



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

**FACULDADE DE ARQUITETURA ARTES COMUNICAÇÃO E DESIGN (FAAC)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
(PPGARQ)**

STELLA BRUNA ANANIAS AFFONSO

O USO DA VERMICULITA EXPANDIDA EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

BAURU-SP

2024

STELLA BRUNA ANANIAS AFFONSO

O USO DA VERMICULITA EXPANDIDA EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPGARQ) da Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” campus de Bauru, como requisito final para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Maximiliano dos Anjos Azambuja

BAURU-SP

2024

Affonso, Stella Bruna Ananias Affonso.

O uso da vermiculita expandida em argamassas de revestimento. - Bauru, 2024

105 f. : il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual

Paulista (Unesp), Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design, Bauru

Orientador: Maximiliano dos Anjos Azambuja

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE STELLA BRUNA ANANIAS AFFONSO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO, DA FACULDADE DE ARQUITETURA, ARTES, COMUNICAÇÃO E DESIGN - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 14 dias do mês de agosto do ano de 2024, às 09:00 horas, no(a) meet.google.com/vkr-ogih--xqu, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de STELLA BRUNA ANANIAS AFFONSO, intitulada **O uso da vermiculita expandida em argamassas de revestimento**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Professor Doutor Associado MAXIMILIANO DOS ANJOS AZAMBUJA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru, Professor Doutor SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA (Participação Virtual) do(a) Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo / Universidade Estadual Paulista, Professor Doutor ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO (Participação Virtual) do(a) Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos. Após a exposição pela mestrande e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Professor Doutor Associado MAXIMILIANO DOS ANJOS AZAMBUJA

Aos meus avós, Maria José (*in memoriam*) e Odival.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e oportunidade de chegar até aqui.

Agradeço aos meus avós Maria José (*in memoriam*) e Odival que sempre me apoiaram com parceria, confiança e carinho.

Ao meu marido e companheiro de vida Bruno por me incentivar e me encorajar a seguir.

Aos meus pais, Paulo e Silvana, e minha irmã Marcella pelo incentivo e apoio em minhas escolhas.

Ao orientador Prof. Dr. Maximiliano dos Anjos Azambuja por direcionar esta pesquisa e por todos os conhecimentos transmitidos.

Ao Ms. Engenheiro Civil Leandro Augusto Erba, pela importante colaboração durante o desenvolvimento geral da pesquisa e na realização dos ensaios.

Ao técnico do Laboratório de Construção Civil da FEB – UNESP Bauru, Israel, pelo auxílio na execução dos ensaios necessários à parte experimental.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da UNESP Bauru por todo conhecimento compartilhado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

As argamassas de revestimento contribuem para o funcionamento das edificações e a vermiculita expandida, apesar de ser um material ainda pouco empregado como agregado em argamassas, apresenta, na literatura, benefícios relacionados à redução do peso estrutural, à diminuição da condutividade térmica, entre outros. O objetivo do presente trabalho consistiu em analisar, com base nas características físicas e mecânicas, o uso da vermiculita expandida como agregado em argamassas de revestimento. Foram confeccionadas misturas com 10, 20, 30, 40 e 50% de substituição da areia por vermiculita e também um traço sem substituição. No estado fresco, as misturas foram avaliadas quanto ao índice de consistência e densidade de massa e, no estado endurecido, quanto à resistência à tração na flexão (14, 28 dias e 56 dias), resistência à compressão (14, 28 e 56 dias), resistência de aderência à tração (28 dias), absorção de água por capilaridade (28 dias) e densidade de massa (28 dias). Visando aprimorar a comparação, bem como propiciar a análise estatística não encontrada no referencial teórico, os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, foram executados também aos 14 e 56 dias, enquanto a norma exigia somente aos 28 dias. Para a resistência à tração na flexão e resistência à compressão, foram avaliados 12 corpos de prova enquanto a norma recomendava três e, para a resistência de aderência à tração, foram empregados 16 corpos de prova, enquanto a norma recomendava 12. Também foi confeccionada uma tabela de classificação geral das argamassas com base na NBR 13281-1 (ABNT, 2023). O desafio deste estudo consistiu em obter, como resultado, uma mistura que atenda às recomendações normativas e que apresente bom desempenho em relação à argamassa de referência e às desenvolvidas em outros estudos. De maneira geral, as misturas com substituição da areia por vermiculita expandida, apresentaram comportamento adequado para utilização como argamassa de revestimento e o traço com 30% de vermiculita obteve o melhor desempenho. Apesar de existirem trabalhos voltados à avaliação de argamassas com vermiculita, a bibliografia aponta uma lacuna na comparação detalhada das propriedades e, assim, esta pesquisa visa colaborar para o desenvolvimento de alternativas para materiais tradicionalmente empregados nas construções.

Palavras-chave: Argamassa de revestimento. Vermiculita. Agregado miúdo. Impacto ambiental.

ABSTRACT

Coating mortars contribute to the functioning of buildings and expanded vermiculite, despite being a material still little used as an aggregate in mortars, presents, in the literature, benefits related to the reduction of structural weight, reduction of thermal conductivity, among others. The objective of this study was to analyze, based on the physical and mechanical characteristics, the use of expanded vermiculite as an aggregate in coating mortars. Mixtures were prepared with 10, 20, 30, 40 and 50% of sand replaced by vermiculite and also a mix without replacement. In the fresh state, the mixtures were evaluated for consistency index and mass density and, in the hardened state, for flexural tensile strength (14, 28 and 56 days), compressive strength (14, 28 and 56 days), tensile adhesion strength (28 days), capillary water absorption (28 days) and mass density (28 days). In order to improve the comparison, as well as to provide statistical analysis not found in the theoretical reference, the flexural tensile strength and compressive strength tests were also performed at 14 and 56 days, while the standard required them only at 28 days. For flexural tensile strength and compressive strength, 12 test specimens were evaluated, while the standard recommended three, and for tensile bond strength, 16 test specimens were used, while the standard recommended 12. A general classification table of mortars was also prepared based on NBR 13281-1 (ABNT, 2023). The challenge of this study was to obtain, as a result, a mixture that meets the normative recommendations and that presents good performance in relation to the reference mortar and those developed in other studies. In general, the mixtures with sand replaced by expanded vermiculite presented adequate behavior for use as coating mortar, and the mix with 30% vermiculite obtained the best performance. Although there are studies aimed at evaluating mortars with vermiculite, the bibliography points to a gap in the detailed comparison of properties and, thus, this research aims to collaborate in the development of alternatives for materials traditionally used in construction.

Keywords: Coating mortar. Vermiculite. Fine aggregate. Environmental impact.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento da pesquisa bibliográfica	20
Figura 2 - Desenvolvimento da etapa experimental da pesquisa	43
Figura 3 - Distribuição granulométrica da areia	45
Figura 4 - Distribuição granulométrica da areia em relação à vermiculita	46
Figura 5 - Ensaio do índice de consistência	50
Figura 6 - Ensaio de resistência à tração na flexão	52
Figura 7 - Ensaio de resistência à compressão	53
Figura 8 - Ensaio de resistência de aderência à tração	54
Figura 9 - Ensaio de absorção de água	55
Figura 10 - Curvas granulométricas dos agregados	58
Figura 11 - Areia natural (à esquerda) e vermiculita (à direita)	59
Figura 12 - Gráfico de resistência à tração na flexão aos 14 dias	63
Figura 13 - Gráfico de resistência à tração na flexão aos 28 dias	63
Figura 14 - Gráfico de resistência à tração na flexão aos 56 dias	64
Figura 15 - Gráfico de resistência à compressão aos 14 dias	71
Figura 16 - Gráfico de resistência à compressão aos 28 dias	71
Figura 17 - Gráfico de resistência à compressão aos 56 dias	72
Figura 18 - Gráfico de resistência de aderência à tração	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação e indicação de uso de argamassas de revestimento	22
Quadro 2 - Características do cimento.....	44
Quadro 3 - Características da cal.....	44
Quadro 4 - Caracterização dos agregados	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos para argamassas de revestimento conforme NBR 13281 (ABNT, 2023)	23
Tabela 2 - Traços para estudo granulométrico.....	47
Tabela 3 - Massa específica real e unitária dos componentes das misturas	48
Tabela 4 - Traços em volume e em massa	48
Tabela 5 - Caracterização granulométrica da areia.....	57
Tabela 6 - Caracterização granulométrica da vermiculita	57
Tabela 7 - Propriedades físicas dos agregados	59
Tabela 8 - Consumo final de componentes nas misturas.....	60
Tabela 9 - Propriedades das argamassas no estado fresco	61
Tabela 10 - Síntese da análise estatística da resistência à tração na flexão	65
Tabela 11 - Tabela ANOVA para resistência à tração na flexão (14 dias)	65
Tabela 12 - Teste Tukey para a resistência à tração na flexão (14 dias)	66
Tabela 13 - Resultado do teste de Tukey com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à tração na flexão (14 dias).....	66
Tabela 14 - Tabela ANOVA para resistência à tração na flexão (28 dias)	67
Tabela 15 - Teste Tukey para a resistência à tração na flexão (28 dias)	67
Tabela 16 - Resultado do teste de Tukey com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à tração na flexão (28 dias).....	68
Tabela 17 - Teste de Kruskal-Wallis para a resistência à tração na flexão (56 dias)	69
Tabela 18 - Resultado do teste de Wilcoxon com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à tração na flexão (56 dias)	70
Tabela 19 - Síntese da análise estatística da resistência à compressão	73
Tabela 20 - Tabela ANOVA para resistência à compressão (14 dias)	73
Tabela 21 - Teste Tukey para a resistência à compressão (14 dias)	74
Tabela 22 - Resultado do teste de Tukey com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à compressão (14 dias).....	74
Tabela 23 - Teste de Kruskal-Wallis para a resistência à compressão (28 dias)	75
Tabela 24 - Resultado do teste de Wilcoxon com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à compressão (28 dias)	75
Tabela 25 - Teste de Kruskal-Wallis para a resistência à compressão (56 dias)	77
Tabela 26 - Resultado do teste de Wilcoxon com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à compressão (56 dias)	77

Tabela 27 - Síntese da análise estatística da aderência à tração	79
Tabela 28 - Teste de Kruskal-Wallis para a resistência de aderência à tração (28 dias)	79
Tabela 29 - Resultado do teste de Wilcoxon com diferença significativa entre médias (μ) de resistência de aderência à tração (28 dias)	80
Tabela 30 - Absorção de água aos 10 min (28 dias)	81
Tabela 31 - Absorção de água aos 90 min (28 dias)	81
Tabela 32 - Coeficiente de capilaridade aos 28 dias	81
Tabela 33 - Densidade de massa aparente (28 dias)	82
Tabela 34 - Classificação das argamassas desenvolvidas no estudo	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP – Corpo de prova

VE – Vermiculita

PVC – Policloreto de vinila

SUMÁRIO

RESUMO	7
1 INTRODUÇÃO	14
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Método de pesquisa bibliográfica	17
2.2 Definição dos traços	20
2.2 Classificação de argamassas	21
2.2.1 Requisitos para argamassas de revestimento	22
2.3 Argamassas de revestimento	23
2.4 Agregados miúdos para argamassa	24
2.5 Incorporação de isolantes térmicos como agregados em argamassas	24
2.5.1 Vermiculita expandida como agregado em argamassas	27
2.6 Avaliação das argamassas no estado fresco	32
2.7 Avaliação das argamassas no estado endurecido	33
2.7.1 Resistência à tração na flexão	33
2.7.2 Resistência à compressão	33
2.7.3 Resistência de aderência à tração	34
2.7.4 Absorção de água e coeficiente de capilaridade	35
2.7.5 Densidade de massa aparente no estado endurecido	36
2.8 Avaliação do desempenho térmico de argamassas	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 Pesquisa experimental	42
3.2 Caracterização dos materiais	43
3.2.1 Aglomerantes	43
3.2.2 Agregados	44
3.2.3 Composição granulométrica dos agregados	45
3.2.3.1 Areia	45
3.2.3.2 Vermiculita	46
3.3 Definição dos traços	46
3.3.1 Quantidade de agregados	47
3.3.2 Quantidade de água	47
3.3.3 Quantidade de aglomerantes	47
3.4 Produção e ensaios das argamassas	48
3.4.1 Ensaios das argamassas no estado fresco	49
3.4.1.1 Índice de consistência	49
3.4.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado	50
3.4.2 Ensaios das argamassas no estado endurecido	52
3.4.2.1 Resistência à tração na flexão	52
3.4.2.2 Resistência à compressão	53
3.4.2.3 Resistência de aderência à tração	53

3.4.2.4 Absorção de água e coeficiente de capilaridade	55
3.4.3 Análise estatística dos resultados dos ensaios no estado endurecido	56
4 RESULTADOS	56
4.1 Caracterização física dos agregados.....	56
4.1.1 Composição granulométrica	56
4.1.2 Massa específica e massa unitária.....	58
4.1.3 Composição dos traços	60
4.2 Caracterização das argamassas no estado fresco	61
4.3 Caracterização das argamassas no estado endurecido	62
4.3.1 Resistência à tração na flexão.....	62
4.3.1.1 Análise estatística da resistência à tração na flexão.....	64
4.3.1.1.1 Análise estatística da resistência à tração na flexão (14 dias).....	65
4.3.1.1.2 Análise estatística da resistência à tração na flexão (28 dias).....	67
4.3.1.1.3 Análise estatística da resistência à tração na flexão (56 dias).....	69
4.3.2 Resistência à compressão.....	70
4.3.2.1 Análise estatística da resistência à compressão	73
4.3.2.1.1 Análise estatística da resistência à compressão (14 dias).....	73
4.3.2.1.2 Análise estatística da resistência à compressão (28 dias).....	75
4.3.2.1.3 Análise estatística da resistência à compressão (56 dias).....	76
4.3.3 Resistência de aderência à tração.....	78
4.3.3.1 Análise estatística da resistência de aderência à tração	79
4.3.4 Absorção de água e coeficiente de capilaridade	81
4.3.5 Densidade de massa aparente no estado endurecido.....	82
4.4 Classificação das argamassas	83
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
REFERÊNCIAS	86
APÊNDICES	94
Apêndice A – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão	94
Apêndice B – Resultados dos ensaios de resistência à compressão	96
Apêndice C – Resultados dos ensaios de resistência de aderência à tração.....	99
Apêndice D – Testes de Normalidade utilizados nas análises estatísticas.....	100

1 INTRODUÇÃO

A busca por edificações com maior eficiência energética faz-se cada vez mais importante para a construção civil que, entre outras implicações, é um setor que demanda elevado consumo de energia relacionado ao processo construtivo e à utilização do edifício ao longo de sua vida útil.

O funcionamento adequado da construção, além de beneficiar o conforto dos usuários, pode reduzir, de modo significativo, os impactos na natureza. No Brasil, a NBR 15575-1 (ABNT, 2021) trata dos requisitos e critérios de desempenho aplicáveis às edificações habitacionais, com diretrizes para conforto, estabilidade estrutural, vida útil adequada e segurança contra incêndios.

Entre os vários sistemas que compõem uma edificação, destacam-se, sob o ponto de vista da eficiência energética, os sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE) que, segundo a NBR 15575-4 (ABNT, 2021), são “partes da edificação habitacional que limitam verticalmente a edificação e seus ambientes, como as fachadas e as paredes ou divisórias internas”.

No Brasil, tais sistemas são, geralmente, compostos por elementos de argamassa cimentícia e blocos cerâmicos e/ou de concreto e, além da vedação e da função estética, possuem influência sobre o desempenho térmico da construção. Além da aderência, fatores como resistência mecânica e capacidade de absorver deformações estão entre as propriedades de maior relevância para as argamassas de revestimento (Carasek, 2010).

Juntamente com outros elementos, a argamassa de revestimento desempenha, portanto, um importante papel como parte integrante do edifício e seu potencial de influenciar o conforto térmico ainda pode ser muito explorado nos estudos (Cintra, 2013).

Amplamente utilizadas nas obras, as argamassas, com certa frequência, têm suas características alteradas pela substituição de agregados tradicionais, geralmente a areia natural de rio, por agregados leves, resultando em uma argamassa com peso reduzido. O uso de vários agregados leves na mistura de argamassa proporciona, com o aumento do índice de vazios e da porosidade na mistura, redução da densidade e da condutividade térmica (Kwon *et al.*, 2015).

No cenário brasileiro, a NBR 13281-1 (ABNT, 2023) especifica os requisitos para as argamassas destinadas ao revestimento de paredes e tetos, além dos métodos de ensaio. Enquanto uma argamassa normal possui densidade de massa no estado fresco entre 1400 kg/m^3 e 2300 kg/m^3 , na leve, o valor é abaixo de 1400 kg/m^3 . Com uma argamassa mais leve, aumenta-se a trabalhabilidade e reduz-se a condutividade térmica, fatores importantes para a utilização em revestimentos (Carasek, 2010).

Nesse cenário, é crescente o número de pesquisas de argamassas com agregados leves, como a vermiculita, que tem apresentado resultado satisfatório quanto às propriedades mecânicas e redução da condutividade térmica. Na construção civil, a vermiculita expandida é utilizada geralmente como isolante térmico e acústico (Reis, 2002 e Nascimento, 2008), mas também colabora para a redução do peso e o aumento da trabalhabilidade (Rashad, 2016). Em argamassas, além do isolamento térmico e acústico, é conhecida por reduzir o peso estrutural e a capacidade de absorção de líquidos (Cintra, Paiva e Baldo, 2014).

Sendo um dos recursos naturais mais utilizados nos sistemas construtivos para a produção de concreto e argamassa, além do impacto de sua extração nos leitos de rios, a areia natural de rio é comumente obtida em locais distantes dos centros urbanos e transportada por veículos movidos por combustíveis fósseis e, assim, outra consequência importante para o meio ambiente pode ser relacionada ao seu deslocamento. Desse modo, destaca-se a importância de investigar a possibilidade de uso da vermiculita também por sua capacidade de, quando incorporada em argamassas, preservar os depósitos de areia natural, reduzindo, portanto, alguns dos efeitos ambientais da construção (Gencel *et al.*, 2021).

Nesse cenário, apesar dos benefícios já apontados, estudos a respeito da utilização de vermiculita em materiais cimentícios são ainda bastante limitados e ganharam maior atenção nos últimos anos, conforme apontado por Guilherme (2019). A autora destaca a importância das pesquisas de tecnologia na construção civil para facilitar o alcance de edificações que, adequadas às normas de desempenho, possam contribuir para o conforto térmico dos usuários, reduzindo, assim, impactos ambientais.

Os agregados leves, com menor massa específica em relação à da areia, reduzem o peso próprio dos elementos construtivos, aliviando, dessa forma, as cargas suportadas pelas fundações (Silva, 2023). Agregados porosos, como a vermiculita expandida, apesar dos significativos efeitos sobre o isolamento térmico, podem, por outro lado, reduzir a resistência mecânica das misturas (Araújo, 2024).

Apesar de relevantes ganhos mostrados pelas pesquisas, como a melhoria da trabalhabilidade, a redução do peso e da condutividade térmica; trabalhos apontam a falta de análises comparativas entre misturas convencionais e argamassas com substituição da areia por vermiculita expandida. Como resistência à compressão, flexão e aderência são indispensáveis na análise do comportamento de argamassas de revestimento, a presente pesquisa justifica-se por investigar o desempenho mecânico de misturas com variados teores de substituição da areia por vermiculita, com o objetivo de desenvolver traços que atendam às recomendações normativas e, empregando um agregado tradicionalmente conhecido pelo isolamento térmico, colaborem com outros estudos focados no desempenho térmico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de argamassas de revestimento produzidas com substituição parcial da areia por vermiculita expandida através da análise de suas propriedades físicas e mecânicas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Investigar as propriedades físicas e mecânicas de argamassas de revestimento executadas através da substituição da areia por vermiculita expandida nos teores de 10, 20, 30, 40 e 50%;
- Comparar as misturas desenvolvidas em relação a um traço de referência, sem substituição e efetuar uma análise estatística dos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo do estudo apresenta o método de pesquisa adotado para a formação do referencial teórico e importantes conceitos da literatura relativos à definição dos traços, classificação de argamassas, agregados miúdos, isolantes térmicos, vermiculita expandida e avaliação das argamassas no estado fresco e endurecido.

2.1 Método de pesquisa bibliográfica

Para a realização da pesquisa, foram consultadas as bases Scielo, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), Anais do Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA), Scopus e Web of Science.

Na Scielo, as buscas ocorreram através de três conjuntos de palavras-chave: “Argamassa” e “Desempenho térmico”; “Argamassa” e “Isolamento térmico” e “Argamassa” e “Vermiculita”.

Na BDTD, foram utilizados dois conjuntos de palavras-chave: “Argamassa”, “Argamassa de revestimento”, “Desempenho térmico” e “Isolamento térmico” e “Argamassa” e “Vermiculita”.

Nos Anais do SBTA: “Isolamento térmico”, “Isolante térmico”, “Condutividade térmica” e “Desempenho térmico”.

Nas bases internacionais, Scopus e Web of Science, a consulta utilizou dois conjuntos de palavras-chave: “Mortar”, “Thermal performance” and “Thermal insulation” e “Mortar” and “Vermiculite”.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) foi utilizada para verificação das normas relativas às argamassas de revestimento de paredes e ao desempenho térmico de edificações. As consultas foram realizadas no mês de maio de 2024 e as plataformas foram escolhidas pela relevância na área de pesquisas, enquanto o SBTA por ser o principal evento de argamassas no país.

Nas plataformas SciELO, BDTD e nos Anais do SBTA, as buscas ocorreram da seguinte forma:

1. Busca de palavras-chave: todos os índices;
2. Período: sem restrição;
3. Filtros: sem filtros.

Já nas bases Scopus e Web of Science, os filtros utilizados foram:

1. Busca de palavras-chave: título, resumo e palavras-chave (duas bases);
2. Período: sem restrição (duas bases);
3. Filtros:
 - Tipo de documento: somente artigos (duas bases) – excluindo trabalhos de conferências, capítulos de livros e revisões sistemáticas da literatura;
 - Artigos restritos às áreas de engenharia e ciências sociais (Scopus) e arquitetura e engenharia civil (Web of Science);
 - Idioma: inglês (duas bases);

Na SciELO, as duas buscas resultaram em 17 artigos e foram selecionados, ao todo, cinco estudos que atendem aos objetivos do trabalho. Foram eliminados os artigos de revisão e os trabalhos duplicados. A partir da leitura dos resumos e objetivos, foram excluídos documentos por falta de aderência com o objetivo do estudo. Estes, consistiam em trabalhos com ênfase em: análise de incertezas físicas; incidência de fissuras de revestimentos; revisão da produção de argamassa de contrapiso e execução do contrapiso; caracterização do resíduo de manta cerâmica; simulação térmica em situação de incêndio; influência da exposição às altas temperaturas no revestimento de argamassa, entre outros.

Nos Anais do SBTA, dos 26 artigos inicialmente encontrados, foram escolhidos oito estudos que atenderam aos objetivos do trabalho. A partir da leitura dos resumos e objetivos, foram eliminados os artigos de revisão e documentos por falta de aderência com o objetivo da pesquisa. Consistiam em estudos focados em: análise da microestrutura da interface argamassa/tijolo cerâmico; desempenho de juntas de argamassa; previsão da vida útil dos revestimentos; módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos da argamassa resultante; análise da aderência de revestimentos; isothermas de dessorção; reologia das argamassas e modelagem micromecânica de argamassas.

Entre teses e dissertações na BDTD, dos 46 trabalhos inicialmente encontrados, foram escolhidos 16 que atendem aos objetivos do trabalho. A partir da leitura dos resumos e objetivos, foram eliminados alguns por falta de aderência com o objetivo da pesquisa. Consistiam em estudos com ênfase em temas como: impacto em estruturas de concreto armado; alvenarias e revestimentos de; resistência ao fogo; danos por exposição a altas temperaturas; placas de gesso termoisolantes; compósitos à base de gesso; resistência ao fogo, entre outros.

Na Scopus, dos 69 artigos inicialmente encontrados, foram selecionados 21 estudos que atendem aos objetivos da pesquisa. Houve a subtração de documentos por duplicidade entre as bases e também por falta de aderência com o objetivo do presente estudo. Assim, foram excluídos os trabalhos voltados a temas como: pulso ultrassônico; desempenho sísmico, hidrotérmico e acústico; proteção ao fogo e altas temperaturas; sistema construtivo sem argamassa: tabique e bloco de concreto aerado autoclavado; parede trombe; concreto; retrofit estrutural; análise econômica; propriedades ópticas de cimento cor fria; pontes térmicas em paredes; materiais de mudança de fase; compósito de gesso; cimento de sulfoaluminato de cálcio; hidrofobização; degradação por congelamento; aplicações estruturais de fachadas de vidro e isolamento anisotrópico, entre outros.

Na Web of Science, dos 59 artigos inicialmente encontrados, foram selecionados 03 estudos que atenderam aos objetivos do trabalho. Houve a subtração de documentos por duplicidade entre as bases e também por falta de aderência com o objetivo do estudo.

Assim, foram eliminados os trabalhos voltados a temas como: pulso ultrassônico; desempenho sísmico, hidrotérmico e acústico; proteção ao fogo e altas temperaturas; sistema construtivo sem argamassa: tabique e bloco de concreto aerado autoclavado; parede trombe; concreto; retrofit estrutural; análise econômica; propriedades ópticas de cimento cor fria; pontes térmicas em paredes; materiais de mudança de fase; compósito de gesso; cimento de sulfoaluminato de cálcio; hidrofobização; degradação por congelamento; aplicações estruturais de fachadas de vidro e isolamento anisotrópico.

Entre todas as bases utilizadas, foram encontrados inicialmente 217 trabalhos, sendo: 17 na SciELO; 46 na BDTD; 26 nos Anais do SBTA; 69 na Scopus e 59 na Web of Science.

Após a seleção dos estudos aderentes ao tema da pesquisa, foram mantidos 53 trabalhos, sendo: 05 na SciELO; 16 na BDTD; 08 nos Anais do SBTA; 21 na Scopus e 03 na Web of Science. A Figura 1 apresenta o fluxograma de desenvolvimento da pesquisa teórica.

Figura 1 - Desenvolvimento da pesquisa bibliográfica

	SciELO	BDTD	Anais do SBTa	Scopus	Web of Science
Palavras-chave	01: "Argamassa" e "Desempenho térmico"; 02: "Argamassa" e "Isolamento térmico" e 03: "Argamassa" e "Vermiculita"	01: "Argamassa", "Argamassa" de revestimento", "Desempenho térmico" e "Isolamento térmico" e 02: "Argamassa" e "Vermiculita"	"Isolamento térmico", "Isolante térmico", "Condutividade de térmica" e "Desempenho térmico"	01: "Mortar", "Thermal performance" and "Thermalinsulation" e 02: "Mortar" and "Vermiculite"	01: "Mortar", "Thermal performance" and "Thermalinsulation" e 02: "Mortar" and "Vermiculite"
Documentos encontrados	17	46	26	69	59
Documentos excluídos por duplicação e/ou falta de aderência	12	30	18	48	56
Documentos selecionados	05	16	08	21	03
Total de documentos encontrados = 217					
Total de documentos selecionados = 53					

Fonte: autora (2024).

2.2 Definição dos traços

A NBR 7200 (ABNT, 1998), ainda vigente, estabelece o procedimento de execução de revestimentos de paredes e tetos, envolvendo as etapas de preparo e aplicação das argamassas inorgânicas; preparo da base de revestimento; acondicionamento das argamassas e cuidados na aplicação. A norma, entretanto, não define os traços a serem utilizados e deixa a critério de quem executa a mistura, seja em experimentos de laboratório ou canteiros de obras.

Nos estudos de Barros (2018), Guilherme (2019), Sinharelli (2019) e Guilherme, Cabral e Souza (2020); a areia foi substituída por vermiculita expandida e o traço adotado foi 1:1:6 (cimento:cal:areia) em volume, para a produção de argamassas. A substituição ocorreu nos teores de 25, 50, 75 e 100% em Barros (2018) e de 25, 30, 35, 40, 45 e 50% em Guilherme (2019). Já em Sinharelli (2019), as proporções de 40%, 60% e 80% foram adotadas na substituição da areia pela vermiculita expandida e em Guilherme, Cabral e Souza (2020), de 25, 35 e 45%.

No estudo de Nascimento (2021), as argamassas de revestimento foram produzidas a partir do traço 1:3 (cimento:areia) em volume e a vermiculita expandida substituiu o agregado natural nas proporções de 0, 20, 40, 60, 80 e 100%.

2.2 Classificação de argamassas

Atualizada em 2023, a NBR 13281-1 (ABNT, 2023) agora divide-se em duas partes: argamassas para revestimento de paredes e tetos e argamassas para assentamento e fixação de alvenarias. Assim, para este estudo, foi utilizada a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), que descreve os requisitos, critérios e métodos de ensaios para argamassas de revestimento de paredes e tetos, sejam produzidas em canteiro, industrializadas, estabilizadas, usinadas, prontas para uso ou outras, e de aplicação manual ou mecanizada.

A norma define os seguintes termos:

Argamassa inorgânica: mistura homogênea de um ou mais ligantes inorgânicos, agregados miúdos e água. Pode conter fibras, adições e/ou aditivos, com características específicas de desempenho adequadas à utilização.

Argamassa inorgânica para revestimento interno: argamassa indicada para o revestimento de paredes internas e tetos da edificação, caracterizando-se como camada de regularização, com características específicas de desempenho adequadas à utilização como substrato para aplicação ou assentamento do acabamento decorativo.

Argamassa inorgânica para revestimento externo: argamassa indicada para o revestimento de fachadas, paredes, muros e outros elementos da edificação em contato com o meio externo, caracterizando-se como camada de regularização, com características específicas de desempenho adequadas à utilização como substrato para aplicação ou assentamento do acabamento decorativo.

Ainda segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), todas as argamassas para revestimento devem ser classificadas em argamassas de revestimento ARV-I; ARV-II; ARV-III ou AET (argamassa para emboço técnico). O Quadro 1 apresenta a classificação e as recomendações para cada argamassa.

Quadro 1 - Classificação e indicação de uso de argamassas de revestimento

Classificação	Indicação para revestimento externo	Indicação para revestimento interno
ARV-I	Edificação com altura total de até 10 m a partir do nível médio da rua da fachada principal	Qualquer edificação
ARV-II	Edificação com altura total de até 60 m a partir do nível médio da rua da fachada principal	
ARV-III	Edificação com altura superior a 60 m a partir do nível médio da rua da fachada principal	
AET	Utilização como primeira camada, compondo um revestimento ATD multicamadas (substrato para a última camada – camada aparente), conforme NBR 16648 (ABNT, 2018)	

Fonte: NBR 13281-1 (ABNT, 2023). Adaptado pela autora, 2024.

2.2.1 Requisitos para argamassas de revestimento

A NBR 13281-1 (ABNT, 2023) estabelece os requisitos para as argamassas destinadas ao assentamento de paredes ou ao revestimento de paredes e tetos, bem como as classificações definidas conforme características e propriedades observadas nos ensaios. A Tabela 1 reúne as propriedades, os métodos de ensaio, os valores limites e as respectivas classificações segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023).

Tabela 1 - Requisitos para argamassas de revestimento conforme NBR 13281 (ABNT, 2023)

Propriedade	Método de ensaio	Limites	Classificação
Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³)	NBR 13278 (ABNT, 2005)	DF < 1400	DF0
		1400 ≤ DF < 1600	DF1
		1600 ≤ DF < 1800	DF2
		1800 ≤ DF < 2000	DF3
		DF ≥ 2000	DF4
Resistência à tração na flexão (MPa)	NBR 13279 (ABNT, 2005)	R _f < 0,5	R1
		0,5 ≤ R _f < 1,5	R2
		1,5 ≤ R _f < 3,0	R3
		R _f > 3,0	R4
Resistência à compressão (MPa)	NBR 13279 (ABNT, 2005)	≤ 2,0	P1
		1,5 a 3,0	P2
		2,5 a 4,5	P3
		4,0 a 6,5	P4
		6,5 a 9,0	P5
		> 8,0	P6
Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	NBR 15258 (ABNT, 2021)	R _i ≥ 0,2	RA1
		R _i ≥ 0,3	RA2
Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	NBR 15259 (ABNT, 2005)	≤ 1,5	C1
		1,0 a 2,5	C2
		2,0 a 4,0	C3
		3,0 a 7,0	C4
		5,0 a 12,0	C5
		> 10,0	C6
Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m ³)	NBR 13280 (ABNT, 2005)	DE < 1200	DE0
		1200 ≤ DE < 1400	DE1
		1400 ≤ DE < 1600	DE2
		1600 ≤ DE < 1800	DE3
		DE ≥ 1800	DE4

Fonte: NBR 13281-1 (ABNT, 2023). Adaptado pela autora, 2024.

2.3 Argamassas de revestimento

A NBR 13529 (ABNT, 2013) define argamassa de revestimento como uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e revestimento. A NBR 7200 (ABNT, 1998) ressalta que os termos, argamassa inorgânica e argamassa de revestimento, são equivalentes. Em relação à espessura, segundo a NBR 13749 (ABNT, 2013), para revestimento de parede para uso interno deve ser de 1,5 centímetros e para uso externo de 2,0 centímetros.

Muito conhecidas pelas funções de acabamento, as argamassas de revestimento, além da finalidade estética, desempenham importante papel na durabilidade, salubridade e conforto das edificações (Guilherme, Cabral e Souza, 2020).

Para Goldberg (2022), além do acabamento, a argamassa de revestimento externo atua, entre outras funções, na estanqueidade das fachadas bem como no conforto térmico e acústico da edificação. Para o autor, a trabalhabilidade, que representa a facilidade de distribuição da mistura, coesão durante o transporte e endurecimento não imediato após a aplicação, representa uma das principais características da argamassa e pode ser influenciada por diversos fatores, sobretudo aglomerantes.

2.4 Agregados miúdos para argamassa

Na ABNT, não há uma norma especialmente destinada aos agregados miúdos de argamassas e a NBR 7211 (ABNT, 2022), que especifica os agregados para o concreto, é adotada como referência para estudos de argamassas. Ao definir as zonas utilizáveis e ótimas para o agregado miúdo, a NBR 7211 (ABNT, 2022) permite a classificação dos agregados tradicionais e dos materiais empregados nas substituições.

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura, efetuou a substituição do agregado natural, a areia, com o objetivo de obter melhor comportamento mecânico ou térmico. Entre as motivações, importante pontuar também que encontrar alternativas para substituir a areia pode reduzir alguns dos impactos ambientais da construção civil visto que já são conhecidos os efeitos de sua extração sobre os leitos de rios.

De modo geral, tornam-se relevantes nas pesquisas, os agregados leves que, permitindo a obtenção de argamassas leves, contribuíram, em muitos casos, com a melhoria da resistência mecânica e do comportamento térmico das argamassas (Záleská *et al.*, 2021).

2.5 Incorporação de isolantes térmicos como agregados em argamassas

A mistura de argamassa, tradicionalmente formada por um ou mais aglomerantes (cimento ou cal), agregado miúdo (areia) e água, tem, com certa frequência, características alteradas em busca de melhorias de acordo com a finalidade de uso, a exemplo de diversos estudos de argamassas que empregam agregados com propriedades de isolamento térmico. Neste item, portanto, serão

apresentados alguns trabalhos do referencial teórico que avaliaram a substituição da areia por materiais isolantes nas misturas.

Segundo Lamberts *et al.* (2014), materiais cimentícios como argamassas e concretos, são tipicamente isolantes à passagem de calor e, portanto, o comportamento térmico do conjunto da edificação pode ser representado por suas respectivas características de capacidade calorífica e condutividade térmica.

Resíduos de borracha de pneus foram utilizados como agregados em alguns trabalhos. Cintra (2013) avaliou argamassas contendo vermiculita e agregados de borracha reciclada de pneu e observou, nas argamassas contendo vermiculita e agregados de borracha reciclada, valores de condutividade térmica semelhantes aos encontrados nas misturas que utilizaram somente vermiculita. Para a autora, a variação da condutividade térmica está diretamente relacionada com a densidade de massa do material, de modo que, quanto menor a densidade de massa, menor a condutividade térmica. Em Cintra, Paiva e Baldo (2014), a combinação de borracha de pneus e vermiculita foi empregada em forma de agregado na mistura e a combinação dos resíduos foi considerada uma alternativa viável pelos autores.

Ferreira (2016) investigou diferentes argamassas de revestimento confeccionadas com areia grossa e areia fina de basalto, areia de aciaria elétrica e partículas de alumínio reciclado. Medindo a transferência de calor por condução, notou a possibilidade de uso do resíduo de alumínio em argamassas de revestimento.

Cardinale *et al.* (2017), analisaram fibras de cana e palha em argamassas de cimento. Na comparação dos resultados, relataram que a palha tende a diminuir as características mecânicas e a condutividade térmica quando adicionada à argamassa.

Em Rocha (2019), foram investigadas argamassas com substituição de areia por borracha reciclada de pneu nos teores de 5, 10, 15, 20 e 25%. De acordo com os resultados, a inserção da borracha reciclada de pneu diminuiu a densidade de massa no estado fresco e endurecido, e a absorção de água por capilaridade. As resistências mecânicas das misturas também diminuíram e, entretanto, todas as argamassas foram consideradas adequadas ao uso como revestimento. Na análise do desempenho térmico, a condutividade térmica reduziu de 12 a 33%, aproximadamente e, quanto maior a proporção do resíduo, menor a condutividade. Para o autor, a borracha de pneu gerou um bom isolamento térmico nas argamassas e mostrou-se capaz de contribuir para a melhoria do conforto térmico nas edificações.

Gomes (2020) avaliou argamassas com substituição parcial da areia por resíduos de borracha de pneus. O traço com 10% de resíduos de borracha apresentou uma redução na absorção de água por capilaridade, enquanto o traço com 20% de resíduos apresentou maior absorção. Na avaliação da condutividade térmica dos traços com 10 e 20% de resíduos em relação ao traço de referência, a autora notou uma redução de, aproximadamente, 16 e 29%, respectivamente, para as misturas com 10 e 20% de resíduos de borracha em relação à argamassa sem substituição. Ainda atendendo aos requisitos normativos, a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão diminuíram com o aumento do resíduo de borracha.

A perlita expandida foi empregada em Pichór *et al.* (2019) e Záleská *et al.* (2021). Em Pichór *et al.* (2019), o incremento de perlita expandida, agregado leve com baixa porosidade, gerou, em relação à argamassa de referência, menor condutividade térmica em todas as comparações e maior absorção de água conforme o aumento do teor de substituição. Záleská *et al.* (2021) avaliaram argamassas leves para usos em reparações com substituição total da areia por perlita expandida e relataram melhorias na resistência mecânica e rigidez para todas as misturas avaliadas, sendo eficientes para o uso avaliado, mesmo em alvenaria histórica que exige cuidados específicos.

Akiniemy *et al.* (2020) aplicaram a casca da palha de arroz como agregado em busca de um material de construção estrutural leve com isolamento térmico. Argamassas foram modificadas com polímero de borracha de butadieno-estireno para reforço e os resultados apontaram que, com qualquer teor de adição de fibra, a resistência à compressão melhorou.

Petereit (2020) estudou o comportamento térmico de argamassas de revestimento externo com substituição parcial da areia por materiais reciclados – polietileno expandido, couro e etileno acetato de vinila - nos teores de 25, 50 e 75%. As argamassas com resíduos apresentaram menores valores de densidade de massa e condutividade térmica.

Em Yousefi *et al.* (2020), o vidro expandido, com alta porosidade e baixa condutividade térmica, diminuiu a transferência de calor e melhorou o isolamento térmico das misturas, demonstrando viabilidade de uso em argamassas com foco na redução do consumo energético em edifícios. Para os autores, a adição do vidro expandido reciclado, levou a uma redução na resistência à compressão, que diminuiu com o decréscimo da densidade em três das misturas avaliadas e aumentou com o

incremento da densidade em outras três misturas. Os autores, assim, destacaram a complexidade existente na investigação de argamassas.

A argila expandida em substituição à areia foi empregada nos estudos de Fontes (2021), Fontes *et al.* (2022) e Silva (2023). Os comportamentos mecânicos e térmicos de argamassas de revestimento com 10, 20, 30, 40 e 50% foram avaliados em Fontes (2021) e Fontes *et al.* (2022) e, ao compará-las à argamassa de referência, os autores não constatarem prejuízos às propriedades mecânicas e, como vantagens, observaram menor condutividade térmica. A argila expandida mostrou-se, portanto, um agregado leve cujo aumento na composição dos traços reduziu a condutividade térmica e ampliou o isolamento térmico dos elementos construtivos. Em Silva (2023), estudo que analisou argamassas com argila expandida e borracha de pneus em substituição à areia, o aumento dos novos agregados levou a uma redução na densidade de massa no estado endurecido. Para a autora, esse resultado pode ser associado à menor massa específica dos agregados leves em relação à areia.

Em Silva *et al.* (2021), o agregado miúdo foi substituído por resíduo de madeira nos teores de 0; 2,5; 5,0 e 10,0% e todos os traços com resíduo apresentaram melhor isolamento térmico quando comparados ao traço de referência e, quanto maior a taxa de substituição, menor a resistência mecânica encontrada. Todas as misturas que empregaram o resíduo de madeira no estudo mostraram-se viáveis para uso na construção civil, segundo os autores.

2.5.1 Vermiculita expandida como agregado em argamassas

Ao analisar o panorama da vermiculita no Brasil na época, Reis (2002) citou como vantagens a geologia favorável, as reservas abundantes, a disponibilidade de tecnologia e laboratórios de desenvolvimento e, principalmente, um mercado interno crescente e diversificado, impulsionado pela construção civil e agricultura. Entre as dificuldades no cenário da época, apontou, sobretudo, as deficiências no conhecimento das jazidas, a escassez de centros tecnológicos especializados e a produção de concentrados de qualidade variável e sem padrões e/ou especificações. Para o autor, com poucos fornecedores mundiais, havia uma demanda crescente para o país e, no Brasil, o maior consumo de vermiculita estava atrelado à agricultura e à horticultura.

A vermiculita na forma expandida, como geralmente é comercializada, possui como vantagens o fato de não se decompor e nem se deteriorar e, além de não liberar gases tóxicos, ser um material isento de amianto, conforme apontado por Nascimento (2008). Para o autor, por ser um mineral da família das argilas micáceas, após aquecida a temperaturas muito elevadas, passa por uma rápida evaporação da água contida nas suas partículas e, como o ar preenche os espaços criados, origina um material poroso, leve e com baixa condutividade térmica.

Os maiores depósitos de vermiculita no mundo estão na África do Sul, com cerca de 30% da produção, seguida pelos Estados Unidos da América, com 23%, e Brasil, com 16%. No território brasileiro, as jazidas de vermiculita estão nos estados da Bahia, Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Paraná, Piauí e Paraíba. Utilizada na forma expandida, em diversas aplicações, a produção e o beneficiamento da vermiculita no país em 2013 foi de, aproximadamente, 68.014 toneladas (Paula, 2014).

A utilização de resíduos do caulim associados à vermiculita em argamassas foi avaliada em Nascimento (2008). Em busca de isolamento térmico e acústico, quanto maior a quantidade de vermiculita, maior foi o isolamento térmico encontrado, conforme esperado de acordo com as próprias características do agregado. Para o autor, ambos resíduos demonstraram potencial para utilização na construção civil.

Segundo Ugarte, Sampaio e França (2005), após passar pelo processo de expansão, a vermiculita reduz sua massa específica aparente de 640-960 kg/m³ para 56-192 kg/m³ e por isso é considerada um agregado leve.

Ao analisarem argamassas com vermiculita expandida e argamassas contendo vermiculita e resíduo de borracha de pneus, Cintra, Paiva e Baldo (2014) afirmaram que a combinação dos resíduos representou uma opção viável. Com resultados semelhantes no estado fresco e melhores resultados nos ensaios de resistência à compressão e aderência, as misturas com vermiculita e borracha apresentaram melhor comportamento em relação às misturas contendo apenas vermiculita.

Argamassas com perlita, argila expandida, vermiculita expandida e fibras de celulose e polipropileno foram analisadas em Palomar, Barluenga e Puentes (2015) e a junção dos agregados e fibras favoreceu o desempenho térmico e acústico. No estudo, a condutividade térmica encontrada foi 24% menor nos traços com 50% de substituição e a redução da condutividade térmica foi proporcional à da resistência à compressão.

O desempenho térmico e mecânico de argamassas de revestimento com substituições de 25, 30, 35, 40, 45 e 50% da areia natural pela vermiculita expandida foram estudadas em Guilherme (2019). Para a autora, entre os benefícios decorrentes da incorporação da vermiculita, destacam-se o aumento da trabalhabilidade, a redução da densidade, pequena redução na resistência à compressão, aumento do índice de vazios e da resistência de aderência.

O comportamento térmico e mecânico de argamassas produzidas no traço 1:1:6 com 25, 50, 75 e 100% de substituição do agregado natural pela vermiculita foram analisados em Barros (2018). Entre as misturas investigadas, a mistura com 25% de substituição obteve o melhor desempenho termomecânico e, para a autora, o aumento da vermiculita expandida diminui a densidade de massa no estado fresco devido à porosidade e à leveza do material.

O emprego do resíduo de vermiculita em substituição à areia fina em argamassas de revestimento foi avaliado por Dias (2018). O trabalho foi desenvolvido em Campina Grande, na Paraíba, estado que, segundo a autora, abriga grande concentração de vermiculita e, entretanto, durante a fase de beneficiamento, toneladas de resíduos são gerados e depositados no meio ambiente de maneira inadequada. As argamassas foram confeccionadas com 0, 30, 60 e 100% de substituição de areia fina por resíduo de vermiculita e, após as avaliações, que encontraram, sobretudo, melhorias no desempenho térmico, o resíduo foi considerado adequado para utilização em argamassas de revestimento.

Um sistema de vedação vertical externa (SVVE) constituído por parede de concreto revestida com diferentes argamassas leves desenvolvidas no estudo, foi analisado em Passos e Carasek (2018). Como agregados, foram empregados resíduos de poliestireno expandido (EPS) e resíduos do acabamento de painéis isolantes termoacústicos, compostos por lãs de vidro e de rocha, além de vermiculita. No caso das paredes externas, as argamassas leves contendo resíduos permitiram que os SVVE em parede de concreto, atendessem aos critérios normativos. De modo geral, a opção mais adequada aos parâmetros térmicos foi o revestimento de argamassa com cerca de 90% de substituição de areia por EPS reciclado e resíduo fibroso.

Passos, Jungblut e Carasek (2019) avaliaram argamassas com resíduos de poliestireno expandido (EPS) e resíduos da produção de placas isolantes termoacústicas contendo fibras de lã de rocha, lã de vidro e vermiculita expandida. A

partir dos ensaios, os autores relataram que as argamassas com resíduos, apresentaram grande potencial para utilização como revestimento isolante térmico de paredes e que, os maiores benefícios foram encontrados quando houve a associação de argamassas com EPS e resíduo contendo fibras de lã de rocha, lã de vidro e vermiculita expandida. Portanto, as argamassas com isolantes foram consideradas eficientes para o desempenho térmico.

Argamassas de revestimento com vermiculita expandida em Pessatto, Carasek e Cascudo (2019) foram estudadas e, no estado fresco, as densidades de massa das misturas com vermiculita fina e média foram 19 e 17% menores que a argamassa de referência, respectivamente. Eram esperados percentuais maiores em função da baixa massa unitária da vermiculita expandida e do aumento do teor de argamassa, que foram de 83 e 33% maiores do que a argamassa de referência para as argamassas com vermiculita fina e média, respectivamente. A respeito dos ensaios no estado endurecido, as argamassas com vermiculita apresentaram um desempenho um pouco inferior ao da argamassa de referência, porém ainda com possibilidade de uso. Com a adição da vermiculita, houve uma redução na resistência à compressão e um aumento na absorção de água e, de modo geral, a argamassa com substituição de parte da areia por vermiculita foi considerada adequada, com boa trabalhabilidade e com densidade de massa menor que a da mistura convencional.

A areia foi substituída parcialmente por vermiculita expandida nas proporções de 40, 60 e 80% com adição de pozolana nas proporções de 10 e 20% em relação à massa de cimento em Sinhorelli (2019). Para a autora, tornando a argamassa mais porosa, a vermiculita favoreceu o desempenho térmico, com uma redução da condutividade em até cerca de 78% para a mistura com 80% de substituição. As misturas com 60 e 80% de substituição, apresentaram resistência de aderência à tração inferiores a 0,3 MPa e, portanto, foram as únicas não adequadas para uso em revestimento externo. O traço com 40% de vermiculita, com importantes resultados na análise térmica, atendeu aos requisitos de resistência de aderência à tração para argamassas de revestimento externo e apresentou também características de trabalhabilidade próximas às da argamassa de referência.

O uso da vermiculita expandida nas propriedades mecânicas de argamassas leves foi avaliado em Guilherme, Cabral e Souza (2020). Na pesquisa, os resultados mostraram que a incorporação de vermiculita reduziu a densidade de massa no estado fresco e endurecido, aumentou a resistência de aderência e a resistência à

compressão foi reduzida. Para os autores, a vermiculita expandida em argamassas de revestimento possui grande potencial como substituto parcial para a areia e pode contribuir para a elaboração de argamassas leves.

Ao avaliarem argamassas à base de cinzas volantes e vermiculita expandida, Gencel *et al.* (2021) observaram aumento na fluidez, na absorção de água e na porosidade, bem como redução no peso unitário seco e na condutividade térmica em comparação aos traços sem vermiculita. A condutividade térmica foi 18% menor para a mistura com 15% de vermiculita em relação ao traço sem substituição e, entretanto, o incremento da vermiculita levou à diminuição das resistências das misturas. Em relação às misturas sem vermiculita, observaram que, com 50% de cinzas volantes, as misturas contendo 15 e 30% de vermiculita tiveram uma resistência à compressão, aproximadamente, 5 e 9% menor, respectivamente. Já com 70% de cinzas volantes, a resistência à compressão foi, aproximadamente, 9 e 21% menor. Entretanto, os autores relataram que a resistência à compressão de todas as misturas atendeu à resistência à compressão mínima de 2 MPa, de acordo com a EN 13279-1:2008 e consideraram a vermiculita expandida como uma alternativa à areia natural para uso em materiais na busca de melhoria do desempenho térmico de edificações.

Argamassas leves foram produzidas através da substituição do agregado miúdo por vermiculita expandida nos teores de 0, 15, 30 e 45% e com emprego do cimento Portland e cimento de aluminato de cálcio em Koksall *et al.* (2021). Na análise, associada ao cimento de aluminato de cálcio, a vermiculita colaborou para ganhos significativas nos ensaios térmicos e de resistência à flexão e à compressão.

As propriedades mecânicas e térmicas de argamassas com cinzas volantes e vermiculita expandida foram analisadas em Kaya e Köksal (2022). Para os autores, a vermiculita contribuiu com importantes reduções na condutividade térmica e, pela própria estrutura de alta porosidade, mostrou-se um bom isolante.

O efeito sinérgico da adição combinada da vermiculita expandida com um plastificante à base de lignosulfonato em argamassas de revestimento, foi investigado em Araújo (2024). A areia foi substituída por vermiculita expandida nos teores de 0, 25 e 50% e a autora observou que, com o aumento da vermiculita, a densidade e a resistência mecânica foram reduzidas.

Três argamassas com substituição do agregado miúdo por vermiculita nas proporções de 10, 20 e 30% em volume, com e sem aditivo incorporador de ar, foram analisadas em Fonseca (2023). O traço com 30% de vermiculita, quando comparado ao traço de referência, sem substituição, foi o que apresentou a redução mais expressiva na resistência à compressão e à tração, bem como condutividade térmica.

2.6 Avaliação das argamassas no estado fresco

A consistência, segundo Carasek (2010), indica a maior ou menor facilidade da argamassa em deformar-se sob a ação de cargas. O índice de consistência é uma propriedade influenciada diretamente pelo teor de água e o espalhamento depende da facilidade de movimentação entre as partículas (Cintra, 2013).

Atribuído à natureza porosa e mais leve do agregado, a densidade de massa no estado fresco diminuiu com o incremento da vermiculita expandida em Barros (2018).

As argamassas com vermiculita apresentaram, comparadas à mistura de referência, menor densidade de massa no estado fresco e boa trabalhabilidade no trabalho de Pessatto, Carasek e Cascudo (2019). As densidades de massa das misturas com vermiculita fina e média foram 19 e 17% menores que a argamassa de referência, respectivamente, e, entretanto, os autores esperavam percentuais maiores em função da baixa massa unitária da vermiculita expandida.

As argamassas leves contendo agregados de borracha reciclada de pneus apresentaram maior teor de ar incorporado nos traços com maior quantidade de vermiculita em Cintra, Paiva e Baldo (2014). Os autores destacaram a relação direta entre teor de ar incorporado e trabalhabilidade ressaltando que, quanto mais leve a argamassa, menor o esforço necessário para a aplicação do material, aumentando, portanto, a trabalhabilidade e a produtividade. Por outro lado, como o ar incorporado corresponde aos vazios gerados pela entrada de ar no interior da mistura, o aumento da trabalhabilidade também pode implicar em uma menor resistência mecânica.

2.7 Avaliação das argamassas no estado endurecido

2.7.1 Resistência à tração na flexão

Com a utilização da vermiculita expandida em substituição à areia como agregado em argamassas, houve uma redução na resistência à tração na flexão nos trabalhos de Barros (2018), Sinharelli (2019), Nascimento (2021), Kaya e Köksal (2022), Silva (2023) e Araújo (2024). Segundo Nascimento (2021) e Kaya e Köksal (2022), devido ao aumento da porosidade e da absorção de água, a vermiculita contribuiu para a redução da resistência mecânica das misturas.

A respeito de outros tipos de agregados utilizados em substituição à areia, alguns autores também observaram diminuição da resistência à tração na flexão: Passos e Carasek (2018), com resíduos de EPS; Rocha (2019), com resíduos de borracha de pneu reciclado; Awoyera *et al.* (2022), que empregaram lã mineral e palha de arroz e em El-Seidy *et al.* (2022), que adotaram resíduos de PVC e borracha como agregados.

Em Akiniemy *et al.* (2020), que empregaram palha da casca de arroz e em Záleská *et al.* (2021), que utilizaram perlita expandida, vidro expandido e zeólita; maiores valores de resistência à tração na flexão foram observados para os traços com substituição da areia.

2.7.2 Resistência à compressão

Cintra (2013) e Barros (2018) encontraram uma redução na resistência à compressão nas argamassas com adição de vermiculita e atribuíram este efeito à própria estrutura porosa do material. Ambos observaram maior absorção de água por capilaridade conforme aumentou-se o teor de vermiculita, o que foi relacionado, sobretudo, à alta absorção do agregado leve.

Ao avaliar argamassas contendo vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus, Cintra (2013) notou que a adição de agregados de borracha reciclada de pneu em substituição parcial da areia e da vermiculita, aumentou a densidade aparente ao mesmo tempo em que melhorou a resistência à compressão e a resistência de aderência das argamassas.

Em Cintra, Paiva e Baldo (2014), que empregaram vermiculita expandida e resíduo de borracha de pneus, os resultados dos ensaios de resistência à compressão para as quatro argamassas estudadas apresentaram valores entre 1,25 a 1,44 MPa, atendendo às exigências da NBR 13281-1 (ABNT, 2023).

No estudo de Ferreira (2016), que avaliou argamassas de revestimento com partículas de alumínio reciclado, a média da resistência à compressão, aos 28 dias, foi de 30 MPa para o traço referência, enquanto nas misturas com alumínio foi de 10 MPa, ou seja, 1/3 do valor. Segundo a autora, os resultados atenderam ao objetivo proposto pois uma argamassa convencional de revestimento apresenta resistência à compressão de 5,6 MPa.

Em Dias (2018), em relação à argamassa de referência, a adição da vermiculita, que possui grande quantidade de finos, aumentos nos valores foram encontrados para a resistência à compressão, absorção de água por imersão e por capilaridade.

Segundo Pichór *et al.* (2019), que avaliaram argamassas com vidro celular e perlita expandida como agregados, a resistência à compressão diminuiu com o aumento do vidro celular, o que resulta, principalmente, da baixa resistência dos grãos. A perlita expandida aumentou os valores em todas as argamassas e a substituição de uma parte do vidro celular por areia de quartzo, ao reduzir a porosidade da matriz, também aumentou a resistência à compressão.

Ferrández *et al.* (2022) analisaram o efeito da incorporação de resíduos de construção e demolição de materiais de isolamento térmico contendo dois tipos de poliestireno expandido e lã mineral, em duas proporções diferentes cada. Na avaliação da resistência à compressão, as misturas de referência apresentaram os maiores valores, enquanto as argamassas com lã mineral demonstraram uma resistência maior que a encontrada para as argamassas com poliestireno expandido. Nos três tipos de argamassa isolantes, a resistência à compressão foi maior nos traços com menor teor de resíduos.

2.7.3 Resistência de aderência à tração

A resistência de aderência à tração aumentou de acordo com o incremento da vermiculita e, todas as argamassas com substituição do agregado natural pela vermiculita obtiveram resultados superiores ao encontrado para a mistura de referência nos estudos de Guilherme (2019) e Guilherme, Cabral e Sousa (2020). Em

Guilherme (2019), que estudou argamassas de revestimento com substituições de 25, 30, 35, 40, 45 e 50% da areia pela vermiculita expandida, no ensaio de resistência de aderência à tração, todas as rupturas ocorreram na própria argamassa e, com exceção da mistura de referência, todos os traços apresentaram valores acima do mínimo estabelecido pela norma. Em Guilherme, Cabral e Sousa (2020), nas substituições de 25, 35 e 45% da areia pela vermiculita expandida, conforme o aumento da vermiculita, maior foi a resistência de aderência à tração.

De acordo com Sinharelli (2019), entre as características mecânicas de uma argamassa de revestimento, a resistência de aderência à tração é uma das mais relevantes pois representa uma das principais solicitações desse tipo de argamassa. A vermiculita substituiu a areia nas proporções de 40, 60 e 80% e, apesar de reduzir o desempenho mecânico das misturas, a mistura com 40% de vermiculita atendeu aos valores de resistência de aderência à tração para argamassas de revestimento externo. A autora apontou o traço com 40% de vermiculita como a melhor mistura, pois, além de atender aos requisitos de resistência de aderência à tração para uso como revestimento externo, apresentou características de trabalhabilidade próximas às da argamassa de referência e contribuiu significativamente para o desempenho térmico.

Em Nascimento (2021), o aumento do teor de vermiculita diminuiu a resistência de aderência à tração.

2.7.4 Absorção de água e coeficiente de capilaridade

Em Barros (2018), a absorção de água por capilaridade, comparada ao traço de referência, foi reduzida apenas na mistura com 25% de substituição o que, para a autora, se deve à granulometria dos agregados e ao aumento do consumo de cimento.

Foi observado um aumento na absorção de água nas argamassas com vermiculita em Pessatto, Carasek e Cascudo (2019).

Malagoni *et al.* (2019), que trabalharam com um revestimento de cal e fibra de cânhamo, afirmaram que o revestimento de menor massa específica demonstrou o melhor desempenho, com excelente regulação da umidade e melhor desempenho térmico.

Em Pichór *et al.* (2019), para a maioria das argamassas, a absorção de água por capilaridade diminuiu com o aumento da quantidade de vidro celular na argamassa e é menor para amostras com adição de perlita expandida moída. Para os autores, a perlita expandida, preenchendo os poros capilares, possivelmente limita a ação de capilaridade da água nas argamassas ao selar a matriz cimentícia.

Em Yousefi *et al.* (2020), a incorporação de vidro expandido reciclado ampliou a absorção de água e a trabalhabilidade. Para os autores, esse aumento pode ser relacionado à alta porosidade do vidro expandido em comparação ao agregado natural.

Ferrández *et al.* (2022), que analisaram argamassas de cal com poliestireno expandido e lã mineral, relataram que os valores de absorção de água por capilaridade de todas as misturas com isolantes foram superiores aos da argamassa de referência.

2.7.5 Densidade de massa aparente no estado endurecido

Em Rocha (2019), a adição das partículas de borracha reciclada de pneus, diminuiu a densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas. O autor destacou também que os valores da densidade no estado endurecido foram menores em relação à densidade no estado fresco, o que foi relacionada à perda de parte da água do corpo de prova.

Em Gomes (2020), as argamassas com substituição da areia por resíduo de borracha apresentaram menores valores da densidade de massa aparente.

Fukui, Tanabe e Silva (2013) observaram que a densidade de massa aparente na mistura com resíduos de EPS como isolantes foi bastante reduzida.

A adição da vermiculita expandida gerou redução da densidade de massa no estado endurecido em Pessatto, Carasek e Cascudo (2019), Sinhorelli (2019), Guilherme, Cabral e Souza (2020) e Nascimento (2021). Conforme maior o teor de vermiculita, maior a redução das densidades de massa no estado fresco e endurecido das argamassas em Sinhorelli (2019) e Nascimento (2021).

2.8 Avaliação do desempenho térmico de argamassas

Em busca da melhoria do desempenho térmico das edificações, estudos foram desenvolvidos com o objetivo de analisar o comportamento térmico de argamassas de revestimento com substituição parcial da areia por isolantes térmicos.

No Brasil, os estudos de argamassas com propriedades de isolamento térmico possuem como referências as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) relativas à produção e ensaio de argamassas, bem como as normas voltadas ao desempenho de edificações.

A NBR 15575 (ABNT, 2021) estabelece requisitos e critérios de desempenho aplicáveis a edificações habitacionais. O conjunto normativo é dividido com base nos sistemas que compõem uma edificação: sistemas estruturais; sistemas de pisos; sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE; sistemas de coberturas e sistemas hidrossanitários. O desempenho térmico encontra-se entre os temas tratados na norma, que também ressalta que as edificações residenciais devem, com base no zoneamento estabelecido pela NBR 15520 (ABNT, 2005), atender ao desempenho térmico de acordo com a respectiva zona bioclimática na qual estão inseridas.

A NBR 15520 (ABNT, 2005), dividida em três partes, trata do desempenho térmico de edificações e estabelece as oito zonas bioclimáticas brasileiras. Para a formulação de diretrizes construtivas para cada zona bioclimática e para o estabelecimento das estratégias de condicionamento térmico passivo, considera os seguintes parâmetros: tamanho das aberturas para ventilação; proteção das aberturas; vedações externas (tipo de parede externa e cobertura) e estratégias de condicionamento térmico passivo.

Em Cintra (2013), as argamassas de revestimento com adição de vermiculita e borracha reciclada de pneu apresentaram condutividades térmicas visivelmente menores que as da mistura de referência, sem substituição. Conforme apontado pela autora, na avaliação de desempenho térmico, a maioria dos trabalhos é baseada na medição da condutividade térmica, grandeza física que caracteriza se um material é ou não um bom condutor de calor.

Fukui, Tanabe e Silva (2013) mediram a condutividade térmica e a resistência térmica da argamassa e diferentes sistemas compostos por bloco cerâmico ou de concreto, argamassa de revestimento e com ou sem argamassa termoisolante. A

condutividade térmica da argamassa termoisolante, que utilizou resíduo de EPS, foi em torno de 76, 86 e 92% menor quando comparada à argamassa celular, de cal e comum, respectivamente. Em relação à resistência térmica, o resultado foi, aproximadamente, dez vezes maior para a argamassa isolante e, segundo os autores, a argamassa com EPS ampliou a resistência térmica em todos os sistemas analisados, com aumento de cerca de 80% para paredes de concreto, 65% para paredes de bloco de concreto e 58% para paredes de bloco cerâmico.

Kwon *et al.* (2015) observaram, na análise da condutividade térmica de argamassas leves, resultados relevantes. No estudo, o uso de vários agregados leves proporcionou isolamento térmico suficiente e, com o aumento do índice de vazios e a mistura de fibras curtas em argamassa porosa, a densidade foi reduzida, assim como a condutividade térmica.

Nas medições de condutividade em Cardinale *et al.* (2017), que estudaram argamassas de cimento reforçadas com fibras de cana e palha, foi usado um medidor de fluxo de calor em “amostra única em configuração dupla”, colocado em laboratório condicionado a uma temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa de $50 \pm 5\%$, para garantir o atendimento às exigências da norma EN 12664:2002, que determina a resistência térmica pelo método da placa quente protegida e medidor de fluxo de calor. Com os resultados, os autores concluíram que, em comparação à mistura de referência, a adição da palha tende a diminuir as características mecânicas e a condutividade térmica na argamassa. A cana também afeta a condutividade térmica, porém de modo menos significativo que a palha.

Dias (2018), ao medir o gradiente térmico entre as faces de placas confeccionadas com argamassas com e sem adição de vermiculita, encontrou uma variação até 40% maior para as amostras com vermiculita.

Segundo Barros (2018), a condutividade térmica é a principal propriedade em análises térmicas de materiais de construção e destacou a contribuição da vermiculita expandida nos resultados de isolamento térmico, visto que a adição do material reduziu significativamente a condutividade térmica. No trabalho, os traços com substituição de areia por vermiculita nas proporções de 75 e 100%, apresentaram resistência à compressão, aos 28 dias, 61 e 69% menores, respectivamente, em relação ao traço referência. Entretanto, a resistência à tração na flexão aos 28 dias reduziu, em relação ao traço de referência, somente cerca de 3% na mistura de 25 e 56% no traço de 100% de vermiculita.

Em Passos e Carasek (2018), foi avaliado o desempenho térmico do sistema de vedação vertical externa (SVVE) constituído pela parede de concreto revestida com as diferentes argamassas do estudo. A condutividade térmica foi determinada pelo ensaio da placa quente protegida, utilizando valores de referência da NBR 15220 (ABNT, 2005) e, para a avaliação dos níveis de desempenho térmico, empregou-se a NBR 15575 (ABNT, 2013). Os valores de condutividade térmica do SVVE foram compatíveis com outros estudos realizados com argamassas convencionais e, sobre a transmitância térmica, os sistemas e as argamassas com resíduos, desde que com espessura a partir de 2,5 cm, atenderam aos requisitos normativos para todas as zonas bioclimáticas brasileiras.

O desempenho térmico foi inicialmente avaliado no estudo de Guilherme (2019) por meio de procedimento simplificado de acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013) e os cálculos de transmitância térmica e capacidade térmica utilizaram dados fornecidos pela NBR 15220-2 (ABNT, 2003). Já o protótipo, ao simular a vedação vertical externa de uma edificação, era formado por painéis e dois tijolos de alvenaria cerâmica revestidos pelas argamassas do estudo em uma camada de 2 cm. O equipamento consistia em uma caixa de madeira revestida por poliestireno expandido, lâmpada infravermelha de 250 watts cada para simular a ação do sol sobre a edificação e uma divisória interna de espuma para colocação dos painéis. Entre os resultados, destacou-se o traço com 50% de substituição da areia pela vermiculita, pois reduziu 31% da condutividade térmica em relação à argamassa de referência. Já as misturas com 25, 30, 35, 40 e 45% reduziram, respectivamente, 15, 17, 20, 23 e 26%.

Para Malagoni *et al.* (2019), na avaliação dos dois revestimentos de cal e fibra de cânhamo (caule), a formulação mais fibrosa, de menor massa específica e maior capacidade de absorção de água, mostrou-se mais isolante que a mistura menos fibrosa. Segundo os autores, com boa inércia térmica e alta capacidade de regulação da umidade, o revestimento de cal e fibra de cânhamo apresentou-se como um isolante adequado. O revestimento com maior teor de fibras e menor massa específica obteve o melhor desempenho higrotérmico.

Passos, Jungblut e Carasek (2019) analisaram o desempenho térmico de SVVE constituídos por blocos de concreto e cerâmicos e quatro diferentes revestimentos de argamassa convencional e com isolantes térmicos. Com ênfase na medição da transmitância e da capacidade térmica, a NBR 15575 (ABNT, 2013) guiou a avaliação térmica e os procedimentos de cálculo da NBR 15220 (ABNT, 2005) foram

seguidos de acordo com as propriedades dos componentes do SVVE avaliado. A argamassa com resíduo da produção de placas isolantes termoacústicas composto por lã de rocha, lã de vidro e vermiculita expandida, ao ser aplicada interna e externamente, reduziu significativamente a transmitância térmica nos sistemas de blocos de concreto e revestimentos de argamassas. As argamassas com isolamento térmico foram, portanto, mais eficientes para o desempenho térmico.

Segundo Pichór *et al.* (2019), as medições térmicas foram feitas pelo método de fluxo de calor em conformidade com o padrão PN-EN ISO 8301:1998. O resultado representa o valor médio de três medições independentes e foi calculado a partir do valor do fluxo de calor, altura da amostra e diferenças de temperatura em ambas as superfícies de cada amostra. Os autores notaram que as propriedades isolantes das argamassas nas quais parte do vidro celular foi substituída por areia de quartzo, como esperado, foram prejudicadas pois o quartzo tem uma condutividade térmica bem mais elevada que o vidro celular. Também relataram que a perlita expandida, em todas as amostras, apresentou menor coeficiente de condutividade térmica em relação à referência, sendo o mais baixo visto na mistura com 20% de perlita moída. Conforme os autores, a utilização do vidro celular como agregado leve, sobretudo com uma granulação otimizada, permite obter argamassas com bom isolamento térmico e propriedades mecânicas relativamente elevadas.

Em Sousa e Piovesan (2019), foram analisadas uma argamassa sem substituições, uma argamassa com 15% e outra com 30% de resíduos de EPS em substituição à areia e foi empregada uma câmara térmica com o objetivo de analisar se a argamassa de revestimento com EPS conduz menor teor de energia térmica que a argamassa convencional. Quando comparadas à argamassa convencional, de maneira geral, as argamassas com EPS apresentaram um comportamento térmico melhor, indicando a viabilidade do EPS como substituto para o agregado com foco na redução do fluxo de calor e, portanto, na melhoria do isolamento térmico.

Yousefi *et al.* (2020) afirmaram que a substituição do agregado natural por agregado de vidro expandido melhorou o isolamento térmico dos compósitos de cimento. Este efeito positivo é atribuído à menor condutividade térmica e maior porosidade do agregado de vidro expandido em relação ao agregado natural. O estudo utilizou termografia em todas as amostras e uma diminuição da condutividade térmica foi observada em todos os compósitos com agregado de vidro expandido e, de acordo com os autores, as imagens térmicas indicaram uma diferença clara entre

a distribuição de temperatura na amostra controle e em algumas amostras com vidro expandido. Ao ser incorporado, o agregado de vidro expandido, de baixa condutividade térmica, substitui ar por areia, que tem alta condutividade térmica e, assim, a transferência de calor diminui. Para os autores, os resultados demonstraram que, com baixa transferência de calor e excelente isolamento térmico, o potencial de isolamento térmico do vidro expandido permite seu uso na envolvente do edifício ou em elementos como divisórias.

Na medição da condutividade térmica em Gencel *et al.* (2021), os resultados mostraram que, com 50% de cinzas volantes, as misturas contendo 15 e 30% de vermiculita apresentaram condutividades, aproximadamente, 12 e 24% menores e, com 70% de cinzas, as condutividades foram, aproximadamente, 24 e 34% menores que nas misturas industrializadas sem vermiculita, respectivamente. Para os autores, a condutividade diminuiu quando a areia foi substituída por vermiculita expandida. O aumento do teor de vermiculita, com grande quantidade de ar devido à própria estrutura lamelar, reduz o peso unitário, diminuindo também a condutividade térmica da argamassa, indicando grande potencial para a produção de um material de construção ecológico e leve, com excelentes características térmicas.

Záleská *et al.* (2021) relataram que, ao utilizarem agregados leves (perlita e vidro expandido), as argamassas produzidas apresentaram, de modo geral, melhoria da resistência mecânica e redução da condutividade térmica.

Awoyera *et al.* (2022) investigaram argamassas de cimento Portland com adição de lã mineral e palha de arroz e relataram que a incorporação dos materiais reduziu significativamente a condutividade térmica. A adição de fibras, apesar de afetar negativamente o comportamento mecânico em algumas misturas, ainda atendeu aos requisitos mínimos de resistência. Para os autores, os resultados indicam a viabilidade de inserção das fibras utilizadas em busca da melhoria do isolamento térmico em argamassas de cimento Portland.

No trabalho de Awoyera *et al.* (2022), a adição de lã mineral e palha de arroz, de modo geral, reduziu a resistência à compressão e à flexão das argamassas estudadas, enquanto a mistura de referência apresentou o melhor comportamento mecânico. No entanto, as misturas com lã mineral e palha de arroz foram consideradas viáveis para o uso no revestimento de paredes, visto que ainda atenderam aos requisitos normativos da BS EN 998–1:2015.

El-Seidy *et al.* (2022) estudaram argamassas com substituição da areia por borracha reciclada e partículas de policloreto de vinila (PVC) derivadas de resíduos de pneus e revestimento isolante de fios elétricos como agregados. Os resultados apontaram que a mistura com 70% de PVC e 30% de areia demonstrou uma redução de 73% na absorção de água e de 20% na condutividade térmica quando comparada à argamassa de referência, enquanto o melhor comportamento mecânico foi observado para o PVC. Os pesquisadores relataram que as argamassas desenvolvidas no trabalho apresentam comportamento físico e mecânico adequados à utilização em elementos estruturais não portantes.

Ferrández *et al.* (2022), que investigaram argamassas de cal com dois tipos de isolantes reciclados de poliestireno expandido e também lã mineral, analisaram a condutividade térmica das argamassas pelo medidor de fluxo de calor, utilizando a Lei de Fourier. Os autores encontraram, nas argamassas com material isolante, uma condutividade térmica menor em relação às argamassas tradicionais de cal, com uma menor condutividade térmica nas misturas com maior quantidade de material isolante reciclado. O melhor desempenho térmico foi obtido pelas argamassas com poliestireno expandido para uso em fachadas, seguido pelo poliestireno para uso interno. Afirmaram que os resíduos isolantes de poliestireno, de modo geral, contribuem para a redução da condutividade térmica.

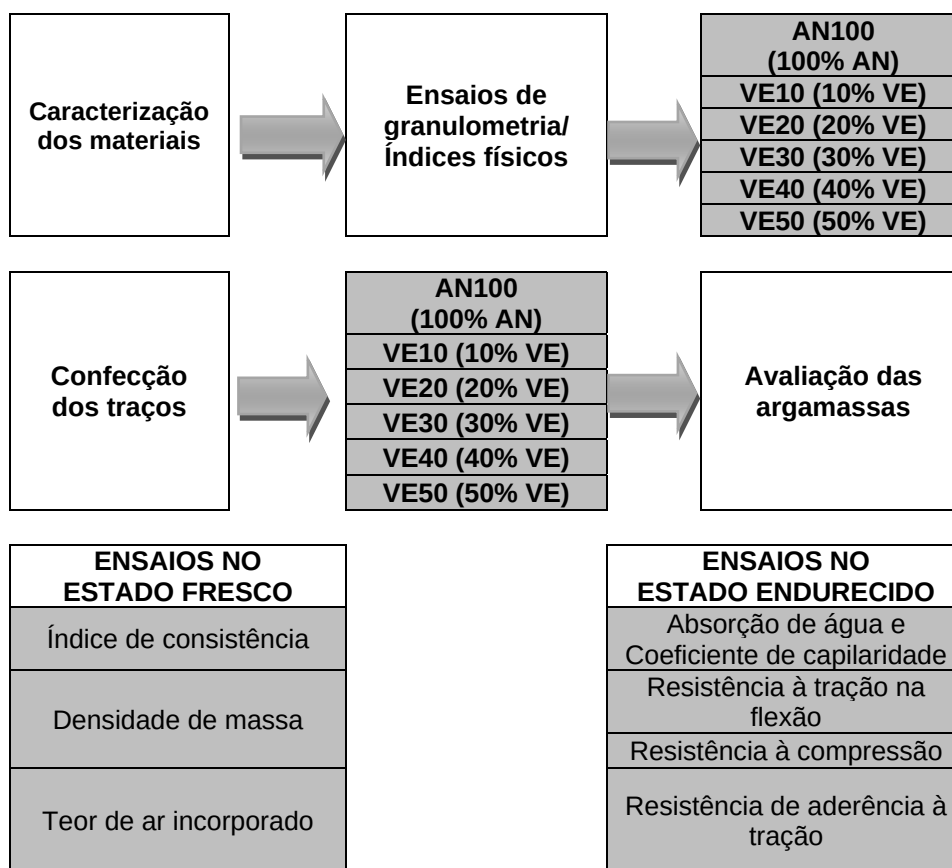
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Pesquisa experimental

De modo sintetizado, a etapa experimental do estudo dividiu-se em: caracterização dos materiais com foco nos agregados (areia e vermiculita) e avaliação do desempenho das argamassas através de ensaios no estado fresco e endurecido.

Os ensaios de caracterização dos agregados, a confecção das misturas e os ensaios das argamassas foram executados no Laboratório de Construção Civil da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). A Figura 2 ilustra as principais etapas da parte experimental da pesquisa.

Figura 2 - Desenvolvimento da etapa experimental da pesquisa



Fonte: autora (2024).

Após a execução de todos os ensaios, foi executada uma análise estatística a partir dos resultados dos ensaios das argamassas no estado endurecido - resistência à tração na flexão, resistência à compressão e resistência de aderência à tração – com vistas a investigar se as diferenças entre as médias obtidas nos ensaios foram significativas ou não.

3.2 Caracterização dos materiais

3.2.1 Aglomerantes

Foi empregado na mistura o cimento Portland tipo CP II F-32, cuja caracterização principal é fornecida pelo fabricante e apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 - Características do cimento

Propriedade	Limites
Início de Pega	≥ 60 min
Fim de Pega	≥ 600 min
Resistência à compressão (3 dias)	≥ 10 MPa
Resistência à compressão (7 dias)	≥ 20 MPa
Resistência à compressão (28 dias)	≥ 32 MPa
pH	$12 \leq \text{pH} \leq 14$
Massa específica aparente	0,9 a 1,2 g/cm ³
Massa específica real	2,8 a 3,2 g/cm ³

Fonte: Votorantim cimentos (2024).

Também foi utilizada a cal hidratada do tipo CH-III. As características físicas e químicas são também fornecidas pelo fabricante e apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Características da cal

Propriedade	Limites
Hidróxido de cálcio	65 a 78%
Hidróxido de magnésio	15 a 25%
Carbonato de cálcio	$< 15\%$
Óxido de cálcio	$< 15\%$
pH	12,4
Massa específica aparente	0,50 g/cm ³
Massa específica real	2,21 g/cm ³

Fonte: Supercal (2024).

3.2.2 Agregados

Foram utilizados dois tipos de agregados: areia natural lavada quartzosa de rio e vermiculita expandida. A areia natural, proveniente do Rio Tietê, foi extraída na cidade de Pederneiras-SP, cidade a 30 km de distância de Bauru-SP, enquanto a vermiculita expandida foi adquirida em loja de insumos agrícolas de Bauru-SP.

Antes de serem utilizados, os agregados passaram por peneiras com abertura de 2,8 mm para a retirada de impurezas e padronização do diâmetro máximo. Todos os agregados foram caracterizados de acordo com os ensaios listados no Quadro 4.

Quadro 4 - Caracterização dos agregados

Característica	Objetivo	Método
Composição granulométrica	Determinar a composição granulométrica dos agregados, especificando também a dimensão máxima e o módulo de finura.	NBR NM 248 (ABNT, 2001)
Massa específica	Demonstrar a relação entre a massa do agregado na condição saturado com superfície seca e seu volume, com exclusão dos poros permeáveis.	Método do Frasco de Chapman
Massa unitária de agregado em estado solto	Calcular a massa unitária e o volume de vazios do agregado.	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa unitária de agregado em estado compactado seco	Calcular a massa unitária e o volume de vazios do agregado.	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Teor de material pulverulento	Determinar a quantidade de material fino que passa através da peneira de 75 µm por lavagem.	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
Determinação de impurezas orgânicas	Estabelecer o método de determinação colorimétrica de impurezas orgânicas em agregado miúdo.	NBR NM 49 (ABNT, 2001)

Fonte: autora (2024).

3.2.3 Composição granulométrica dos agregados

3.2.3.1 Areia

Para a verificação do dimensionamento e distribuição das partículas da areia, foi executado o ensaio de granulometria conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2001). A amostra utilizada foi de 300g, com grãos passantes na peneira de abertura 2,8 mm. A Figura 3 ilustra a caracterização granulométrica da areia empregada no estudo.

Figura 3 - Distribuição granulométrica da areia

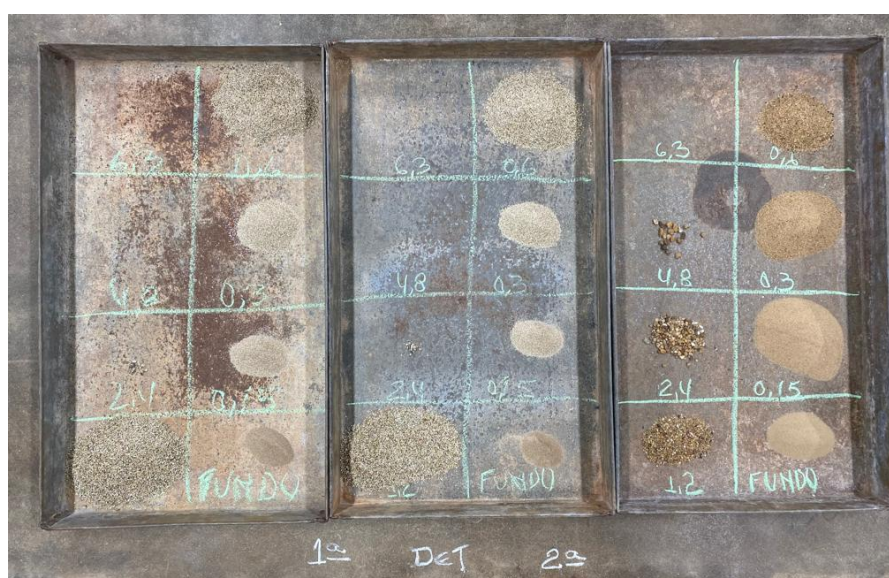


Fonte: autora (2024).

3.2.3.2 Vermiculita

A verificação da granulometria da vermiculita foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2001). A amostra utilizada foi de 300g, com grãos passantes na peneira de abertura 2,8 mm. A Figura 4 apresenta a distribuição granulométrica da areia em relação à vermiculita: bandeja da esquerda: 1ª determinação da areia; bandeja do meio: 2ª determinação da areia e bandeja da direita: vermiculita.

Figura 4 - Distribuição granulométrica da areia em relação à vermiculita



Fonte: autora (2024).

3.3 Definição dos traços

As argamassas utilizadas nesta pesquisa foram confeccionadas em laboratório a partir do traço 1:1:6 (cimento, cal e agregado) em volume, para comparação com a literatura (Barros, 2018; Guilherme, 2019; Sinhorelli, 2019 e Guilherme, Cabral e Souza, 2020).

Também de acordo com o referencial teórico, adotou-se a substituição do agregado natural por vermiculita nas porcentagens de 10, 20, 30, 40 e 50% para avaliar com precisão os resultados em comparação às argamassas convencionais. As composições dos traços estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Traços para estudo granulométrico

Traço	Teor de Areia Natural (%)	Teor de Vermiculita (%)
AN100	100	0
VE10	90	10
VE20	80	20
VE30	70	30
VE40	60	40
VE50	50	50

Fonte: autora (2024).

3.3.1 Quantidade de agregados

A quantidade de agregados no traço foi definida a partir da análise das curvas granulométricas, que forneceram as relações aglomerantes/agregados. Para isso, foi estabelecida a dimensão máxima de 2,8 mm em função do acabamento almejado e das massas específicas unitárias.

3.3.2 Quantidade de água

A quantidade de água na mistura foi obtida pelo ensaio do índice de consistência, definido pela NBR 13276 (ABNT, 2016) considerando uma consistência de 260 ± 10 mm.

3.3.3 Quantidade de aglomerantes

Para definir o traço ideal, foi adotada a equação 3.1, sendo estipulada a quantidade percentual (volume aparente) de cimento para obtenção da quantidade de cal.

$$P_{cal} = 100 - (P_{cimento} + P_{areia} + P_{água}) \quad (3.1)$$

Onde:

P_{cal} é o consumo de cal (%)

$P_{cimento}$ é o consumo de cimento (%)

P_{areia} é o consumo de areia (%)

$P_{água}$ é o consumo de água (%)

3.4 Produção e ensaios das argamassas

Os valores de massa específica real e unitária do cimento (2,99 kg/l e 1,19 kg/l, respectivamente) e da cal (2,21 kg/l e 0,73 kg/l respectivamente), fornecidos pelos fabricantes, foram utilizados para a transformação dos traços em proporção de massa. A Tabela 3 apresenta os valores de massa específica real e unitária dos componentes das misturas e a Tabela 4 os traços em volume e em massa.

Tabela 3 - Massa específica real e unitária dos componentes das misturas

Material	Massa específica(g/cm³)	Massa unitária (g/cm³)
Cimento	2,99	1,19
Cal	2,21	0,73
Areia natural	1,68	1,59
Vermiculita	0,63	0,18

Fonte: autora (2024).

Tabela 4 - Traços em volume e em massa

Traço	Teor de substituição	Traço em volume (cimento:cal: areia:vermiculita)	Traço em massa (cimento:cal: areia:vermiculita)	Relação água/cimento
AN100	0%	1:1:6:0	5:3,08:39,92:0	1,44
VE10	10%	1:1:5,4:0,6	5:3,08:35,93:0,45	1,44
VE20	20%	1:1:4,8:1,2	6,25:3,08:31,94:0,90	1,44
VE30	30%	1:1:4,2:1,8	7,75:3,08:27,94:1,36	1,44
VE40	40%	1:1:3,6:2,4	5,87:3,08:23,95:1,81	1,44
VE50	50%	1:1:3:3	6,75:3,08:19,96:2,26	1,44

Fonte: autora (2024).

O processo de confecção das argamassas consistiu nos seguintes passos: separação e pesagem dos materiais correspondentes à cada traço; imprimação da betoneira e do carrinho de mão e mistura em betoneira de eixo vertical, equipamento usualmente encontrado nas obras. Foi adicionado, de início, somente o agregado com parte da água na betoneira e, posteriormente, o cimento e a cal (quando utilizada). A seguir, a quantidade de água em cada mistura foi definida pelo ensaio do índice de consistência. A adição de água ocorreu até o alcance do espalhamento de 260 ± 10 mm conforme padronizado pela NBR 13276 (ABNT, 2016).

Para a padronização dos resultados, a quantidade de material para cada traço foi suficiente para a confecção de todos os corpos de prova, evitando a execução de novas misturas e possíveis interferências nos resultados.

3.4.1 Ensaio das argamassas no estado fresco

As argamassas do estudo foram avaliadas no estado fresco quanto às seguintes propriedades: índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado. A relação água/cimento foi mantida em função da trabalhabilidade.

3.4.1.1 Índice de consistência

A determinação do índice de consistência da argamassa, realizado através do teste em mesa, *Flow table*, foi executado de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016). As argamassas, produzidas de 15 ± 2 minutos antes do ensaio, ficaram em repouso nesse período e, a seguir, foram homogeneizadas manualmente com espátula por no máximo 30 segundos.

Anteriormente ao ensaio, os equipamentos foram limpos para evitar interferências. O ensaio consistiu basicamente em encher o molde troncônico, colocá-lo de modo centralizado sobre a mesa do ensaio; enchê-lo em três camadas sucessivas com alturas aproximadamente iguais, e aplicar, em cada uma, 15, 10 e 5 golpes, respectivamente. A seguir, o rasamento da argamassa foi executado com régua metálica rente à borda do molde troncocônico, com movimentos curtos de vai-e-vem ao longo de toda a superfície. O molde foi retirado verticalmente e foi acionada manualmente a manivela da mesa para índice de consistência, aplicando 30 golpes em 30 segundos, de modo uniforme. Imediatamente após o último golpe, foi aferido com o paquímetro o espalhamento da argamassa, com medidas efetuadas em três diâmetros tomados em pares de pontos uniformemente distribuídos ao longo do perímetro. A Figura 5 ilustra a moldagem e a finalização do ensaio que consiste na aferição do espalhamento.

Figura 5 - Ensaio do índice de consistência



Fonte: autora (2024).

Segundo a NBR 13276 (ABNT, 2016), em caso de falta de informação relativa à quantidade de água da mistura de argamassa, a quantia utilizada deve garantir um índice de consistência de 260 ± 10 mm. Assim, para a argamassa de referência (AN100), a adição de água na mistura ocorreu até atingir o índice de consistência de 260 ± 10 mm e a relação água/cimento encontrada foi de 1,44.

Para os demais traços, ou seja, nas misturas com substituição da areia por vermiculita, a mesma relação água/cimento foi assegurada e a quantidade de água foi ajustada para que todos atingissem o índice de consistência de 260 ± 10 mm, conforme recomendação normativa.

3.4.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os ensaios de densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado foram executados conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005). Em resumo, o processo consistiu basicamente em medir o volume do recipiente cilíndrico (que consiste em enchê-lo com água quantificada em instrumento calibrado) e calcular a massa final.

Após a produção da argamassa, o processo para encher o recipiente de acordo com a norma resumiu-se em:

- Introduzir, com colher, porções de argamassa no recipiente calibrado, compondo três camadas de alturas aproximadamente iguais;
- Aplicar, em cada camada, 20 golpes ao longo do perímetro da argamassa. Cada golpe corresponde à entrada e à saída da espátula na posição vertical. Na primeira camada, a espátula não deve bater fortemente contra o fundo do recipiente

e, nas demais camadas, a espátula deve ser aplicada somente com a força necessária para penetrar na superfície da camada imediatamente inferior;

- Após a execução e o golpeamento de cada camada, efetuar três quedas do recipiente com altura aproximada de 3 cm. Ao final, não devem ficar vazios entre a argamassa e a parede do recipiente;

- Rasar o recipiente com a espátula, em duas passadas ortogonais entre si, fazendo movimentos de vai-e-vem, com inclinação de 45° em relação à superfície da argamassa;

- Após a eliminação de qualquer partícula ou água aderida à parede externa do recipiente, pesar e registrar a massa do molde com a argamassa.

A densidade é calculada pela razão entre a diferença da massa do conjunto (recipiente + argamassa) e do recipiente vazio e o volume do recipiente. Para cada traço, foram executadas três aferições e a média dos valores obtidos foi considerada para o valor da densidade de massa.

A densidade (d) foi calculada através da equação 3.2.

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} 1000 \quad (3.2)$$

Onde:

m_c é a massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa, em gramas;

m_v é a massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas;

v_r é o volume do recipiente cilíndrico vazio, em centímetros cúbicos.

O teor de ar incorporado (A) foi definido pela razão entre a densidade de massa medida encontrada no ensaio (d) e a densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios (d_t), conforme a equação 3.3.

$$A = 100 \left(1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad (3.3)$$

Onde:

d é o valor da densidade de massa da argamassa, em gramas por centímetro cúbico;

d_t é o valor da densidade de massa teórica da argamassa, em gramas por centímetro cúbico, sem vazios.

3.4.2 Ensaio das argamassas no estado endurecido

As argamassas do estudo foram avaliadas no estado endurecido quanto às seguintes propriedades: absorção de água e coeficiente de capilaridade, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e resistência de aderência à tração.

3.4.2.1 Resistência à tração na flexão

Conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005), o ensaio de resistência à tração na flexão deve ser realizado em corpos de prova prismáticos com 28 dias de idade. Para cada traço de argamassa, foram moldados três corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm; desmoldados após 24 horas e mantidos em condições ambientes de temperatura e umidade no laboratório. Para o ensaio, os corpos de prova foram posicionados sobre os suportes de apoio do equipamento e, a seguir, houve a aplicação de carga a uma velocidade de (50 ± 10) N/s até a ruptura. A Figura 6 ilustra a realização do ensaio.

Figura 6 - Ensaio de resistência à tração na flexão

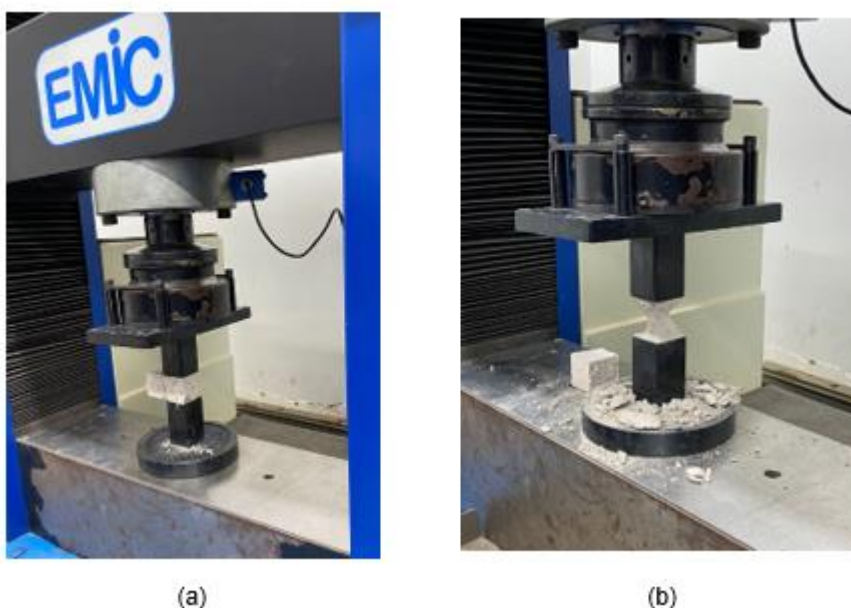


Fonte: autora (2024).

3.4.2.2 Resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, foram empregados os corpos de prova provenientes das metades dos três corpos de prova obtidas após o rompimento no ensaio de resistência à tração na flexão. Foi aplicada uma carga de (500 ± 50) N/s, até a ruptura do corpo de prova, de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005). A Figura 7 ilustra o corpo de prova posicionado no equipamento do ensaio (à esquerda) e após o ensaio de resistência à compressão (à direita).

Figura 7 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: autora (2024).

3.4.2.3 Resistência de aderência à tração

Conforme a NBR 13528 (ABNT, 2019), a resistência de aderência à tração, deve ser avaliada por meio do ensaio de arrancamento (*pull-off test*), que determina a extração de doze amostras de revestimento, escolhidas aleatoriamente. O ensaio foi executado com corpos de prova preparados em laboratório de acordo com os procedimentos a seguir:

- Aplicação de revestimento de argamassa sobre bloco cerâmico, disposição dos blocos sobre bancada e manutenção em temperatura ambiente por 28 dias;
- Para cada traço, doze corpos de prova obtidos através de seção circular de 50 mm na camada de revestimento;
- Corte com serra copo com borda diamantada e profundidade de 2 mm;

- Limpeza da superfície do corpo de prova para a remoção de partículas descartáveis antes da fixação da pastilha (placa metálica não deformável com a carga de ensaio, de seção circular, com 50 mm de diâmetro, com um dispositivo no centro para acoplamento do equipamento de tração);
- Colagem, através de cola epóxi, da pastilha no corpo de prova;
- Acoplamento do equipamento de tração à pastilha e início do esforço de tração de modo perpendicular ao corpo de prova até a ruptura, com anotação do valor da carga e da forma de ruptura;
- Determinação da tensão de ruptura através da divisão da tensão de ruptura (MPa) pela área da seção do corpo de prova (mm^2);
- Os resultados dependem diretamente do modo de ruptura do corpo de prova e a tensão encontrada equivale à resistência à tração da seção de ruptura.

A NBR 13749 (ABNT, 2013), que estipula os valores mínimos para o revestimento (0,20 MPa para paredes internas e 0,30 MPa para paredes externas) foi utilizada como parâmetro para os resultados encontrados no ensaio. A Figura 8 demonstra o ensaio de resistência de aderência à tração.

Figura 8 - Ensaio de resistência de aderência à tração



Fonte: autora (2024).

3.4.2.4 Absorção de água e coeficiente de capilaridade

A NBR 15259 (ABNT, 2005) foi empregada para a execução dos ensaios de absorção de água e coeficiente de capilaridade e utilizou três corpos de prova para cada traço. Desmoldados após 24 horas, os corpos de prova permaneceram em condições ambientes de temperatura e umidade do laboratório. Aos 28 dias, foram levados à estufa e retirados após 24 horas. Ao alcançarem a temperatura ambiente, tiveram sua massa inicial aferida (m_0) e, posteriormente, foram posicionados no recipiente com água, de modo que somente a face quadrada do corpo de prova permanecesse em contato com a água. O nível de água foi mantido constante a 5 ± 1 mm acima da face em contato com a água (Figura 9).

Figura 9 - Ensaio de absorção de água



Fonte: autora (2024).

A absorção de água por capilaridade (A_t), calculada para cada tempo e expressa em gramas por centímetro quadrado, foi determinada pela equação 3.4.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (3.4)$$

Onde:

m_t é a massa do corpo de prova em cada tempo, aproximada ao centésimo mais próximo, em gramas;

m_0 é a massa inicial do corpo de prova, em gramas, aproximada ao centésimo mais próximo, em gramas;

T corresponde aos tempos de 10min e 90 min, em segundos;

16 é a área do corpo de prova, em centímetros quadrados.

A seguir, foram executadas duas medidas de massa, uma aos 10 minutos e a segunda aos 90 minutos, direcionadas ao cálculo do coeficiente de capilaridade (C) que, expresso em gramas por decímetro quadrado pela raiz quadrada de minuto, representa o valor médio das diferenças de massa aos 10 e aos 90 min. Para o cálculo, utilizou-se a equação 3.5.

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (3.5)$$

Onde:

m_{10} é a massa do corpo de prova aos 10 minutos, em gramas;

m_{90} é a massa do corpo de prova aos 90 minutos, em gramas.

3.4.3 Análise estatística dos resultados dos ensaios no estado endurecido

A partir dos resultados dos ensaios das argamassas no estado endurecido - resistência à tração na flexão, resistência à compressão e resistência de aderência à tração - foi executada uma análise estatística de modo a avaliar se as diferenças entre as médias obtidas nos ensaios foram significativas ou não.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização física dos agregados

4.1.1 Composição granulométrica

A Tabela 5 apresenta os resultados da caracterização granulométrica da areia utilizada no estudo.

Tabela 5 - Caracterização granulométrica da areia

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)			Porcentagem retida (%)	
	1ª Determinação	2ª Determinação	Média	Individual	Acumulada
4,8	0	0	0	0	0
2,4	0,7	0,7	0,7	1,00	1
1,2	9,1	9,1	9,1	9,00	10
0,6	14,39	14,39	14,39	14,00	24
0,3	29,94	29,94	29,94	30,00	54
0,15	35,23	35,23	35,23	35,00	89
fundo	10,61	10,61	10,61	11,00	-
total	99,97	99,97	99,97	100	178

Módulo de finura (MF) = 1,78 mm

Dimensão máxima ($d_{m\acute{a}x}$) = 1,20 mm

Fonte: autora (2024).

A Tabela 6 apresenta os resultados da caracterização granulométrica da vermiculita utilizada no estudo.

Tabela 6 - Caracterização granulométrica da vermiculita

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)			Porcentagem retida (%)	
	1ª Determinação	2ª Determinação	Média	Individual	Acumulada
4,8	0	0	0	0	0
2,4	0,03	0,05	0,04	0	0
1,2	16,05	19,61	17,83	36	36
0,6	19,44	18,44	18,94	38	74
0,3	5,58	4,41	4,99	10	84
0,15	5,08	4,03	4,55	9	93
fundo	3,78	3,36	3,57	7	-
total	49,96	49,90	49,93	100	287

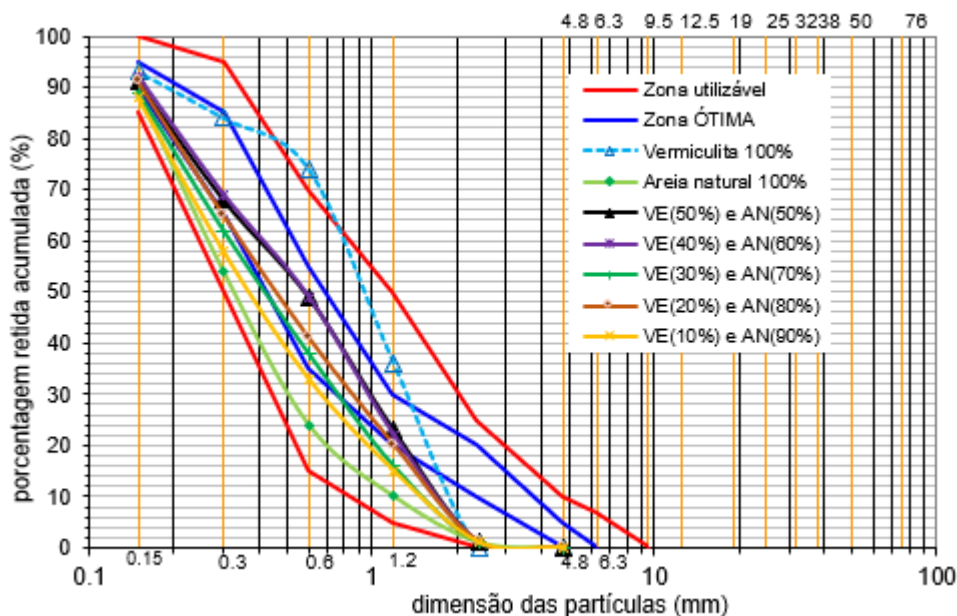
Módulo de finura (MF) = 2,87 mm

Dimensão máxima ($d_{m\acute{a}x}$) = 2,40 mm

Fonte: autora (2024).

A Figura 10 apresenta as curvas granulométricas dos agregados de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022), voltada aos agregados para concreto, visto que foi empregada como referência normativa já que não há uma destinada aos agregados de argamassas nas normas brasileiras.

Figura 10 - Curvas granulométricas dos agregados



Fonte: autora (2024).

Ao observar o gráfico, nota-se que a maioria dos agregados se encontra na zona utilizável de acordo com a norma de granulometria dos agregados. Todos os traços encontram-se dentro das zonas utilizáveis inferior e superior, com destaque para os traços VE20 (80% de areia natural e 20% de vermiculita) e VE50 (50% de areia natural e 50% de vermiculita) que estão localizados entre as zonas ótimas superior e inferior.

4.1.2 Massa específica e massa unitária

Segundo a NBR NM 45 (ABNT, 2006), a massa unitária busca definir a massa que as partículas do agregado ocupam em determinado volume enquanto a massa específica, ou massa específica real, procura estabelecer a relação entre a massa do agregado na condição saturada em superfície seca e seu volume, excluindo os poros permeáveis e é calculada pelo método do Frasco de Chapman. A Tabela 7 reúne os resultados obtidos.

Tabela 7 - Propriedades físicas dos agregados

Propriedade	Areia natural	Vermiculita expandida
Dimensão máxima (mm)	1,20	2,40
Módulo de finura (mm)	1,78	2,87
Massa específica (g/cm ³)	1,68	0,63
Massa unitária (g/cm ³)	1,59	0,18

Fonte: autora (2024).

Após a observação dos dados, notou-se que a areia é mais fina que a vermiculita pois a maior quantidade de grãos de vermiculita expandida encontra-se acima de 0,6 mm de diâmetro, enquanto a maior quantidade de grãos de areia encontra-se nas faixas de 0,3 a 0,15 mm. Visualmente também se observa essa diferença entre os agregados (Figura 11).

Figura 11 - Areia natural (à esquerda) e vermiculita (à direita)



Fonte: autora (2024).

Assim, o módulo de finura é menor para a areia e maior para a vermiculita. Resultados semelhantes foram encontrados em Guilherme (2019) e Nascimento (2021).

Conforme apontado por Nascimento (2021), o maior módulo de finura da vermiculita, agregado leve, torna mais difícil a acomodação dos grãos do material e aumenta sua porosidade. Ainda conforme a autora, conforme maior a adição de

vermiculita, maior a quantidade de vazios na mistura em razão do aumento na dificuldade de acomodação de suas partículas, bem como da própria natureza porosa do agregado.

4.1.3 Composição dos traços

A quantidade de cal foi fixada e as quantidades de areia natural e vermiculita foram em função de cada substituição.

A partir da relação água/cimento de 1,44 encontrada para a argamassa de referência, AN100, água e cimento, conforme necessário, foram adicionados até que cada mistura atingisse o índice de consistência de 260 ± 10 mm.

Em todas as misturas, também foi utilizado um aditivo plastificante com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade da argamassa. A proporção de aditivo utilizada seguiu como base a indicação do fabricante de usar 2ml de aditivo para cada 1,0 kg de cimento. Assim, no traço referência (AN100), foram empregados 10 ml do produto e nos traços com substituição da areia, a cada 10% de vermiculita, ocorreu um aumento de 10% na quantidade de aditivo. A Tabela 8 apresenta o consumo final de cada componente nas misturas.

Tabela 8 - Consumo final de componentes nas misturas

Traço	Cimento (kg)	Cal (kg)	Areia (kg)	Vermiculita (kg)	Água (kg)	Aditivo plastificante (ml)
AN100	5,00	3,08	39,92	0	7,24	10
VE10	5,00	3,08	35,93	0,45	7,24	11
VE20	6,25	3,08	31,94	0,90	9,05	12
VE30	7,75	3,08	27,94	1,36	11,22	13
VE40	5,87	3,08	23,95	1,81	8,50	14
VE50	6,75	3,08	19,96	2,26	9,77	15

Fonte: autora (2024).

Utilizando o ensaio do índice de consistência, a quantidade de água em cada mistura foi suficiente para que todas atingissem o espalhamento de 260 ± 10 mm conforme recomenda a NBR 13276 (ABNT, 2016). Como previsto, a substituição da areia por vermiculita exigiu um aumento no teor de água a partir do traço VE20. Entretanto, no traço VE40 a quantidade de água adicionada foi menor que no VE30 e o teor de água voltou a crescer no VE50.

O aumento do teor de vermiculita expandida implicou em maior consumo de água e valores de espalhamento no ensaio do índice de consistência, com números mais próximos da argamassa de referência conforme o aumento da substituição em Cintra (2013) e Barros (2018).

No estudo de argamassas com vermiculita e aditivo plastificante, o aumento do teor de substituição aumenta o consumo de água em Araújo (2024). Para a autora, a maior demanda de água nas misturas resulta da absorção de água relacionada à alta porosidade da vermiculita.

4.2 Caracterização das argamassas no estado fresco

A caracterização das argamassas produzidas no estado fresco consistiu na análise das propriedades: densidade de massa e índice de consistência. A relação água/cimento foi fixada e todas as misturas produzidas foram avaliadas em relação à densidade de massa, teor de ar incorporado e índice de consistência.

Embasado na NBR 13276 (ABNT, 2016), que recomenda um índice de consistência de 260 ± 10 mm, foi executado o ensaio através do método *Flow table* para o traço de referência (AN100) e a média obtida foi de 257,85 mm. Para este traço, a relação água/cimento encontrada foi de 1,44; proporção mantida para as demais composições para assegurar a trabalhabilidade das argamassas. A Tabela 9 reúne as propriedades observadas nos ensaios no estado fresco.

Tabela 9 - Propriedades das argamassas no estado fresco

Traço	Relação água/cimento	Densidade de massa (kg/m ³)	Índice de consistência (mm)
AN100	1,44	1840	257.85
VE10	1,44	1990	250.64
VE20	1,44	1980	252.02
VE30	1,44	1940	250.50
VE40	1,44	1860	256.00
VE50	1,44	1810	251.00

Fonte: autora (2024).

A observação dos resultados permite inferir que, com a adição da vermiculita, houve um aumento na densidade de massa dos traços intermediários e um decréscimo nos traços com maior taxa de substituição. A mistura com 50% de vermiculita apresentou a menor densidade de massa no estado fresco, com resultado

muito semelhante ao da argamassa de referência. Assim, nesta análise, quanto maior o teor de substituição, menor o valor de densidade de massa.

Todas as argamassas deste estudo podem ser utilizadas em revestimento e classificadas como normais pois apresentam densidade de massa no estado fresco na faixa entre 1400 kg/m^3 e 2300 kg/m^3 , de acordo com Carasek (2010).

Barros (2018) notou uma redução de quase 37% na densidade de massa no estado fresco como resultado da adição da vermiculita. No estudo, todas as argamassas, exceto a de 100%, podem ser classificadas como normais e, portanto, podem ser aplicadas como revestimento.

Para Guilherme (2019) e Guilherme, Cabral e Souza (2020), nas argamassas com vermiculita, a maior quantidade de ar relativa à própria estrutura do material após passar pela expansão, colabora para a melhoria da trabalhabilidade.

A adição da vermiculita, de modo geral, reduziu o índice de consistência, com exceção do traço VE40, cujo valor, entre as misturas com substituição, foi o mais elevado e o resultado muito semelhante ao da argamassa de referência.

Com base na NBR 13281-1 (ABNT, 2023), as argamassas podem ser classificadas quanto à densidade de massa no estado fresco como DF3, por apresentarem densidade maior ou igual a 1800 kg/m^3 e menor que 2000 kg/m^3 .

4.3 Caracterização das argamassas no estado endurecido

No estado endurecido, as argamassas foram avaliadas quanto aos seguintes parâmetros: resistência à tração na flexão (14, 28 dias e 56 dias), resistência à compressão (14, 28 e 56 dias), resistência de aderência à tração (28 dias), absorção de água por capilaridade (28 dias) e densidade de massa (28 dias).

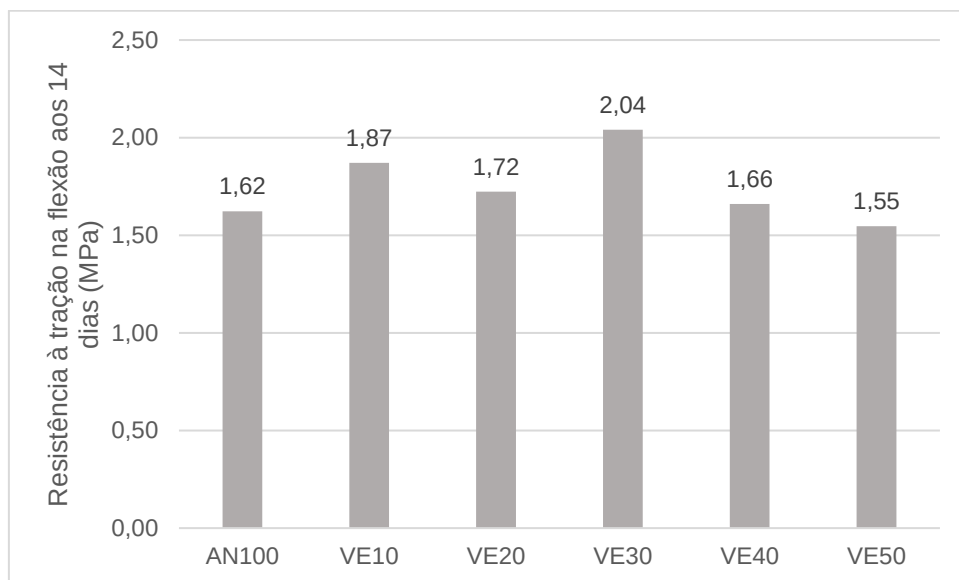
Os campos marcados com * indicam ensaios ainda não executados ou corpos de prova danificados durante os procedimentos no laboratório. De qualquer modo, todos os ensaios utilizaram um número de corpos de prova superior ao exigido pelas respectivas normas.

4.3.1 Resistência à tração na flexão

De acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005), para o ensaio de resistência à tração na flexão, três corpos de prova devem ser avaliados aos 28 dias. Os resultados, as médias, o desvio padrão e o coeficiente de variação obtidos no ensaio de

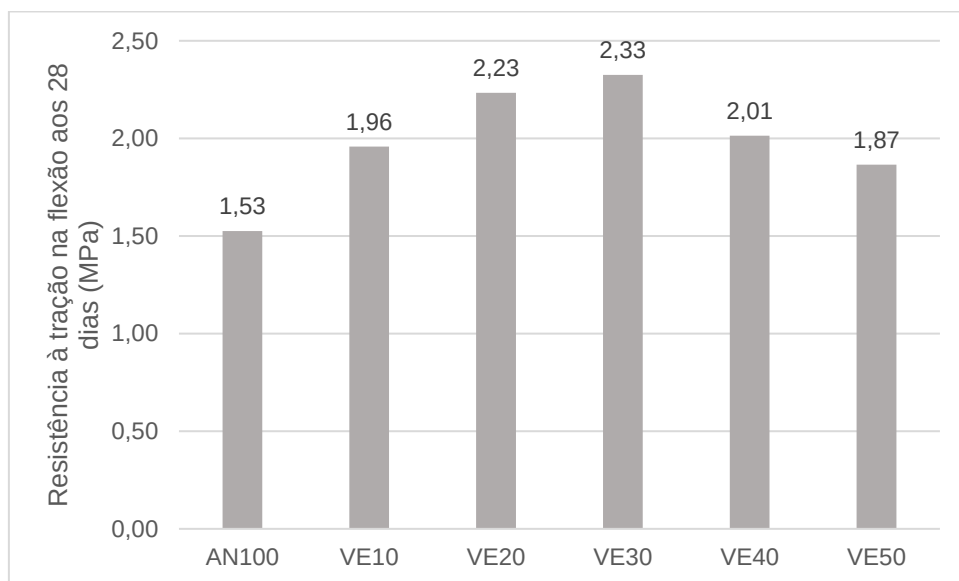
resistência à tração na flexão para os seis traços estudados são apresentados no apêndice A. Os gráficos das Figuras 12, 13 e 14 apresentam os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão.

Figura 12 - Gráfico de resistência à tração na flexão aos 14 dias



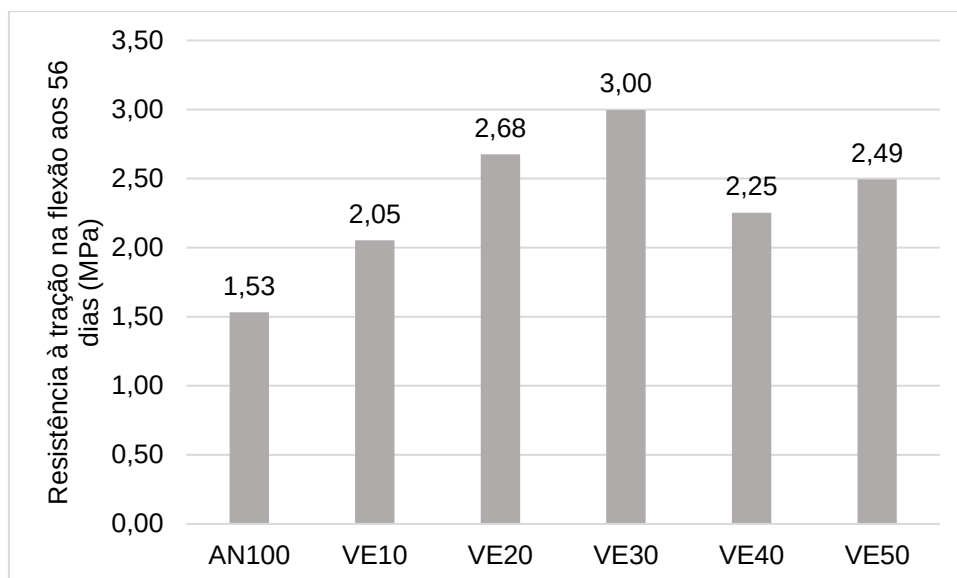
Fonte: autora (2024).

Figura 13 - Gráfico de resistência à tração na flexão aos 28 dias



Fonte: autora (2024).

Figura 14 - Gráfico de resistência à tração na flexão aos 56 dias



Fonte: autora (2024).

Os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão indicaram que, com o acréscimo da vermiculita, houve um aumento na resistência à tração na flexão, sendo VE30 a mistura com o maior valor. Em todos os traços com vermiculita, as médias encontradas foram superiores às do traço de referência e houve um leve decréscimo nos traços VE40 e VE50.

As argamassas do estudo podem ser classificadas como R3, de acordo com a NBR 13281-1 (ABNT, 2023) por apresentarem, aos 28 dias, resistência à tração na flexão maior ou igual a 1,5 e menor que 3,0 MPa.

4.3.1.1 Análise estatística da resistência à tração na flexão

Foi realizada uma análise estatística com o objetivo de averiguar se as diferenças entre as médias de resistência à tração na flexão foram significativas ou não. Conforme exigido para a realização de testes paramétricos, foi realizada a verificação simultânea das condições: Teste de Normalidade e Teste de Homogeneidade das variâncias.

A Tabela 10 sintetiza, para a resistência à tração na flexão, o Teste de Normalidade e a distribuição encontrada, o Teste de Homogeneidade das variâncias, definindo o tipo de teste (paramétrico ou não-paramétrico). A última coluna, finalmente, indica o teste aplicado (Tukey ou Kruskal-Wallis). Os gráficos de todos os testes de normalidade são apresentados no apêndice D.

Tabela 10 - Síntese da análise estatística da resistência à tração na flexão

Resultados	Normalidade (Shapiro-Wilk)		Variância (Levene Statistic)		Teste utilizado
	<i>p</i>	Distribuição	<i>p</i>	Tipo de teste	
Flexão 14 dias	0,663	normal	0,075	paramétrico	Tukey
Flexão 28 dias	0,165	normal	0,369	paramétrico	Tukey
Flexão 56 dias	0,483	normal	0,007	não-paramétrico	Kruskal-Wallis

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

4.3.1.1.1 Análise estatística da resistência à tração na flexão (14 dias)

A respeito da resistência à tração na flexão (14 dias), foram considerados seis (6) grupos de observações independentes, cada grupo procedeu de uma população com distribuição normal e houve homogeneidade das variâncias.

Como no teste de Shapiro-Wilk o valor encontrado foi de 0,663; sendo, portanto, $> 0,05$; a hipótese nula não é rejeitada, ou seja, os erros têm distribuição normal. Já no teste de Levene, com o valor de 0,075; portanto $> 0,05$; a variância dos grupos pode ser considerada homogênea. Os gráficos dos testes de normalidade (apêndice D) indicam distribuição normal.

A Tabela 11 apresenta a análise de variância ANOVA para os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão (14 dias).

Tabela 11 - Tabela ANOVA para resistência à tração na flexão (14 dias)

Fonte de variabilidade	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Quadrado médio (MQ)	Razão <i>F</i>	<i>P</i>
Entre grupos	1,946	5	0,389	12,088	0,000
Dentro dos grupos	2,093	65	0,032		
Total	4,040	70			

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

Assim, como atendeu aos testes de Normalidade e Homogeneidade das Variâncias, foi aplicado o teste de Tukey com o objetivo de verificar as comparações de médias entre amostras de tamanhos iguais, ao nível de significância de 0,05. A Tabela 12 apresenta as médias de resistência à tração na flexão (14 dias) obtidas através do método de Tukey.

Tabela 12 - Teste Tukey para a resistência à tração na flexão (14 dias)

Grupo	Traço	AN100	VE10	VE20	VE30	VE40	VE50
1	AN100		0,015	0,741	0,000	0,996	0,911
2	VE10	0,015		0,346	0,201	0,058	0,001
3	VE20	0,741	0,346		0,001	0,954	0,185
4	VE30	0,000	0,201	0,001		0,000	0,000
5	VE40	0,996	0,058	0,954	0,000		0,655
6	VE50	0,911	0,001	0,185	0,000	0,655	

Obs: as diferenças significativas estão pintadas.

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

A Tabela 13 apresenta o resultado do teste de Tukey com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à tração na flexão (14 dias), para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 13 - Resultado do teste de Tukey com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à tração na flexão (14 dias)

Grupo	Traço	N	Média (μ)	DP	Tukey
1	AN100	12	1,62	0,14	$\mu_1 = \mu_3 = \mu_5 = \mu_6$ e $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_4$
2	VE10	12	1,87	0,25	$\mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$ e $\mu_2 \neq \mu_1 \neq \mu_6$
3	VE20	12	1,72	0,15	$\mu_3 = \mu_2 = \mu_5 = \mu_6$ e $\mu_3 \neq \mu_1 \neq \mu_4$
4	VE30	12	2,04	0,15	$\mu_4 = \mu_2$ e $\mu_4 \neq \mu_1 \neq \mu_3 \neq \mu_5 \neq \mu_6$
5	VE40	12	1,66	0,11	$\mu_5 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_6$ e $\mu_5 \neq \mu_4$
6	VE50	11	1,54	0,21	$\mu_6 = \mu_1 = \mu_3 = \mu_5$ e $\mu_6 \neq \mu_2 \neq \mu_4$

Legenda: μ_1 : Grupo 1 (AN100); μ_2 : Grupo 2 (VE10); μ_3 : Grupo 3 (VE20); μ_4 : Grupo 4 (VE30); μ_5 : Grupo 5 (VE40) e μ_6 : Grupo 6 (VE50)

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

Destacando os resultados mais relevantes da tabela para discussão, nota-se que os traços VE20, VE30, VE40 e VE50 indicam possibilidade de utilização como argamassa de revestimento.

VE10 e VE20 apresentam diferença estatística significativa em relação ao traço de referência (AN100) e, entre as misturas com vermiculita, VE40 e VE50, apesar de conterem os maiores teores de substituição, destacam-se por apresentarem médias semelhantes e não apresentarem diferenças estatísticas significativas em relação ao traço de referência.

De maneira geral, com exceção do traço VE50, os valores de resistência à tração na flexão (14 dias) encontrados para as argamassas com vermiculita expandida foram maiores que o do AN100. Entre todas as misturas, VE50 e AN100 obtiveram, respectivamente, as duas menores médias e VE30 e VE10 as duas maiores.

Não foram encontrados no referencial teórico, dados para a discussão comparativa dos valores de resistência à tração na flexão medidos aos 14 dias.

4.3.1.1.2 Análise estatística da resistência à tração na flexão (28 dias)

Com base nos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão (28 dias), a Tabela 14 apresenta a análise de variância ANOVA.

Tabela 14 - Tabela ANOVA para resistência à tração na flexão (28 dias)

Fonte de variabilidade	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Quadrado médio (MQ)	Razão F	P
Entre grupos	4,850	5	0,970	31,140	0,000
Dentro dos grupos	1,869	60	0,031		
Total	6,719	65			

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

Assim, como atendeu aos testes de Normalidade e Homogeneidade das Variâncias, foi aplicado o teste de Tukey para a resistência à tração na flexão (28 dias) com o objetivo de verificar as comparações de médias entre amostras de tamanhos iguais, ao nível de significância de 0,05.

A Tabela 15 apresenta as médias de resistência à tração na flexão (28 dias) obtidas pelo método de Tukey.

Tabela 15 - Teste Tukey para a resistência à tração na flexão (28 dias)

Grupo	Traço	AN100	VE10	VE20	VE30	VE40	VE50
1	AN100		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	VE10	0,000		0,032	0,001	0,988	0,899
3	VE20	0,000	0,320		0,0799	0,039	0,000
4	VE30	0,000	0,001	0,799		0,001	0,000
5	VE40	0,000	0,988	0,039	0,001		0,323
6	VE50	0,000	0,899	0,000	0,000	0,323	

Obs: as diferenças significativas estão pintadas.

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

A Tabela 16 apresenta o resultado do teste de Tukey com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à tração na flexão (28 dias), com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 16 - Resultado do teste de Tukey com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à tração na flexão (28 dias)

Grupo	Traço	N	Média (μ)	DP	Tukey
1	AN100	12	1,52	0,21	$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5 \neq \mu_6$
2	VE10	6	1,95	0,11	$\mu_2 = \mu_3 = \mu_5 = \mu_6$ e $\mu_2 \neq \mu_1 \neq \mu_4$
3	VE20	12	2,23	0,12	$\mu_3 = \mu_2 = \mu_4$ e $\mu_3 \neq \mu_1 \neq \mu_5 \neq \mu_6$
4	VE30	12	2,32	0,20	$\mu_4 = \mu_3$ e $\mu_4 \neq \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_5 \neq \mu_6$
5	VE40	12	2,01	0,17	$\mu_5 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_6$ e $\mu_5 \neq \mu_1 \neq \mu_4$
6	VE50	12	1,86	0,18	$\mu_6 = \mu_2 = \mu_5$ e $\mu_6 \neq \mu_1 \neq \mu_3 \neq \mu_4$

Legenda: μ_1 : Grupo 1 (AN100); μ_2 : Grupo 2 (VE10); μ_3 : Grupo 3 (VE20); μ_4 : Grupo 4 (VE30); μ_5 : Grupo 5 (VE40) e μ_6 : Grupo 6 (VE50)

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

A partir da observação dos resultados mais significativos da tabela para discussão, observou-se que, com médias superiores e diferença estatística significativa em relação ao traço de referência (AN100), todos os traços com substituição da areia por vermiculita podem ser confeccionados para utilização como argamassa de revestimento.

As misturas AN100 e VE50 obtiveram, respectivamente, as duas menores médias de resistência à tração na flexão, enquanto VE30 e VE20 as duas maiores.

O aumento da resistência à tração na flexão difere das tendências encontradas nos outros estudos, visto que o acréscimo da vermiculita reduziu a propriedade nas argamassas avaliadas em Barros (2018), Sinhorelli (2019), Nascimento (2021), Kaya e Köksal (2022), Silva (2023) e Araújo (2024).

Com destaque para os resultados de Barros (2018), visto que, em relação à mistura de referência, a resistência à tração na flexão reduziu cerca de 3% no traço com 25% de vermiculita e 56% no traço com 100% de vermiculita.

A tendência encontrada no presente estudo aproxima-se do que ocorreu em Guilherme (2019). Na pesquisa, a vermiculita expandida exerceu pouca influência sobre a resistência à tração (28 dias) e uma redução foi observada somente na mistura com 50% de substituição. Para a autora, a partir desse teor, pode haver um comprometimento da resistência em razão da má distribuição dos poros.

4.3.1.1.3 Análise estatística da resistência à tração na flexão (56 dias)

Após a realização do Teste de Normalidade e Teste de Homogeneidade das variâncias para a resistência à tração na flexão (56 dias), verificou-se que seria adotado um teste não-paramétrico (Tabela 10).

No contexto do teste de Kruskal-Wallis, o "rank" refere-se à posição que cada valor observado ocupa quando todos os valores são ordenados em uma única série. O teste de Kruskal-Wallis compara os ranks médios entre os grupos para determinar se há evidência estatística suficiente para concluir que as medianas dos grupos não são todas iguais e seu teste estatístico é baseado na soma dos quadrados dos desvios dos ranks esperados para cada grupo.

Já o teste de Wilcoxon para amostras pareadas compara os ranks das diferenças observadas com os ranks esperados sob a hipótese nula de que não há diferença entre os pares de observações. O teste estatístico é baseado na soma dos ranks de diferenças positivas (ou negativas, dependendo da formulação) entre os pares de observações.

Dessa forma, para a resistência à tração na flexão (56 dias), foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis para verificar as classificações e o teste de Wilcoxon para a comparação das médias. A Tabela 17 apresenta as classificações médias obtidas pelo teste de Kruskal-Wallis para a resistência à tração na flexão (56 dias).

Tabela 17 - Teste de Kruskal-Wallis para a resistência à tração na flexão (56 dias)

Grupo	Traço	N	Rank médio
1	AN100	12	6,58
2	VE10	12	22,71
3	VE20	12	51,08
4	VE30	12	61,21
5	VE40	12	32,33
6	VE50	12	45,08

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há uma diferença significativa entre os grupos [$\chi^2(5) = 54,791$; $p < 0,05$].

A Tabela 18 apresenta as comparações observadas através do teste de Wilcoxon para as médias (μ) de resistência à tração na flexão (56 dias).

Tabela 18 - Resultado do teste de Wilcoxon com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à tração na flexão (56 dias)

Grupo	Traço	N	Média (μ)	DP	Wilcoxon
1	AN100	12	1,53	0,17	
2	VE10	12	2,05	0,20	$\mu_2 \neq \mu_1$
3	VE20	12	2,67	0,38	$\mu_3 \neq \mu_1 \neq \mu_2$
4	VE30	12	2,99	0,38	$\mu_4 = \mu_3$ e $\mu_4 \neq \mu_1 \neq \mu_2$
5	VE40	12	2,25	0,15	$\mu_5 = \mu_2$ e $\mu_5 \neq \mu_1 \neq \mu_3 \neq \mu_4$
6	VE50	12	2,49	0,19	$\mu_6 = \mu_3$ e $\mu_6 \neq \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_4 \neq \mu_5$

Legenda: μ_1 : Grupo 1 (AN100); μ_2 : Grupo 2 (VE10); μ_3 : Grupo 3 (VE20); μ_4 : Grupo 4 (VE30); μ_5 : Grupo 5 (VE40) e μ_6 : Grupo 6 (VE50)

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

A observação da tabela contendo os resultados obtidos no teste Wilcoxon permitiu inferir que, quando as médias de traços distintos foram semelhantes, não existiram diferenças significativas, a exemplo dos casos: VE10 e VE40 e VE30 e VE20, além de VE50 e VE20.

Todos os traços com vermiculita apresentaram médias superiores e diferença estatística significativa em relação ao traço de referência (AN100).

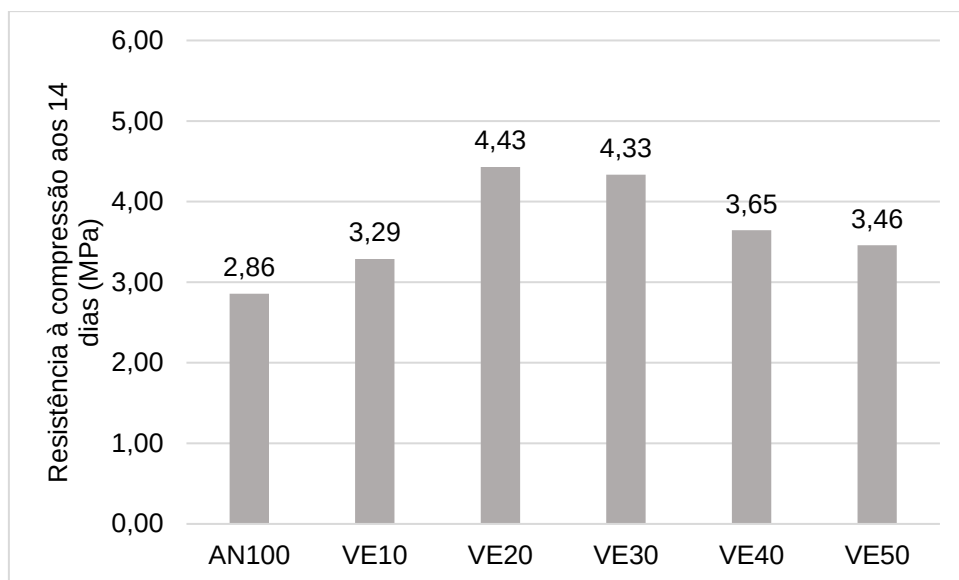
As misturas AN100 e VE10 apresentaram, respectivamente, as duas menores médias de resistência à tração na flexão (56 dias) e VE30 e VE20 as duas maiores.

Não foram encontrados no referencial teórico, dados para a discussão comparativa dos valores de resistência à tração na flexão medidos aos 56 dias.

4.3.2 Resistência à compressão

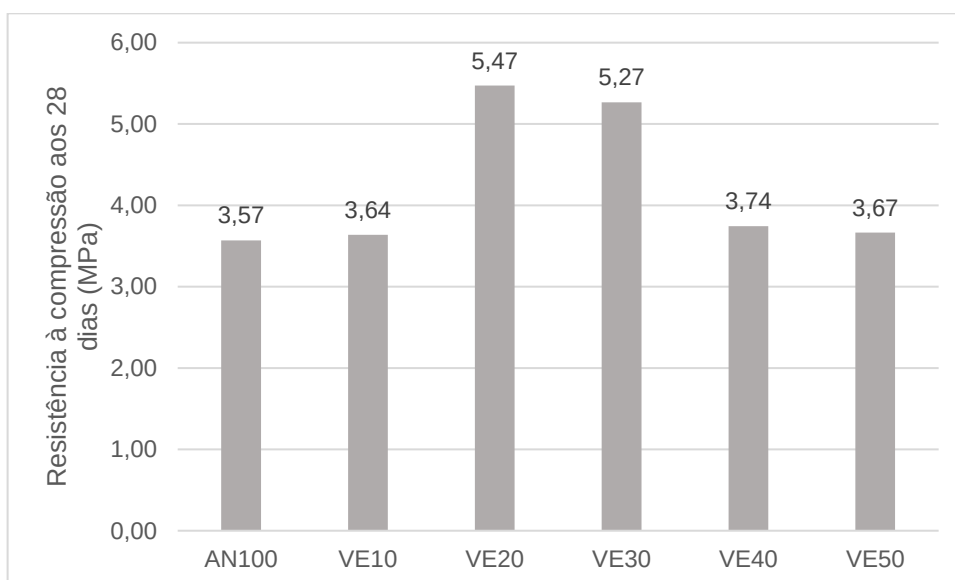
Conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005), o ensaio de resistência à compressão deve ser executado na idade de 28 dias e utilizar as metades dos três corpos de prova do ensaio de flexão. O apêndice B contém todos os resultados, as médias, o desvio padrão e o coeficiente de variação obtidos no ensaio de resistência à compressão. Os gráficos das Figuras 15, 16 e 17 mostram os resultados do ensaio de resistência à compressão.

Figura 15 - Gráfico de resistência à compressão aos 14 dias



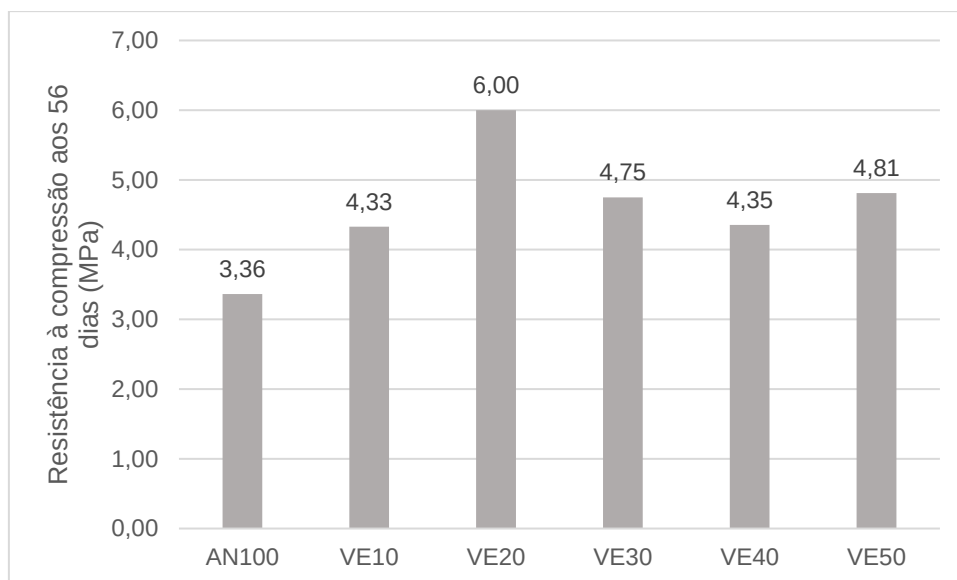
Fonte: autora (2024).

Figura 16 - Gráfico de resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: autora (2024).

Figura 17 - Gráfico de resistência à compressão aos 56 dias



Fonte: autora (2024).

Os resultados do ensaio de resistência à compressão apontaram que, de modo geral, o acréscimo da vermiculita elevou a resistência à compressão. Todos os traços com o agregado leve demonstraram valor de resistência à compressão acima do encontrado para AN100. Em todas as idades, o traço com o valor mais alto de resistência à compressão corresponde ao VE20.

Conforme a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), as misturas podem ser classificadas quanto à resistência à compressão como P3 (AN100, VE10, VE40 e VE50, com resistência entre 2,5 e 4,5 MPa) e P4 (VE20 e VE30, com resistência entre 4,0 e 6,5 MPa).

A inserção da vermiculita elevou a resistência à compressão nas argamassas avaliadas em Dias (2018). Para a autora, o aumento pode ser atribuído às próprias características da vermiculita que, semelhante à argila e pertencente ao grupo das micáceas, aumentam a coesão entre moléculas de água e partículas de resíduo e cimento, o que contribui para o aumento da resistência.

O ensaio de resistência à compressão seguiu as mesmas tendências de aumento dos valores para os traços intermediários, conforme observado também na resistência à tração na flexão.

O traço VE20, com 5,47 MPa aos 28 dias, obteve a maior resistência à compressão, indicando um aumento da resistência mecânica nos traços com substituição da areia por vermiculita expandida.

4.3.2.1 Análise estatística da resistência à compressão

A Tabela 19 sintetiza, para os resultados de resistência à compressão, o Teste de Normalidade e o tipo de distribuição, Teste de Homogeneidade das variâncias e tipo de teste, bem como o teste aplicado (Tukey ou Kruskal-Wallis). Os gráficos de todos os testes de normalidade estão no apêndice D.

Tabela 19 - Síntese da análise estatística da resistência à compressão

Resultados	Normalidade (Shapiro-Wilk)		Variância (Levene Statistic)		Teste utilizado
	<i>p</i>	Distribuição	<i>p</i>	Tipo de teste	
Compressão 14 dias	0,703	normal	0,251	paramétrico	Tukey
Compressão 28 dias	0,000	não existe	0,004	não-paramétrico	Kruskal-Wallis
Compressão 56 dias	0,001	não existe	0,001	não-paramétrico	Kruskal-Wallis

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

4.3.2.1.1 Análise estatística da resistência à compressão (14 dias)

A Tabela 20 apresenta a análise de variância ANOVA para os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão (14 dias).

Tabela 20 - Tabela ANOVA para resistência à compressão (14 dias)

Fonte de variabilidade	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Quadrado médio (MQ)	Razão <i>F</i>	<i>P</i>
Entre grupos	26,114	5	5,223	11,450	0,000
Dentro dos grupos	62,947	138	0,456		
Total	89,061	143			

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

Assim, como atendeu aos testes de Normalidade e Homogeneidade das Variâncias, foi aplicado o teste de Tukey para os resultados de resistência à tração na flexão (14 dias), com a finalidade de verificar as comparações de médias entre amostras de tamanhos iguais, ao nível de significância de 0,05. A Tabela 21 apresenta as médias de resistência à compressão (14 dias) obtidas através do método de Tukey.

Tabela 21 - Teste Tukey para a resistência à compressão (14 dias)

Grupo	Traço	AN100	VE10	VE20	VE30	VE40	VE50
1	AN100		0,017	0,109	0,295	0,702	0,163
2	VE10	0,017		0,000	0,000	0,448	0,952
3	VE20	0,109	0,000		0,997	0,001	0,000
4	VE30	0,295	0,000	0,997		0,007	0,000
5	VE40	0,702	0,448	0,001	0,007		0,930
6	VE50	0,163	0,952	0,000	0,000	0,930	

Obs: as diferenças significativas estão pintadas.

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

A Tabela 22 apresenta o resultado do teste de Tukey com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à compressão (14 dias), com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 22 - Resultado do teste de Tukey com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à compressão (14 dias)

Grupo	Traço	N	Média (μ)	DP	Tukey
1	AN100	24	3,92	0,58	$\mu_1 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$ e $\mu_1 \neq \mu_2$
2	VE10	24	3,28	0,52	$\mu_2 = \mu_5 = \mu_6$ e $\mu_2 \neq \mu_1 \neq \mu_3 \neq \mu_4$
3	VE20	24	4,42	0,81	$\mu_3 = \mu_1 = \mu_4$ e $\mu_3 \neq \mu_2 \neq \mu_5 \neq \mu_6$
4	VE30	24	4,33	0,67	$\mu_4 = \mu_1 = \mu_3$ e $\mu_4 \neq \mu_2 \neq \mu_5 \neq \mu_6$
5	VE40	24	3,64	0,74	$\mu_5 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_6$ e $\mu_5 \neq \mu_3 \neq \mu_4$
6	VE50	24	3,45	0,67	$\mu_6 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_5$ e $\mu_6 \neq \mu_3 \neq \mu_4$

Legenda: μ_1 : Grupo 1 (AN100); μ_2 : Grupo 2 (VE10); μ_3 : Grupo 3 (VE20); μ_4 : Grupo 4 (VE30); μ_5 : Grupo 5 (VE40) e μ_6 : Grupo 6 (VE50)

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

Com base nos resultados mais relevantes expostos na tabela, notou-se que as duas maiores médias de resistência à compressão (14 dias) pertencem aos traços intermediários (VE20 e VE30, respectivamente) e as duas menores para os traços com o maior e o menor teor de substituição (VE10 e VE50, respectivamente).

Importante destacar também que os traços VE20 e VE30 apontam como os únicos com médias de resistência à compressão (14 dias), maiores que a da mistura de referência (AN100) e somente VE10 apresentou diferença estatística significativa em relação ao AN100.

Não foram encontrados no referencial teórico, dados para a discussão comparativa dos valores de resistência à compressão medidos aos 14 dias.

4.3.2.1.2 Análise estatística da resistência à compressão (28 dias)

Após a realização do Teste de Normalidade e Teste de Homogeneidade das variâncias para a resistência à compressão (28 dias), foi verificado que o teste adotado seria não-paramétrico. Dessa forma, Kruskal-Wallis foi utilizado para verificação das classificações e Wilcoxon para a comparação das médias.

A Tabela 23 apresenta as classificações médias obtidas pelo teste de Kruskal-Wallis para a resistência à compressão (28 dias).

Tabela 23 - Teste de Kruskal-Wallis para a resistência à compressão (28 dias)

Grupo	Traço	N	Rank médio
1	AN100	24	40,63
2	VE10	12	43,54
3	VE20	24	105,63
4	VE30	24	98,79
5	VE40	24	51,13
6	VE50	24	47,81

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há uma diferença significativa entre os grupos [$\chi^2(5) = 67,136$; $p < 0,05$].

A Tabela 24 apresenta as comparações observadas de acordo com teste de Wilcoxon para as médias (μ) de resistência à compressão (28 dias).

Tabela 24 - Resultado do teste de Wilcoxon com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à compressão (28 dias)

Grupo	Traço	N	Média (μ)	DP	Wilcoxon
1	AN100	24	3,56	0,56	
2	VE10	12	3,63	0,69	$\mu_2 = \mu_1$
3	VE20	24	5,47	0,80	$\mu_3 \neq \mu_1 \neq \mu_2$
4	VE30	24	5,26	1,01	$\mu_4 = \mu_3$ e $\mu_4 \neq \mu_1 \neq \mu_2$
5	VE40	24	3,74	0,67	$\mu_5 = \mu_1 = \mu_2$ e $\mu_5 \neq \mu_3 \neq \mu_4$
6	VE50	24	3,71	0,55	$\mu_6 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_5$ e $\mu_6 \neq \mu_3 \neq \mu_4$

Legenda: μ_1 : Grupo 1 (AN100); μ_2 : Grupo 2 (VE10); μ_3 : Grupo 3 (VE20); μ_4 : Grupo 4 (VE30); μ_5 : Grupo 5 (VE40) e μ_6 : Grupo 6 (VE50)

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

A tabela contendo os resultados do teste Wilcoxon demonstrou que, quando as médias foram muito semelhantes entre os diferentes traços, não foram observadas diferenças significativas.

Os traços AN100, VE10, VE40 e VE50 apresentaram médias muito semelhantes entre si, bem como ocorreu entre VE20 e VE30. Com base no traço de referência, a diferença estatística significativa foi observada apenas em relação aos traços VE20 e VE30, misturas com as duas maiores médias de resistência à compressão (28 dias).

O aumento, ainda que pequeno, da resistência à compressão (28 dias) difere da maioria dos resultados do referencial teórico. No estudo de Dias (2018), o acréscimo da vermiculita levou a um aumento na resistência à compressão, enquanto em Cintra (2013), Barros (2018), Guilherme (2019) e Pessatto, Carasek e Cascudo (2019), a resistência à compressão (28 dias) das argamassas diminuiu. O decréscimo observado na resistência à compressão pode ser explicado pela baixa resistência e massa específica da vermiculita, bem como pelo aumento do teor de ar no estado fresco (Pessatto, Carasek e Cascudo, 2019).

Entre os trabalhos, destacou-se o estudo de Barros (2018) que confeccionou traços com 75 e 100% de substituição da areia por vermiculita e os valores de resistência à compressão encontrados foram 61 e 69% menores, respectivamente, em relação ao do traço de referência.

A redução da resistência à compressão observada com o aumento do teor de substituição, já era esperada devido à microestrutura porosa da vermiculita e menor densidade em relação à areia (Guilherme, 2019).

4.3.2.1.3 Análise estatística da resistência à compressão (56 dias)

Após a realização do Teste de Normalidade e Teste de Homogeneidade das variâncias para a resistência à compressão (56 dias), foi verificado que o teste adotado seria não-paramétrico, sendo: Kruskal-Wallis aplicado para verificação das classificações e Wilcoxon para a comparação das médias.

A Tabela 25 apresenta as classificações médias obtidas pelo teste de Kruskal-Wallis para a resistência à compressão (56 dias).

Tabela 25 - Teste de Kruskal-Wallis para a resistência à compressão (56 dias)

Grupo	Traço	N	Rank médio
1	AN100	24	23,23
2	VE10	24	64,67
3	VE20	24	119,25
4	VE30	24	80,25
5	VE40	24	65,88
6	VE50	24	81,73

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há uma diferença significativa entre os grupos [$\chi^2(5) = 67,088$; $p < 0,05$].

A Tabela 26 apresenta as comparações observadas através do teste de Wilcoxon para as médias (μ) de resistência à compressão (56 dias).

Tabela 26 - Resultado do teste de Wilcoxon com diferença significativa entre médias (μ) de resistência à compressão (56 dias)

Grupo	Traço	N	Média (μ)	DP	Wilcoxon
1	AN100	24	3,36	0,42	
2	VE10	24	4,32	0,77	$\mu_2 \neq \mu_1$
3	VE20	24	5,99	0,90	$\mu_3 \neq \mu_1 \neq \mu_2$
4	VE30	24	4,74	0,86	$\mu_4 = \mu_2$ e $\mu_4 \neq \mu_1 \neq \mu_3$
5	VE40	24	4,35	0,69	$\mu_5 = \mu_2 = \mu_4$ e $\mu_5 \neq \mu_1 \neq \mu_3$
6	VE50	24	4,81	1,16	$\mu_6 = \mu_2 = \mu_4 = \mu_5$ e $\mu_6 \neq \mu_1 \neq \mu_3$

Legenda: μ_1 : Grupo 1 (AN100); μ_2 : Grupo 2 (VE10); μ_3 : Grupo 3 (VE20); μ_4 : Grupo 4 (VE30); μ_5 : Grupo 5 (VE40) e μ_6 : Grupo 6 (VE50)

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

A partir da análise da tabela contendo os resultados do teste Wilcoxon, notou-se que, quando as médias de traços foram semelhantes, não foram observadas diferenças estatísticas significativas.

Todas as misturas com vermiculita apresentaram médias superiores e diferença estatística significativa em relação ao traço de referência (AN100).

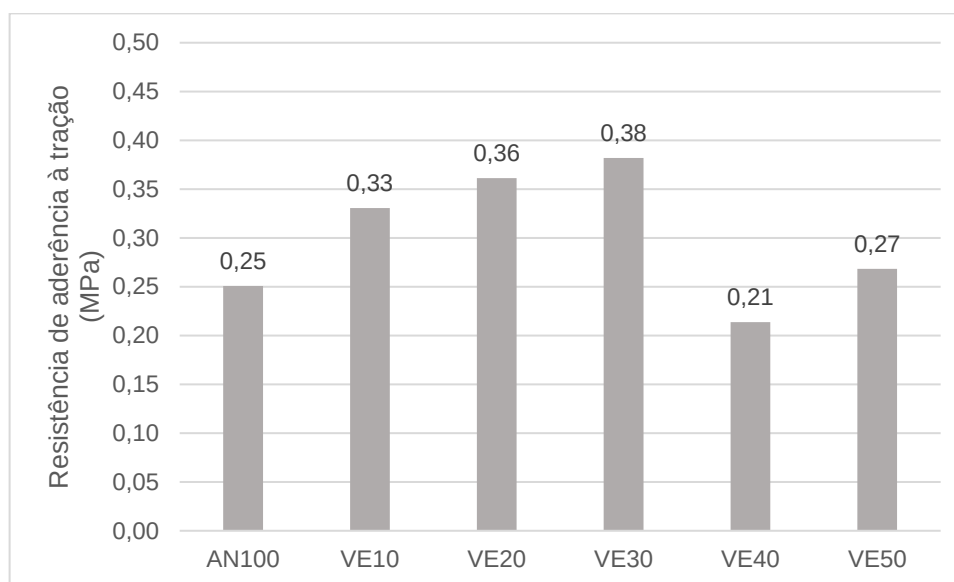
Os traços AN100 e VE10 apresentaram, respectivamente, as duas menores médias de resistência à compressão (56 dias) e VE20 e VE50 as duas maiores.

Não foram encontrados no referencial teórico, dados para a discussão comparativa dos valores de resistência à compressão medidos aos 56 dias.

4.3.3 Resistência de aderência à tração

Conforme a NBR 13528 (ABNT, 2019), a resistência de aderência à tração foi avaliada aos 28 dias por meio do ensaio de arrancamento (*pull-off test*) utilizando 12 corpos de prova. Os resultados observados após o ensaio de todos os corpos de prova, assim como as formas de ruptura, são apresentados no Apêndice C. O gráfico da Figura 18 mostra os resultados do ensaio de resistência de aderência à tração.

Figura 18 - Gráfico de resistência de aderência à tração



Fonte: autora (2024).

A análise dos dados demonstra que, com a adição da vermiculita, houve um aumento na resistência de aderência à tração. Com exceção de VE40, todos os outros resultados foram superiores aos encontrados para AN100, as rupturas ocorreram na própria argamassa e VE30 apresentou o maior valor.

A resistência de aderência à tração é uma das propriedades mais importantes para as argamassas de revestimento pois refere-se ao desempenho da argamassa quando submetida a uma de suas principais solicitações (Sinhorelli, 2019).

Todos os traços atenderam à NBR 13749 (ABNT, 2013), que estipula os valores mínimos de 0,20 MPa para paredes internas e 0,30 MPa para paredes externas. Os traços VE10, VE20 e VE30, com resistência de aderência à tração maior que 0,30 MPa, mostraram-se adequados para revestimentos externos, enquanto VE40 e VE50, com valores entre 0,20 e 0,30 MPa, para revestimentos internos.

Com base na NBR 13281-1 (ABNT, 2023), as misturas podem ser classificadas quanto à resistência de aderência à tração como RA1 (AN100, VE40 e VE50, pela resistência maior ou igual a 0,2 MPa) e RA2 (VE10, VE20 e VE30, pela resistência maior ou igual a 0,3 MPa).

4.3.3.1 Análise estatística da resistência de aderência à tração

A Tabela 27 sintetiza, para os resultados de resistência de aderência à tração, o Teste de Normalidade e tipo de distribuição, Teste de Homogeneidade das variâncias e tipo de teste, bem como o teste aplicado (Tukey ou Kruskal-Wallis). O apêndice D apresenta todos os testes de normalidade referentes às análises estatísticas.

Tabela 27 - Síntese da análise estatística da aderência à tração

Resultados	Normalidade (Shapiro-Wilk)		Variância (Levene Statistic)		Teste utilizado
	p	Distribuição normal	sig.	Tipo de teste	
Aderência à tração	0,000	não existe	0,000	não-paramétrico	Kruskal-Wallis

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2024).

Após a realização do Teste de Normalidade e Teste de Homogeneidade das variâncias para a resistência de aderência à tração (28 dias), foi verificado que o teste adotado seria não-paramétrico, sendo: Kruskal-Wallis aplicado para verificação das classificações e Wilcoxon para a comparação das médias.

A Tabela 28 apresenta as classificações médias obtidas pelo teste de Kruskal-Wallis para a resistência de aderência à tração (28 dias).

Tabela 28 - Teste de Kruskal-Wallis para a resistência de aderência à tração (28 dias)

Grupo	Traço	N	Rank médio
1	AN100	14	29,82
2	VE10	16	54,00
3	VE20	16	63,00
4	VE30	16	66,91
5	VE40	16	20,38
6	VE50	16	48,69

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há uma diferença significativa entre os grupos [$\chi^2(5) = 35,973$; $p < 0,05$].

A Tabela 29 apresenta as comparações observadas através do teste de Wilcoxon para as médias (μ) de resistência de aderência à tração (28 dias).

Tabela 29 - Resultado do teste de Wilcoxon com diferença significativa entre médias (μ) de resistência de aderência à tração (28 dias)

Grupo	Traço	N	Média (μ)	DP	Wilcoxon
1	AN100	14	0,24	0,073	
2	VE10	16	0,33	0,056	$\mu_2 \neq \mu_1$
3	VE20	16	0,36	0,070	$\mu_3 = \mu_2$ e $\mu_3 \neq \mu_1$
4	VE30	16	0,38	0,075	$\mu_4 = \mu_2 = \mu_3$ e $\mu_4 \neq \mu_1$
5	VE40	16	0,21	0,072	$\mu_5 = \mu_1$ e $\mu_5 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$
6	VE50	16	0,39	0,244	$\mu_6 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ e $\mu_6 \neq \mu_5$

Legenda: μ_1 : Grupo 1 (AN100); μ_2 : Grupo 2 (VE10); μ_3 : Grupo 3 (VE20); μ_4 : Grupo 4 (VE30); μ_5 : Grupo 5 (VE40) e μ_6 : Grupo 6 (VE50)

Fonte: autora com base no Software IBM SPSS Statistics (2015).

A observação dos resultados do teste Wilcoxon indicou que, de modo geral, somente os traços VE10, VE20 e VE30 apresentaram diferenças estatísticas significativas com relação ao AN100.

As médias das misturas VE10, VE20, VE30 e VE50 foram superiores à do traço de referência (AN100) e apenas de VE40 inferior. Os traços VE40 e AN100, apresentaram, respectivamente, as duas menores médias de resistência de aderência à tração (28 dias) e VE50 e VE30 as duas maiores.

Este aumento da resistência de aderência à tração diverge da maioria das pesquisas, mas foi observado em outros dois estudos. Em Guilherme (2019) e Guilherme, Cabral e Sousa (2020), o acréscimo da vermiculita aumentou a resistência de aderência à tração e, além de atenderem ao mínimo de 0,20 MPa determinado pela NBR 13749 (ABNT, 2013), todos os traços com substituição apresentaram resultados maiores que o encontrado para o traço de referência.

Em Sinhorelli (2019) e Nascimento (2021), o aumento do teor de vermiculita diminuiu a resistência de aderência à tração das argamassas.

4.3.4 Absorção de água e coeficiente de capilaridade

Aos 28 dias, a absorção de água e o coeficiente de capilaridade foram medidos segundo a NBR 15259 (ABNT, 2005). Os resultados obtidos estão listados nas Tabelas 30, 31 e 32.

Tabela 30 - Absorção de água aos 10 min (28 dias)

At10 (g/cm^2)	Traço					
	AN100	VE10	VE20	VE30	VE40	VE50
CP1	0,30	0,40	0,15	0,25	0,20	0,30
CP2	0,30	0,30	0,20	0,30	0,25	0,40
CP3	0,60	0,40	0,10	0,30	0,30	0,30
Média	0,40	0,40	0,10	0,30	0,25	0,30
Desvio padrão	0,20	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Coeficiente de variação (%)	43,30	14,80	36,40	18,00	17,00	16,80

Fonte: autora (2024).

Tabela 31 - Absorção de água aos 90 min (28 dias)

At90 (g/cm^2)	Traço					
	AN100	VE10	VE20	VE30	VE40	VE50
CP1	0,95	1,05	0,40	0,60	0,60	0,90
CP2	1,25	0,90	0,40	0,80	0,70	1,00
CP3	1,25	1,10	0,20	0,70	0,80	0,80
Média	1,15	1,00	0,30	0,70	0,70	0,90
Desvio padrão	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Coeficiente de variação (%)	15,70	12,30	36,70	14,80	13,30	11,60

Fonte: autora (2024).

Tabela 32 - Coeficiente de capilaridade aos 28 dias

Coeficiente de capilaridade ($g/dm^2 \cdot min^{\frac{1}{2}}$)	Traço					
	AN100	VE10	VE20	VE30	VE40	VE50
CP1	10,00	10,40	3,50	6,20	6,70	9,10
CP2	15,00	8,80	3,20	7,80	7,10	10,20
CP3	10,00	10,82	1,60	6,45	8,40	8,50
Média	11,70	10,00	2,80	6,80	7,40	9,30
Desvio padrão	2,90	1,10	1,00	0,90	0,80	0,80
Coeficiente de variação (%)	24,70	10,90	37,40	13,00	11,40	9,00

Fonte: autora (2024).

Foi observada uma redução dos valores de absorção de água por capilaridade e no coeficiente de capilaridade nos traços intermediários e um aumento nas misturas com maior teor de vermiculita.

Segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), as argamassas do presente estudo podem ser classificadas quanto ao coeficiente de capilaridade como C3 (VE20, com

valores entre 2,0 e $4,0g/dm^2 \cdot min^{\frac{1}{2}}$, C4 (VE30, com valores entre 3,0 e $7,0g/dm^2 \cdot min^{\frac{1}{2}}$) e C5 (AN100, VE10, VE40 e VE50, com valores entre 5,0 e $12,0g/dm^2 \cdot min^{\frac{1}{2}}$).

Em Guilherme (2019), quanto maior o teor de substituição, maior a absorção de água por imersão. Para a autora, a vermiculita, material poroso, com grãos maiores que a areia, dificulta o empacotamento das partículas e favorece a absorção de água. No estudo, a mistura com 50% de vermiculita indicou uma absorção 40% maior em relação ao traço de referência.

A adição da vermiculita aumentou a absorção de água em Cintra (2013), Barros (2018), Dias (2018), Pessatto, Carasek e Cascudo (2019), Gencel *et al.* (2021), Nascimento (2021) e Kaya e Köksal (2022).

4.3.5 Densidade de massa aparente no estado endurecido

Aos 28 dias, foi verificada a densidade de massa aparente no estado endurecido conforme recomenda a NBR 13280 (ABNT, 2005). Os resultados estão na Tabela 33.

Tabela 33 - Densidade de massa aparente (28 dias)

$\chi(kg/m^3)$	Traço					
	AN100	VE10	VE20	VE30	VE40	VE50
CP1	1809	1737	1805	1708	1774	1481
CP2	1818	1731	1810	1715	1855	1478
CP3	1808	1722	1753	1713	1899	1495
Média	1812	1730	1789	1712	1843	1484
Desvio padrão	5,58	7,53	31,66	3,86	63,12	8,94
Coefficiente de variação (%)	0,30	0,43	1,77	0,22	3,42	0,60

Fonte: autora (2024).

A densidade de massa aparente no estado endurecido não sofreu grandes variações com a adição da vermiculita, conforme observado acima. De maneira geral, a vermiculita tende a reduzir a densidade de massa aparente e, portanto, como já esperado, o traço VE50 apresentou o menor valor e AN100 o maior.

Conforme a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), as argamassas da pesquisa podem ser classificadas quanto à densidade de massa aparente no estado endurecido como DE2 (VE50, com densidade maior ou igual a 1400 e menor que 1600 kg/m³), DE3

(VE10, VE20 e VE30, com densidades maiores ou iguais a 1600 e menores que 1800 kg/m³) e DE4 (AN100 E VE40, com densidades maiores ou iguais a 1800 kg/m³).

De modo semelhante, a adição da vermiculita expandida reduziu a densidade de massa no estado endurecido em Pessatto, Carasek e Cascudo (2019), Sinhorelli (2019), Guilherme, Cabral e Souza (2020) e Nascimento (2021).

4.4 Classificação das argamassas

De acordo com a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), as argamassas destinadas ao assentamento de paredes ou ao revestimento de paredes e tetos devem cumprir os requisitos estabelecidos na norma (apresentados no Capítulo 2 deste trabalho) e são classificadas conforme as características e propriedades apresentadas nos ensaios. A Tabela 34 apresenta a classificação das argamassas desenvolvidas neste estudo.

Tabela 34 - Classificação das argamassas desenvolvidas no estudo

Ensaio	Traço					
	AN100	VE10	VE20	VE30	VE40	VE50
Densidade de massa no estado fresco	DF3	DF3	DF3	DF3	DF3	DF3
Resistência à tração na flexão	R3	R3	R3	R3	R3	R3
Resistência à compressão	P3	P3	P4	P4	P3	P3
Resistência de aderência à tração	RA1	RA2	RA2	RA2	RA1	RA1
Coefficiente de capilaridade	C5	C5	C3	C4	C5	C5
Densidade de massa aparente no estado endurecido	DE4	DE3	DE3	DE3	DE4	DE2

Fonte: NBR 13281-1 (ABNT, 2023). Adaptado pela autora, 2024.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da execução dos ensaios e da comparação dos resultados entre si e em relação à literatura, a análise do comportamento das misturas e a confecção da tabela acima com base na NBR 13281-1 (ABNT, 2023) foram viabilizadas.

Mediante as características analisadas, as argamassas com vermiculita expandida apresentaram desempenho adequado para utilização como argamassa de revestimento.

Com os resultados dos ensaios no estado fresco, notou-se que, de modo geral, a adição da vermiculita expandida tende a reduzir o índice de consistência e a densidade de massa no estado fresco quando em comparação à argamassa de

referência, o que pode ser associado à massa específica da vermiculita que é consideravelmente menor que a da areia natural.

Em relação aos ensaios de resistência à tração na flexão, notou-se um aumento com a incorporação da vermiculita, constatação que diverge das tendências encontradas na maioria dos estudos. A mistura VE30 obteve o maior valor de resistência à tração na flexão e houve uma leve redução nos traços VE40 e VE50 e, entretanto, todos os traços com substituição apresentaram valores maiores que o encontrado para o traço de referência (AN100).

A adição da vermiculita expandida como agregado ocasionou um aumento na resistência à compressão em todos os traços, o que foi divergente da maioria dos trabalhos do referencial teórico. Os traços intermediários (VE20 e VE30) apresentaram os maiores valores de resistência à compressão e diferença estatística significativa em relação ao AN100, enquanto VE10 e VE50, com o menor e o maior teor de substituição, demonstraram redução dessa propriedade.

Sobre a resistência de aderência à tração, todas as misturas atenderam a norma para argamassa de revestimento e as rupturas ocorreram na própria argamassa. Com exceção do VE40, em todos os demais traços com vermiculita, a resistência de aderência à tração foi superior à do AN100 e os traços intermediários (VE20 e VE30) apresentaram os maiores valores. Com valores de resistência de aderência à tração maiores que 0,30 MPa, as misturas VE10, VE20 e VE30 podem ser empregadas para revestimento externo, enquanto VE40 e VE50 atenderam aos requisitos para revestimento interno.

Quanto à absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade, houve uma redução nos traços intermediários e a seguir um aumento nas misturas com maior teor de substituição da areia por vermiculita.

A respeito da densidade de massa aparente no estado endurecido, a adição da vermiculita não causou grandes variações.

O traço VE30, com substituição de 30% do agregado natural por vermiculita, pode ser apontado como a opção com o melhor resultado geral entre as misturas investigadas na presente pesquisa. Além de atender aos parâmetros normativos para utilização como argamassa de revestimento externo, quando comparado à mistura de referência, apresentou resultados melhores em alguns ensaios e também algumas características semelhantes.

Entre as principais contribuições do estudo, destacam-se que, através da execução de ensaios no estado endurecido aos 14, 28 e 56 dias empregando quantidades de corpos de prova maiores que as exigidas pelas normas, os resultados visaram atender à lacuna encontrada no referencial quanto à uma investigação comparativa detalhada das propriedades físicas e mecânicas de argamassas com vermiculita expandida como agregado. Da mesma forma, a análise estatística dos resultados não foi apresentada por outros estudos e pretende contribuir para o embasamento da discussão.

Como base para as comparações e discussões dos resultados, foram adotados, além dos requisitos normativos, as observações contidas nos trabalhos do referencial teórico. Assim, para alguns ensaios, quando não foram encontrados dados compatíveis na literatura, os resultados foram comparados somente em relação à mistura de referência e aos demais traços desenvolvidos no presente estudo.

Dessa forma, procurando investigar a viabilidade da utilização da vermiculita expandida como alternativa para o agregado natural em argamassas de revestimento, este estudo pretende contribuir para o desenvolvimento de novas tecnologias para materiais tradicionalmente empregados nas obras como forma de reduzir o impacto ambiental relacionado às atividades da construção civil.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7200**: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto Especificação. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimentos de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. **NBR 13281-1**: Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaios. Parte I: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2023.

_____. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2019.

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

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

_____. **NBR 15220-4**: Desempenho térmico de edificações – Parte 4 – Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575**: Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro, 2021.

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

_____. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 49**: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

AKINYEMI, Banjo; OMONIYI, Temidayo E.; ELEMILE, Olugbenga; AROWOFILA, Oluwafemi. Innovative Husk-Crete Building Materials from Rice Chaff and Modified Cement Mortars. **Acta Technologica Agriculturae**, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 67-72, 1 jun. 2020. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.2478/ata-2020-0011>.

AWOYERA, Paul O.; AKINRINADE, Ayomide D.; GALDINO, André Gustavo de Sousa; ALTHOEY, Fadi; KIRGIZ, Mehmet Serkan; TAYEH, Bassam A.. Thermal insulation and mechanical characteristics of cement mortar reinforced with mineral wool and rice straw fibers. **Journal of Building Engineering**, [S.L.], v. 53, p. 104568, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobee.2022.104568>.

ARAÚJO, Andressa Galvão de. **Efeito sinérgico de misturas vermiculita-lignosulfonato nas propriedades termomecânicas de argamassa**. 2024. 81 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

AYED, Rabeb; BOUADILA, Salwa; SKOURI, Safa; BOQUERA, Laura; CABEZA, Luisa F.; LAZAAR, Mariem. Recycling Textile Waste to Enhance Building Thermal Insulation and Reduce Carbon Emissions: experimentation and model-based dynamic assessment. **Buildings**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 535, 15 fev. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings13020535>.

BARROS, Ilana Maria da Silva. **Análise térmica e mecânica de argamassas de revestimento com adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

BOUBAAYA, Rabah; DJENDEL, Mokhtar; BENANIBA, Samir; KESSAL, Oussama; DRISS, Zied. Impact of the loading of date palm fibers on the performances of mortars. **Rem – International Engineering Journal**, [S.L.], v. 76, n. 2, p. 159-168, jun. 2023. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672022760052>.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. 1996. 285 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, p. 893-941, 2010.

CARDINALE, Tiziana; ARLEO, Giuseppe; BERNARDO, Franco; FEO, Andrea; FAZIO, Piero de. Investigations on thermal and mechanical properties of cement mortar with reed and straw fibers. **International Journal of Heat and Technology**, [S.L.], v. 35, n. 1, p. 375-382, 20 set. 2017. International Information and Engineering Technology Association. <http://dx.doi.org/10.18280/ijht.35sp0151>.

CARDINALE, Tiziana; SPOSATO, Corradino; ALB, Maria Bruna; FEO, Andrea; FAZIO, Piero de. Energy Performance of Construction Materials Using Waste Recycled Polymer as Fine Aggregate Replacement. **International Journal of Heat and Technology**, [S.L.], v. 37, n. 3, p. 696-704, 28 set. 2019. International Information and Engineering Technology Association. <http://dx.doi.org/10.18280/ijht.370305>.

CINTRA, Cynthia Leonis Dias. **Argamassa para revestimento com propriedades termoacústicas, produzida a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus**. 2013. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

CINTRA, Cynthia Leonis Dias; PAIVA, Antônio Ernandes Macedo; BALDO, João Baptista. Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha rec. **Cerâmica**, [S.L.], v. 60, n. 353, p. 69-76, mar. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132014000100010>.

DIAS, Renata Tomaz Vieira. **Desempenho termomecânico de argamassas com adição de resíduos de vermiculita para construções rurais**. 2018. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

EL-SEIDY, Eslam; SAMBUCCI, Matteo; CHOUGAN, Mehdi; AL-KHEETAN, Mazen J.; BIBLIOTECA, Ilario; VALENTE, Marco; GHAFAR, Seyed Hamidreza. Mechanical and physical characteristics of alkali- activated mortars incorporated with recycled polyvinylchloride and rubber aggregates. **Journal of Building Engineering**, [S.L.], v. 60, p. 105043, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105043>.

FERRÁNDEZ, Daniel; YEDRA, Engerst; MORÓN, Carlos; ZARAGOZA, Alicia; KOSIOR-KAZBERUK, Marta. Circular Building Process: reuse of insulators from construction and demolition waste to produce lime mortars. **Buildings**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 220, 16 fev. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings12020220>.

FERREIRA, Tatiana Vettori. **Comportamento térmico de argamassas expandidas pela incorporação de alumínio reciclado**. 2016. 207 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento). Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2016.

FONSECA, Thales Daniel dos Santos. **Desenvolvimento de argamassa termoisolante para revestimento de paredes de alvenaria em edificações com uso de areia de britagem e vermiculita**. 2023. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2023.

FONTES, Ádna Érica Melo de Sousa. **Análise mecânica, térmica e acústica de argamassas com substituição do agregado fino por argila expandida**. 2021. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande de Norte, Natal, 2021.

FONTES, Adna Érica Melo de Sousa; CABRAL, Kleber Cavalcanti; SOUZA, Wendell Rossine Medeiros de; MARTINELLI, Antônio Eduardo; FONTES, Kristy Emanuel Silva. **Análise mecânica e térmica de argamassas de revestimento com substituição parcial do agregado por ar**. *Ambiente Construído*, [S.L.], v. 22, n. 3, p. 299-311, set. 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000300620>.

FUKUI, Eiji; TANABE, Aline; SILVA, Isac José da. Sistemas de argamassa termo isolante. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, X., 2013, Fortaleza. **Anais [...]**. [S. l.]: UFG, 2013.

GENCEL, Osman; GHOLAMPOUR, Aliakbar; TOKAY, Hayrettin; OZBAKKALOGLU, Togay. Replacement of Natural Sand with Expanded Vermiculite in Fly Ash-Based Geopolymer

Mortars. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 1917, 22 fev. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app11041917>.

GOLDBERG, Guilherme Sasson. **Análise da influência da muscovita na transmissão de calor das argamassas de revestimento**. 2022. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2022.

GOMES, Adriana. **Estudo do comportamento de argamassas com resíduos de borracha**. 2020. 122 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia). Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2020.

GUARDIA, Cynthia; BARLUENGA, Gonzalo; PALOMAR, Irene. Evaluation of the energy storage capacity of Phase Change Material cement-lime mortars by using heat flux meters and ultrasonic pulse transmission. **Journal of Energy Storage**, [S.L.], v. 50, p. 104674, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2022.104674>.

GUILHERME, Deize Daiane Pinto. **Estudo do desempenho térmico e mecânico em argamassas de revestimento com substituição do agregado natural pela vermiculita expandida**. 2019. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande de Norte, Natal, 2019.

GUILHERME, Deize Daiane Pinto; CABRAL, Kleber Cavalcanti; SOUZA, Wendell Rossine Medeiros de. Estudo do uso de vermiculita expandida nas propriedades mecânicas de argamassas leves. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 25, n. 4, p. 1-10, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1194>.

HORMA, Othmane; CHARAI, Mouatassim; HASSANI, Sara El; HAMMOUTI, Aboubakr El; MOUSSAOUI, Mohammed A.; MEZRHAB, Ahmed. Thermal Performance Study of a Cement-Based Mortar Incorporating EPS Beads. **Frontiers in Built Environment**, [S.L.], v. 8, p. 1-10, 31 maio 2022. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fbuil.2022.882942>.

HU, Yi; CHEN, Changbing. Thermodynamic performance analysis and simulation test of composite thermal insulation wall. **International Journal of Heat and Technology**, [S.L.], v. 36, n. 4, p. 1181-1186, 30 dez. 2018. International Information and Engineering Technology Association. <http://dx.doi.org/10.18280/ijht.360404>.

KAYA, Mehmet; KÖKSAL, Fuat. Physical and mechanical Properties of C class fly ash based lightweight geopolymer mortar produced with expanded vermiculite aggregate. **Revista de la Construcción**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 21-35, 2022. Pontificia Universidad Catolica de Chile. <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.21.1.21>.

KOKSAL, Fuat; NAZL, Turan; BENLI, Ahmet; GENCEL, Osman; KAPLAN, Gokhan. The effects of cement type and expanded vermiculite powder on the thermo- mechanical characteristics. **Case Studies in Construction Materials**, [S.L.], v. 15, p. 1-26, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00709>.

KUNTHAWATWONG, Ronnakrit; WONGSA, Ampol; EKPRASERT, Jindarat; SUKONTASUKKUL, Piti; SATA, Vanchai; CHINDAPRASIRT, Prinya. Performance of Geopolymer Mortar Containing PVC Plastic Waste from Bottle Labels at Normal and Elevated Temperatures. **Buildings**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 1031, 14 abr. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings13041031>.

KWON, Sukmin; NISHIWAKI, Tomoya; KIKUTA, Takatsune; MIHASHI, Hirozo. Material Design Methods for Lightweight Cement-Based Composites and Its Application. **Journal of Advanced Concrete Technology**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 178-186, 24 mar. 2015. Japan Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.3151/jact.13.178>.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2014.

LAN, Yirui; ZOU, Ran. Study on Thermal Performance Measurement and Construction of Passive Exterior Wall with Low Energy: teaching and laboratory Building of Shandong Jianzhu University. **Advances in Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 2022, p. 1-11, 3 jun. 2022. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2022/3253085>.

LUCAS, C. N. M.; SCALON, V. L.; AZAMBUJA, M. A Medição da condutividade térmica em concreto leve produzido com resíduo de pedra basáltica. In. SIMPÓSIO BRASILEIRO ONLINE DE GESTÃO URBANA, 5., 2021. **Anais** [...]. ANAP, 2021. p. 869-883.

MAJUMDER, Arnab; STOCHINO, Flavio; FRATTOLILLO, Andrea; VALDE, Monica; MANCUSI, Geminiano; MARTINELLI, Enzo. Jute fiber-reinforced mortars: mechanical response and thermal performance. **Journal of Building Engineering**, [S.L.], v. 66, p. 105888, maio 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105888>.

MALAGONI, Marina; CLAUDE, Sophie; GINESTET, Stephane; ESCADEILLAS, Gilles; BLOT, Corinne. Estudo das propriedades higrotérmicas de revestimento de cal e fibra de cânhamo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, XIII., 2019, Goiânia. **Anais [...]**. [S. l.]: UFG, 2019. p. 448-453.

NASCIMENTO, Marcos César Bezerra do. **Argamassa térmica produzida com resíduos da exploração e processamento mineral de caulim e vermiculita**. 2008. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

NASCIMENTO, Raquel Ferreira do. **Efeito da hidroxipropilmetilcelulose em argamassas leves térmicas à base de vermiculita expandida**. 2021. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande de Norte, Natal, 2021.

PARRACHA, J.L.; SANTOS, A. Rita; LAZERA, R.; FLORES-COLEN, I.; GOMES, M. Glória; RODRIGUES, A. Moret. Performance of lightweight thermal insulating mortars applied on bricks substrates specimens and prototype wall. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 364, p. 129954, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129954>.

PASSOS, Paulo Martins dos; CARASEK, Helena. Argamassas com resíduos para revestimento isolante térmico de parede pré-moldada de concreto. **Cerâmica**, [S.L.], v. 64, n. 372, p. 577-588, dez. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643722391>.

PASSOS, Paulo Martins dos; JUNGBLUT, Mônica Engel; CARASEK, Helena. Influência do revestimento de argamassa no desempenho térmico dos sistemas de vedação vertical. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, XIII., 2019, Goiânia. **Anais [...]**. [S. l.]: UFG, 2019. p. 674-681.

PAULA, R. F. Vermiculita no Brasil – situação atual. **Sumário Mineral**. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2014. v.34, p. 122-123.

PESSATTO, Valda G. M.; CARASEK, Helena; CASCUDO, Oswaldo. Avaliação das propriedades de argamassas com vermiculita. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2019, Goiânia. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 377-385.

PETEREIT, Yasmin Eccel. **Comportamento térmico de argamassas de revestimento externo com substituição parcial do agregado miúdo por materiais reciclados**. 2020. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2020.

PICHÓR, Waldemar; KAMINSKI, Adrian; SZOLDRA, Paulina; FRAC, Maksymilian. Lightweight Cement Mortars with Granulated Foam Glass and Waste Perlite Addition. **Advances in Civil Engineering**, [S.L.], v. 2019, p. 1-9, 17 fev. 2019. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2019/1705490>.

POSANI, Magda; VEIGA, Rosário; FREITAS, Vasco. Post-Insulating traditional massive walls in Southern Europe: a moderate thermal resistance can be more effective than you think. **Energy and Buildings**, [S.L.], v. 295, p. 113299, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113299>.

QUINTALIANI, Chiara; MERLI, Francesca; FIORINI, Costanza Vittoria; CORRADI, Marco; SPERANZINI, Emanuela; BURATTI, Cinzia. Vegetal Fiber Additives in Mortars: experimental characterization of thermal and acoustic properties. **Sustainability**, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 1260, 23 jan. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su14031260>.

RASHAD, Alaa M. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 125, p. 53-62, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.019>.

REIS, E. **Vermiculita no Brasil – Situação atual**. Ministério de Ciência e Tecnologia/ Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Brasília, 2002. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/images/a-finep/fontes-de-orcamento/fundos-setoriais/ct-mineral/vermiculita-no-brasil.pdf>>. Acesso em: 24/08/2023.

ROCHA, Vicente de Paula Teixeira. **Desenvolvimento de argamassas para revestimento de alvenaria com adição de borracha reciclada de pneu**. 2019. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

SILVA, Jussara Adílio da; PIVA, Jorge Henrique; WANDERLIND, Augusto; SAVI, Aline Eyng; ANTUNES, Elaine Guglielmi Pavei. Análise das características físicas e propriedades mecânicas de argamassa com inserção de resíduos de madeira. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 1-11, 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13008>.

SILVA, Marília Reis Nunes da. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de argamassas com argila expandida e borracha de pneus**. 2023. 69 f. Dissertação (Mestrado em tecnologia). Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2023.

SINHORELLI, Kássia dos Santos. **Estudo das propriedades reológicas e térmicas das argamassas de revestimento contendo adições minerais e vermiculita**. 2019. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

SOUSA, Camila Mertz; PIOVESAN, Tenile Rieger. Análise experimental da influência do poliestireno expandido no desempenho térmico da argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, XIII., 2019, Goiânia. **Anais [...]**. [S. l.]: UFG, 2019. p. 90-97.

SUPERCAL. **Cal Hidratada CH-III aditivada**. 2023. Disponível em: <<https://ical.com.br/cal.html>> Acesso em: 24/06/2023.

UGARTE, J. F. O., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. **Vermiculita**. Capítulo 32. In: LUZ, A. B., LINS, F. F. (Ed.). Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações. CETEM/ MCT: Rio de Janeiro, 2005. p.677 - 698.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Cimento para uso geral todas as obras**. 2023. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/cimentos/todas-as-obras/>. Acesso em: 18/07/2023.

YOUSEFI, Ali; TANG, Waiching; KHAVARIAN, Mehrnoush; FANG, Cheng; WANG, Shanyong. Thermal and Mechanical Properties of Cement Mortar Composite Containing Recycled Expanded Glass Aggregate and Nano Titanium Dioxide. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 10, n. 7, p. 2246, 26 mar. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app10072246>.

ZÁLESKÁ, Martina; PAVLÍKOVÁ, Milena; VYŠVAŘIL, Martin; PAVLÍK, Zbyšek. Effect of Aggregate and Binder Type on the Functional and Durability Parameters of Lightweight Repair Mortars. **Sustainability**, [S.L.], v. 13, n. 21, p. 11780, 25 out. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su132111780>.

ZHANG, Mo; QIU, Xinxin; SHEN, Si; WANG, Ling; ZANG, Yongquan. Mechanical and Thermal Insulation Properties of rGFRP Fiber-Reinforced Lightweight Fly-Ash-Slag-Based Geopolymer Mortar. **Sustainability**, [S.L.], v. 15, n. 9, p. 7200, 26 abr. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su15097200>.

APÊNDICES

Apêndice A – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão

Resistência à tração na flexão (MPa) aos 14 dias						
Corpo de prova	Traço					
	AN100	VE10	VE20	VE30	VE40	VE50
1	1,65	2,06	1,62	2,05	1,67	1,37
2	1,72	1,96	1,82	2,30	1,54	1,35
3	1,78	1,71	1,79	2,12	1,65	1,75
4	1,73	2,29	1,52	2,08	1,65	1,73
5	1,53	1,94	1,55	1,97	1,76	1,69
6	1,53	1,36	1,53	2,05	1,73	1,15
7	1,79	2,18	1,97	2,19	1,73	1,32
8	1,35	1,81	1,68	2,04	1,79	1,49
9	1,47	1,56	1,60	1,98	1,48	1,76
10	1,46	1,91	1,85	1,81	1,84	1,68
11	1,76	1,79	1,86	1,76	1,53	1,72
12	1,70	1,88	1,89	2,14	1,55	*
Média	1,62	1,87	1,72	2,04	1,66	1,54
Desvio padrão	0,14	0,25	0,15	0,15	0,11	0,21
Coeficiente de variação (%)	9,12	13,63	9,15	7,36	6,92	14,02

Resistência à tração na flexão (MPa) aos 28 dias						
Corpo de prova	Traço					
	AN100	VE10	VE20	VE30	VE40	VE50
1	1,49	2,06	2,26	2,31	1,87	1,74
2	1,47	2,07	2,17	2,40	2,08	2,14
3	1,44	2,04	2,50	2,56	2,10	1,87
4	2,07	1,83	2,27	2,67	1,80	2,17
5	1,59	1,83	2,20	2,26	2,10	1,93
6	1,33	1,92	2,12	2,02	2,38	1,71
7	1,65	*	2,24	2,04	1,79	1,65
8	1,41	*	2,18	2,22	1,95	1,72
9	1,42	*	2,10	2,49	2,10	1,82
10	1,73	*	2,39	2,23	1,95	2,10
11	1,34	*	2,28	2,18	1,89	1,70
12	1,36	*	2,09	2,52	2,16	1,84
Média	1,53	1,96	2,23	2,32	2,01	1,86
Desvio padrão	0,21	0,12	0,12	0,20	0,17	0,18
Coeficiente de variação (%)	13,90	5,77	5,38	8,84	8,49	9,76

Resistência à tração na flexão (MPa) aos 56 dias						
Corpo de prova	Traço					
	AN100	VE10	VE20	VE30	VE40	VE50
1	1,43	2,25	3,04	3,01	2,20	2,49
2	1,41	2,15	2,61	2,46	2,25	2,31
3	1,45	1,79	2,89	2,75	2,37	2,42
4	1,72	2,09	2,91	3,55	2,15	2,75
5	1,67	1,93	2,87	3,35	2,12	2,52
6	1,78	1,88	2,73	3,08	2,32	2,85
7	1,24	2,08	2,09	3,54	2,56	2,41
8	1,58	1,88	3,37	2,86	2,40	2,65
9	1,38	2,43	2,68	2,89	1,97	2,30
10	1,43	2,36	2,54	2,40	2,17	2,17
11	1,49	1,90	2,19	3,30	2,33	2,59
12	1,81	1,90	2,19	2,77	2,19	2,47
Média	1,53	2,05	2,67	2,99	2,25	2,49
Desvio padrão	0,17	0,20	0,38	0,38	0,15	0,19
Coefficiente de variação (%)	11,60	10,14	14,22	12,77	6,86	7,79

Apêndice B – Resultados dos ensaios de resistência à compressão

Resistência à compressão (MPa) aos 14 dias						
Corpo de prova	Traço					
	AN100	VE10	VE20	VE30	VE40	VE50
1	3,00	4,29	3,63	4,69	4,07	3,28
2	1,64	3,83	4,20	3,67	2,89	3,81
3	2,52	4,27	2,63	4,43	4,28	2,61
4	3,12	2,79	4,28	4,74	2,51	3,21
5	2,38	2,95	4,96	4,07	2,45	4,81
6	3,41	3,64	4,79	4,04	4,28	3,46
7	2,61	2,95	5,09	4,64	2,90	3,30
8	2,79	3,25	4,82	2,50	3,72	2,84
9	3,22	3,81	4,36	4,61	3,41	3,80
10	2,25	2,24	3,51	3,70	4,92	2,72
11	3,81	3,11	3,73	4,80	3,99	4,69
12	3,31	2,60	5,33	3,73	4,43	3,78
13	2,25	2,71	5,52	5,23	3,16	3,91
14	2,44	3,26	6,19	3,94	4,74	2,94
15	3,07	3,80	5,03	4,79	3,86	2,16
16	2,40	3,07	5,37	4,07	3,13	2,44
17	2,39	3,34	4,40	4,41	3,20	3,56
18	2,24	3,28	4,94	4,22	3,19	3,33
19	3,25	3,76	3,98	5,65	3,29	4,11
20	2,91	3,72	3,96	3,67	4,59	3,06
21	3,77	3,39	4,30	5,06	4,40	3,32
22	3,03	3,08	4,24	4,39	3,73	3,39
23	3,57	2,57	3,70	5,17	2,36	3,96
24	3,18	3,19	3,34	3,81	3,98	4,50
Média	2,85	3,28	4,42	4,33	3,64	3,45
Desvio padrão	0,54	0,52	0,81	0,67	0,74	0,67
Coefficiente de variação (%)	19,20	16,01	18,28	15,47	20,43	19,65

Resistência à compressão (MPa) aos 28 dias						
Corpo de prova	Traço					
	AN100	VE10	VE20	VE30	VE40	VE50
1	3,69	2,49	5,6	6,17	3,88	4,12
2	3,41	3,47	5,62	6,59	3,49	3,39
3	3,04	3,46	5,90	6,06	4,93	3,07
4	2,78	3,23	5,49	5,54	4,06	3,26
5	3,42	3,83	3,65	6,21	3,29	3,12
6	3,47	4,12	5,78	5,60	2,23	3,88
7	4,46	3,28	5,93	6,03	2,86	3,83
8	4,96	3,25	4,74	4,90	4,74	4,04
9	4,10	3,07	6,00	6,50	3,33	3,38
10	3,96	5,03	7,01	5,26	3,18	4,40
11	3,20	3,80	4,24	4,60	4,22	3,44
12	3,51	4,63	5,97	3,63	4,01	3,41
13	4,70	*	5,26	5,93	3,31	2,97
14	4,16	*	5,12	5,65	4,36	4,55
15	2,77	*	4,74	4,31	4,39	4,16
16	3,68	*	6,43	3,40	3,57	2,92
17	3,23	*	6,40	5,97	3,96	3,62
18	3,14	*	5,07	6,15	4,28	4,43
19	3,60	*	4,27	6,04	2,58	3,51
20	3,26	*	6,19	3,50	3,64	3,56
21	3,02	*	5,43	5,76	3,18	3,29
22	3,38	*	5,51	4,69	4,59	4,30
23	3,56	*	4,64	3,85	3,85	3,47
24	3,16	*	6,36	4,04	3,93	5,03
Média	3,56	3,63	5,47	5,26	3,74	3,66
Desvio padrão	0,56	0,69	0,80	1,01	0,67	0,55
Coeficiente de variação (%)	15,95	19,19	14,69	19,27	17,99	15,18

* sem resultado experimental.

Resistência à compressão (MPa) aos 56 dias						
Corpo de prova	Traço					
	AN100	VE10	VE20	VE30	VE40	VE50
1	3,74	5,67	4,92	5,57	4,04	4,56
2	4,09	3,77	6,29	4,51	4,17	5,29
3	2,57	5,80	7,36	4,23	3,75	5,43
4	3,06	4,77	7,18	4,24	4,47	5,22
5	3,64	5,23	7,04	4,13	3,73	6,93
6	3,82	4,02	6,45	3,47	3,20	6,04
7	3,08	3,41	7,03	5,20	3,31	4,71
8	3,39	4,53	4,41	6,30	5,30	3,25
9	3,08	4,08	4,61	4,46	5,18	3,13
10	2,78	4,27	6,61	5,24	3,52	3,34
11	3,46	3,20	6,16	4,79	5,52	2,79
12	3,72	5,01	5,40	4,12	4,72	3,13
13	3,00	4,31	5,58	4,36	4,72	4,64
14	3,21	4,30	6,61	4,16	4,92	5,26
15	3,31	4,28	4,78	4,03	5,07	5,62
16	4,26	4,47	6,71	3,54	4,10	5,36
17	2,98	5,63	5,32	4,61	4,78	3,99
18	3,00	3,66	4,81	5,55	5,20	5,67
19	3,22	3,48	5,44	3,72	3,65	4,74
20	3,15	3,18	5,31	7,04	3,28	5,11
21	3,33	3,46	6,32	4,92	4,81	5,03
22	3,22	4,52	5,84	5,05	4,14	5,54
23	3,49	5,00	6,80	5,70	4,72	7,10
24	4,11	3,86	7,00	5,02	4,20	3,61
Média	3,36	4,32	5,99	4,74	4,35	4,81
Desvio padrão	0,42	0,77	0,90	0,86	0,69	1,16
Coeficiente de variação (%)	12,72	17,84	15,16	18,18	15,93	24,18

* sem resultado experimental.

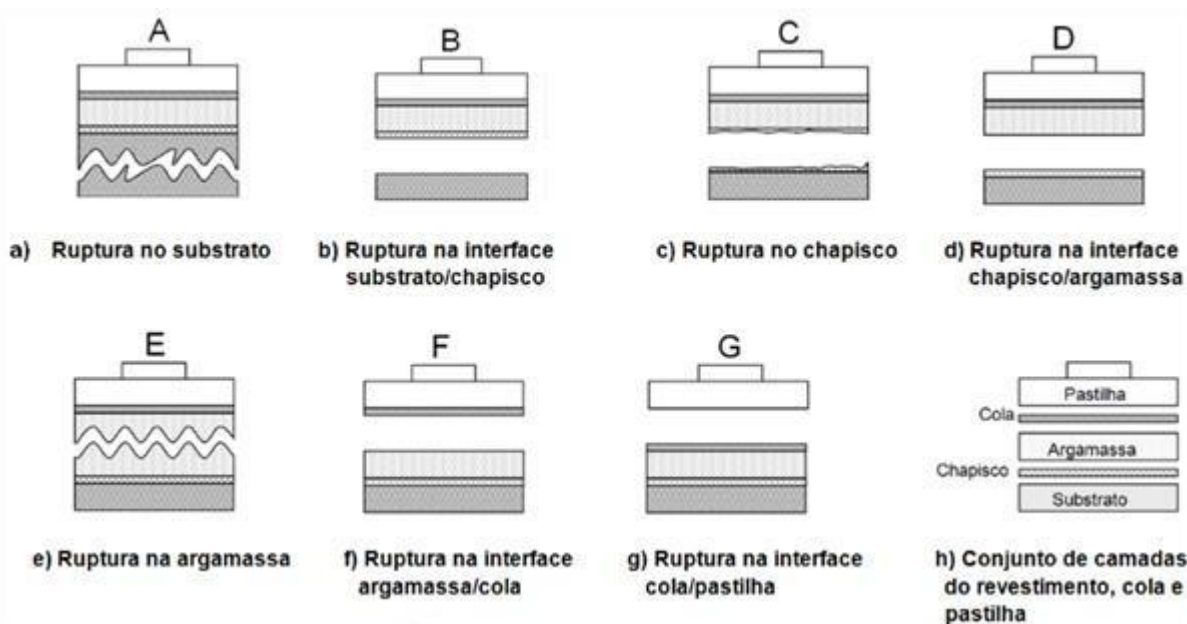
Apêndice C – Resultados dos ensaios de resistência de aderência à tração

Corpo de prova	Resistência de aderência à tração (MPa) aos 28 dias											
	Traço											
	AN100	T.R	VE10	T.R	VE20	T.R	VE30	T.R	VE40	T.R	VE50	T.R
1	0,32	E	0,34	E	0,28	E	0,32	E	0,18	E	0,42	E
2	0,30	E	0,34	E	0,33	E	0,28	D	0,19	E	0,28	E
3	0,30	E	0,41	E	0,21	A	0,38	D	0,19	E	0,28	E
4	0,32	E	0,42	E	0,28	E	0,41	E	0,22	E	0,22	E
5	0,24	E	0,30	E	0,34	E	0,48	E	0,19	E	0,20	F
6	0,25	E	0,30	E	0,37	E	0,29		0,17	E	0,21	E
7	0,23	E	0,25	E	0,41	E	0,40	E	0,14	E	0,27	E
8	0,39	E	0,37	E	0,40	C	0,41	E	0,11	E	0,19	F
9	0,20	A	0,37	E	0,43	E	0,52	E	0,27	E	0,30	E
10	0,15	E	0,36	E	0,46	E	0,51	E	0,24	E	0,34	E
11	0,19	A	0,28	E	0,28	E	0,39	E	0,37	F	0,27	E
12	0,12	A	0,32	E	0,44	E	0,38	E	0,31	E	0,24	E
13	0,21	E	0,26	E	0,35	E	0,41	D	0,13	C	0,82	E
14	0,24	A	0,36	E	0,42	E	0,31	E	0,15	C	0,64	E
15	*	*	0,23	E	0,37	E	0,31	E	0,28	E	0,91	E
16	*	*	0,38	E	0,41	E	0,31	E	0,28	E	0,78	E
Média	0,25		0,33		0,36		0,38		0,21		0,26	
Desvio padrão	0,07		0,05		0,07		0,07		0,07		0,06	
Coefficiente de variação (%)	31,32		15,46		19,54		20,41		34,11		24,29	

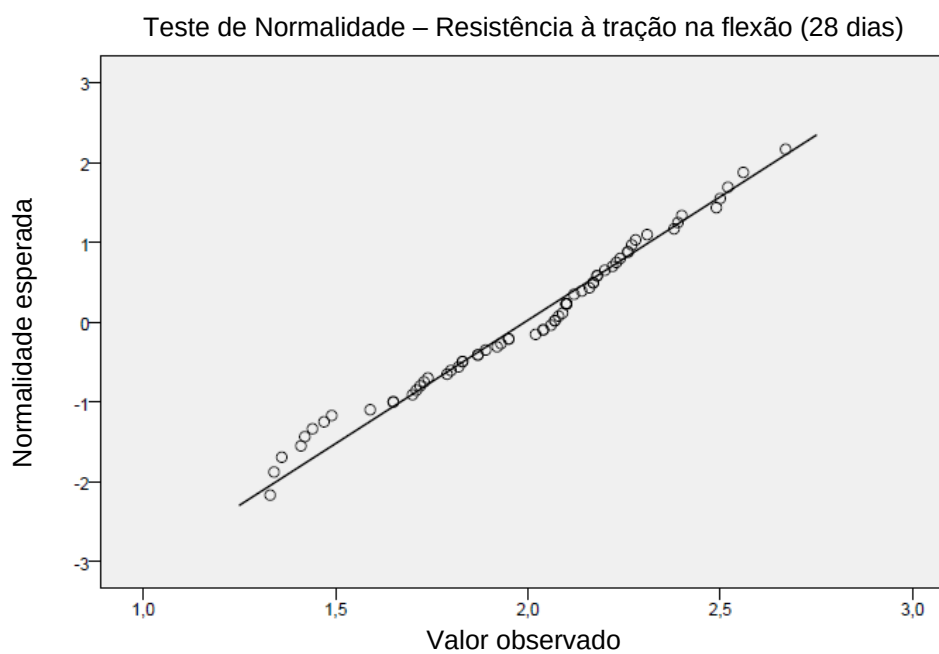
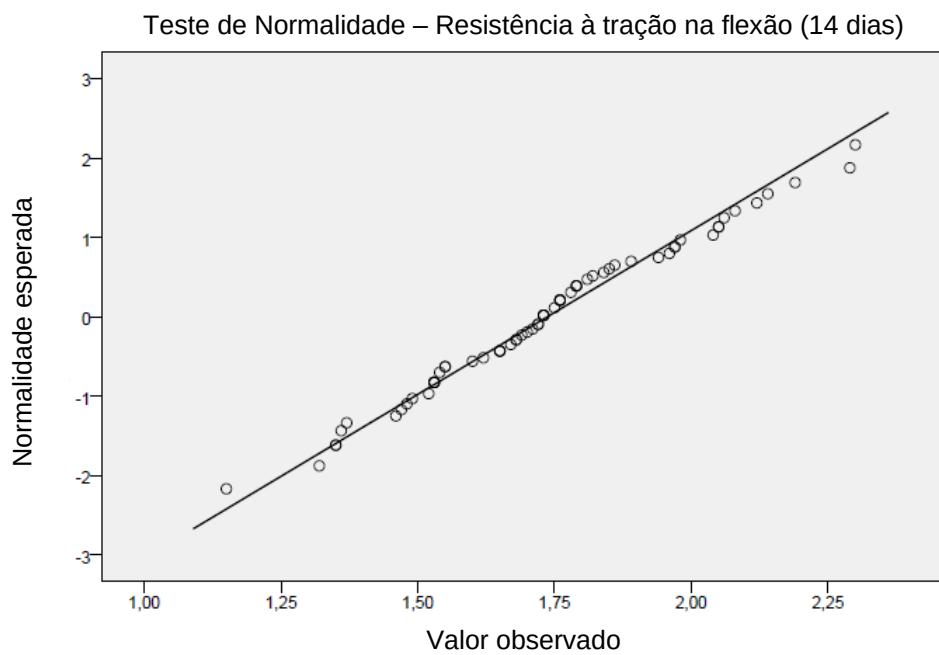
Legenda: TR: tipo de ruptura.

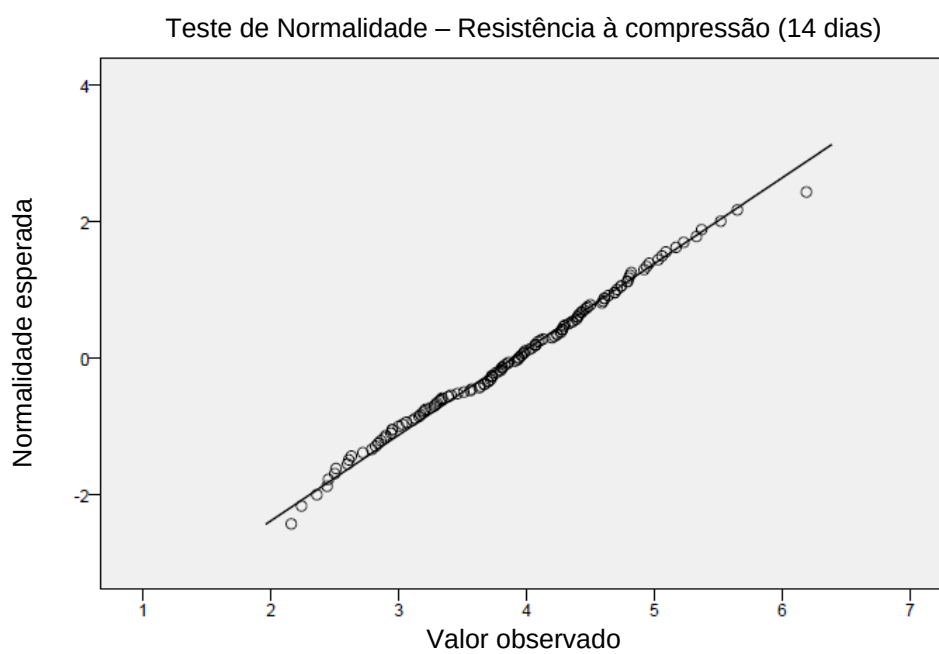
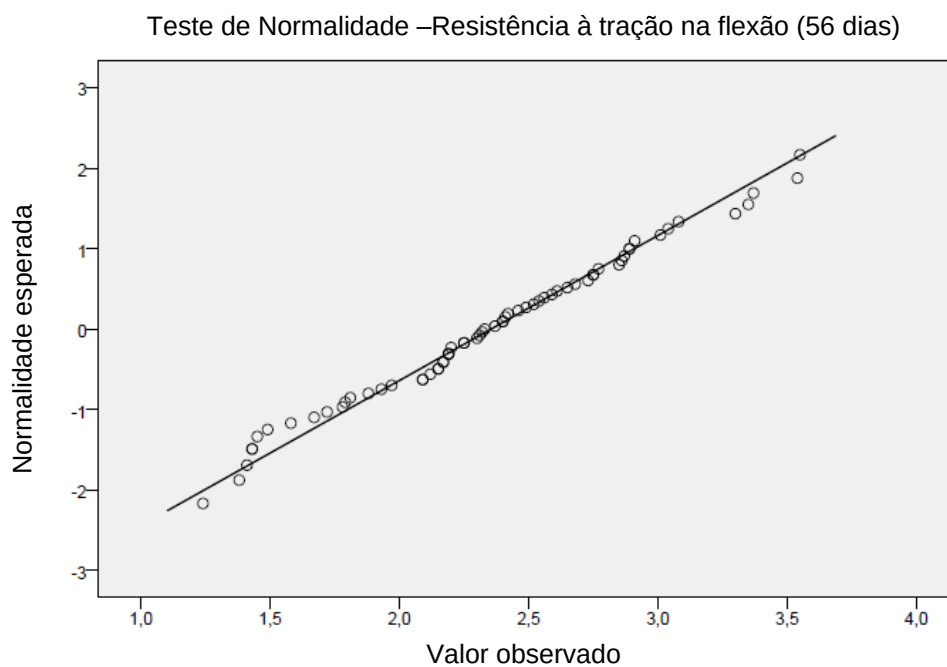
* sem resultado experimental.

Figura C1 – Tipos de ruptura do corpo de prova no ensaio de resistência de aderência à tração

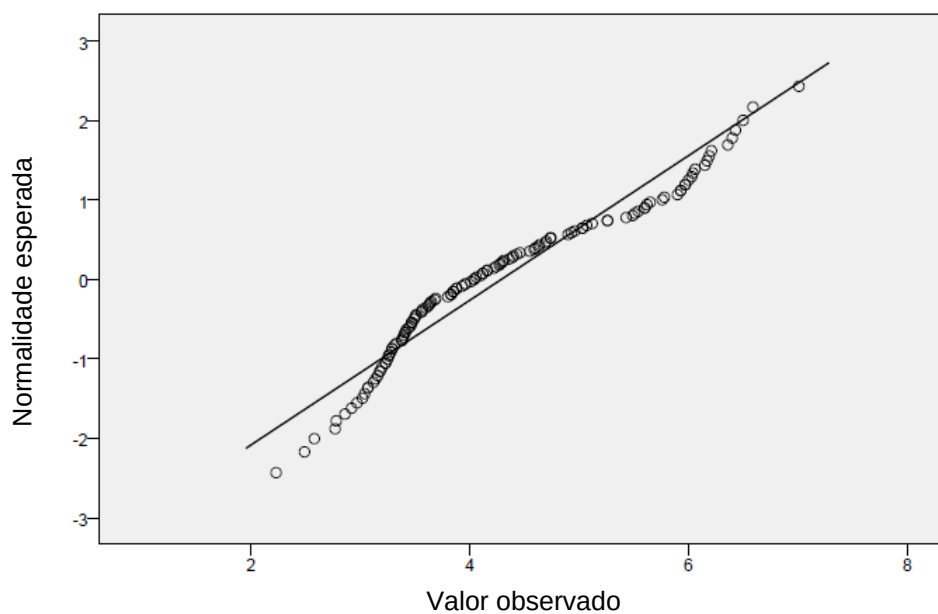


Fonte: NBR 13528 (ABNT, 2019).

Apêndice D – Testes de Normalidade utilizados nas análises estatísticas



Teste de Normalidade - Resistência à compressão (28 dias)



Teste de Normalidade - Resistência à compressão (56 dias)

