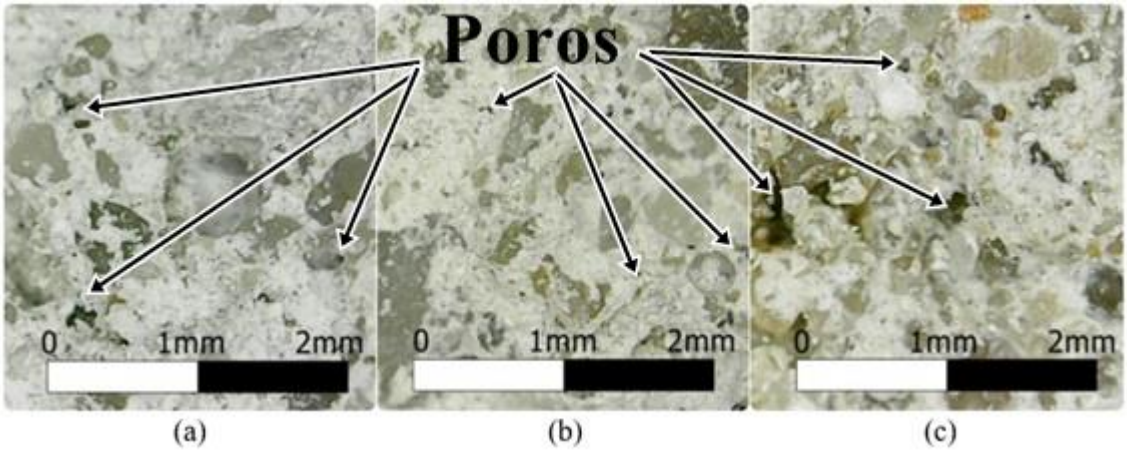
Fonte: Autor, 2020.

Figura 4345: Argamassa com 10% de EPS com temperaturas de (a) 300 ºC, (b) 500 ºC e (c) 700 ºC.



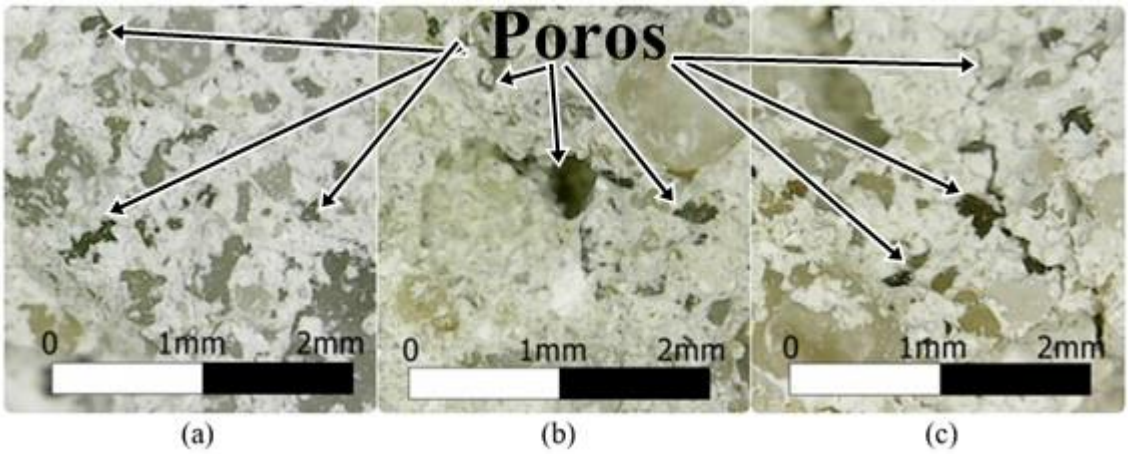
Fonte: Autor, 2020.

Figura 4446: Argamassa com 20% de EPS com temperaturas de (a) 300 ºC, (b) 500 ºC e (c) 700 ºC.



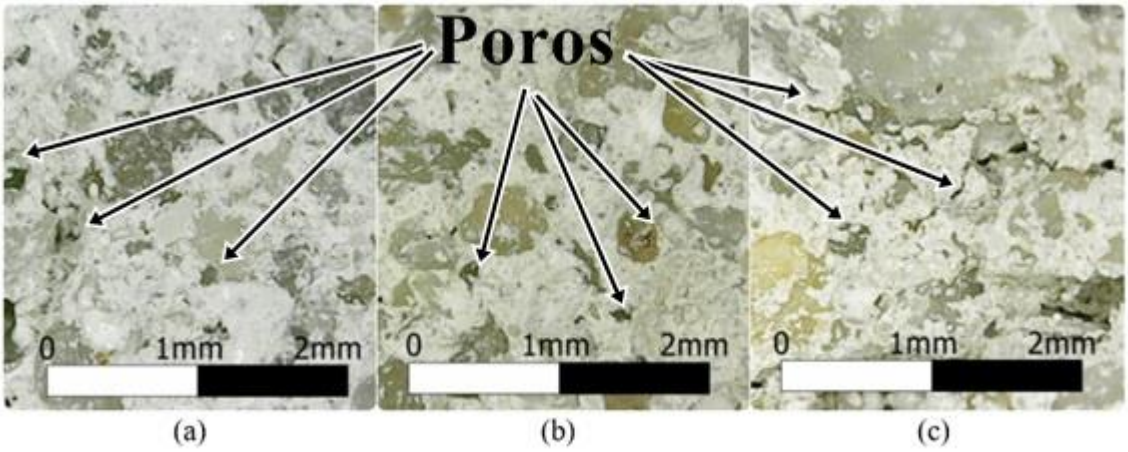
Fonte: Autor, 2020.

Figura 4547: Argamassa com 30% de EPS com temperaturas de (a) 300 ºC, (b) 500 ºC e (c) 700 ºC.



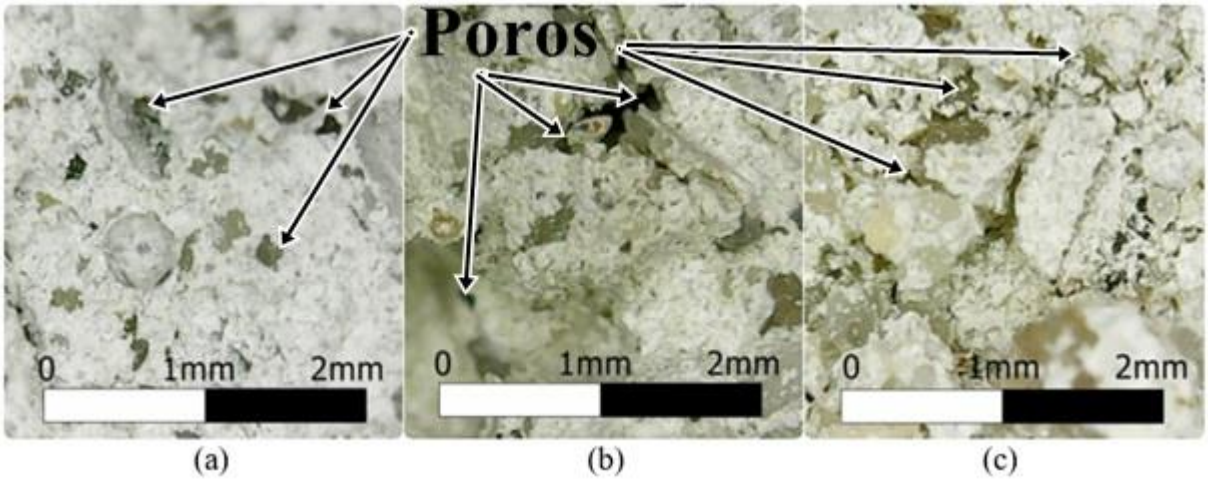
Fonte: Autor, 2020.

Figura 4648: Argamassa com 40% de EPS com temperaturas de (a) 300 ºC, (b) 500 ºC e (c) 700 ºC.



Fonte: Autor, 2020.

Figura 4749: Argamassa com 50% de EPS com temperaturas de (a) 300 ºC, (b) 500 ºC e (c) 700 ºC.



Fonte: Autor, 2020.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi desenvolvida uma argamassa de revestimento com adição de resíduo de EPS em substituição à areia natural. Para essa argamassa foram avaliadas diferentes propriedades para verificar a viabilidade técnica de uso como material alternativo na construção civil. As propriedades avaliadas foram as densidades em estado fresco e endurecido, resistência à compressão e à tração na flexão, variação dimensional, massa específica seca e saturada, aderência à tração e resistência à incêndios.

Avaliando a densidade da mistura com diferentes teores de resíduo, é verificado que a proporção de EPS em substituição à areia natural, reduz as densidades da mistura, tornando o revestimento mais leve.

Nas resistências mecânicas das argamassas, houve uma redução de resistências mecânicas com a utilização dos resíduos, porém essas propriedades não são determinantes para os revestimentos de argamassa.

No ensaio de resistência à compressão, indicam uma perda de resistências com o aumento da substituição da areia natural pelo resíduo de EPS, contudo, os resultados atendem as normas vigentes para a aplicação em revestimentos argamassados. Na ruptura dos CP's, foi observado um esmagamento nos corpos de prova contendo EPS. Isso ocorre devido a capacidade de deformação maior nas partículas de EPS, quando comparado com a areia natural, tendendo a absorver melhor as deformações oriundas de esforços internos e externos. Com a observação dos resultados de resistência à compressão, notou-se que as proporções de substituição de 20% não afetam significativamente as propriedades, permitindo o uso do resíduo do EPS em argamassas.

Os resultados médios à tração na flexão, os corpos de prova de argamassa com a porcentagem de EPS indicam que todas as porcentagens de resíduo dos moldes de argamassas podem ser consideradas iguais, ficando dentro dos limites do desvio padrão encontrado nos resultados do ensaio.

Nas argamassas com o resíduo a variação dimensional foi mais evidente, obtendo resultados de retração acima dos esperados quando comparados, com a argamassa sem o EPS, obtendo resultados proporcionais ao aumento da porcentagem do resíduo. Esses níveis de retração demonstram o esmagamento das partículas de EPS sendo o principal motivo para a movimentação de dimensões ao longo do molde, devido ao processo de evaporação da água dos poros capilares.

Na absorção de água por imersão total e índice de vazios, os resultados das argamassas com resíduo de EPS, mostram-se com maior índice de absorção e vazios, quando comparadas com argamassas convencionais. Para a massa especifica seca, saturada e real, foi observado uma redução significativa em relação ao traço referencial, obtendo bons resultados com o maior teor de substituição.

O resultado de aderência à tração em revestimento com a argamassa referencial obteve resultados superiores às demais porcentagens de EPS. Mesmo inferiores à argamassa com 0% de EPS, em todas as porcentagens de resíduo, os resultados demonstram um bom potencial para a utilização em revestimentos internos, atendendo os limites mínimos exigidos pela norma NBR 13281 (ABNT, 2005).

Para a condutividade térmica, os resultados pretendidos com a inserção de EPS na argamassa foram atendidos, resultando em uma significativa redução de condutividade térmica nos resultados com maior porcentagem de substituição de resíduo. Os resultados descrevem os resultados encontrados em outros estudos, trazendo enorme potencial de utilização em ambientes residenciais para o isolamento térmico.

Na resistência à incêndios, os comportamentos das argamassas com resíduos tendem a sofrer reduções mais significativas de densidades de massa e resistências mecânicas proporcionais à quantidade de EPS inseridos e as diferentes temperaturas expostas dos moldes. Aos 300 ºC as argamassas com resíduo tendem a ter um aumento de suas resistências mecânicas, com uma perda insignificante de massa. Com a temperatura de 500 ºC e 700 ºC, ocorre uma queda de massa, e uma queda significativa de resistências mecânicas e todas as proporções de argamassa, citado pelas literaturas pela decomposição de elementos químicos presentes nas propriedades cimentícias das argamassas.

Por fim, as argamassas, desenvolvidas com diferentes percentuais de resíduos de EPS, possuem indicativos técnicos que atendem as exigências mínimas estabelecidas pelas normas vigentes. Nesse estudo observa-se que é possível a utilização do resíduo de EPS em argamassas de revestimento em todos os percentuais, contudo destaca-se o traço com 20% de resíduo de EPS, pelos resultados alcançados, quando comparado com o traço referencial, possui as propriedades sem alterações significativas, com baixa densidade, resistência à compressão e tração na flexão com baixa variação. Para a durabilidade das argamassas tem-se uma maior absorção de água e índice de vazios, quando comparado com a argamassa referencial, contudo há uma melhora significativa nas propriedades térmicas. Na aderência, os resultados esperados foram atendidos, conforme exigências normativas, para o uso de revestimentos internos. Já em

situações de incêndio, onde a argamassa é exposta em altas temperaturas, nota-se uma queda de densidades e resistências a partir de 500 ºC, não sendo indicada para combater princípios de incêndio, onde são expostas às temperaturas mais elevadas.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise de retenção de líquidos nas argamassas em estado fresco resíduos de EPS;

- Análise das propriedades da argamassa com maiores teores de substituição do agregado natural por resíduo de EPS;

- Avaliar à exposição em maiores temperaturas;

- Análise de resistência com um resfriamento rápido em argamassas em situação de incêndio;

- Avaliação da argamassa com o resíduo em ambientes agressivos;

7. REFERÊNCIAS

AKIYOSHI, M. M.; SILVA, A. P. D.; SILVA, M. G. D.; PANDOLFELLI, V. C. Condutividade térmica e sua correlação com a temperatura e a massa específica volumétrica de materiais refratários sílico-aluminosos e aluminosos. CERÂMICA 2001, 47, (301), 9.

ALMEIDA, L., SANTOS SILVA, A., VEIGA, M. R., MIRÃO, J. Characterization of renders from buildings awarded with Lisbon's Valmor Prize of Architecture (1902-2002): conservation and contributions for preservation. 3° International Conference on PROTECTION OF HISTORICAL CONSTRUCTIONS, Lisboa, p.12 – 15, Jul. 2017.

ALMEIDA, A. E.F. S.; SICHIERI, E. P. Study of the Adherence between Polymer-Modified Mortars and Porcelain Stoneware Tiles. Materials Research, Scielo, v. 8, n. 3, 245-249, São Carlos, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13529:1995 – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

____. NM 248:2001 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

____. NBR 13277:2005 – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

____. NBR ISSO 8894-1 – Materiais Refratários – Determinação da Condutividade Térmica. Parte 1: Métodos do fio-quente (arranjo cruzado e termômetro de resistência). Rio de Janeiro, 2005.

____. NBR 13278:2005 – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

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

____. NBR 13280:2005 – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

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

____. NBR 9778:2005 – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

____. NBR 15261:2005 – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

____. NBR 13276:2016 – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

____. NBR 13528-3:2019 – Revestimento de paredes inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração – Parte 3: Aderência superficial. Rio de Janeiro, 2019.

____. NBR 11768:2011 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

____. NBR 15575:2013 - Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

____. NBR 15575-4:2013 – Edificações habitacionais – Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2013.

____. NBR 7175:2003 – Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

BARROCA, P.A.G. Comportamento reológico e mecânico de argamassas com agregados leves. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), 2013, Covilhã, p.1-166, 2013.

BARROCA, P.A.G.; NEPOMUCENO, M.C.S.; OLIVEIRA, L.A.P. Performance evaluation of rendering mortars with artificial and recycled lightweight aggregates. Internacional Conference in Engineering – ICEUBI 2015, University of Beira Interior. Covilhã, 2014.

BAUER, E.; REGUFFE, M.; NASCIMENTO, M.L.M.; CALDAS, L.R. Requisitos das argamassas estabilizadas para revestimento. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas – XI SBTA, Porto Alegre, Abr. 2015

BERGH, D. V. D.; DOORN, J. V.; MARSMAN, M.; DRAWS, T.; KESTEREN, E.J.V.; DERKS, K.; DABLANDER, F.; GRONAU, Q. F.; KUCHARSKY, S.; GUPTA, A. R. K. N., SARAFOGLOU, A.; VOELKEL, J. G.; STEFAN, A.; LY, A.; HINNE, M.; MATZKE, D.; WAGENMAKERS, E. J. A Tutorial on Conducting and Interpreting a Bayesian ANOVA in JASP, Cair Info Matieres à Reflexion, France, v.120, p. 73-96, 2020.

BERNARDO, H. M.; ROMANO, R. C. O.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Efeito da absorção de água e do tipo de substrato no desempenho de argamassa de revestimento nos estados fresco e endurecido. Ambiente Construído, Scielo, v.20, n.3, pág. 493-511, Porto Alegre, set. 2020.

BOITA, A.; BELLEI, P. Análise da substituição parcial do agregado miúdo por poliestireno expandido (eps) na argamassa de assentamento. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia civil), 2019, Universidade de Central de Educação Faem Faculdade – UCEFF, Chapeço, 2019.

BORGAS, J. A., CARRIÇO, A., PERREIRA, M.F.C., Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars, Journal of Cleaner Production, ScienceDirect. Lisboa, v.218, 2019, pág. 377-389, 31 Jan. 2019.

BRÁS, A.; LEAL, M.; FARIA, P. Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance. Construction and Building Materials. ScienceDirect. Lisboa, v. 49, 2013, pág. 315-327, Lisboa, Jun. 2013.

BROOKS, A. L.; ZHOU, H.; HANNA, D. Comparative study of the mechanical and thermal properties of lightweight cementitious composites. Construction and Building Materials, ScienceDirectHuntsville, v. 159, 2018 pág. 316-328, Huntsville, 20 Jan. 2018.

BURGER, N.; LAACHACHI, A.; FERRIOL, M.; LUTZ, M; TONIAZZO, V.; RUCH, D. Review of thermal conductivity in composites: mechanisms, parameters and theory. Progress in Polymer Science, ScienceDirect, Luxembourg, v. 61, 2016, pág. 1-28, Luxembourg, Out. 2016.

BUSSOLO, C. S. Influência do uso de poliestireno expandido (EPS) como agregado em argamassa. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia civil). Universidade Federal de Santa Caratina – UFSC. Joinville, 2020.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Florianópolis, 23 a 25 de maio de 2009.

CHUNG, S.Y.; ELRAHMAN, M.; STEPHAN, D. Effects of expanded polystyrene (EPS) sizes and arrangements on the properties of lightweight concrete. Materials and Structures, ScienceDirect, Berlin, v. 51, n. 3, p. 57, 2018.

CINCOTTO, M. A. Patologia das argamassas de revestimento: análise e recomendações. 2. Ed. São Paulo, IPT, 1995.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307, de 05 de Julho de 2002: Estabelece Diretrizes, Critérios e Procedimentos para um Gestão dos Resíduos da Construção Civil. Ministério do Meio Ambiente: Brasília, 2002.

Comite Europeen de Normalisation. EN 998-1: 2016. Specification for mortar for masonry - part 1: rendering and plastering mortar. 2016.

COSTA, P.L.A. Patologias do processo executivo de revestimentos de fachada de edifícios. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia civil), 2013, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, Ago. 2007.

DIXIT, A.; PANGA, S. D.; KANGB, S. H.; MOONB, J. Lightweight structural cement composites with expanded polystyrene (EPS) for enhanced thermal insulation. Cement and Concrete Composites. ScienceDirect. Gwanak-gu , v.102, 2019, p. 185–197, Gwanak-gu, Set. 2019.

EARTH FRIENDLY BUILDING MATERIALS, EPS Recycling, Disponível em http://www.efbm.com/Articles-on-Insulated-Concrete-Forms-(ICFs).html. Acesso em Abril de 2020.

FERRÁNDIZ-MAS, V.; GARCÍA-ALCOCEL, E. Physical and Mechanical

Characterization of Portland Cement Mortars Made with Expanded Polystyrene Particles Addition (EPS). Materiales de Construcción, Alicante, v. 62, n. 308, p. 547-566, 2012.

FERRÁNDIZ-MAS, V.; GARCÍA-ALCOCEL, E., CHEESEMAN, C.R. Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. Construction and building materials, ScienceDirect, v. 61, pág. 285-292, London, 2014.

FORMOSA, J.; CHIMENOS, J.M.; LACASTA, A.M.; HAURIE, L.; ROSEL, J.R. Novel fire-protecting mortars formulated with magnesium by-products. Cement and Concrete Research, ScienceDirect, v. 41, p. 191-196, Barcelona, 2011.

FRANCO, A. An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method. *Applied Thermal Engineering* 2007, 27, (14-15), 2495-2504.

GOMES, M.G; COLEN, I.F.; SILVA, F., PEDROSO, M. Thermal conductivity measurement of thermal insulating mortars with EPS and silica aerogel by steady-state and transient methods. Construction and building materials, ScienceDirect, v. 172, pág. 696-705, Lisboa, 2018.

GOMES, M. G.; COLEN, I. F.; MELO, H.; SOARES, A. Physical performance of industrial and EPS and cork experimental thermal insulation renders. Construction and building materials, ScienceDirect, v. 198, pág. 786-795, Lisboa, 2020.

GRAZZINI, G.; BALOCCO, C.; LICIA, U., Measuring thermal properties with the parallel wire method: a comparison of mathematical models. International Journal Heat Mass Transfer 1995, 39, (10), 5.

HUANG, S.; ZHU, W.; LU, D.; ZHAO, R. Study on EPS thermal insulation mortar prepared with oxychloride cement. EDP Sciences, E3S Web of Conferences, v. 198, Guangzhou, out, 2020.

HUANG, Z.;WANG, F.; ZHOU, Y.; SUI, L.; KRISHMAN, P.; YUEN, J.; LIEW, R. A Novel, Multifunctional, Floatable, Lightweight Cement Composite: Development and Properties. Materials, ScienceDirect, v. 11, Singapore, 2018.

JIMENEZ, M.; DUQUESNE, S.; BOURBIGOT, S. Characterization of the performance of an intumescent fire protective coating. Surface & Coatings Technology, ScienceDirect, França, v.201, p. 979-987, 2006.

KAYA, A.; KAR, F. Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. Construction and Building Materials. ScienceDirect., Elazig, vol. 105, 2016, pág. 572-578, Elazig, 15 Fev. 2016.

KOKSAL, F.; MUTLUAY, E.; GENCEL, O. Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene. Construction and Building Materials. ScienceDirect., vol. 236, Yozgat, 2020.

LEAL, M.M.R. Desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado. 2012. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal, 2012.

LERMEN, R. T.; FAVARETTO, P.; SILVA, R. A.; HIDALGO, G.E.N.; TUBINO, R.M.C.; TIECHER, F. Effect of Additives, Cement Type, and Foam Amount on the Properties of Foamed Concrete Developed with Civil Construction Waste. Applied Sciences, v. 9, n. 15, p. 2998, 2019.

LERMEN, R. T.; NETO, D.D.S.; SECCO, M.P. DALL'AGNOL, OLIVEIRA, L.N.; SILVA, R.A. Avaliação das Propriedades Físicas e Mecânicas de Blocos de Concreto Autoclavado e Espumígenos Comercializados em Passo Fundo/RS Brasil. Revista de Arquitetura IMED, v. 8, n. 1, p. 111-128, 2019.

LIU, N. e CHEN, B. Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. Construction and Building Materials, ScienceDirect, Shanghai, vol.68, 2014, pág. 227-232, Shanghai, 16 Jul. 2014.

MACEDO, A. M. A.; ZANELATO, E. B.; MANHÃES, A. L. F.; AZEVEDO, A. R. G.; MARVILA, M. T.; MONTEIRO, S. N.; ALEXANDRE, J.; PETRUCCI, L. J. T. Influência da incorporação de RCD em argamassas 74º Congresso Anual da ABM – Internacional, parte integrante da ABM Week, São Paulo, 01 a 03 de outubro de 2019.

MARTINS, M. Comportamento Físico de Argamassas de Reboco com Regranulado Negro de Cortiça. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

MILED, K; SAB, K; LE ROY, R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling. Mechanics of Materials, ScienceDirect, v. 39, p. 222–240, 2007.

MILLING, A.; MWASHA, A.; MARTIN, H. Exploring the Full Replacement of Cement with Expanded Polystyrene (EPS) Waste in Mortars used for Masonry Construction. Construction and Building Materials, ScienceDirect, Trinidad, 4 Abr. 2020.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Disponível em: <http://www.mp.go.gov.br/portalweb/hp/9/docs/rsudoutrina_24.pdf>. Acesso em: 21/03/2020.

MONTEIRO, D. Avarias em argamassas – causas, prevenção e reparação. 2008. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Universidade Fernando Pessoa – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Setúbal, 2008.

OLIVEIRA, L. S. Reaproveitamento de resíduos de poliestireno expandido (isopor) em compósitos cimentícios. 2013. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2013.

OLIVO, P. Estudo da influência da temperatura de queima da casca de arroz no desempenho da argamassa de revestimento. Dissertação (Mestrado em engenharia civil), 2020,

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.

PASSOS, P.M.; CARASEK, H. Argamassas com resíduos para revestimento isolante térmico de parede pré-moldada de concreto. Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental. Revista Cerâmica. São Paulo, vol.64, pág. 577-588, out./dez. 2018.

PCZIECZEK, A.; SCHACKOW, A.; EFFTING, C.; DIAS, T. F.; GOMES, I. R. Properties of mortars containing tire rubber waste and expanded polystyrene (EPS). Journal of Urban and Environmental Engineering, ScienceDirect, v.11, n.2, pág. 219-225, Joinville, jan. 2018.

POLLETO, M. Obtenção e caracterização de compósitos preparados com poliestireno expandido reciclado e pó de madeira. 2009. Tese (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2009.

RAMÍREZ, C.P.; BARRIGUETE, A.V.; SOMOLINOS, R.S.; MERINO, M.R.R.; SÁNCHEZ, E.A. Analysis of fire resistance of cement mortars with mineral wool from recycling. Construction and Building Materials, ScienceDirect, v. 265, Spain, 2020.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, S. Série monográfica qualidade: projeto de experimentos. Porto Alegre, 2001.

RODRIGUES, M. J. Desenvolvimento de um sistema de medição de viscosidade em uma roda giratória. Google Acadêmico, Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica), 2017, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Dez. 2017.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N. Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida. *Matéria (Rio de Janeiro)* 2010, 15, (1), 31-39.

SANTOS, W. N. D. Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmicas de materiais cerâmicos: II - o método do fio quente. Cerâmica 2005**,** 51, 10.

SANTOS, W. N. D., O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície (The hot wire method: the hot wire parallel technique and the hot wire surface technique). Cerâmica 2002**,** 48, 6.

SAYADI, A. A.; TAPIA, J. V.; NEITZERT, T. R.; CLIFTON, G. C. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. Construction and Building Materials. ScienceDirect. Auckland, vol.112, pág. 716-724, Auckland, 4 Mar. 2016.

SENGUL, O.; TASDEMIR, C.; TASDEMIR, M. A. A comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes. Energy and Buildings, ScienceDirect, Istanbul, 2017, v. 151, pág. 469- 475, Istanbul, 10 Jul. 2017.

SILVA, F. S. B. Condutibilidade térmica de argamassas térmicas com eps e aerogel de sílica. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – University Tecnico Lisboa, Lisboa, Maio 2017.

SILVA; M. W. M.; AZEVEDO, C. M.; FARIAS, L. S.; GOMES, E. M. R.; CORDEIRO, L. N. P. Absorção de água em argamassa leve com a incorporação de poliestireno expandido. Scientia Plena, vol. 16, n.2, Belém, 21 Fev. 2020.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas. XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído – Entac 2006, Florianópolis, 23 a 25 de Ago. 2008.

SIVESTRE, L.S. Análise de dados e estatística descritiva. Escolar Editora, São Paulo, 2007

SOUSA, A. J. C. Aplicação de Argamassas Leves de Reboco e Assentamento em Alvenarias. 2010. Dissertação (Mestrado em Educação) – Faculdade em Engenharia, Universidade do Porto, Mar. 2010.

SOUZA, R. P.; PACHECO, F.; PRAGER, G. L.; GIL, A.M.; CHRIST, R.; MELLO, V.M.; TUTIKIAN, B. F. Verification of the Influence of Loading and Mortar Coating Thickness on Resistance to High Temperatures Due to Fire on Load-Bearing Masonries with Clay Tiles. Materials, ScienceDirect, v.12, 2019.

TADESMIR, C.; SENGUL, O.; TASDESMIR, M. A. A comparative study on the thermal conductivities and mechanicalproperties of lightweight concretes. Energy and Buildings, ScienceDirect, Istanbul, v. 151, 2017, pág.469-475, 15 Fe. 2017.

TCATCH, R. K.; PIOVESAN, A. Z. Manifestações patológicas em revestimentos de argamassa: estudo de caso das anomalias observadas em edificações nos municípios de campos novos (SC) e herval d'oeste (SC). Anuário de Pesquisa e Extensão UNOESC Joaçaba, Joaçaba, v.4, 2019.

TENGKU, F. S. Lightweight high strength concrete with expanded polystyrene beads. Journal Mekteck, Tadulako, v. 8, 2006, Nº. 1, pág. 1-7, Tadulako 2006.

TITTARELLI, F.; GIOSUE, C.; MOBILI, A.; PERNA, C.; MONOSI, S. Effect of using recicled instead of virgin EPS in lighttweight mortars. Procedia Engineering, ScienceDirect, v. 161, p. 660-665, Marche, 2016.

THOMAZ, E. Chapisco, emboço e reboco são fundamentais para a boa qualidade do acabamento. Revista aecweb, disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/chapisco-emboco-e-reboco-sao-fundamentais-para-a-boa-qualidade-do-acabamento/11328>, acesso em dez. 2020.

TORRES, M. L.; RUIZ, P. A. G. Lightweight pozzolanic materials used in mortars: Evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption. Cement & Concrete Composites, ScienceDirect, v. 31, pág. 114-119, Cartagena, 2009.

VEIGA, M. do R. Argamassas de cal para conservação e reabilitação de edifícios: conhecimento consolidado e necessidades de investigação. Ambiente Construído, Lisboa, v. 18, 2018, n. 4, p. 85-96, Lisboa 18 Maio 2018.

VELOSA, A.; VEIGA, M. Argamassas do Património Histórico: conhecer para conservar e reabilitar. XII CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, Porto, 2016.

VYAS, P; CHAUDHURI, R.G.; GOPALAKRISHNAN, G.; BALADHANDAPANI, M. Development of novel formulation for high performance fire retardant cementitious mortars. Materials Today: Proceedings, ScienceDirect, v.28, p. 1245-1253, 2020.

ZAPARTE, T.A. Análise global da influência da finura da cinza de casca de arroz como substituição parcial ao cimento portland nas propriedades da argamassa de revestimento. Dissertação (Mestrado em engenharia civil), 2020, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.

ZHANG, J.; CHEN, B.; YU, F. Preparation of EPS-Based Thermal Insulation Mortar with Improved Thermal and Mechanical Properties, Journal of Materials in Civil Engeneering, ScienceDirect, v. 31, Shanghai, 2019.

ZHOU, B.; YOSHIOKAB, H.; NOGUCHIA, T.; ANDOA, T. Experimental study of expanded polystyrene (EPS) External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) masonery façade reaction-to-fire performance. Thermal Science and Engineering Progress, ScienceDirect, v. 8, p. 83-92, 2018.

ZHU, P.; BRUNNERB, S.; ZHAOB, S.; GRIFFAB, M.; LEEMANNB, A.; TOROPOVSB, N.; MALEKOSB, A.; KOEBELD, M.M.; LURAB, P. Study of physical properties and microstructure of aerogel-cement mortars for improving the fire safety of high-performance concrete linings in tunnels. Cement and Concrete Composites, ScienceDirect, v. 104, 2019.

APÊNDICE A – Resultados de densidade em estado endurecido

Densidade em estado endurecido (Kg/m³)							
Idade	CP's	Percentual de substituição					
		0%	10%	20%	30%	40%	50%
7 dias	P1	2029,06	1860,94	1764,22	1768,16	1682,46	1470,00
	P2	2047,97	1847,89	1762,70	1742,77	1585,82	1510,20
	P3	2002,66	1858,36	1783,79	1751,37	1591,37	1445,23
	P4	2041,56	1864,02	1788,44	1726,33	1607,38	1446,41
14 dias	P1	1981,41	1869,88	1852,93	1569,84	1583,59	1522,42
	P2	1928,16	1857,19	1740,47	1703,75	1631,21	1533,32
	P3	1966,64	1785,70	1743,59	1632,34	1605,94	1497,77
	P4	1876,68	1857,19	1764,96	1690,78	1571,80	1591,56
21 dias	P1	1875,55	1830,23	1739,02	1672,58	1599,10	1510,00
	P2	1888,28	1830,08	1785,51	1738,87	1650,82	1394,34
	P3	1832,46	1860,94	1770,55	1621,02	1605,98	1477,73
	P4	1875,86	1829,96	1790,70	1700,31	1580,86	1497,70
28 dias	P1	1965,47	1864,53	1742,70	1713,91	1535,16	1403,87
	P2	1982,42	1872,34	1734,92	1804,49	1642,27	1466,60
	P3	1914,22	1848,95	1798,20	1718,24	1549,41	1470,31
	P4	1891,37	1793,32	1721,41	1683,13	1554,80	1437,19

APÊNDICE B – Resultados de resistência à compressão

Resistência a compressão (MPa)							
Idade	CP's	Percentual de substituição					
		0%	10%	20%	30%	40%	50%
28 dias	P1	3,39	7,51	2,84	1,58	2,14	1,67
		5,16	8,58	1,84	5,59	1,70	1,60
	P2	3,07	3,35	6,31	1,98	2,08	1,33
		2,71	9,97	6,69	6,46	1,80	1,70
	P3	1,75	3,12	7,89	2,20	2,90	1,95
		1,85	6,24	8,32	6,82	3,06	1,71
	P4	2,28	9,11	7,71	7,14	2,64	1,65
		3,31	9,07	6,61	5,42	2,41	1,81

APÊNDICE C – Resultados de resistência à tração na flexão

Resistencia a Tração na Flexão (Mpa)							
Idade	CP's	Percentual de substituição					
		0%	10%	20%	30%	40%	50%
28 dias	P1	1,25	1,16	1,29	0,85	1,03	0,83
	P2	1,06	1,13	1,33	0,86	1,06	0,92
	P3	0,94	1,07	1,14	0,86	1,04	1,03
	P4	1,39	1,26	1,21	0,99	0,95	0,94

APÊNDICE D – Resultados de variação dimensional

Variação dimensional							
Idade	CP's	Percentual de substituição					
		0%	10%	20%	30%	40%	50%
1 dia	P1	298,41	296,72	291,20	296,00	302,00	300,55
	P2	299,81	297,05	293,71	294,34	298,82	300,63
	P3	299,52	298,37	290,87	292,03	298,80	298,66
7 dias	P1	298,26	296,68	291,00	295,82	302,72	299,77
	P2	299,74	296,99	293,10	293,92	298,60	299,78
	P3	299,41	298,27	290,65	291,71	298,10	297,41
28 dias	P1	298,16	296,40	290,00	295,68	302,33	299,52
	P2	299,71	296,87	293,36	293,80	297,59	299,75
	P3	299,41	298,16	290,42	290,42	296,79	297,46

APÊNDICE E – Resultados de absorção de água por imersão total

Absorção de água por imersão total (%)							
Idade	CP's	Percentual de substituição					
		0%	10%	20%	30%	40%	50%
28 dias	P1	11,62	12,05	12,44	14,09	16,55	16,52
	P2	12,67	12,31	13,17	14,01	15,40	16,53
	P3	11,59	13,28	12,99	14,27	15,33	16,54

APÊNDICE F – Resultados de índice de vazios

Índice de vazios (%)							
Idade	CP's	Percentual de substituição					
		0%	10%	20%	30%	40%	50%
28 dias	P1	20,33	21,24	21,91	23,92	26,86	26,33
	P2	22,71	22,08	23,14	23,04	24,68	27,22
	P3	20,82	23,59	22,47	24,11	25,67	26,94

APÊNDICE G – Resultados de massa específica seca

Massa específica seca (g/cm³)							
Idade	CP's	Percentual de substituição					
		0%	10%	20%	30%	40%	50%
28 dias	P1	1,75	1,79	1,76	1,70	1,62	1,59
	P2	1,79	1,79	1,76	1,64	1,60	1,65
	P3	1,80	1,78	1,73	1,69	1,67	1,63

APÊNDICE H – Resultados de massa específica saturada

Massa específica saturada (g/cm³)							
Idade	CP's	Percentual de substituição					
		0%	10%	20%	30%	40%	50%
28 dias	P1	1,95	2,00	1,98	1,94	1,89	1,86
	P2	2,02	2,01	1,99	1,87	1,85	1,92
	P3	2,00	2,01	1,95	1,93	1,93	1,90

APÊNDICE I – Resultados de aderência na tração

TRAÇO	Corpo de Prova	Carga (N)	Seção (mm^2)	Tensão (Mpa)	Forma de Ruptura			
					S	S/A	A	F
0%	1	563,88	1963,50	0,29			X	
	2	647,24	1963,50	0,33			X	
	3	744,32	1963,50	0,38			X	
	4	508,96	1963,50	0,26			X	
	5	616,84	1963,50	0,31		X		
	6	0,00	1963,50	0,00				X
	7	665,87	1963,50	0,34		X		
	8	714,90	1963,50	0,36			X	
	9	0,00	1963,50	0,00				X
	10	673,71	1963,50	0,34			X	
	11	696,27	1963,50	0,35		X		
	12	710,98	1963,50	0,36		X		
MÉDIA =		**654,30**	**1963,50**	**0,33**	**0,00%**	**33,33%**	**50,00%**	**16,66%**
10%	1	362,84	1963,50	0,18		X		
	2	392,26	1963,50	0,20		X		
	3	441,30	1963,50	0,22			X	
	4	539,36	1963,50	0,27			X	
	5	470,72	1963,50	0,24			X	
	6	0,00	1963,50	0,00				X
	7	813,95	1963,50	0,41			X	
	8	706,08	1963,50	0,36		X		
	9	676,66	1963,50	0,34			X	
	10	539,36	1963,50	0,27			X	
	11	490,33	1963,50	0,25			X	
	12	0,00	1963,50	0,00				X
MÉDIA =		**543,29**	**1963,50**	**0,28**	**0,00%**	**25,00%**	**58,33%**	**16,66%**
20%	1	470,72	1963,50	0,24			X	
	2	431,49	1963,50	0,22			X	
	3	0,00	1963,50	0,00				X
	4	509,94	1963,50	0,26			X	
	5	490,33	1963,50	0,25		X		
	6	392,26	1963,50	0,20			X	
	7	353,04	1963,50	0,18			X	
	8	608,01	1963,50	0,31			X	
	9	617,82	1963,50	0,31		X		
	10	402,07	1963,50	0,20		X		
	11	470,72	1963,50	0,24			X	
	12	0,00	1963,50	0,00				X
MÉDIA =		**474,64**	**1963,50**	**0,24**	**0,00%**	**25,00%**	**58,33%**	**16,66%**
30%	1	426,59	1963,50	0,22			X	

	2	421,68	1963,50	0,21			X	
	3	431,49	1963,50	0,22			X	
	4	0,00	1963,50	0,00				X
	5	411,88	1963,50	0,21			X	
	6	402,07	1963,50	0,20		X		
	7	406,97	1963,50	0,21			X	
	8	392,26	1963,50	0,20			X	
	9	353,04	1963,50	0,18			X	
	10	490,33	1963,50	0,25		X		
	11	0,00	1963,50	0,00				X
	12	441,30	1963,50	0,22			X	
MÉDIA =		**417,76**	**1963,50**	**0,21**	**0,00%**	**16,66%**	**66,66%**	**16,66%**
40%	1	617,82	1963,50	0,31			X	
	2	431,49	1963,50	0,22			X	
	3	549,17	1963,50	0,28			X	
	4	686,46	1963,50	0,35			X	
	5	676,66	1963,50	0,34			X	
	6	382,46	1963,50	0,19			X	
	7	304,00	1963,50	0,15			X	
	8	323,62	1963,50	0,16			X	
	9	186,33	1963,50	0,09			X	
	10	225,55	1963,50	0,11			X	
	11	0,00	1963,50	0,00				X
	12	0,00	1963,50	0,00				X
MÉDIA =		**438,36**	**1963,50**	**0,22**	**0,00%**	**0,00%**	**83,33%**	**16,66%**
50%	1	274,58	1963,50	0,14			X	
	2	509,94	1963,50	0,26			X	
	3	215,75	1963,50	0,11			X	
	4	313,81	1963,50	0,16			X	
	5	245,17	1963,50	0,12			X	
	6	637,43	1963,50	0,32			X	
	7	304,00	1963,50	0,15			X	
	8	441,30	1963,50	0,22			X	
	9	411,88	1963,50	0,21			X	
	10	568,78	1963,50	0,29			X	
	11	0,00	1963,50	0,00				X
	12	0,00	1963,50	0,00				X
MÉDIA =		**392,26**	**1963,50**	**0,20**	**0,00%**	**0,00%**	**83,33%**	**16,66%**

(S) Ruptura no substrato; (S/A) Ruptura na interfase substrato/argamassa; (A) Ruptura na argamassa; (F) Falha da colagem da peça metálica;

APÊNDICE J – Resultados de condutividade térmica

Condutividade térmica (W/mk)							
Idade	CP's	Percentual de substituição					
		0%	10%	20%	30%	40%	50%
28 dias	P1	1,23	1,16	0,79	0,67	0,43	0,33
	P2	1,37	0,96	0,89	0,79	0,47	0,45
	P3	1,09	1,06	0,84	0,73	0,39	0,39

APÊNDICE K – Resultados de perda de massa em corpos de prova expostos em altas temperaturas

Perda de massa								
Temperatura (ºC)	Idade	CP's	Percentual de substituição					
			0%	10%	20%	30%	40%	50%
300	28 dias	P1	5,3	7,22	8,08	10,02	10,7	9,3
		P2	8,06	9,47	10,45	15,91	10,26	11,04
		P3	8,58	8,92	9,58	7,11	11,33	12,69
500	28 dias	P1	7,9	7,78	10,94	16,45	19,51	20,87
		P2	10,99	11,56	15,33	16,19	11,93	19,6
		P3	12,83	17,16	12,1	8,7	13,54	13,11
700	28 dias	P1	16,25	18,32	17,54	22,34	22,06	19,36
		P2	12,92	23,64	23,24	22,87	21,9	21,62
		P3	14,62	6,57	20,29	20,44	22,01	22,06

APÊNDICE L – Resultados de resistência à compressão em corpos de prova expostos em altas temperaturas

Resistência à compressão (MPa)								
Temperatura (ºC)	Idade	CP's	Percentual de substituição					
			0%	10%	20%	30%	40%	50%
300	28 dias	P1	4,19	6,05	4,75	4,52	3,66	2,59
			4,33	5,69	5,58	3,99	3,46	2,62
		P2	5,86	5,67	3,47	3,44	3,14	3,02
			5,09	4,59	3,9	3,47	2,8	2,62
		P3	5,59	4,7	4,01	4	2,1	2,35
			5,57	5,21	4,78	4,19	2,83	2,2
500	28 dias	P1	3,35	3,43	2,26	1,54	1,73	1,03
			2,94	4,22	2,82	1,72	2,82	1,34
		P2	3,7	4,21	2,75	1,25	1,89	1,39
			4,04	5,62	2,33	1,06	2,29	0,6
		P3	3,02	2,87	2,04	1,85	1,62	0,78
			3,23	3,6	2,24	1,72	1,47	1,06
700	28 dias	P1	1,13	1,99	0,6	0,98	1,16	0,61
			0,75	2,73	0,85	0,72	0,78	0,81
		P2	0,81	1,52	0,61	1,42	1	0,79
			0,95	0,83	0,7	1,6	1,42	0,73
		P3	1,58	1,16	0,61	1,1	1,2	0,89
			1,55	0,89	0,71	0,85	0,74	0,61

APÊNDICE M – Resultados de resistência à tração na flexão em corpos de prova expostos em altas temperaturas

Resistência à tração na flexão (MPa)								
Temperatura (ºC)	Idade	CP's	Percentual de substituição					
			0%	10%	20%	30%	40%	50%
300	28 dias	P1	2,01	2,25	2,53	2,34	2,34	2,19
		P2	2,34	2,53	2,33	2,41	2,74	2,34
		P3	2,2	2,4	2,16	2,4	2,41	2,32
500	28 dias	P1	0,32	0,37	0,47	0,68	0,53	0,28
		P2	0,35	0,66	0,6	0,4	0,6	0,31
		P3	0,33	0,62	0,43	0,68	0,54	0,42
700	28 dias	P1	0,06	0,1	0,12	0,18	0,21	0,06
		P2	0,1	0,11	0,08	0,2	0,42	0,02
		P3	0,09	0,09	0,11	0,03	0,04	0,04