



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS
(P²CEM)**

ANA LARISSA CRUZ PRATA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)
NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E COMPORTAMENTO TÉRMICO DE
ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS.**

SÃO CRISTÓVÃO, SE – BRASIL

JUNHO DE 2022

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)
NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E COMPORTAMENTO TÉRMICO DE
ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS.

ANA LARISSA CRUZ PRATA

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS OTÁVIO DAMAS MARTINS

SÃO CRISTÓVÃO, SE – BRASIL

JUNHO/2022

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

P912a Prata, Ana Larissa Cruz
Análise da influência da adição de poliestireno expandido (eps) nas propriedades físico-mecânicas e comportamento térmico de argamassas cimentícias / Ana Larissa Cruz Prata ; orientador Carlos Otávio Damas Martins. - São Cristóvão, 2022.
61 f. : il.

Dissertação (mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Sergipe, 2022.

1. Ciência dos materiais. 2. Argamassa 3. Poliestireno I. Martins, Carlos Otávio Damas Orient. II. Título.

CDU 66.017

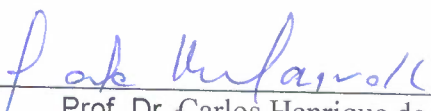
“ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE POLIESTIRENO
EXPANDIDO (EPS) NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS
E COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGAMASSAS
CIMENTÍCIAS”

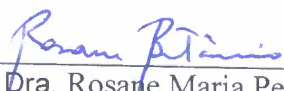
Ana Larissa Cruz Prata

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS.

Aprovada por:


Prof. Dr. Carlos Otávio Damas Martins


Prof. Dr. Carlos Henrique de Carvalho


Profa. Dra. Rosane Maria Pessoa Betânia Oliveira

SÃO CRISTÓVÃO, SE – BRASIL

Junho/2022

Este trabalho é dedicado aos meus pais, que nunca mediram esforços para me proporcionar a melhor educação, e sempre me ensinaram que o estudo é o único meio para alcançar meus objetivos.

“A persistência é o menor caminho ao êxito”

Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

O caminho foi longo (parecia não ter fim) e árduo, mas, felizmente foi concluído, em grande parte, graças ao apoio que tive de pessoas essenciais durante esse período.

Agradeço à Deus por em diversos momentos me demonstrar forças, onde imaginava ser impossível tê-las. Obrigada, misericórdia de Deus, pela vida e todas as bênçãos a mim concedidas.

Aos meus pais, que sempre me ajudaram desde o início, sem palavras para agradecer, essa conquista é NOSSA. A minha irmã Victória, que colocou a mão na massa, literalmente, para me ajudar. Muito obrigada por tudo e por tanto, Amo Vocês.

Ao meu namorado, Davi, que sempre esteve pronto para me ajudar, independente do dia da semana e do cansaço, fez acontecer cada momento junto comigo, obrigada pelo empenho e cada palavra necessária em momentos difíceis. Essa conquista também é sua. Te amo.

À família e amigos em geral, obrigada pela preocupação durante esse período.

As minhas amigas de mestrado e agora da vida, Thaís, Íris e Lídia, não tenho palavras para agradecer a ajuda nesse período, sem vocês o caminho teria sido ainda mais difícil, muito obrigada hoje e sempre. Sem esquecer de Renan, obrigada por toda ajuda com as dúvidas em partes específicas de sua área e nos dias em que colocamos à mão na massa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Martins, pelo apoio da orientação e aprendizado constante durante esse período, muito obrigada. Assim como, àqueles professores do Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - P2CEM que durante os projetos de pesquisa contribuíram de forma positiva com o resultado final do meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Raphael, do Departamento de Estatística e Ciências Atuariais, pela ajuda na análise estatística do presente trabalho.

Ao Brenno Lima do Laboratório de Microestruturas e Propriedades Mecânicas – LAMP (UFS) pelo auxílio no ensaio do presente trabalho.

Ao Prof. Msc. Euler que me ajudou durante o período da faculdade e continuou me ajudando durante o período da dissertação.

Aos responsáveis pelo laboratório do Instituto Federal de Sergipe – IFS, Rafael e Danilo, muito obrigada pela assistência durante esse período. Agradeço também ao IFS, pela liberação do uso do laboratório.

À minha psicóloga Glicia, seu trabalho foi essencial para alcançar o êxito dessa dissertação, muito obrigada.

Por fim, agradeço aos entes queridos que se foram durante o período tão incerto que passamos, meus avôs Valdomiro e Zé Cruz e minha tia Jô, sei que de onde estiverem, estão torcendo muito por mim.

“Ser persistente pode te abrir muitas portas. Ser agradecido pode mantê-las sempre abertas”.

Autor desconhecido

Resumo da Dissertação apresentada ao P²CEM/UFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS.

Ana Larissa Cruz Prata

Junho/2022

Orientador: Prof. Dr. Carlos Otávio Damas Martins

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Com o advento da norma NBR 15.575, os requisitos esperados pelos materiais empregados nas obras civis tornaram-se mais exigentes a fim de proporcionar adequada habitabilidade aos seus usuários. Aliado a isso, a urgente necessidade atual da reutilização/reciclagem de materiais nocivos ao meio ambiente pode ser uma alternativa para garantir tal habitabilidade. Neste panorama, o poliestireno expandido (EPS), um polímero que apresenta uma deficiente gestão de resíduos, pode ser aplicado nas obras civis com o objetivo de garantir um maior conforto térmico. Em detrimento disso, o uso em maiores proporções pode reduzir as características mecânicas primordiais para garantir um bom desempenho durante seu uso. Sendo assim, este trabalho buscou analisar as características físico-mecânica e de comportamento térmico em variadas adições de EPS em substituição à areia, com a finalidade de compará-las aos requisitos mínimos esperados pelas diretrizes normativas. Ao final do estudo, através dos resultados obtidos, foi possível verificar os percentuais válidos para a correta aplicação em obras civis.

Palavras Chave: Argamassa de revestimento; EPS; Ensaio não destrutivo; Desempenho físico-mecânico; Comportamento térmico.

Abstract of Master dissertation presented to P²CEM/UFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Materials Science and Engineering

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE ADDITION OF EXPANDED POLYSTYRENE (EPS) ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES AND THERMAL BEHAVIOR OF CEMENT MORTARS.

Ana Larissa Cruz Prata

June/2022

Advisors: Prof. Dr. Carlos Otávio Damas Martins

Department: Post Graduate Program of Materials Science and Engineering

With the advent of the NBR 15.575 standard, the requirements expected by the materials used in civil works became demanding in order to provide adequate habitability to its users. Allied to this, the current urgent need for the reuse/recycling of materials harmful to the environment can be the alternative to guarantee such habitability. In this scenario, expanded polystyrene (EPS), a polymer that presents poor waste management, can be applied in civil works in order to guarantee greater thermal comfort. To the detriment of this, the use in larger proportions can reduce the fundamental mechanical characteristics to guarantee a good performance during its use. Therefore, this work sought to analyze the physical-mechanical and thermal behavior characteristics of various EPS additions to replace sand, in order to compare them to the minimum requirements expected by the normative guidelines. At the end of the study, through the results obtained, it was possible to verify the valid percentages for the correct application in civil works.

Key Words: Coating mortar; EPS; Non-Destructive Tests; Physical-mechanical performance; Thermal behavior.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	Objetivo Geral.....	2
2.2	Objetivos Específicos.....	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1	Argamassa de revestimento.....	4
3.2	Argamassa leve.....	5
3.3	Propriedades e características da argamassa leve com adição de EPS.....	6
4	MATERIAIS E MÉTODOS	9
4.1	Caracterização do material	9
4.2	Análise física	11
4.2.1	Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica	11
4.2.2	Determinação da densidade de massa aparente	13
4.3	Análise morfológica	13
4.3.1	MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)	13
4.4	Análise mecânica.....	14
4.4.1	Determinação da resistência à compressão	14
4.4.2	Determinação da resistência à tração na flexão	15
4.4.3	Determinação da resistência de aderência à tração	16
4.4.4	Determinação da velocidade do pulso ultrassônico	18
4.5	Comportamento térmico	19
4.6	Análise estatística – ANOVA (Análise da Variância)	22
4.7	Limitantes da pesquisa	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
5.1	Análise física	24
5.1.1	Índice de consistência	24
5.1.2	Absorção de água	24
5.1.3	Índice de vazios	25
5.1.4	Massa específica e densidade aparente	26
5.2	Análise morfológica	27
5.2.1	MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)	28

5.3	Análise Mecânica.....	29
5.3.1	Resistência à compressão e resistência à tração na flexão	29
5.3.2	Resistência de aderência à tração	33
5.3.3	Velocidade do pulso ultrassônico	36
5.3.4	Análise estatística - ANOVA (Análise da variância)	37
5.4	Comportamento térmico	38
6	CONCLUSÕES	43
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
8	REFERÊNCIAS	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Camadas do revestimento argamassado.....	4
Figura 2: Estrutura molecular do poliestireno (EPS).....	5
Figura 3: (a) EPS utilizados como suporte de telhas e descartados para doação; (b) EPS triturado.....	9
Figura 4: Ensaio do índice de consistência – (a) Equipamentos; (b) Argamassa após ensaio.	11
Figura 5: Corte transversal das argamassas leves com variadas adições de EPS.....	11
Figura 6: Ensaio de absorção de água, índices de vazios e massas específicas – (a) Corpos de prova em estufa; (b) Medição da massa do corpo de prova na balança; (c) Corpos de prova imersos em água; (d) Medição da massa com corpo de prova imerso na balança hidrostática.....	13
Figura 7: Equipamento Kurt J. Lesker Company 108.....	14
Figura 8: Ensaio de resistência mecânica à compressão – Equipamento.....	14
Figura 9: Ensaio de resistência à tração na flexão – Equipamento e etapas do ensaio.	15
Figura 10: Protótipo da parede para ensaio da resistência de aderência à tração.....	16
Figura 11: Protótipo da parede para o ensaio de resistência de aderência à tração – (a) Aplicação do chapisco; (b) e (c) Camada da argamassa com o percentual de adição do EPS.....	16
Figura 12: Ensaio de resistência de aderência à tração - (a) (b) Execução do furo no protótipo; (c) Colagem das pastilhas; (d) (e) Arrancamento das pastilhas.....	17
Figura 13: Tipo de ruptura no ensaio de resistência de aderência a tração conforme ABNT NBR 13528-1:2019 [35]	18
Figura 14: Ensaio da velocidade do pulso ultrassônico.....	19
Figura 15: Esquema da caixa utilizada no ensaio de comportamento térmico.....	19
Figura 16: Esquema dos equipamentos e materiais utilizados no ensaio de comportamento térmico.....	20

Figura 17: Esquema (na prática) do ensaio de comportamento térmico – (a) Lado da lâmpada infravermelha; (b) Fixação da placa de argamassa e do sensor térmico; (c) Lado da câmera térmica; (d) Equipamentos de análise das temperaturas.....	20
Figura 18: Sensor térmico.....	21
Figura 19: Câmera termográfica utilizada no ensaio de comportamento térmico e suas especificações.....	21
Figura 20: Termo-higrômetro de marca TESTO e modelo 605-i.....	21
Figura 21: Curva granulométrica da areia.....	24
Figura 22: Absorção de água (%) conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.....	25
Figura 23: Índice de vazios (%) conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.....	25
Figura 24: Massas específicas conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.....	26
Figura 25: Densidade aparente conforme o % de EPS adicionado à argamassa	27
Figura 26: Microscopia eletrônica de varredura – (a) Estrutura celular do EPS; (b) Estrutura celular do EPS e presença de poros.....	28
Figura 27: Microscopia eletrônica de varredura – Estrutura celular do EPS com presença de poros.....	28
Figura 28: Microscopia eletrônica de varredura – (a) Estrutura da argamassa com adição de EPS; (b) (c) Estrutura do EPS e presença de vazios na zona interfacial entre EPS e pasta; (d) Pasta de cimento aderida na estrutura celular do EPS.....	28
Figura 29: Resistência mecânica – à compressão e à tração na flexão conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.....	29
Figura 30: Corpos de prova após o fim dos ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.....	31
Figura 31: Deformação conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa....	32
Figura 32: Módulo de Elasticidade Estático (MPa) conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.....	33
Figura 33: Correlação do Módulo de Elasticidade Estático e índice de vazios (%).	33

Figura 34: Resistência de aderência à tração (MPa) conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa e os tipos de rupturas apresentadas no ensaio.....	34
Figura 35: Ruptura do tipo coesiva constatadas nas argamassas com adição de EPS em um percentual de 0%, 60% e 75%, respectivamente.....	34
Figura 36: Ruptura do tipo adesiva constatadas nas argamassas com adição de EPS em um percentual de 15%, 30% e 45%, respectivamente.....	35
Figura 37: Velocidade do pulso ultrassônico (m/s) conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.....	36
Figura 38: Tempo de propagação da onda (μ s) conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.....	36
Figura 39: Formatos das ondas no ensaio de velocidade do pulso ultrassônico conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.....	37
Figura 40: Temperatura registrada na face externa e interna durante 120 minutos de ensaio na argamassa com percentual de 0% de adição de EPS.....	38
Figura 41: Temperatura registrada na face externa e interna durante 120 minutos de ensaio na argamassa com percentual de 15% de adição de EPS.....	39
Figura 42: Temperatura registrada na face externa e interna durante 120 minutos de ensaio na argamassa com percentual de 30% de adição de EPS.....	39
Figura 43: Temperatura registrada na face externa e interna durante 120 minutos de ensaio na argamassa com percentual de 45% de adição de EPS.....	39
Figura 44: Temperatura registrada na face externa e interna durante 120 minutos de ensaio na argamassa com percentual de 60% de adição de EPS.....	40
Figura 45: Temperatura registrada na face externa e interna durante 120 minutos de ensaio na argamassa com percentual de 75% de adição de EPS.....	40
Figura 46: Variação da temperatura entre as faces durante 120 minutos de ensaio conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.....	41
Figura 47: Esquema do fluxo de calor em partes do material compacto e com presença de descontinuidades (vazios).....	41
Figura 48: Termogramas durante 2 horas de ensaio conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Massa unitária dos materiais.....	10
Tabela 2: Resistência à tração na flexão e à compressão conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.....	29
Tabela 3: Classes normativas para a resistência à compressão em comparação aos resultados do estudo.....	30
Tabela 4: Classes normativas para a resistência à tração na flexão em comparação aos resultados do estudo.....	30
Tabela 5: Resistências normativas para a resistência de aderência à tração e o emprego do material.....	35
Tabela 6: Resultados da análise estatística ANOVA.....	37

LISTA DE SIGLAS

EPS	Poliestireno Expandido
END'S	Ensaio não destrutivo
CP	Cimento Portland
CH	Cal Hidratada
ANOVA	Análise de variância
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a busca de novos conhecimentos e materiais estão voltadas para a sustentabilidade devido a urgência que o mundo necessita em praticar a reciclagem, reduzir a emissão de gases tóxicos e o grande desperdício de materiais diariamente. Dentre os materiais, o poliestireno expandido (EPS) presente em grande quantidade nas embalagens descartáveis, se torna uma séria ameaça ambiental, devido à prática não sustentável de descartar EPS em aterros sanitários, pois ocupa grandes volumes para uma pequena massa e não sendo adequado para queima, pois são liberados cinquenta e sete (57) subprodutos químicos durante a combustão da espuma de poliestireno, sendo o principal o estireno, uma toxina e possivelmente um gás cancerígeno. Devido aos impactos ambientais dos resíduos de EPS e ao aumento exponencial do seu uso, a necessidade de uma gestão ecológica desse material, tornou-se imperativa [1]. No Brasil, a gestão de resíduos sólidos na construção civil é regulamentada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e a Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) 307/2002, que classifica o EPS no âmbito da construção como classe B do tipo materiais que podem ser reciclados e ganhar outras destinações. Com a finalidade de alavancar essa gestão de resíduos, surgiu o interesse de pesquisadores na aplicação do poliestireno como material de construção que pode ser encontrado nas obras a partir da sustentação de matérias-primas/insumos e como caixa para isolamento do objeto com o meio externo.

A indústria da construção civil utiliza excessivamente a exploração de recursos naturais, como o agregado miúdo - areia e necessita de materiais alternativos para reduzir o alto impacto ambiental do setor. Diante do cenário, o uso de EPS reciclado na construção é uma alternativa sustentável de estratégia mitigadora de impactos, para ambas realidades, a partir da aplicação desse material na produção de argamassas leves, por exemplo.

As argamassas leves produzidas com a adição de poliestireno, podem ser aplicadas como argamassas de assentamento e de revestimento e possuem características marcantes, principalmente de isolamento térmico e baixo peso próprio. Essa aplicação contribui para a eficiência energética das edificações, principalmente na atualidade em que o aumento gradual da temperatura influencia diretamente no aumento do consumo de energia nos edifícios, além disso, episódios de crises energéticas, atualmente, ocorrem com mais frequência em todo o mundo, principalmente nas regiões tropicais [2].

A temática do desempenho térmico se destaca na indústria da construção civil através do advento da ABNT NBR 15575-4:2013 [3], conhecida como a Norma de Desempenho, que estabelece diretrizes para atendimento de requisitos mínimos em construções habitacionais. O desempenho térmico de edificações pode ser entendido como à resposta da habitação, a partir de parâmetros climáticos inerentes ao clima em que está localizada. O envoltório de uma edificação estabelece relações entre o ambiente interno e externo, portanto, os materiais que a compõem atuam nas condições do espaço interior [4]. Com isso, a aplicação de materiais isolantes térmicos nas fachadas e compartimentos internos das habitações diminuem o consumo de energia pelo fato de proporcionar maior conforto térmico ao ambiente.

Para contribuir com a sustentabilidade e promover a reutilização de um material com destinação final, nociva ao meio ambiente, diminuir o alto impacto da indústria da construção civil e atender diretrizes normativas e mínimas necessárias para as habitações, este trabalho analisou diferentes adições de EPS à argamassa de revestimento em substituição ao agregado miúdo. Foram analisadas as principais propriedades, com intuito de promover a implantação de um sistema construtivo de argamassa de revestimento com material reciclado e isolante.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho visou o estudo de argamassas de revestimento com variadas adições de EPS em substituição ao agregado miúdo (areia) para análise de propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e comportamento térmico com vistas para a garantia do desempenho das argamassas de revestimento em obras civis.

2.2 Objetivos Específicos

- Promover maior confiabilidade na aplicação de um material sustentável através da análise de ensaios no âmbito físico-mecânico e de comportamento térmico;
- Simular, através de um protótipo, o comportamento térmico de argamassas com adição de EPS através da submissão às temperaturas registradas no clima da região;
- Aplicar ensaios não destrutivos na análise das características mecânicas e térmicas com o fito de aliar a nova tecnologia com a confiabilidade dos resultados;
- Comparar os resultados dos ensaios propostos no estudo com os requisitos mínimos normativos para promover a confiabilidade na aplicação do material;
- Determinar as limitações da aplicação do material conforme as características resultantes promovidas através da conclusão dos ensaios.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento de materiais aliados à sustentabilidade, desempenho mecânico adequado e bom comportamento térmico é o principal objetivo de órgãos ambientais e comunidades acadêmicas, principalmente no tocante à construção civil, visto que essa é uma das indústrias que mais geram resíduos e poluentes. Uma das alternativas de diminuir o impacto dessa realidade é o reaproveitamento de resíduos em materiais de construção, pois de um lado tem-se os resíduos que não possuem a destinação esperada e correta após seu uso e de outro, materiais que durante sua fabricação agredem severamente o meio ambiente a partir da emissão de poluentes. Sendo assim, um dos materiais empregados na indústria da construção civil que pode aliar resíduos e sustentabilidade é a argamassas de revestimento.

3.1 Argamassa de revestimento

A argamassa é um material de construção constituído por uma mistura homogênea de um ou mais aglomerantes (cimento ou cal), agregado miúdo (areia) e água. As argamassas de revestimentos têm a função de proteção e acabamento da superfície, por exemplo, da alvenaria de bloco para o recebimento do revestimento final, seja ele cerâmico ou pintura. Dentre as camadas das argamassas de revestimentos têm-se o chapisco, emboço e o reboco, conforme Figura 1.

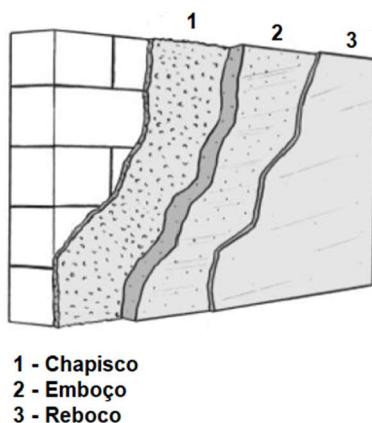


Figura 1: Camadas do revestimento argamassado. [5]

Além de proteção e acabamento, as argamassas de revestimento têm a função de unir com solidez elementos de alvenaria ajudando a resistir aos esforços que as paredes estão submetidas e auxilia-las a cumprirem as suas funções quanto as características mecânicas, isolamento térmico, acústico, estanqueidade à água e de

segurança contra incêndio [6]. Para melhorar suas características quanto ao desenvolvimento de determinada função, materiais e aditivos podem ser incorporados à argamassa; quando esses têm a finalidade de reduzir a densidade do material, constituem-se as argamassas leves.

3.2 Argamassa leve

A composição da argamassa leve é semelhante à argamassa tradicional e pode constituir, por exemplo, na substituição do agregado miúdo (areia $\sim 1.480,00 \text{ kg/m}^3$) por materiais com densidades mais leves, como é o caso da substituição pelo poliestireno expandido (EPS $\sim 16,35 \text{ kg/m}^3$).

O EPS pertence ao grupo dos polímeros da classe mais importante dos termoplásticos. Sua estrutura molecular é formada por hidrogênio e carbono (Figura 2), composta de longas cadeias produzidas pela união de monômeros – estireno, que apesar de longas, possuem ramificações que restringe o empacotamento mais denso das cadeias, reduzindo a densidade, dureza e a resistência mecânica do polímero. É de natureza amorfa e a posição do elemento anel benzeno é suficientemente aleatória para inibir a cristalização, tal elemento também propicia ao poliestireno maior reatividade do que um polietileno [7] [8].

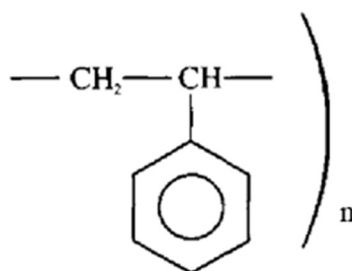


Figura 2: Estrutura molecular do poliestireno (EPS). [8]

Em suma, seu processo de fabricação baseia-se na mistura do estireno com um hidrocarboneto de baixo ponto de ebulição para depois ser polimerizado. Através de um agente expensor, que pode ser incorporado antes da polimerização, a partir do tipo de moldagem a vapor, os grânulos se expandem para cerca de 40 vezes seu tamanho anterior. A entrada de vapor nas células causa um aumento adicional na pressão interna resultando em uma maior expansão. Em seguida, os grânulos são resfriados e o vapor dentro das células se condensa causando um vácuo parcial no interior, equilibrando a

pressão interna com a externa. Por fim, os grânulos são moldados, novamente, a vapor, expandindo após a penetração nas células. Expandidos, os grânulos consistem em até 98% de ar e apenas 2% de poliestireno. O seu índice de vazios pode chegar a valores entre 40 e 100, onde em 1m³ de EPS, por exemplo, existem de 3 a 6 bilhões de células fechadas e cheias de ar. As características marcantes da espuma de poliestireno moldada a vapor são a baixa densidade e condutividade térmica decorrente de uma estrutura celular fechada, com ar ocluído, que dificulta a transferência de calor [8][9][10].

Salienta-se que a fonte de energia utilizada em seu processo de fabricação é o vapor de água, tornando sua tecnologia limpa. Além disso, o consumo de água em sua fabricação é mínimo, ou seja, o impacto é restrito. Devido ao fato de o consumo de água ser mínimo, e o produto ser limpo, esta água utilizada no processo pode ser reutilizada [9].

3.3 Propriedades e características da argamassa leve com adição de EPS

O estudo da absorção de água é fundamental para a durabilidade de um material de construção, segundo TITARELLI [11] as argamassas com EPS reciclado possuem absorção de água inferior quando comparado ao EPS virgem, devido ao formato dos grãos do material. Enquanto o EPS virgem apresenta formato esférico e composição granulométrica uniforme que desfavorece o empacotamento das partículas, formando macroporos, o EPS reciclado possui formato irregular que aumenta a tortuosidade do caminho da água. Quando comparado a argamassa sem adições (de referência) a presença e o aumento do EPS reciclado, aumentou a absorção de água e o índice de vazios e reduziu a massa específica e densidade do material em relação à argamassa de referência. O aumento da absorção de água e índice de vazios é influenciado pelos vazios existentes nas zonas interfaciais entre o EPS e a pasta de cimento + areia não estar bem compactadas, devido a menor interação que o EPS possui com a pasta de cimento + areia, aumentando a porosidade no material. O estudo de TORRES [12] complementa que apesar de sua natureza hidrofóbica, o poliestireno expandido adicionado à argamassa, apresenta menor resistência à penetração de água, resultando em um aumento de 35% na absorção de água entre a argamassa de referência e a argamassa com adição de EPS. A redução da massa específica e densidade do material é explicada devido ao material ser formado por aproximadamente 95-98% de ar, resultando em uma menor gravidade específica em relação aos agregados naturais [13] [14].

No âmbito das propriedades mecânicas, a resistência à compressão e à tração na flexão de argamassas com adição de EPS, também apresentam influências dos vazios existentes nas zonas interfaciais entre o EPS e a pasta de cimento + areia. Além disso, a substituição da areia leva a uma redução nas propriedades mecânicas, devido à força zero do EPS que resulta na baixa capacidade resistente dos grânulos de poliestireno quando submetidos à uma força, enfraquecendo com isso, o comportamento mecânico da mistura [15][16][17][18][19]. Exemplificando, o estudo de FERRÁNDIZ-MAS *et al.* [20] demonstra que argamassas produzidas com adição de 70% de EPS virgem em relação à argamassa padrão oferecem perdas de resistência à compressão de até 80% e perda de resistência à tração na flexão de, aproximadamente 40%. No estudo de MAAROUFI [15] a adição em substituição à areia de 53% de EPS reciclado na argamassa, reduziu em 80% a resistência mecânica à compressão em comparação à argamassa de referência, comportamento também encontrado nos estudos de PASSOS [18] e MILLING [1]. De qualquer forma os estudos concluíram que os valores atingidos, atendem a finalidade para argamassas de revestimento.

De forma análoga, o módulo de elasticidade de argamassas com adição de EPS também sofre redução, pois a maior plasticidade fornecida pelo poliestireno expandido pode ser consequência de seu comportamento plástico [12], uma vez que os grânulos de EPS têm rigidez desprezível. O estudo de NIKBIN [13] demonstra que a redução do módulo de elasticidade pode chegar em até 30% quando comparado corpos de prova com adição de 40% de EPS em relação ao de referência (0% de adição). Vale ressaltar que, tal comportamento é relevante para argamassas de revestimento, pois indica a possibilidade de deformação do material sem ruptura do revestimento, pois esses estão sujeitos a movimentação diferenciais de diversas solicitações que demandam do material adequada deformabilidade [18].

Complementando a análise do estudo da resistência mecânica para argamassas com adição de EPS, MILLING [1] analisou a resistência de aderência à tração substituindo o percentual de cimento por uma pasta de EPS (grânulos de poliestireno + solvente orgânico – acetona) e constatou que à medida que a quantidade da pasta de EPS aumentou a resistência da ligação diminuiu e quando duplicava a pasta no material, a resistência de ligação restringiu de 3,96 MPa para 1,91 MPa, resultando em cerca de 52% de redução.

Com o objetivo de investigar internamente o material para analisar seu desempenho, os ensaios não destrutivos (END's) atuam sem alterar o estado do material e atualmente, vêm sendo amplamente empregados no âmbito científico. Como exemplo, o método de ensaio da velocidade do pulso ultrassônico é aplicado para verificar a homogeneidade da argamassa, a fim de avaliar a integridade interna, no

tocante à presença de fissuras ou vazios (porosidade) demonstrando com isso, as características físicas e mecânicas. Essa técnica ultrassônica consiste na propagação de ondas sonoras no material, que com a presença de descontinuidades alteram a velocidade dessa onda postergando a chegada do sinal ao receptor, resultando com isso em uma velocidade menor quando comparada a velocidade de um material mais homogêneo, sem descontinuidades [21] [22]. O estudo realizado por LATROCH *et al.* [16] empregou a técnica ultrassônica e analisou a velocidade de propagação em relação à porosidade do material, verificando que a velocidade diminuía à medida que a proporção da adição de poliestireno aumentava na argamassa devido à maior presença de descontinuidades, ou seja, porosidade. Ainda neste estudo, foi constatado que na maior adição de 75% de EPS, a velocidade do pulso ultrassônico diminuiu cerca de 30% quando comparada a argamassa de referência, conclusões semelhantes foram obtidas nos estudos realizados por LAFHAJ *et al.* [23], LAFHAJ *et al.* [24] e HERNÁNDEZ *et al.* [25]. Outras duas características que podem ser analisadas a partir da onda ultrassônica é a atenuação e a amplitude. A atenuação é a perda gradual de energia, que é absorvida pela movimentação que a onda gera das partículas do meio para que oscilem e repassem esse movimento para a partícula vizinha, quanto maior essa absorção de energia, maior será a atenuação e menor será a amplitude da onda, devido às descontinuidades presentes no interior do material [26].

A aplicação do ensaio de termografia infravermelha, pertencente aos END's, possibilita a análise da variação de temperatura no decorrer do tempo através de uma câmera termográfica que detecta energia infravermelha (calor), converte-a em sinal elétrico e produz imagens, efetuando cálculos de temperatura [27]. As imagens reproduzidas são termogramas, que exibem as diferentes temperaturas de um determinado local da amostra na forma de gradientes de coloração (escala policromática) ou de tonalidades de cinza (escala monocromáticas) [28]. A análise da técnica foi aplicada por AZENHA *et al.* [29] que observou que a partir da termografia é possível estudar a evolução das temperaturas da superfície através de qualquer pixel do termograma permitindo traçar curvas de temperatura versus tempo. O estudo realizado por NETO [9] analisou a temperatura superficial da face interna e externa das argamassas com diferentes adições de materiais poliméricos aplicados a alvenaria de bloco após exposição solar, por meio da câmera infravermelha. Este estudo concluiu que adições de EPS na proporção de 20% e 30%, resultam em uma diferença de temperatura entre as faces em torno de 10°C.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização do material

Para a presente discussão de resultados do tema apresentado, o desenvolvimento do trabalho iniciou-se com a aquisição e estudo do material, e em seguida a caracterização através da execução de ensaios.

O EPS adquirido para o presente trabalho foi doado de uma obra em andamento, onde empregava tal material para sustentação de telhas termoacústicas que em seguida seriam descartadas. Após coleta, o material foi triturado no equipamento denominado moinho de facas e em seguida, passou-se por um conjunto de peneiras definindo a granulometria do material com $\varnothing < 4,8\text{mm}$ (Figura 3).

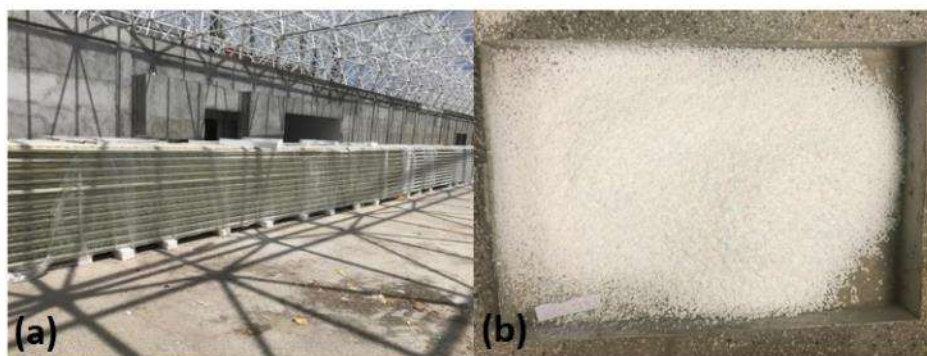


Figura 3: (a) EPS utilizados como suporte de telhas e descartados para doação; (b) EPS triturado.

Além do EPS, os materiais utilizados foram o cimento do tipo Cimento Portland CP II-F-32-RS a cal hidratada CH-I e a areia, considerada fina, em seu maior percentual. Cabe salientar que toda areia retida na peneira $\varnothing = 4,8\text{mm}$ foi descartada.

O traço do estudo foi 1:2:6, usualmente empregado em argamassas de revestimentos de paredes (reboco). Definiu-se o percentual de adição de EPS em substituição à areia, de 0% (referência), 15%, 30%, 45%, 60% e 75%. De posse de tais informações, executou o ensaio que determinou a massa unitária dos materiais e o índice de consistência que definiu a quantidade necessária de água para cada percentual de EPS, conforme índice padrão de consistência da argamassa. Tais ensaios foram executados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe – IFS.

De início, conforme ABNT NBR 16972:2021 [30] determinou-se a massa unitária dos materiais constituintes da argamassa através da medição da massa do recipiente vazio, recipiente com o agregado e o volume do recipiente, conforme métodos

específicos mencionados na norma (método A, B e C), conforme o tipo de material. De posse das medições, determina-se a massa unitária através da Equação 1, obtendo como resultado demonstrado na Tabela 1.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar}-m_r}{V} 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

ρ_{ap} é a massa unitária do agregado em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

m_{ar} é a massa do recipiente com o agregado em quilogramas (kg);

m_r é a massa do recipiente vazio em quilogramas (kg);

V é o volume do recipiente em metros cúbicos (m³).

Material	Resultado (g/cm³)
Cimento	1,08
Cal	0,59
Areia	1,48
EPS	0,0164

Tabela 1: Massa unitária dos materiais.

Aliado a determinação da massa unitária, verificou-se em cada percentual adicionado de EPS, o índice de consistência de acordo com a ABNT NBR 13276:2016 [31]. Ao executar a argamassa de cada traço, na mesa para índice de consistência (Figura 4a;3), formou-se no molde troncônico (Figura 4a;1) três camadas sucessivas com alturas aproximadamente iguais, aplicando em cada uma delas, sucessivamente, quinze, dez e cinco golpes com o auxílio do soquete (Figura 4a;2) de maneira a ficar uniforme. Após realizar o rasamento na superfície do molde, retirou-o verticalmente e acionou a manivela da mesa durante 30s gerando 30 golpes de subida e descida. Por fim, após a última queda mediu-se com o auxílio do paquímetro o espalhamento da argamassa (Figura 4b).



Figura 4: Ensaio do índice de consistência – (a) Equipamentos; (b) Argamassa após ensaio.

De posse de tais informações, foram confeccionados os corpos de prova de acordo com a demanda de cada ensaio programado, permanecendo na cura, para o desenvolvimento e hidratação de seus componentes.

O teor de partículas de EPS para cada traço é nitidamente observado na Figura 5, a partir do corte transversal do corpo de prova prismático.

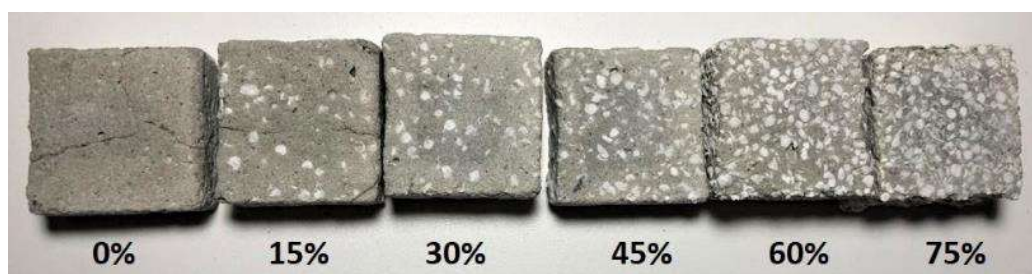


Figura 5: Corte transversal das argamassas leves com variadas adições de EPS.

4.2 Análise física

4.2.1 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os ensaios de absorção de água (%), índice de vazios (%) e massas específicas, foram desenvolvidos conforme ABNT NBR 9778:2006 [32] e realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe – IFS. Inicialmente cinco corpos de prova cilíndricos de cada traço permaneceram na estufa por 72hrs a temperatura 105 ± 5 °C, concluindo o tempo proposto, com o auxílio da balança

registrou-se a massa da amostra seca (m_s). Na segunda etapa os corpos de prova permaneceram imergidos em água para saturação durante 72hrs na temperatura 23 +/- 2°C, concluindo o tempo de imersão solicitado, as amostras foram colocadas em um recipiente preenchido com água em ebulição durante 5hrs, em seguida após a água estabilizar na temperatura de 23 +/- 2°C por meio de uma balança hidrostática, registrou-se a massa da amostra saturada imersa em água após fervura (m_i). Por fim, ao retirar as amostras da água e enxugá-las com pano úmido, com o auxílio da balança registrou-se a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (m_{sat}). Todas as etapas conforme a Figura 6. De posse dos dados, calculou-se através das Equação 2 a 6 os seguintes parâmetros de análise:

- Absorção (A)

$$A = \frac{m_{sat}-m_s}{m_s} 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

- Índice de vazio (I_v)

$$I_v = \frac{m_{sat}-m_s}{m_{sat}-m_i} 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

- Massa específica da amostra seca (ρ_s)

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat}-m_i} \quad (\text{Eq. 4})$$

- Massa específica da amostra saturada (ρ_{sat})

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat}-m_i} \quad (\text{Eq. 5})$$

- Massa específica real (ρ_r)

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s-m_i} \quad (\text{Eq. 6})$$

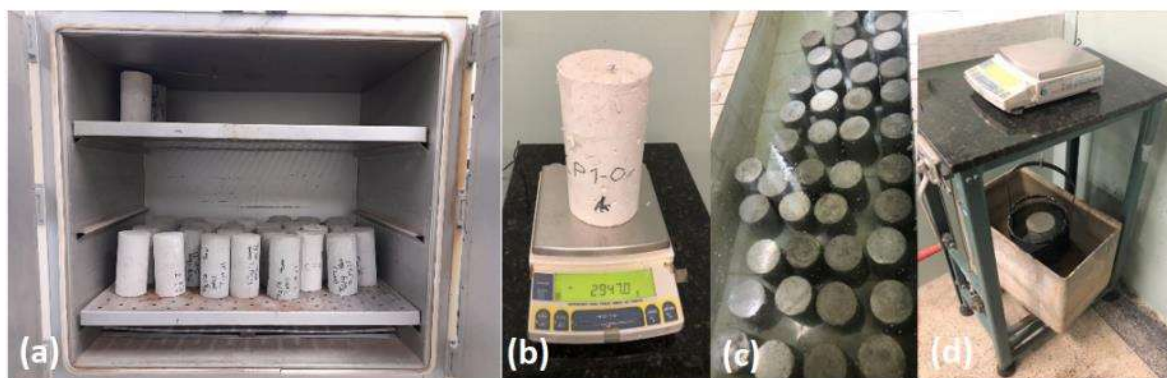


Figura 6: Ensaio de absorção de água, índices de vazios e massas específicas – (a) Corpos de prova em estufa; (b) Medição da massa do corpo de prova na balança; (c) Corpos de prova imersos em água; (d) Medição da massa com corpo de prova imerso na balança hidrostática.

4.2.2 Determinação da densidade de massa aparente

A análise da densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas foi consoante a ABNT NBR 13280:2005 [33], tal ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe – IFS. Através do estudo de 5 corpos de prova de cada traço, com o auxílio do paquímetro foi medido o diâmetro em duas posições ortogonais no seu terço médio e sua altura em três pontos diferentes. Em seguida, com o auxílio da balança, registrou-se sua massa, calculou-se o volume da amostra e obteve-se a densidade a partir da Equação 7.

$$\gamma_{ap} = 1000 \frac{M}{V} \quad (\text{Eq. 7})$$

onde:

γ_{ap} é a densidade de massa aparente em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

M é a massa em gramas (g);

V é o volume do corpo de prova em centímetros cúbicos (cm³).

4.3 Análise morfológica

4.3.1 MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais

(DCEM/UFS), no microscópio JSM- 5700 da JEOL. Foram analisadas 1 amostra de EPS e 6 amostras de cada tipo de adição de EPS à argamassa, anteriormente metalizadas com prata durante 200 segundos pelo equipamento Kurt J. Lesker Company 108 – Cressing Thickness Mpnitor mtm 10 (Figura 7).



Figura 7: Equipamento Kurt J. Lesker Company 108.

4.4 Análise mecânica

4.4.1 Determinação da resistência à compressão

Na determinação da resistência mecânica à compressão das argamassas, o ensaio foi desenvolvido conforme ABNT NBR 13279:2005 [34] e realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção Civil - LEMC do Serviço Social da Indústria - SESI, a partir 3 corpos de prova prismáticos para cada traço. Esses foram ensaiados na Prensa Elétrica Hidráulica, conforme Figura 8.



Figura 8: Ensaio de resistência mecânica à compressão – Equipamento.

Ao finalizar o ensaio, de posse das cargas máximas aplicadas, efetuou-se o cálculo da resistência mecânica à compressão através da Equação 8.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

R_c é a resistência mecânica à compressão em megapascal (MPa);

F_c é a carga máxima aplicada em newton (N);

1600 é a área da seção em milímetros (mm).

4.4.2 Determinação da resistência à tração na flexão

A determinação da resistência à tração na flexão foi regida pela ABNT NBR 13279:2005 [34] e realizado no Laboratório de Microestruturas e Propriedades Mecânicas – LAMP/UFS, a partir da análise de 3 corpos de prova prismáticos para cada adição de EPS à argamassa. O ensaio consiste em posicionar o corpo de prova no equipamento (Máquina Universal de Ensaio Mecânico com controle de velocidade de deformação INSTRON série 3367), e em seguida, aplicar uma carga de 50 ± 10 N/s até a ruptura do mesmo, conforme demonstrado na Figura 9.



Figura 9: Ensaio de resistência à tração na flexão – Equipamento e etapas do ensaio.

De posse dos resultados da carga, o cálculo da resistência à tração na flexão é realizado através da Equação 9, que se apresentou de forma automática no software do equipamento utilizado, demonstrando também o resultado do módulo de elasticidade e o gráfico tensão x deformação.

$$Rf = \frac{1,5 Ff L}{40^3} \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde:

Rf é a resistência à tração na flexão, em megapascal (MPa);

Ff é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newton (N);

L é a distância entre os suportes, em milímetros (mm).

4.4.3 Determinação da resistência de aderência à tração

A determinação da resistência de aderência à tração é conforme a ABNT NBR 13528-1:2019 [35] e foi realizada com o suporte do Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção Civil - LEMC do Serviço Social da Indústria - SESI. Para execução do ensaio, foram produzidos 6 protótipos de paredes em alvenaria de bloco, formados por 7 blocos, conforme Figura 10.



Figura 10: Protótipo da parede para ensaio da resistência de aderência à tração.

Após montagem do protótipo, aplicou-se o chapisco e em seguida a argamassa conforme cada percentual de adição de EPS (Figura 11).



Figura 11: Protótipo da parede para o ensaio de resistência de aderência à tração – (a) Aplicação do chapisco; (b) e (c) Camada da argamassa com o percentual de adição do EPS.

Após conclusão dos protótipos com as devidas camadas de revestimento, iniciou-se o ensaio propriamente dito com a demarcação do local a ser estudado, e em seguida, com o auxílio de uma furadeira serra copo, realizou-se 4-6 cortes circulares (diâmetro de 50 ± 1 mm) em cada protótipo (Figura 12; a b). Após o corte, foi fixada a pastilha (Figura 12; c) para acoplar o dinamômetro na argamassa de revestimento através de uma cola epóxi que reagiu durante 24hrs. Após o tempo informado, foi executado o ensaio de arrancamento com o auxílio do equipamento Aderímetro Hidráulico Digital, marca Pavitest – Contenco, conforme Figura 12; (d) (e).

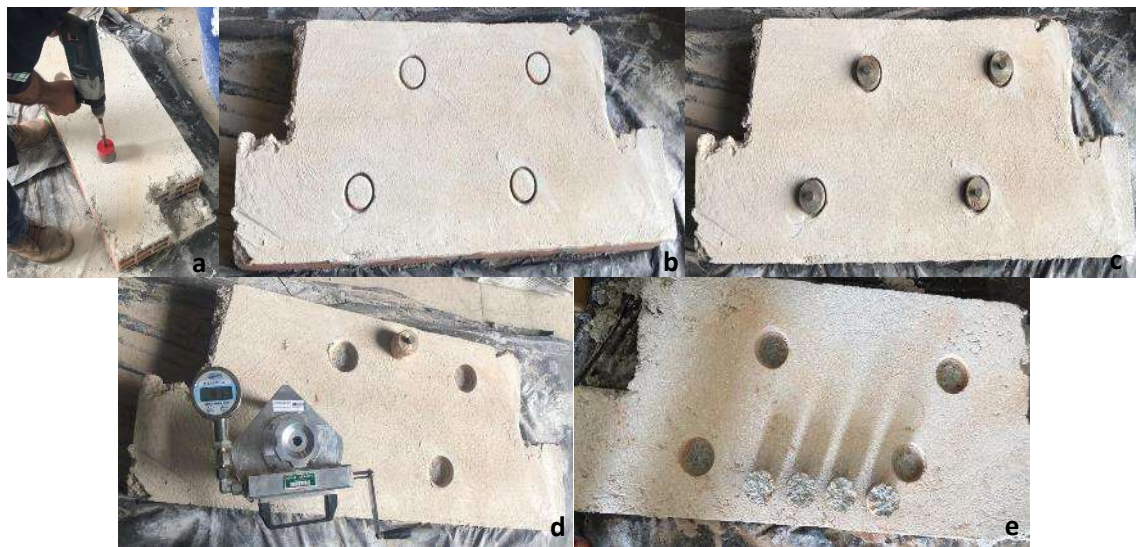


Figura 12: Ensaio de resistência de aderência à tração - (a) (b) Execução do furo no protótipo; (c) Colagem das pastilhas; (d) (e) Arrancamento das pastilhas.

De posse da força de ruptura (N) informada no aderímetro, calculou-se a resistência de aderência à tração, conforme a Equação 10.

$$Ra = \frac{F}{A} \quad (\text{Eq.10})$$

Onde:

Ra é a resistência de aderência à tração, em megapascal (MPa);

F é a força de ruptura, em newtons (N)

A é a área do corpo de prova, em milímetros quadrados (mm²).

Após a análise da força de ruptura, verificou-se o tipo de ruptura para cada pastilha e classificou conforme o preconizado na ABNT NBR 13528-1:2019 [35] (Figura 13).

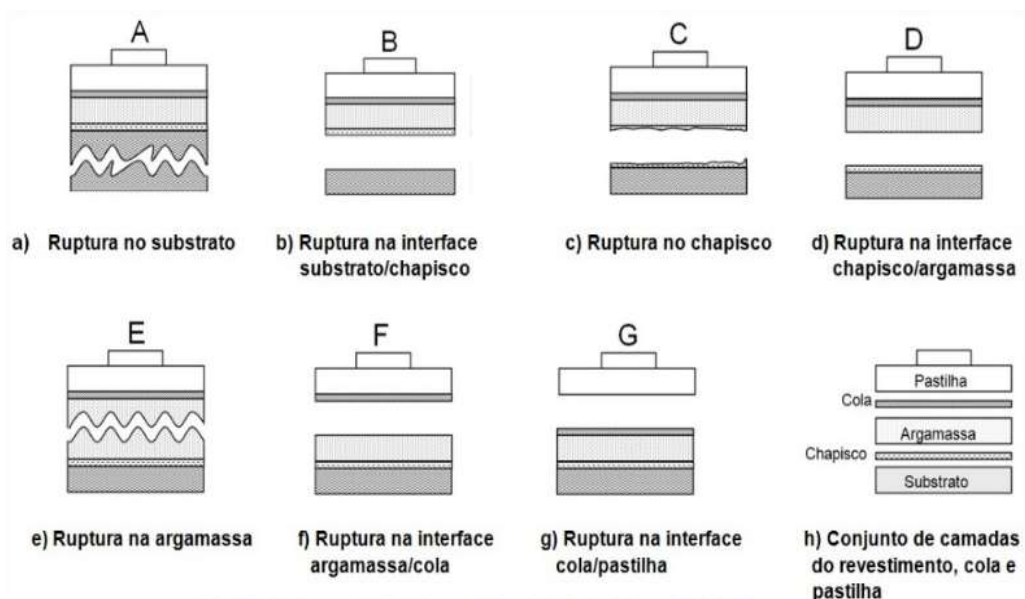


Figura 13: Tipo de ruptura no ensaio de resistência de aderência a tração conforme ABNT NBR 13528-1:2019 [35].

Por fim, também é verificado no presente ensaio a umidade (U) do revestimento, extraindo 3 corpos de prova de cada protótipo ensaiado, conforme a Equação 11.

$$U = \frac{(mu - mi) - ms}{ms} \cdot 100 \quad (\text{Eq.11})$$

Onde:

mi é a massa de cada saco plástico que é utilizado para acondicionados testemunhos, expressa em gramas (g);

mu é a massa de cada testemunho com o respectivo saco plástico utilizado para acondicioná-lo, expressa em gramas (g);

ms é a massa de cada testemunho após o processo de secagem, em estufa e em seguida dessecador, expressa em gramas (g).

Sendo o teor de umidade médio do revestimento igual à média das três determinações realizadas.

4.4.4 Determinação da velocidade do pulso ultrassônico

O ensaio de ultrassom foi realizado com base na ABNT NBR 8802:2019 [36], utilizando o equipamento Proceq Pundit Lab+, acoplado a transdutores normais com diâmetro de 40 mm e frequência de 54kHz do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais (DCEM/UFS). As leituras realizadas em 5 corpos de prova cilíndricos para cada traço foram do tipo direta, como demonstrado na Figura 14, acoplado os

transdutores do ultrassom nas faces inferior e superior com o auxílio do acoplante para garantir a passagem correta do sinal, sem perdas. Em seguida, os dados do sinal característico de cada corpo de prova foram transmitidos para o software Punditlink que demonstrava a velocidade (m/s) e o tempo do pulso ultrassônico (μ s).



Figura 14: Ensaio da velocidade do pulso ultrassônico.

4.5 Comportamento térmico

Para análise do comportamento térmico, foi elaborada uma caixa térmica adaptada do estudo de MAXIMO [37], conforme os esquemas das Figuras 15 e 16 e demonstrado na prática na Figura 17.



Figura 15: Esquema da caixa utilizada no ensaio de comportamento térmico.

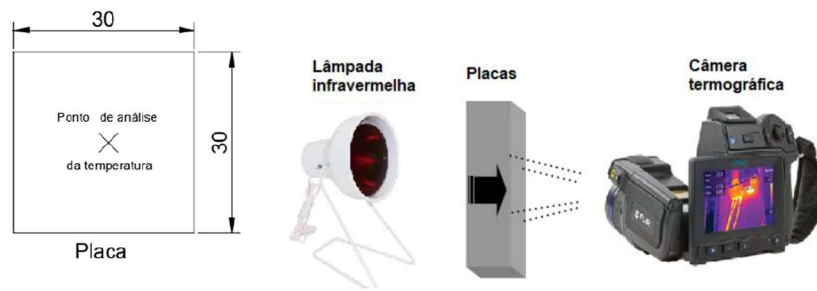


Figura 16: Esquema dos equipamentos e materiais utilizados no ensaio de comportamento térmico.

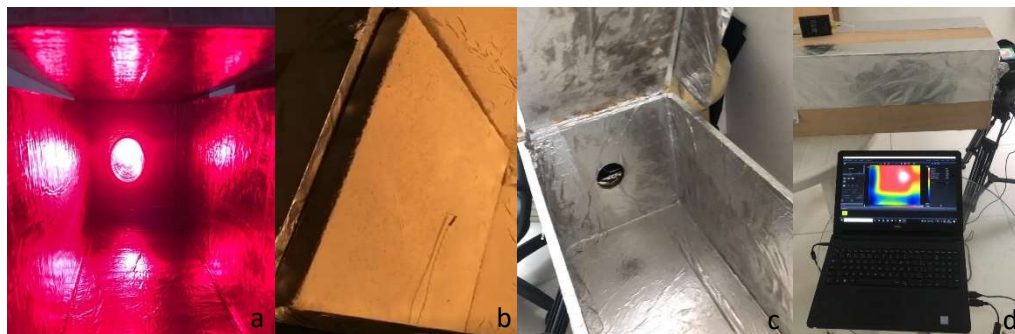


Figura 17: Esquema (na prática) do ensaio de comportamento térmico – (a) Lado da lâmpada infravermelha; (b) Fixação da placa de argamassa e do sensor térmico; (c) Lado da câmera térmica; (d) Equipamentos de análise das temperaturas.

A caixa foi confeccionada em madeira de dimensão 1,62x0,80m e internamente revestida por alumínio, com o objetivo de melhorar o isolamento do sistema. De um lado da caixa era posicionada a câmera termográfica (marca FLIR modelo T640 Sc) e de outro a lâmpada infravermelha de 150 W para realizar o aquecimento da argamassa de análise que era posicionada no meio da caixa (distanto 0,80m para câmera e lâmpada). A argamassa era inserida na caixa por meio de 2 aberturas na parte de cima, que também era vedada com material isolante antes do início do ensaio. No lado da lâmpada infravermelha (Figura 17;a), a temperatura era registrada através de um sensor térmico (Figura 17;b) do tipo Termômetro Digital Termopar K -50°C a 1300°C (Figura 18). No outro lado, a câmera termográfica (Figura 17; c d) com características demonstradas na Figura 19, registrava as temperaturas, a partir de termogramas, com o auxílio do software Flir Tools +.



Figura 18: Sensor térmico.



Câmera termográfica	FLIR T 640 Sc
Faixa de medição	-40 °C a +2000 °C
Resolução	640 x 480
Faixa espectral	7,5 a 13 μ m
Precisão	+/- 1 °C
Sensibilidade térmica	< 0,02 °C a 30 °C
Frequência de imagens	30 Hz
Zoom digital	1 a 8 vezes
FOV	25° x 19°
IFOV	0,68 mrad

Figura 19: Câmera termográfica utilizada no ensaio de comportamento térmico e suas especificações.

Antes do início dos ensaios termográficos, foi utilizado o termo-higrômetro de marca TESTO e modelo 605-i (Figura 20) para aferição da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar, no objetivo de inserir nos dados da câmera termográfica e obter termogramas com valores corrigidos de temperatura superficial.



Figura 20: Termo-higrômetro de marca TESTO e modelo 605-i.

Além disso, para prosseguimento do ensaio, foram realizados ajustes na emissividade e temperatura refletida. Para definição da emissividade deste trabalho

utilizou-se o método da ASTM E 1933 [38] que se baseia na análise do termograma extraído contendo uma região preta fosca e com emissividade conhecida, neste trabalho utilizou-se da fita isolante, para definição da emissividade do material estudado.

Para o cálculo da temperatura refletida foi utilizado o método da ASTM E 1862 [39] que se baseia em uma folha de alumínio amassada e fixada na superfície do corpo de prova. Com o auxílio da câmera termográfica, ajustando a emissividade para 1 ($\epsilon=1$), é extraído o termograma dessa região e calculada, através do software Flir Tool +, a temperatura média que resulta na temperatura refletida dos ensaios termográficos.

Com a inserção na câmera dos fatores termográficos relatados anteriormente, a análise dos resultados do comportamento térmico foi realizada através dos termogramas extraídos durante o período de 2hrs de ensaio e as temperaturas registradas, conforme tempo definido, pelo sensor térmico.

4.6 Análise estatística – ANOVA (Análise de Variância)

O teste estatístico baseado na ANOVA que significa “análise de variância”, caracteriza-se na comparação da média de três ou mais grupos e na variação dentro e entre esses grupos, com isso, o objetivo desta análise estatística foi avaliar a influência da adição de EPS na argamassa quanto a resistência à compressão, resistência à tração na flexão e a velocidade do pulso ultrassônico.

Através da programação e dos dados fornecidos ao software R Studio, foi analisado o valor “P” obtido, ou seja, índice de significância, que indica a probabilidade de ocorrência das variações nas variáveis de resposta terem acontecido ao acaso considerando um limite máximo de 5%, com isso, para um P menor que 0,05, a influência do parâmetro analisado é expressiva.

4.7 Limitantes da pesquisa

Devido à pandemia mundial da COVID-19 iniciada no Brasil nos primeiros meses de 2020, os ensaios programados com o objetivo de analisar o desempenho do material perante as idades, como por exemplo, ensaios mecânicos e da velocidade do pulso ultrassônico, foram diretamente afetados, conforme as medidas de isolamento que suspenderam as atividades no laboratório da Universidade Federal de Sergipe (UFS), sendo assim, esses foram realizados após 780 dias de sua confecção, com isso, a análise das características por idade dos materiais, não fizeram parte do escopo do presente estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise Física

5.1.1 Análise Granulométrica

A partir do ensaio de granulometria do agregado miúdo, observou-se que a areia possui de granulometria conforme Figura 21, considerada fina, em seu maior percentual.

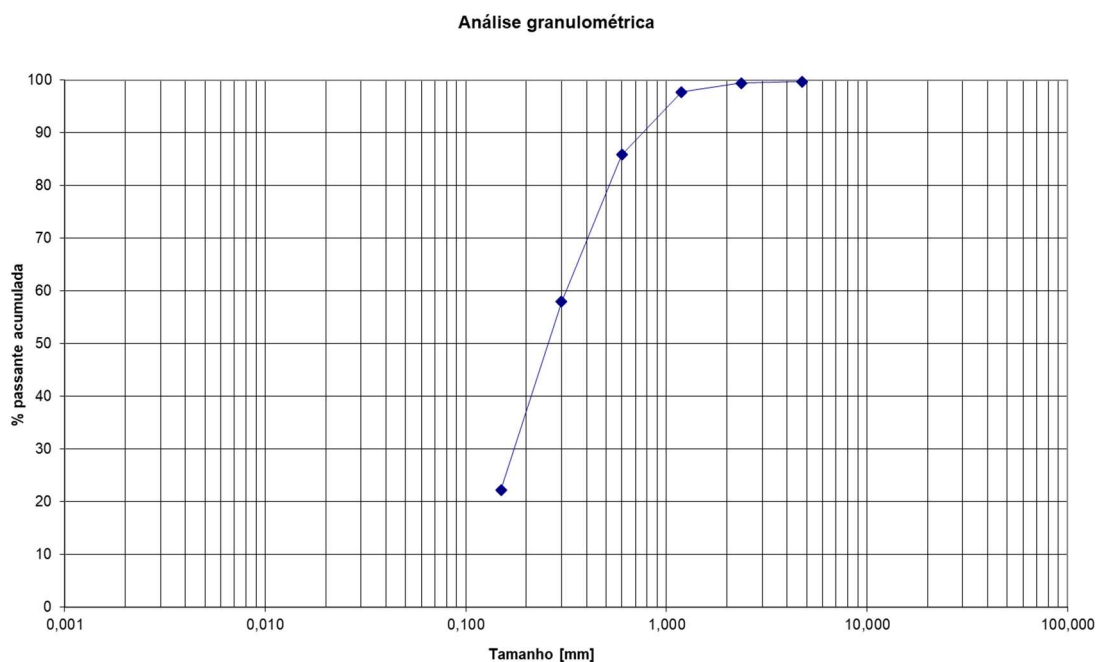


Figura 21: Curva granulométrica da areia.

5.1.2 Índice de consistência

O ensaio do índice de consistência em cada traço de argamassa leve demonstrou que quanto maior o percentual de EPS na pasta de cimento + areia, menor era a adição de água para alcançar a trabalhabilidade preconizada em norma. Tal desempenho deve-se ao comportamento do EPS, que em contradição à areia, possui natureza hidrofóbica, ou seja, não realiza ligações com a água, resultando em uma maior disponibilidade de água para a pasta de cimento + areia que reduzida conforme a maior adição de EPS em cada traço estudado.

5.1.3 Absorção de água

A análise da absorção de água fornece informações quanto à porosidade e conectividade, o presente estudo revelou, que apesar de sua natureza hidrofóbica, quanto maior a adição do poliestireno expandido na argamassa em substituição à areia, maior será o percentual da absorção de água, elevando em 50% esse índice ao

comparar o percentual de 75% de adição com a argamassa de referência (0%) (Figura 22). Esse comportamento corrobora com estudos que apontam que a principal causa dessa característica é devido à baixa coesão nas zonas interfaciais entre o EPS e a pasta de cimento + areia, influenciando no empacotamento das partículas, resultando na formação de vazios que dão origem aos poros na microestrutura do material.

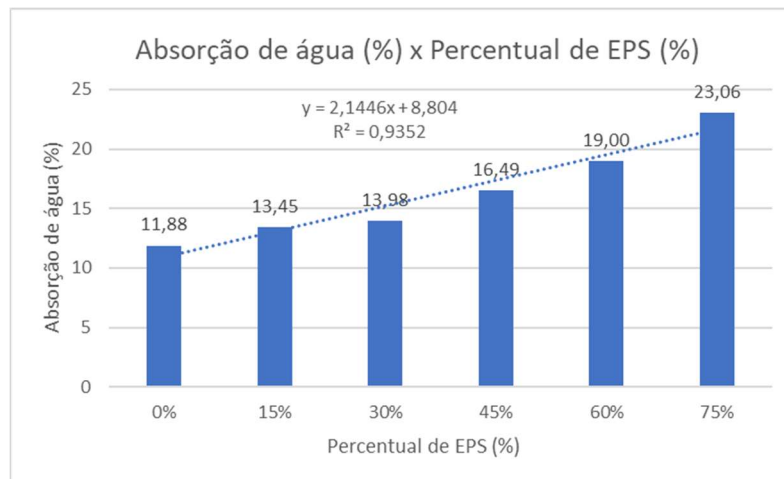


Figura 22: Absorção de água (%) conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.

5.1.4 Índice de vazios

De forma análoga à absorção de água, o índice de vazios nas argamassas com adição de EPS é influenciado pelo processo de empacotamento das partículas, devido à tendência da incorporação de ar durante a mistura dos materiais para formação da argamassa. Além disso, a substituição da areia (material que reage quimicamente com os outros elementos da argamassa) pelo EPS, esse inerte, interfere no aumento dos vazios. No presente estudo, conforme a Figura 23, o percentual de aumento no índice de vazios da argamassa de referência e do percentual de adição de EPS de 75% é de aproximadamente 9%, que influencia diretamente na durabilidade da argamassa, pois tal característica compõe um dos indicadores de durabilidade.

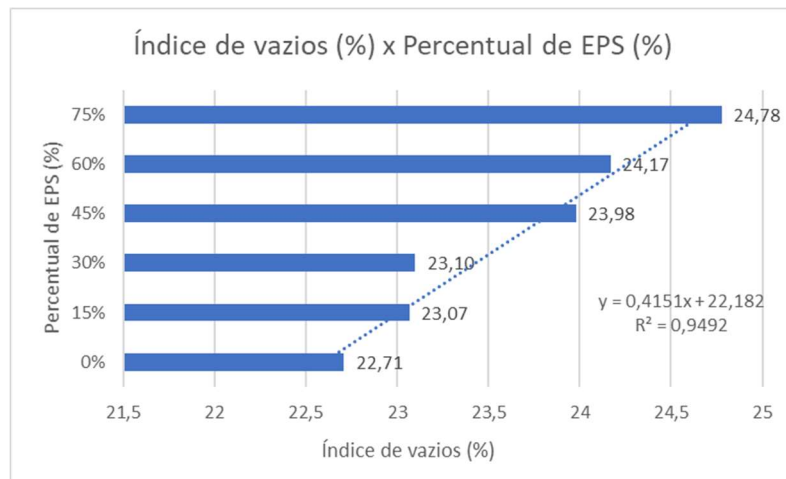


Figura 23: Índice de vazios (%) conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.

5.1.5 Massa específica e densidade aparente

O comportamento das massas específicas seca, saturada e real, se distinguiram conforme o teor de adição de EPS, conforme a Figura 24, para cada massa específica, a argamassa de referência obteve a maior massa e prosseguiu de maneira decrescente até a adição de 75% de poliestireno expandido, ou seja, independente do material estar seco ou saturado, argamassas com maiores adições terão menores massas específicas, devido à adição de um material (EPS) com constituição de aproximadamente 95 a 98% de ar e que, além disso, influencia no aumento da formação dos poros.

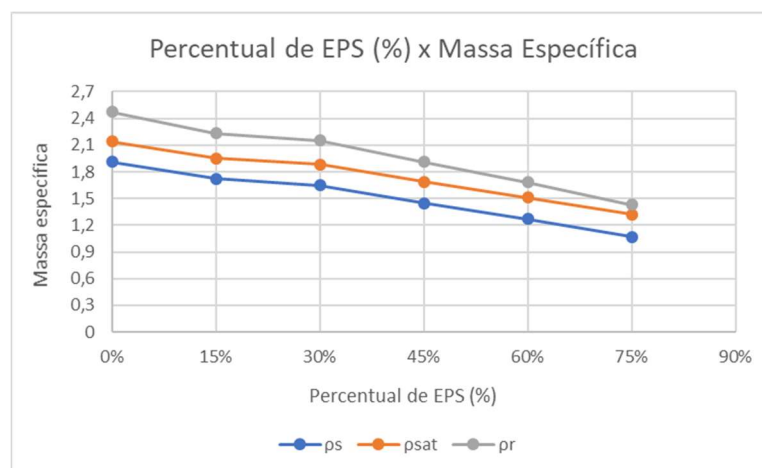


Figura 24: Massas específicas conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.

Comportamento análogo foi verificado na densidade de massa aparente no estado endurecido, conforme a Figura 25, que resultou em uma redução de 44% de densidade comparando a argamassa de referência com a adição de 75%. Além da

composição do EPS, sua estrutura molecular interfere na redução da densidade, pois forma longas cadeias, porém do tipo ramificadas.

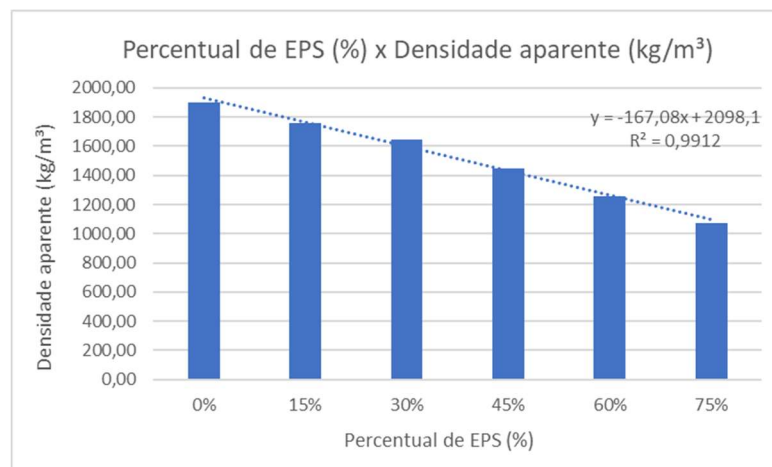


Figura 25: Densidade aparente (kg/m³) conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.

Ressalta-se que a densidade tem papel fundamental na interação do poliestireno com a pasta e controle da penetração de água, pois à medida que a densidade diminui a absorção de água aumenta, devido a compacidade do material [12] [14] [15].

5.2 Análise Morfológica

5.2.1 MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)

As fotografias obtidas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) nos permite analisar a estrutura interna do material. A estrutura celular do EPS, conforme demonstrado nas Figuras 26 e 27 (indicação vermelha), é constituída por paredes finas, onde apenas seu entorno tem a presença do EPS, e o restante é constituído por cavidades vazias. No âmbito científico, essa estrutura é conhecida como “colmeia” devido à semelhança com os abrigos produzidos pelas abelhas [15].

Devido ao processo de expansão que o EPS decorre na sua fabricação, as paredes finas possuem poros, que formam cavidades externas que a pasta de cimento + areia pode aderir, conforme demonstrado na Figura 27 (indicação verde). Além disso, é possível visualizar os poros formados na zona interfacial, conforme indicado nas Figuras 26 e 28 (indicação amarela), devido à baixa coesão entre a pasta cimento + areia e o poliestireno expandido [40][41].

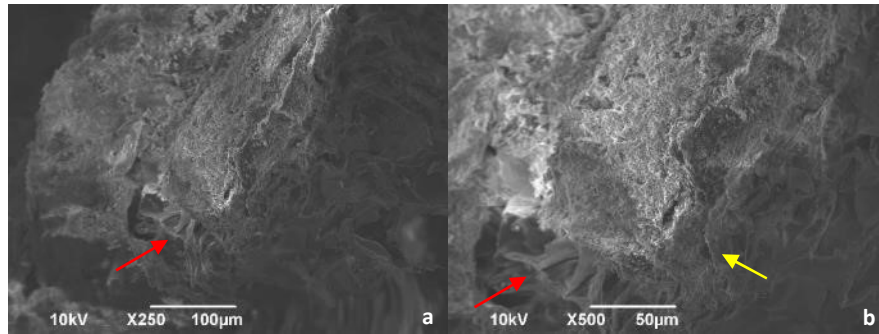


Figura 26: Microscopia eletrônica de varredura – (a) Estrutura celular do EPS; (b) Estrutura celular do EPS e presença de poros.

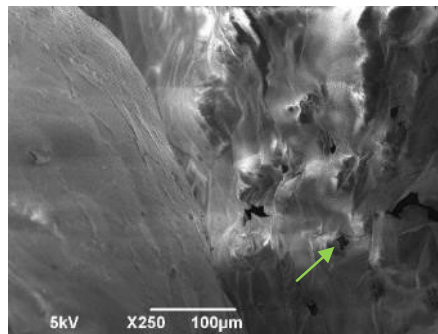


Figura 27: Microscopia eletrônica de varredura – Estrutura celular do EPS com presença de poros.

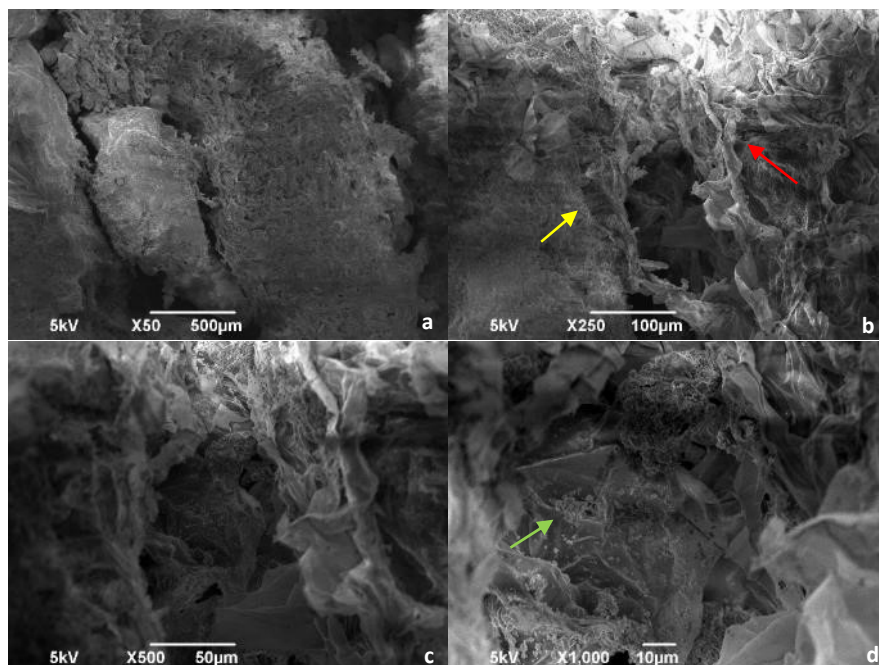


Figura 28: Microscopia eletrônica de varredura – (a) Estrutura da argamassa com adição de EPS; (b) (c) Estrutura do EPS e presença de vazios na zona interfacial entre EPS e pasta de cimento + areia; (d) Pasta de cimento + areia aderida na estrutura celular do EPS.

5.3 Análise Mecânica

5.3.1 Resistência à compressão e resistência à tração na flexão

A Tabela 2 e Figura 29 apresentam as informações da resistência à tração na flexão e à compressão para os percentuais de estudo do presente trabalho.

Percentual	Resist. à Tração na Flexão (MPa)	Resist. à Compressão (MPa)	Perda de resistência (%)	
			À Flexão	À Compressão
0%	6,17	14,68	-	-
15%	4,11	10,69	33,44	27,18
30%	3,39	8,37	45,07	42,98
45%	3,33	7,22	46,07	50,82
60%	2,29	4,97	62,83	66,14
75%	1,88	3,48	69,61	76,29

Tabela 2: Resistência à tração na flexão e à compressão conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.

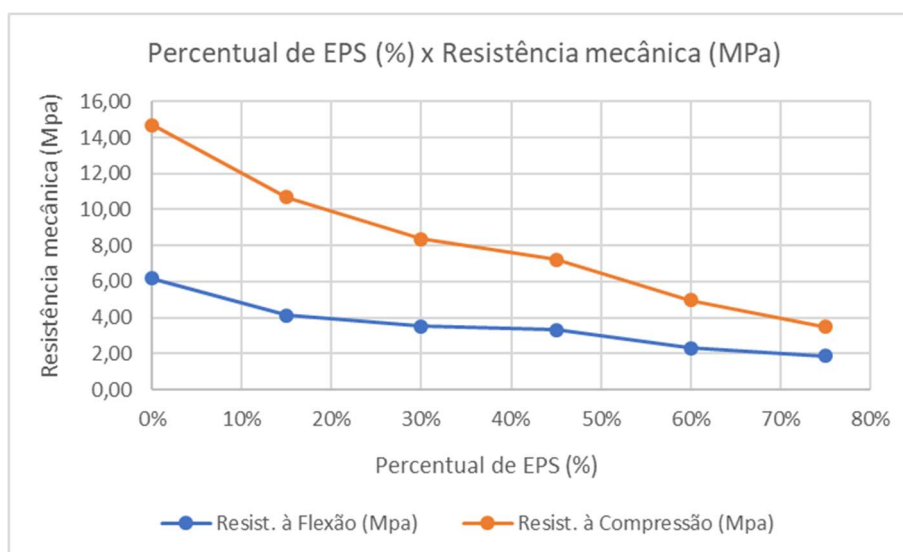


Figura 29: Resistência mecânica – à compressão e à tração na flexão conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.

A incorporação de agregado menos resistente na argamassa que também contribui para a redução da aderência (interface agregado e cimento), resulta na redução da resistência mecânica. Esse comportamento deve-se a amostra perder capacidade resistente, ao adicionar um material, como o EPS, de “força zero” e com rigidez desprezível quando comparado à areia [11][13]. Na resistência à tração na flexão para um percentual de 60% de EPS a perda de resistência em relação à argamassa de referência é de 62,83% e na resistência à compressão é de 66,14%.

A NBR 13.281:2005 [42] estabelece classes para classificação das argamassas no tocante às resistências. A Tabela 3 demonstra as classes da resistência à compressão comparada aos resultados do presente estudo, igualmente, na Tabela 4 para a resistência à tração na flexão.

Classe - NBR 13.281:2005	Resistência à compressão (MPa) - NBR 13.281:2005	Classe do estudo	Resistência à compressão do estudo (MPa)	Percentual de adição do EPS à argamassa
P1	$\leq 2,0$	P6	14,68	0%
P2	1,5 a 3,0	P6	10,69	15%
P3	2,5 a 4,5	P5 e P6	8,37	30%
P4	4,0 a 6,5	P5	7,22	45%
P5	5,5 a 9,0	P4	4,97	60%
P6	$> 8,0$	P3	3,48	75%

Tabela 3: Classes normativas para a resistência à compressão em comparação aos resultados do estudo.

Classe - NBR 13.281:2005	Resistência à tração na flexão (MPa) - NBR 13.281:2005	Classe do estudo	Resistência à tração na flexão do estudo (MPa)	Percentual de adição do EPS à argamassa
R1	$\leq 1,5$	R6	6,17	0%
R2	1,0 a 2,0	R5 e R6	4,11	15%
R3	1,5 a 2,7	R4 e R5	3,39	30%
R4	2,0 a 3,5	R4 e R5	3,33	45%
R5	2,7 a 4,5	R3 e R4	2,29	60%
R6	$> 3,5$	R2 e R3	1,88	75%

Tabela 4: Classes normativas para a resistência à tração na flexão em comparação aos resultados do estudo.

A NBR 13.281:2005 [42] não possui, atualmente, uma interpretação dos parâmetros de classificação das argamassas segundo as suas condições de uso, tal relação foi eliminada da publicação da norma e por isso não foi analisada neste estudo.

Após a conclusão dos ensaios, realizou-se a observação dos tipos de ruptura e presença de fissuras na superfície do material conforme o quadro de Figura 30, para ambas resistências. Nos corpos de prova do ensaio de resistência à compressão houve para o material de referência (adição de 0%) de forma clara, o rompimento com o aparecimento de rachaduras. Nos demais corpos de prova houve a presença de fissuras na superfície, inclusive, de forma pouco perceptível na adição de 60% e 75%. Nos corpos de prova do ensaio de resistência à tração na flexão, para as adições de 0%,

15% e 30% houve o rompimento do material, demonstrando a seção transversal com a presença do EPS para as adições de 15% e 30%. Para as adições de 45%, 60% e 75% não houve a ruptura, apenas o aparecimento de fissuras na superfície, sendo que, nas adições de 45% e 60% de forma pouco perceptível. Tal comportamento, é resultado dos efeitos combinados da fissuração frágil da argamassa e da britagem dúctil dos grânulos de EPS e enfraquecimento, onde são esmagados localmente sob as placas de carregamento [43].

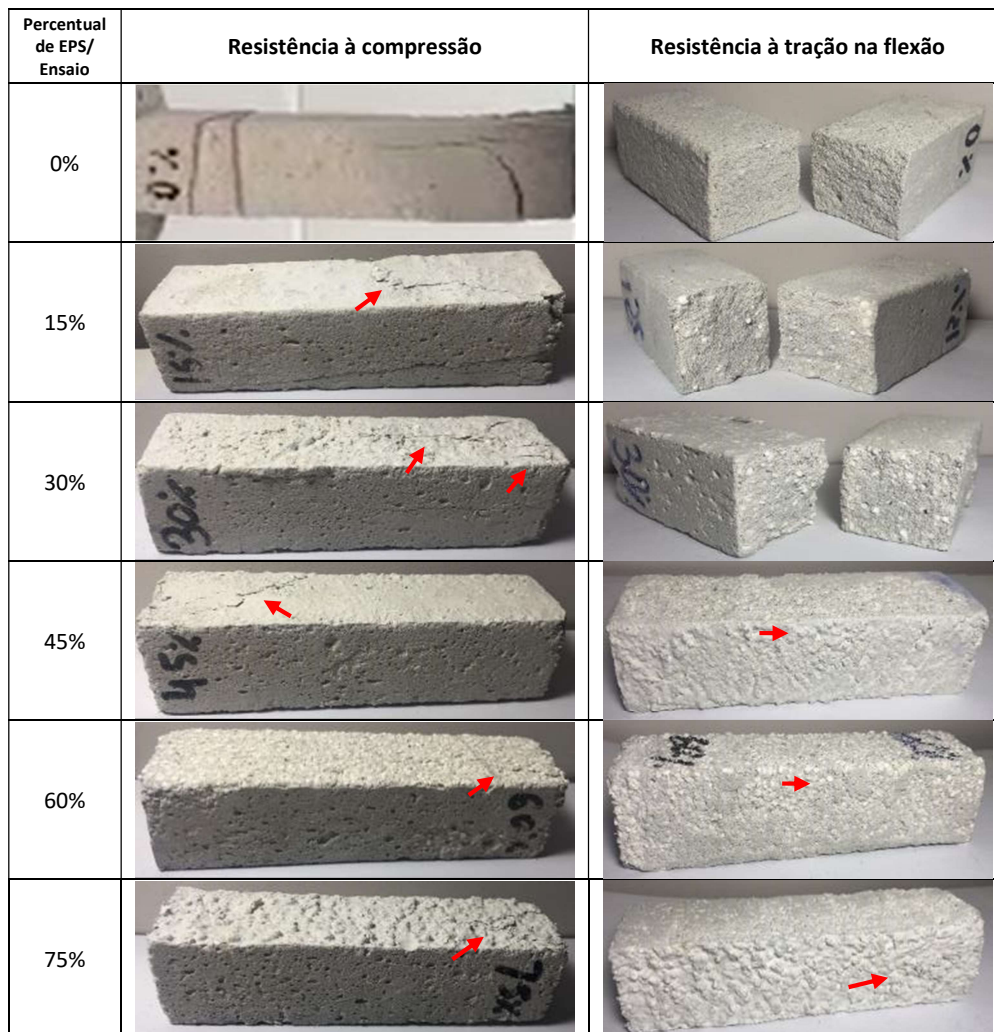


Figura 30: Corpos de prova após o fim dos ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.

Analisando o comportamento da deformação elástica e plástica no ensaio de resistência à tração na flexão das argamassas com variados percentuais de EPS, conforme Figura 31, que apresenta em linha vermelha a região linear do material e ao fim, a transição do comportamento elástico para o plástico e o ponto da tensão limite de escoamento; observa-se que quanto maior o percentual de EPS adicionado a

argamassa, menor será a tensão limite de escoamento, pois com o aumento da porosidade, internamente, o material apresenta fragilidade devido aos vazios presentes em sua estrutura, ocasionando regiões fracas para resistir a uma tensão aplicada. Porém, observou-se que na adição de 60% de EPS, apesar de apresentar uma resistência à tração menor que os percentuais de 15%, 30% e 45%, o material permaneceu na região elástica em uma escala superior de deformação, ou seja, suportou uma maior deformação retornando ao seu estado inicial após aplicação da carga ou exclusão da tensão aplicada. Tal comportamento é de suma importância para a aplicação de argamassa em fachadas externas, pois essas sofrem a ação intensa do meio ambiente e do substrato, que ocasionam variadas deformações no material [44].

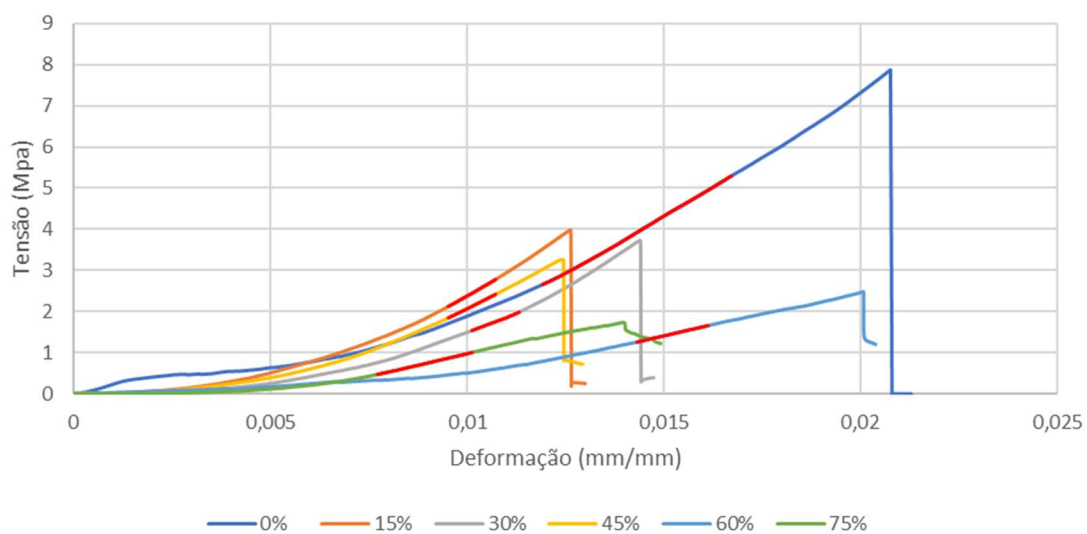


Figura 31: Deformação conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.

Além disso, analisou-se o módulo de elasticidade estático para obter informações sobre a rigidez do material. Conforme a Figura 32, menores percentuais de EPS adicionados à argamassa resultam no maior módulo de elasticidade estático, alcançando uma variação de 40% ao comparar o módulo de elasticidade da argamassa de referência com a adição de 75% de EPS. Tal fato deve-se ao EPS ser um material flexível, com o aumento da sua adição, o módulo de elasticidade se reduz e o material passa a apresentar características mais flexíveis. Para módulos de elasticidade maiores o material apresenta características mais rígidas, sendo assim, difícil de se deformar e que apresenta maior probabilidade à presença de fissuras e com um maior grau de empacotamento, ou seja, menor porosidade. Tal fato é observado na Figura 33, que demonstra a correlação dos índices de vazios e o módulo de elasticidade estático.

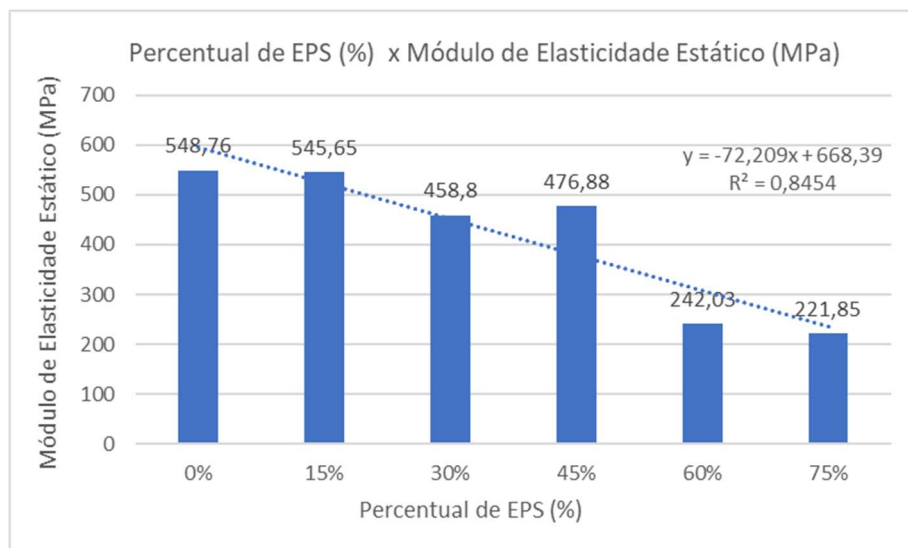


Figura 32: Módulo de Elasticidade Estático (MPa) conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.

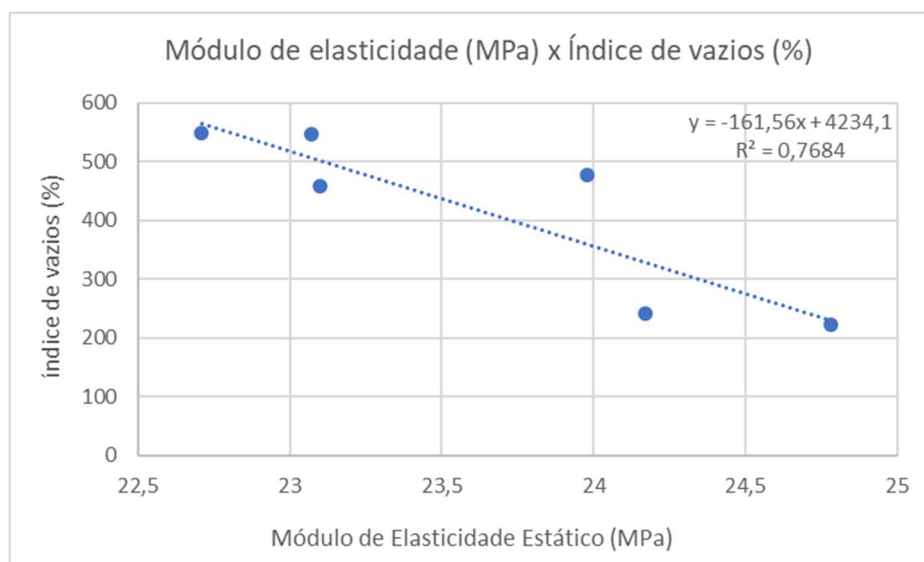


Figura 33: Correlação do Módulo de Elasticidade Estático (MPa) e índice de vazios (%).

Para a aplicação das argamassas em revestimento, ressalta-se a importância de um material com tendência à flexibilidade, devido às tensões e deformações que lhe são impostas durante o seu desempenho.

5.3.2 Resistência de aderência à tração

A resistência de aderência à tração tem como objetivo avaliar a capacidade de aderência da argamassa de revestimento, com isso, na Figura 34, são demonstradas as tensões para cada percentual de EPS adicionado à argamassa em substituição à areia.

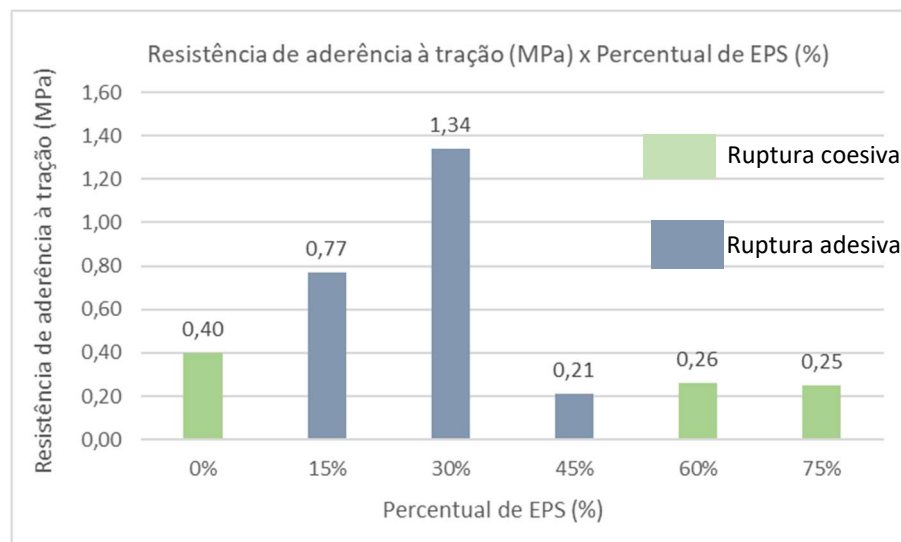


Figura 34: Resistência de aderência à tração (MPa) conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa e os tipos de rupturas apresentadas no ensaio.

A argamassa de referência apresentou uma resistência de 0,40 MPa, as adições de 15% e 30%, respectivamente, alcançaram tensões superiores de 0,77 MPa e 1,34 MPa, em contrapartida as adições de 45%, 60% e 75% alcançaram tensões inferiores, respectivamente, de 0,21 MPa, 0,26 MPa e 0,25 MPa. Diante do exposto, a adição de 30% alcançou a maior capacidade de aderência, porém, obteve em seu ensaio uma ruptura do tipo adesiva, assim como, as rupturas verificadas para as adições de 15% e 45%, que ocorreram nas interfaces/ligações, ou seja, em pontos enfraquecidos do sistema de aderência, e além disso, estar relacionada ao surgimento, em maior probabilidade, de manifestações patológicas [1]. Rupturas do tipo coesiva, verificadas nas adições de 0%, 60% e 75%, demonstram uma maior qualidade no sistema, pois o extremo da “falha” registrada no ensaio ocorreu na região central/mais coesa, da camada, por exemplo, do chapisco ou argamassa. Tais rupturas para cada percentual de EPS adicionado são demonstradas nas Figuras 35 e 36.



Figura 35: Ruptura do tipo coesiva constatadas nas argamassas com adição de EPS em um percentual de 0%, 60% e 75%, respectivamente.



Figura 36: Ruptura do tipo adesiva constatadas nas argamassas com adição de EPS em um percentual de 15%, 30% e 45%, respectivamente.

A NBR 13.749:2013 [45] estabelece limites de resistência de aderência à tração para emboço e camada úmida, conforme a Tabela 5, que enquadra as argamassas com 45%, 60% e 75% de percentual de EPS não recomendada no acabamento interno de cerâmica ou laminado e no acabamento externo para pintura ou base para reboco e cerâmica. Ademais, as adições de 15% e 30% podem ser recomendadas como acabamento para todos os tipos em parede e teto.

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

Tabela 5: Resistências normativas para a resistência de aderência à tração e o emprego do material [45].

É importante ressaltar que os resultados do presente ensaio são diretamente influenciados pelas diferentes etapas e materiais englobados na execução do sistema construtivo, seja ele, na execução da alvenaria de bloco com a argamassa de assentamento e execução do chapisco, etapa primordial para auxiliar na aderência da próxima camada de argamassa de revestimento, dependente da energia de lançamento do executor e análise da espessura da fina camada no substrato.

5.3.3 Velocidade do pulso ultrassônico

O ensaio da velocidade do pulso ultrassônico foi aplicado para a análise das descontinuidades internas das argamassas de forma não destrutiva. De acordo com a Figura 37 percebe-se que quanto maior a substituição de EPS pela areia na argamassa, menor será a velocidade do pulso ultrassônico. Este fato deve-se à elevada presença de descontinuidades, como por exemplo, a porosidade, que surge devido à fraca coesão entre a pasta de cimento + areia e os grânulos de EPS triturado. De forma análoga, foi verificado na análise do tempo de propagação da onda x percentual de adição de EPS, conforme a Figura 38, que demonstra maior tempo de propagação da onda em uma maior adição de EPS à argamassa, devido a interferência das descontinuidades com a dispersão das ondas.

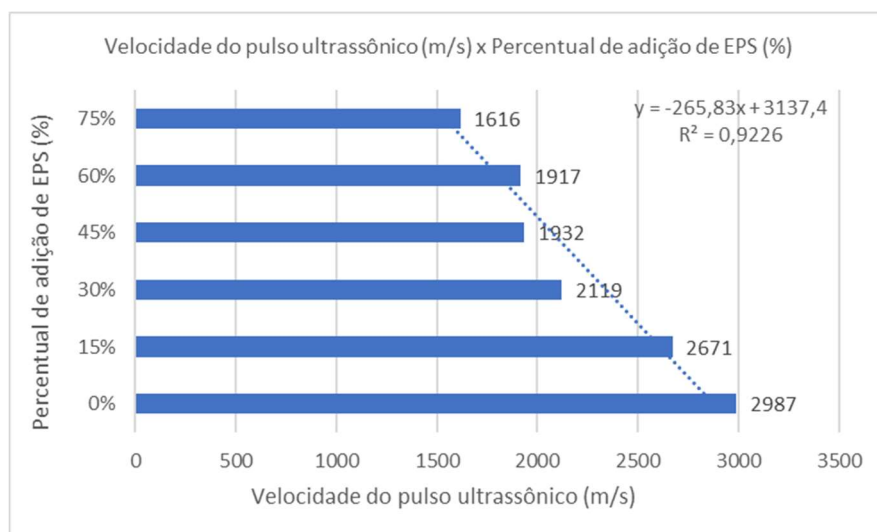


Figura 37: Velocidade do pulso ultrassônico (m/s) conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.

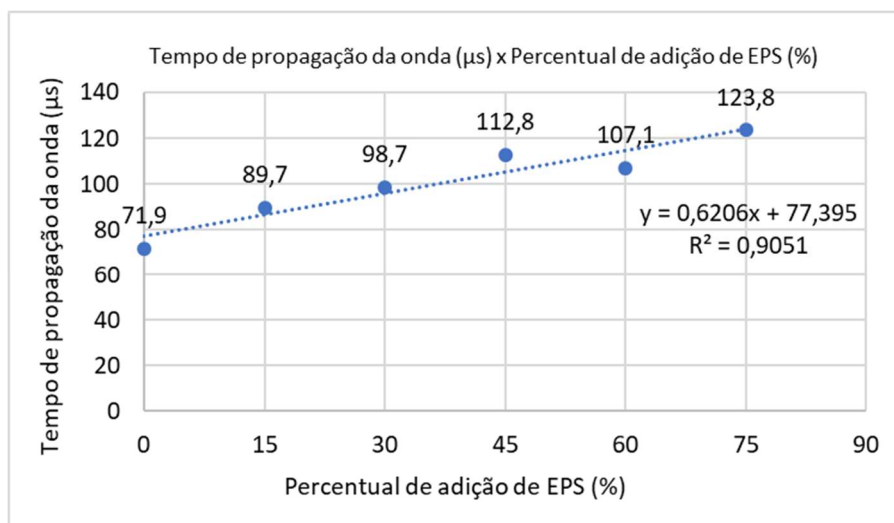


Figura 38: Tempo de propagação da onda (μs) conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.

Na análise das ondas ultrassônicas resultantes do presente ensaio, ilustrado na Figura 39, verifica-se que com o aumento das discontinuidades internas, como verificado anteriormente, no aumento da adição do percentual de EPS, maior será a absorção de energia pelas discontinuidades, resultando em uma maior atenuação da onda e menor amplitude em função do tempo. Conforme analisado, na adição de 0% de EPS a amplitude atinge cerca de 100%, decaindo conforme aumenta essa adição, atingindo cerca de 50% em 15% de EPS, uma perda representativa de metade de sua amplitude, e a partir da adição de 45% de EPS as ondas alcançam mínimas distâncias às cristas ou vales pelo alto teor de discontinuidades.

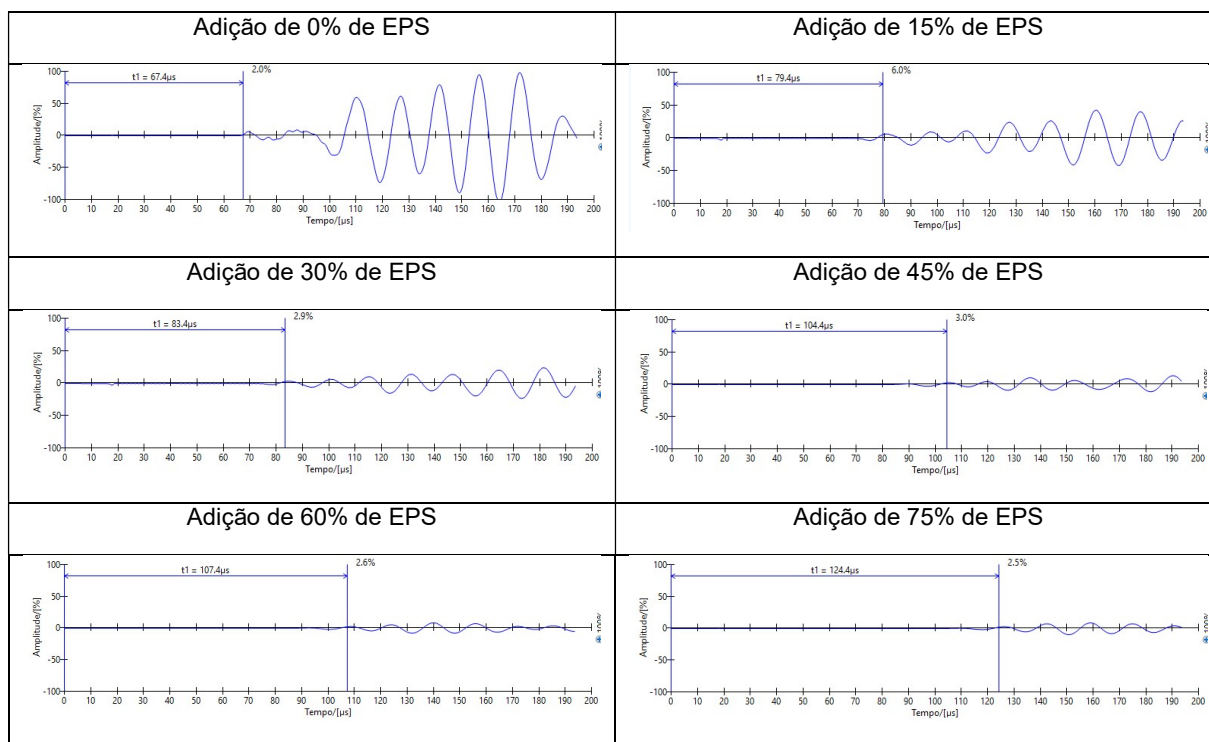


Figura 39: Formatos das ondas no ensaio de velocidade do pulso ultrassônico conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.

5.3.4 Análise estatística – ANOVA (Análise da variância)

Para análise da significância dos percentuais de EPS adicionados as características analisadas de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e a velocidade do pulso ultrassônico, a Tabela 6 demonstra o resumo conforme a análise estatística ANOVA.

Fatores	p-valor
Resistência à compressão	1.49e-08
Resistência à tração na flexão	1.91e-06
Velocidade do pulso ultrassônico	2.68e-07

Tabela 6: Resultados da análise estatística ANOVA.

A análise do p-valor na ANOVA indica que se for menor do que 0,05 o fator terá influência significativa sobre as variáveis, com isso, confirmando o discutido anteriormente na análise dos resultados, conforme a Tabela 6, nos três fatores analisados o efeito do tratamento – percentual de adição de EPS, foi significativo.

5.4 Comportamento térmico

Os fatores termográficos verificados neste estudo apresentaram emissividade de 0,89 ($\varepsilon = 0,89$), temperatura refletida de 32,50°C e valores de umidade e temperatura ambiente, variável conforme o início de cada ensaio, mas identificada em torno de 65% e 31,00°C, respectivamente.

A análise do comportamento térmico no presente estudo, tem o objetivo de analisar o conforto térmico proporcionado pela variada adição de EPS na argamassa, a partir da variação de temperatura nas faces (interna e externa), conforme demonstrado nas Figuras 40 a 45.

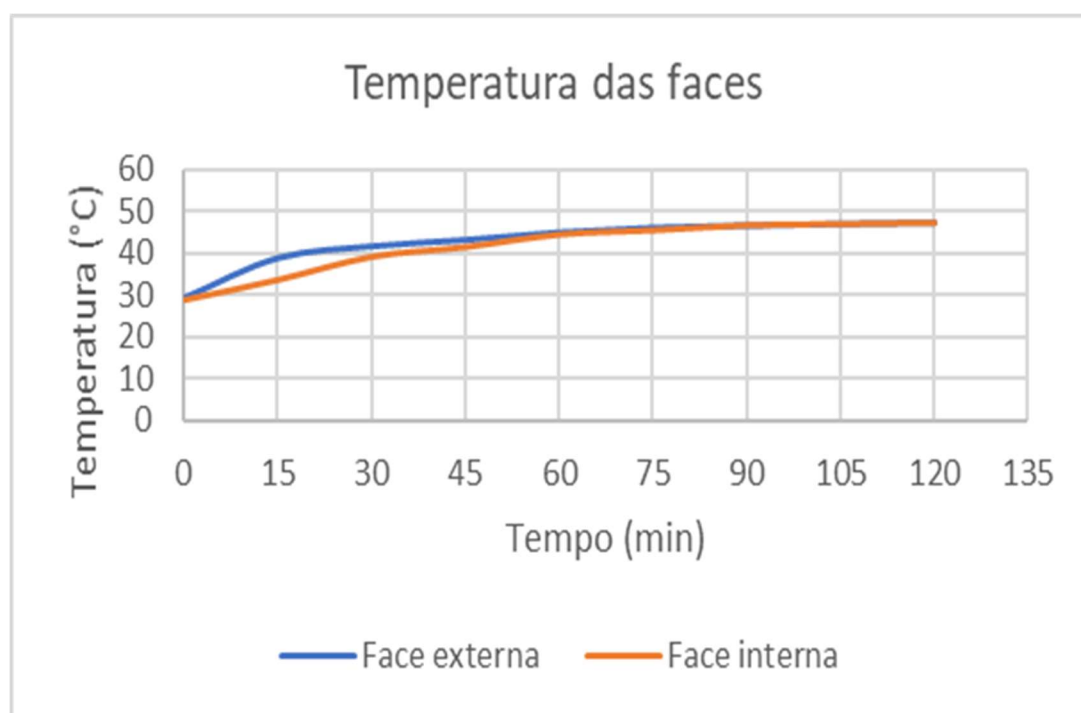


Figura 40: Temperatura registrada na face externa e interna durante 120 minutos de ensaio na argamassa com percentual de 0% de adição de EPS.

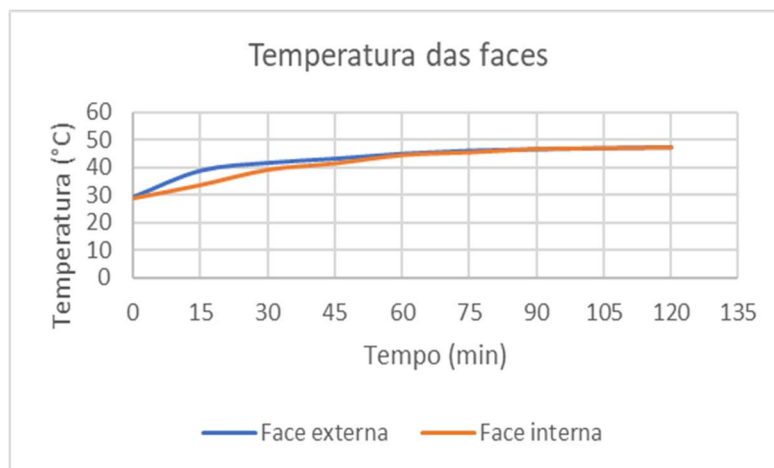


Figura 41: Temperatura registrada na face externa e interna durante 120 minutos de ensaio na argamassa com percentual de 15% de adição de EPS.

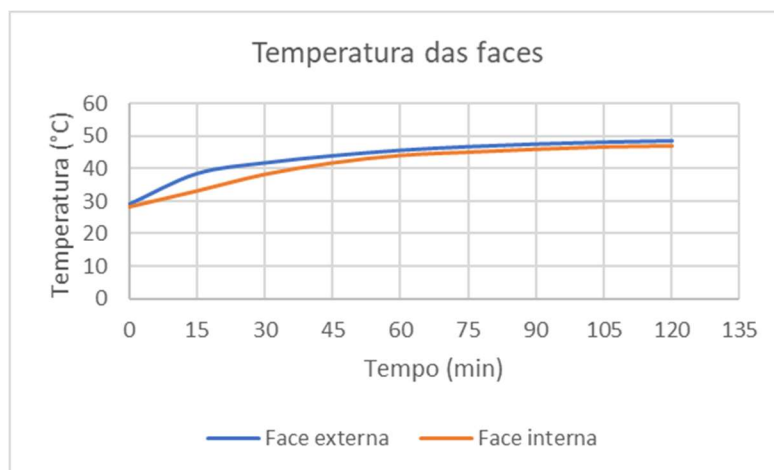


Figura 42: Temperatura registrada na face externa e interna durante 120 minutos de ensaio na argamassa com percentual de 30% de adição de EPS.

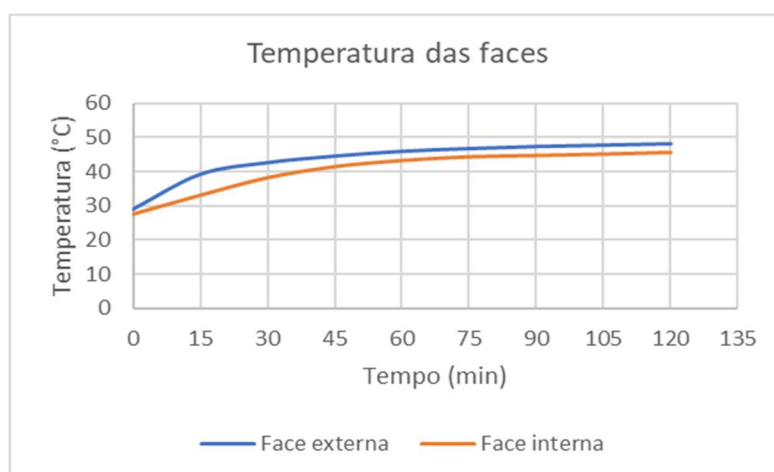


Figura 43: Temperatura registrada na face externa e interna durante 120 minutos de ensaio na argamassa com percentual de 45% de adição de EPS.

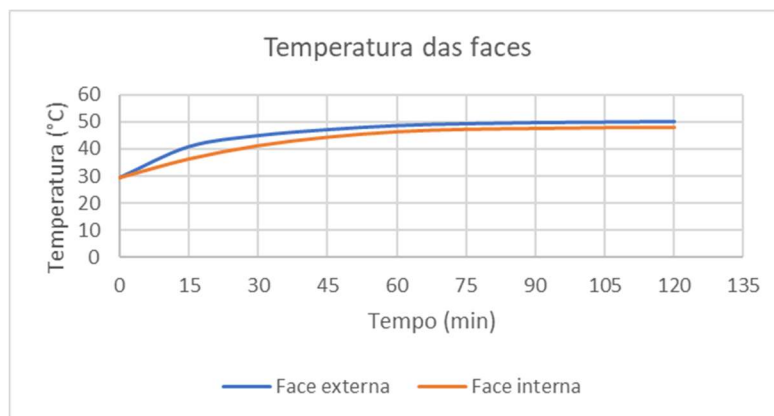


Figura 44: Temperatura registrada na face externa e interna durante 120 minutos de ensaio na argamassa com percentual de 60% de adição de EPS.

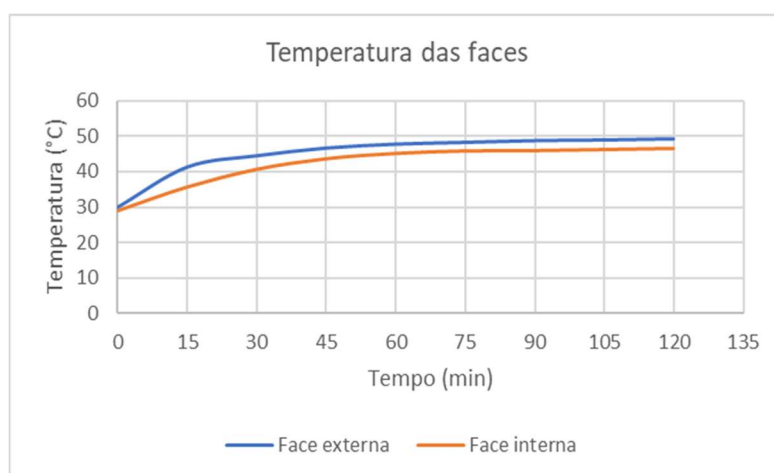


Figura 45: Temperatura registrada na face externa e interna durante 120 minutos de ensaio na argamassa com percentual de 75% de adição de EPS.

Diante do exposto, observa-se que para os maiores percentuais de adição de EPS à argamassa, como por exemplo 45%, 60% e 75%, a temperatura da face externa é superior quando comparada a da face interna, alcançando uma variação de temperatura após 2hr de ensaio, respectivamente de, 2,20°C, 2,30°C e 2,80°C. Além disso, mantém essa variação no decorrer do tempo, em contradição, ao verificado para os percentuais de adições de 0%, 15% e 30%. O resumo de tal variação é verificado na Figura 46.

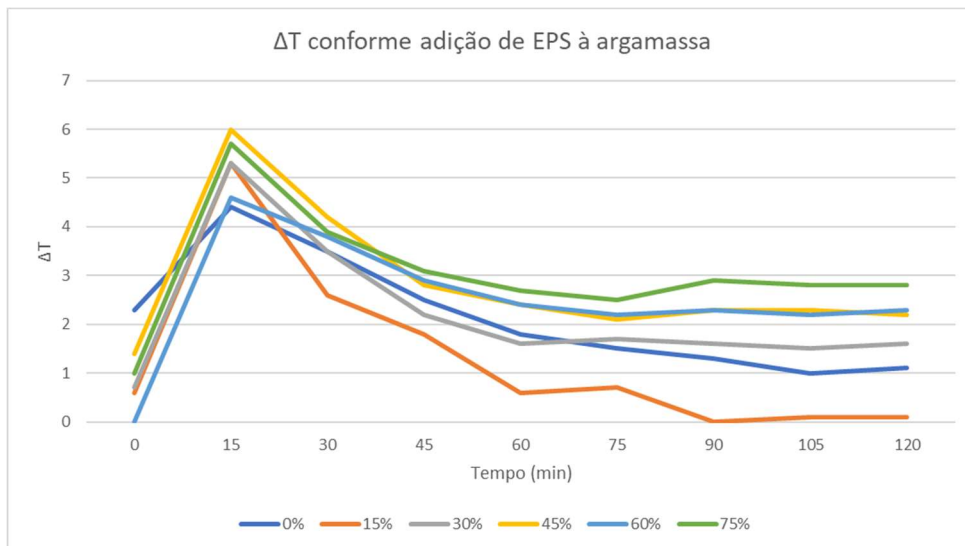


Figura 46: Variação da temperatura entre as faces durante 120 minutos de ensaio conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.

Conforme observado acima, os percentuais de adição de 45%, 60% e 75% atingem maiores variações de temperaturas, tal fato é explicado devido a elevada quantidade de vazios internos do EPS e presença de porosidade. Tais características, impedem que a velocidade da transferência de calor (fluxo de calor) no material seja a mesma que em regiões compactas, uma vez que a ausência de continuidade entre as camadas funciona como resistência térmica [9], sendo assim, o fluxo de calor em regiões compactas atravessam o material em um tempo inferior do que em regiões com descontinuidades (presença de poros), conforme representado no esquema da Figura 47.

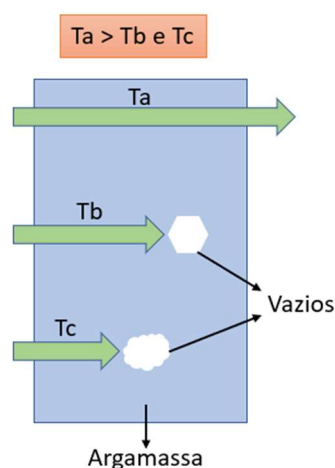


Figura 47: Esquema do fluxo de calor em partes do material compacto e com presença de descontinuidades (vazios).

A diferença de temperatura entre as faces, ou seja, variação de temperatura e a presença de vazios influencia diretamente na condutividade térmica e para o presente material de estudo, está interligada com a densidade específica do material. Sendo assim, para as adições de 45%, 60% e 75%, que possuem menores densidades específicas e maiores variações de temperatura, a condutividade é reduzida, proporcionando um maior conforto térmico ao ambiente interno.

O comportamento térmico da face interna em função do tempo é demonstrado nos termogramas do esquema da Figura 48, que ratifica a presença de temperaturas maiores nas menores adições de EPS, como por exemplo, 0%, 15% e 30%.

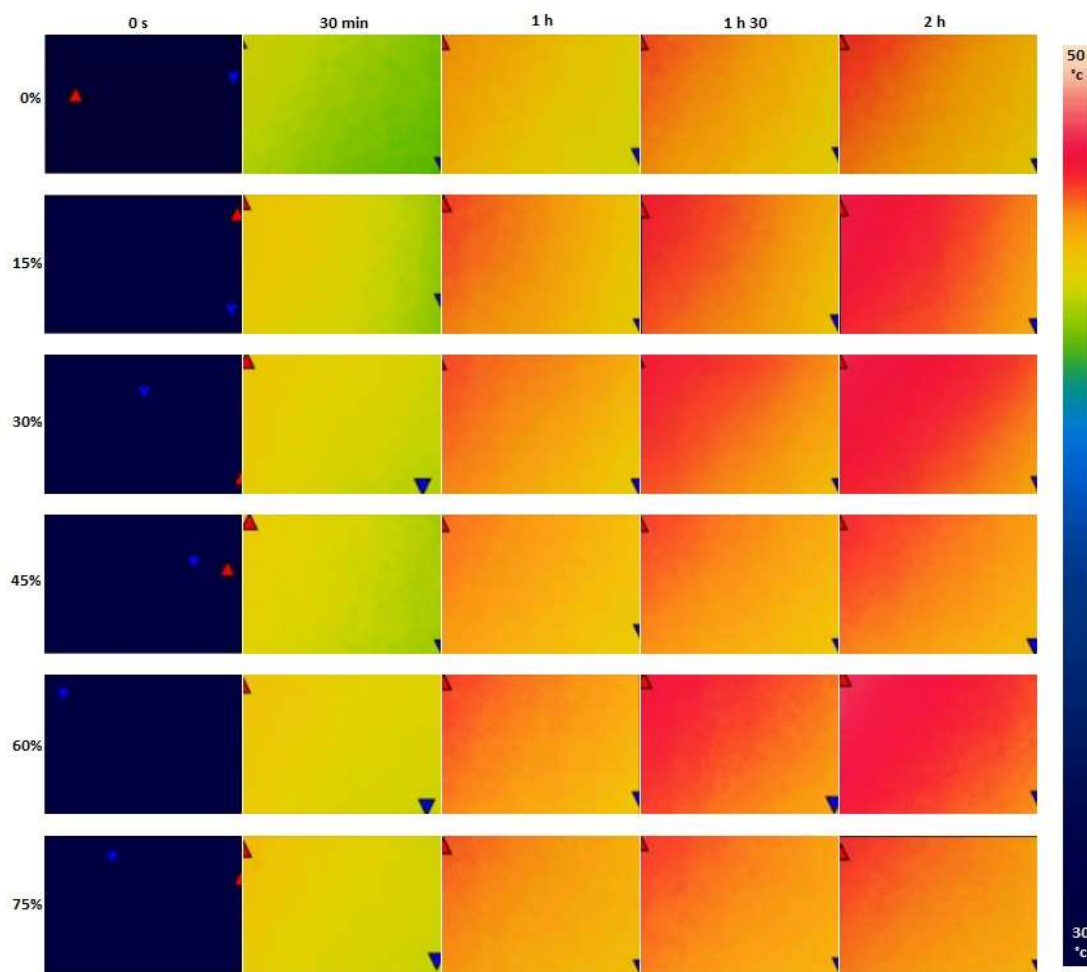


Figura 48: Termogramas durante 2 horas de ensaio conforme o percentual de EPS (%) adicionado à argamassa.

6 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi demonstrar a partir dos resultados obtidos em ensaios realizados a viabilidade da empregabilidade de argamassa de revestimento com adição de EPS em obras civis.

Para alcance do objetivo, foram realizados ensaios no âmbito físico, mecânico, microestrutural e de comportamento térmico. A partir desses foi possível a comparação com requisitos mínimos/esperados preconizados em normas.

Foi possível observar que a adição de EPS promove um aumento no percentual de absorção de água e índice de vazios devido à baixa coesão encontrada entre o poliestireno e a pasta de cimento + areia que promove o desenvolvimento de poros no material. Com relação à massa específica e densidade aparente, em razão da sua microestrutura, formada em até 98% de ar, a adição de poliestireno promove leveza ao material.

Através da análise da microestrutural do material, foi possível observar as paredes finas formadas pelo poliestireno e a porosidade presente na zona interfacial entre o EPS e a pasta de cimento + areia.

A análise mecânica do material permitiu demonstrar a correta destinação no uso da argamassa leve do estudo, através das classificações presentes em norma. Além disso, constatou a influência que o aumento da porosidade e a adição de um material leve provoca ao ser submetido à uma capacidade resistente.

O estudo do comportamento térmico validou a característica de bom comportamento térmico intitulado ao EPS, através da análise das temperaturas da face interna e externa, simulando o ambiente externo e o interno. Com o aumento na adição de EPS à argamassa, a variação de temperatura entre as faces era maior.

A aplicação de ensaios não destrutivos (END's) em estudos científicos colaboram de forma positiva para uma melhor investigação das características, principalmente, interna e de forma não evasiva.

Por fim, conhecendo o material através dos ensaios realizados no presente estudo, apesar das reduções apresentadas no âmbito das características mecânicas, os resultados foram positivos e a aplicação válida em obras civis, principalmente nas adições de 30 e 45%, conforme norma, além de, contribuir com o emprego de um material sustentável que promove melhor conforto térmico nas habitações.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a influência de um aditivo para melhorar a porosidade presente na zona interfacial, ou seja, a coesão entre o EPS e a pasta de cimento + areia, para análise da viabilidade nos resultados dos ensaios, principalmente, mecânicos, comparados ao não uso do aditivo;
- Propor o cálculo da condutividade através da termografia infravermelha, no fito de analisar, também, o perfil de temperatura;
- Analisar a substituição dos mesmos percentuais ao cimento e ao cimento e areia simultaneamente, com o objetivo de promover a comparação entre os resultados para determinar o material mais condizente a ser substituído.

8 REFERÊNCIAS

1. MILLING, A., et al. Exploring the full replacement of cement with expanded polystyrene (EPS) waste in mortars used for masonry construction. **Construction and Building Materials**, v. 253, p. 119158-119166, 2020.
2. BECKER, P. F. B., et al. Lightweight thermal insulating coating mortars with aerogel, EPS, and vermiculite for energy conservation in buildings. **Cement and Concrete Composites**, v. 125, 2022.
3. ABNT NBR 15575-4:2013 – **Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE**.
4. SOARES, R. M. D.; ADAMS, B.; ULLMANN, V.” Desempenho térmico de habitação social: norma NBR 15.575.” **Revista de Arquitetura IMED**, vol 5, nº2, p. 53-64, 2016.
5. SZLAK, B.; TANIGUTI, E.; NAKAKURA, E.; MOTA, E.; BOTTURA, M.; FRIGIERI, V. **Manual de Revestimentos de Argamassa**. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2002.
6. GOMES, M. G., et al. Physical performance of industrial and EPS and cork experimental thermal insulation renders. **Construction and Buildings Materials**, v.198, p.786-795, 2019
7. ASKELAND, D. R., WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. Editora Cengage Learning, ed. de 2014.
8. BRYDSON, J. A. **Plastics Materials**. Libgen Librarian, 1999.

9. NETO, J. O. A. **Caracterização do comportamento geotécnico do EPS através de ensaios mecânicos e hidráulicos**. 2008. 228 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, 2008.
10. CALLISTER, W. D. J. **Ciência e Engenharia de Materiais**. Editora LTC, 7° Ed, 2008.
11. TITARELLI, C. G. F., et al. Effect of Using Recycled instead of Virgin EPS in Lightweight Mortars. **Procedia Engineering**, v. 161, p. 660-665, 2016.
12. TORRES, M. L. Lightweight pozzolanic materials used in mortars: Evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, p. 114-119, 2009.
13. NIKBIN, I. M., et al. The effect of expanded polystyrene synthetic particles on the fracture parameters, brittleness and mechanical properties of concrete. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 94, p.160-172, 2018.
14. CARVALHO, C. H. R. Study about concrete with recycled expanded polystyrene. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 12, p.1390-1407, 2019.
15. MAAROUFI, M., et al. Full characterization of hygrothermal, mechanical and morphological properties of a recycled expanded polystyrene-based mortar. **Construction and Building Materials**, v. 301, p. 124310-124321, 2021.
16. LATROCH, N., et al. Physico-mechanical and thermal properties of composite mortars containing lightweight aggregates of expanded polyvinyl chloride. **Construction and Buildings Materials**, v. 175, p.77-87, 2018.
17. RUMŠYS, D., et al. Comparison of material properties of lightweight concrete with recycled polyethylene and expanded clay aggregates. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 937-944, 2017.
18. PASSOS, P. M., et al. Argamassas com resíduos para revestimento isolante térmico de parede pré-moldada de concreto. **Cerâmica**, v. 64, p. 577-588, 2018.
19. RATHORE, R. S., et al. Influence of plastic waste on the performance of mortar and concrete: A review. **Materials Today: Proceedings**, p.1-4, 2021.
20. FERRÁNDIZ-MAZ, V.; GARCÍA-ALCOCEL, E. “Caracterización física y mecánica de morteros de cemento Portland fabricados con adición de partículas e poliestireno expandido (EPS).” **Materiales de Construcción**, 2012.
21. HELLIER, Charles J.. **HANDBOOK OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION**. New York: McGraw-Hill, 2003. 594 p.
22. SCHMERR JUNIOR, Lester W. **Fundamental Models and Measurements for Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems**. In: CHEN, C. H. (Ed.). Ultrasonic and

Advanced Methods For Nondestructive Testing And Material CHARACTERIZATION. Iowa, USA: World Scientific, 2007. p. 3-31

23. LAFHAJ, Z.; GOUEYGOU, M.; DJERBI, A.; KACZMAREK, M. "Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content." **Cemente and Concrete Research**, v.36, p.625-633, 2006.

24. LAFHAJ, Z.; GOUEYGOU, M. "Experimental study on sound and damaged mortar: Variation of ultrasonic parameters with porosity." **Construction and Buildings Materials**, v.23, p.953-958, 2009.

25. HERNÁNDEZ, M. G.; ANAYA, J.J.; ULLATE, L.G.; CEGARRA, M.; SANCHEZ, T. "Application of a micromechanical model of three phases to estimating the porosity of mortar by ultrasound." **Cemente and Concrete Research**, v.36, p.617-624, 2006.

26. ANUGONDA, P., WIEHN, J. S., TURNER, J. A., Diffusion of ultrasound in concrete. **Ultrasonics**, v. 39, p.429-435, 2001.

27. VIÉGAS, D. J. A. **Utilização de Termografia Infravermelha em Fachadas para Verificação de Descolamento de Revestimento**. Dissertação (Mestrado) - UPE, Recife, 2015.

28. GOMES, M. F. N.; UCHOA, S. B. B. **Análise de Manifestações Patológicas de Fachadas de Edifícios Revestidas com Placas Cerâmicas e Pétreas na Orla de Macéio-AL**. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia e Ambiente Construído, São Paulo, Julho 2004.

29. AZENHA, M.; FARIA, R.; FIGEUIRAS, H. "Thermography as a technique for monitoring early age temperatures of hardening concrete". **Construction and Buildings Materials**, v.25, p.4232-4240, 2011.

30. ABNT NBR 16972:2021 - **Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**.

31. ABNT NBR 13276:2016 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**.

32. ABNT NBR 9778:2006 - **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**.

33. ABNT NBR 13280:2005 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**.

34. ABNT NBR 13279:2005 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**.

35. ABNT NBR 13528:2019 - **Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração - Parte 1: Requisitos gerais.**
36. ABNT NBR 8802:2019 - **Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.**
37. MAXIMO, O. H. **Desempenho Térmico de Compostos Cimentícios Produzidos com Adição de Micropartículas de Resíduos de Vidro.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2016.
38. ASTM E 1933 – **Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers.**
39. ASTM E 1862 – **Standard Practice for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers.**
40. LAUKAITIS, A. et al. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. **Cement & Concrete Composites**, v.27, p.41-47, 2005.
41. MAAROUFI, M. et. Characterization of EPS lightweight concrete microstructure by X-ray tomography with consideration of thermal variations. **Construction and Building Materials**, v.178, p.339-348, 2018.
42. ABNT NBR 13281:2005 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos.**
43. BABAVALLIAN, A. et al. Uniaxial and triaxial failure strength of fiber reinforced EPS concrete. **Construction and Building Materials**, v.247, 2020.
44. CAMPITELI, V. C., SILVA, N. G. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. **Ambiente Construído**, v.8, p.21-35, 2008.
45. ABNT NBR 13749:2013 - **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação.**