UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PLÍNIO CAMPOS DE ASSIS NETO

USO DA VERMICULITA NA COMPOSIÇÃO DA FRAÇÃO INERTE DAS ARGAMASSAS: ESTUDO DAS PROPRIEDADES ANÍDRICA, FRESCA, ENDURECIDA E TÉRMICAS DAS ARGAMASSAS

RECIFE
2023

PLÍNIO CAMPOS DE ASSIS NETO

USO DA VERMICULITA NA COMPOSIÇÃO DA FRAÇÃO INERTE DAS ARGAMASSAS: ESTUDO DAS PROPRIEDADES ANÍDRICA, FRESCA, ENDURECIDA E TÉRMICAS DAS ARGAMASSAS

Dissertação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Concentração Estruturas com ênfase em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro - UFPE
Coorientadora: Prof.ª Dr.ª Aline Figueiredo da Nóbrega - UFPB

RECIFE

2023

CATALOGAÇÃO

Assis Neto, Plínio Campos de.
Uso da vermiculita na composição da fração inerte das argamassas: estudo das propriedades anídrica, fresca, endurecida e térmicas das argamassas / Plínio Campos de Assis Neto. - Recife, 2023.
123f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.
Orientação: Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.
Coorientação: Aline Figueiredo da Nóbrega.
Inclui referências.

1. Argamassa leve; 2. Agregado miúdo; 3. Vermiculita; 4. Desempenho térmico. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira. II. Nóbrega, Aline Figueiredo da. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

PLÍNIO CAMPOS DE ASSIS NETO

USO DA VERMICULITA NA COMPOSIÇÃO DA FRAÇÃO INERTE DAS ARGAMASSAS: ESTUDO DAS PROPRIEDADES ANÍDRICA, FRESCA, ENDURECIDA E TÉRMICAS DAS ARGAMASSAS

Dissertação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Concentração Estruturas com ênfase em Construção Civil.

Aprovada em 27/04/2023

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro – UFPE
Coorientadora: Prof.ª Dr.ª Aline Figueiredo da Nóbrega - UFPB

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof.ª Dr.ª Karoline Alves de Melo Moraes (examinadora externa)
Universidade Federal de Alagoas

participação por videoconferência
Prof. Dr. José Getúlio Gomes de Sousa (examinador externo)
Universidade Federal do Vale do São Francisco

participação por videoconferência
Prof.ª Dr.ª Érika Pinto Marinho (examinadora externa)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTO

À Deus, que sempre esteve comigo, por toda força nas horas mais difíceis e por proporcionar sabedoria e oportunidade de buscar a minha qualificação profissional.

Aos meus pais, Manoel Mouzinho e Luzinete, que nunca pouparam nenhum esforço para investir na minha qualificação profissional, e que sempre foram exemplos de trabalho, esforço e dedicação.

Ao meu orientador Arnaldo Carneiro, por ter aceitado o desafio de me orientar e por todo incentivo, disponibilidade e compreensão, e pelas valorosas contribuições que permitiram concluir este trabalho científico.

A professora Aline Figueiredo, por ter aberto as portas da UFPB, possibilitando que pudesse realizar a pesquisa próximo dos meus familiares em um momento marcado por uma pandemia. E, não menos importante, pela paciência, incentivo e colaboração na realização da pesquisa.

Aos técnicos do LABEME, Sebastião e Delby, por toda ajuda e disponibilidade durante todo o processo de execução da pesquisa. E aos técnicos Ricardo e Marcelo do laboratório de engenharia da UNIPÊ por terem auxiliado e contribuído em momentos importantes dessa pesquisa.

A todos os professores do programa de pós-graduação em engenharia civil da Universidade Federal de Pernambuco por todo o conhecimento compartilhado dentro e fora da aula. E também, a equipe de coordenação do PPGEC, por toda disponibilidade e orientações prestadas nessa caminhada.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo apoio financeiro imprescindível para a realização do mestrado.

E aos meus amigos, em especial a Ferlaine Taina, Rutte Sara, Ianka Maysa, Francisco Gomes, Dhiego Revoredo, Eros Lima, Maria Eduarda, Mariana Dantas, Sofia Ximenes, Roberta Tabaczenski, Rochana Alves, Wesley Maciel, Nelly, Lucas Moura, Palloma Oliveira, Bruno Pinto e Priscilla Leane pelas contribuições, paciência, companheirismo, amizade e motivação. E a todos aqueles que contribuíram para a conclusão desta etapa da minha vida.

RESUMO

As mudanças climáticas têm levado ao aumento da temperatura em todo o mundo e são um dos responsáveis pelo maior consumo de energia para melhorar o conforto térmico nas edificações. Diante disso, políticas públicas foram criadas visando estabelecer parâmetros mínimos para melhorar o desempenho térmico das edificações. Destacam-se, nesse âmbito, a Lei n° 10.295 e a NBR 15.575/2013. A indústria da construção constantemente busca soluções que se adequem às exigências dessas legislações. Uma das possibilidades é o uso de compósitos cimentícios com baixo peso específico, como as argamassas térmicas, que reduzem o fluxo de calor de um elemento de vedação entre dois ambientes; isso permite a redução do uso de equipamentos de arrefecimento. O uso da vermiculita em argamassas é uma solução para diminuir o fluxo de calor em paredes. Entretanto, a vermiculita é um agregado leve com alta absorção de água, e o uso dela em argamassas de revestimento causa uma perda de trabalhabilidade em relação às argamassas tradicionais. Nesse contexto, este estudo procurou analisar a composição granulométrica da fração inerte das argamassas produzidas com vermiculita e a influência desse parâmetro sobre as propriedades anídrica, fresca, endurecida e térmicas. Por meio do estudo do estado da arte, foi determinado o traço básico desta pesquisa e os percentuais de vermiculita utilizados. Assim, as argamassas produzidas neste estudo apresentaram traço 1:1:6 (cimento: cal: agregado) em volume, e a areia foi substituída parcialmente pela vermiculita nas proporções de 20%, 40% e 60% em volume. Foi avaliada a influência da granulometria e do estado de hidratação do agregado leve; para isso, foram utilizadas vermiculitas com classificação granulométrica fina e super fina, e nos estados seco e pré-umedecido. Com base nas propriedades dos materiais utilizados, foi encontrado o consumo em massa para cada componente das argamassas, e a quantidade de água foi determinada a partir do espalhamento obtido na mesa de consistência. No estado fresco, foram estudados o consumo de água necessário para obter um espalhamento de 260 ± 5 mm e as propriedades de teor de ar incorporado, densidade no estado fresco e retenção de água. No estado endurecido, foram avaliadas a resistência mecânica, absorção de água por capilaridade, densidade de massa, índice de vazios, condutividade térmica, taxa de transferência de calor e transmitância térmica. Com base nos resultados coletados, destaca-se a argamassa com 60% de vermiculita super fina seca como tendo o desempenho termomecânico mais satisfatório.

Palavras-chave: Argamassa leve. Agregado miúdo. Vermiculita fina. Vermiculita super fina. Desempenho térmico.

ABSTRACT

Climate change has led to an increase in temperature worldwide, and is one of the factors responsible for the greater consumption of energy to improve thermal comfort in buildings. In view of this, public policies were created to establish minimum parameters to improve the thermal performance of buildings, highlighting in this context Law No. 10,295 and NBR 15,575 / 2013. The construction industry constantly seeks solutions that meet the requirements of these laws, one of the possibilities is the use of cementitious composites with low specific weight, such as thermal mortars, which reduce the heat flow of a sealing element between two environments, this allows the reduction of the use of cooling equipment. The use of vermiculite in mortars is a solution to reduce heat flow in walls, however vermiculite is a light aggregate with high water absorption, its use in coating mortars causes a loss of workability in relation to traditional mortars. In this context, this study sought to analyze the granulometric composition of the inert fraction of mortars produced with vermiculite and the influence of this parameter on the anhydrous, fresh, hardened and thermal properties. Through the study of the state of the art, the basic trace of this research and the percentages of vermiculite used were determined, so the mortars produced in this study presented a 1: 1: 6 trace (cement: lime: aggregate) by volume and the sand was partially replaced by vermiculite in the proportions of 20%, 40% and 60% by volume, and the influence of the granulometry and the state of hydration of the light aggregate was evaluated, for this, vermiculites with fine and super fine granulometric classification were used, and in the dry and pre-moistened state. And based on the properties of the materials used, the mass consumption for each component of the mortars was found, and the amount of water was determined from the spread obtained on the consistency table. In the fresh state, the water consumption necessary to obtain a spread of 260 ± 5 mm, and the properties of incorporated air content, density in the fresh state and water retention were studied. In the hardened state, mechanical strength, water absorption by capillarity, bulk density, void ratio, thermal conductivity, heat transfer rate and thermal transmittance were evaluated. Based on the results collected, the mortar with 60% dry superfine vermiculite stands out as having the most satisfactory thermomechanical performance.

Keywords: Lightweight mortar. Fine aggregate. Fine vermiculite. Superfine vermiculite. Thermal performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura molecular da vermiculita e da mica 17
Figura 2 - Composição química da vermiculita 17
Figura 3 - Relação entre teor de potássio e taxa de expansão 19
Figura 4 - Fragmentos de vermiculita bruta (A) e vermiculita expandida (B) ao microscópio 24
Figura 5 - Relação entre consumo de água, cimento e vermiculita 35
Figura 6 - Relação entre densidade fresca, teor de ar, cimento e vermiculita 38
Figura 7 - Relação entre porosidade, densidade endurecida e teor de vermiculita 41
Figura 8 - Relação entre os valores de índice de capilaridade e teor de vermiculita dos artigos estudados 45
Figura 9 - Relação entre os valores de resistência à compressão, teor de cimento e vermiculita dos artigos estudados. 49
Figura 10 - Relação entre os valores de resistência à tração, teor de cimento e vermiculita dos artigos estudados. 52
Figura 11 - Relação entre teor de vermiculita na mistura e resistência à compressão em amostras com e sem adição mineral 54
Figura 12 - Relação entre teor de vermiculita, condutividade térmica e porosidade do estudo de Palomar *et al.* (2015) 57
Figura 13 - Relação entre condutividade térmica e porosidade do estudo de Palomar *et al.* (2015) 57
Figura 14 - Figura 14 - Relação entre teor de vermiculita, condutividade térmica e porosidade do estudo de Koksal *et al.* (2015) 57
Figura 15 - Relação entre condutividade térmica e porosidade do estudo de Koksal *et al.* (2015) 57
Figura 16 - Relação entre teor de vermiculita, condutividade térmica e porosidade do estudo de Barros (2018) 58
Figura 17 - Relação condutividade térmica e porosidade do estudo de Barros (2018) 58
Figura 18 - Relação entre teor de vermiculita, condutividade térmica e porosidade do estudo de Koksal *et al.* (2020) 58
Figura 19 - Relação condutividade térmica e porosidade do estudo de Koksal *et al.* (2020) .. 58
Figura 20 - Fluxograma experimental 60
Figura 21 - Agregados Utilizados: Areia natural (a), Vermiculita fina (b) e Vermiculita Super fina (c) 61
Figura 22 - Ensaio para determinação das massas específicas das vermiculitas 63

Figura 23 – Recipiente para ensaio de absorção de água da vermiculita aberto (A) e fechado (B) 64
Figura 24 - Resultados do ensaio de absorção de água das vermiculitas 64
Figura 25 - Curvas granulométricas dos agregados utilizados 65
Figura 26 - Difratograma da areia natural (A), vermiculita fina (B) e vermiculita super fina (C). 69
Figura 27 - Conjunto de equipamentos utilizados para o ensaio de retenção de água 74
Figura 28 - Ensaio de absorção de água por capilaridade sendo realizado 75
Figura 29 - Prensa hidráulica da Shimadzu com capacidade para 50 kN 77
Figura 30 - Prensa hidráulica da Shimadzu com capacidade para 10 kN 77
Figura 31 - Desenho esquemático do ensaio com o ISOMET 2114 78
Figura 32 - Placa de argamassa utilizada para o ensaio de transferência de calor 79
Figura 33 - Modelo esquematizado do protótipo proposto por Barros (2018) 80
Figura 34 - Protótipo em funcionamento 80
Figura 35 – Modelo de bloco de concreto e indicações das seções Sa, Sb e Sc 81
Figura 36 - Massa unitária teórica x real da fração inerte 84
Figura 37 - Massa unitária teórica x real das argamassas 85
Figura 38 - Relação água/cimento das argamassas produzidas 88
Figura 39 - Valores da retenção de água das argamassas elaboradas 89
Figura 40 - Valores das densidades de massa fresca das argamassas dosadas 90
Figura 41 - Valores dos teores de ar das argamassas dosadas 92
Figura 42 – Correlação entre densidade de massas fresca X Teor de ar incorporado e % de Vermiculita 93
Figura 43 - Valores das densidades de massa seca das argamassas dosadas 94
Figura 44 - Valores dos índices de vazios das argamassas dosadas 94
Figura 45 -Correlação entre Densidade de massa endurecida x Indice de vazios e Indice de vazios x % Vermiculita 96
Figura 46 - Valores das absorções de água por capilaridade das argamassas dosadas 97
Figura 47 - Valores das absorções de água por imersão das argamassas dosadas 99
Figura 48 - Valores das resistências à compressão das argamassas dosadas 100
Figura 49 - Valores das resistências à tração na flexão das argamassas dosadas 101
Figura 50 – Correlação resistência mecânica X % Vermiculita e Relação a/c 102
Figura 51 - Condutividade térmica das argamassas dosadas 103
Figura 52 - Relação condutividade térmica x índice de vazios das argamassas produzidas 105

Figura 53 - Médias das diferenças de temperatura entre as faces na última hora do ensaio ..106
Figura 54 - Taxa de transferência de calor das argamassas.....107
Figura 55 - Transmitância térmica (W/m²K) para bloco de concreto com 9 cm de espessura 108
Figura 56 - Transmitância térmica (W/m²K) para bloco de concreto com 14 cm de espessura 108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentual dos elementos constituintes da vermiculita 18
Tabela 2 - Classificação granulométrica da vermiculita pelo sistema Americano e Internacional 21
Tabela 3 - Classificação granulométrica da vermiculita pelo sistema Brasileiro 22
Tabela 4 - Classificação das argamassas segundo a NBR 13281/2005 28
Tabela 5 - Tipos e especificações de argamassas de acordo com ASTM C 1329 29
Tabela 6 - Composições das dosagens de outras pesquisas sobre argamassas com vermiculita 30
Tabela 7 - Consumo de cimento, vermiculita e água de argamassas com vermiculitas 34
Tabela 8 - Densidade fresca, teor de ar incorporado, teor de cimento e vermiculita de diferentes autores 37
Tabela 9 - Relação entre porosidade, densidade endurecida e teor de vermiculita 40
Tabela 10 - Valores de índice de capilaridade e teor de vermiculita dos artigos estudados 44
Tabela 11 - Valores de resistência à compressão, teor de cimento e vermiculita dos artigos estudados. 48
Tabela 12 - Valores de resistência à tração, teor de cimento e vermiculita dos artigos estudados. 51
Tabela 13 - Propriedade térmica das argamassas com vermiculita. 55
Tabela 14 - Ensaios e normas empregados para a caracterização da vermiculita. 62
Tabela 15 - Propriedades físicas dos materiais utilizados na pesquisa. 63
Tabela 16 - Composição química dos ligantes com base do ensaio de FRX. 67
Tabela 17 - Composição química dos agregados com base do ensaio de FRX 67
Tabela 18 - Composição das dosagens realizadas 71
Tabela 19 - Consumo de material (Kg) por m³ de argamassa 71
Tabela 20 – Condutividade térmica da Argamassa comum e do concreto 81
Tabela 21 - Resistências térmicas superficial interna e externa 82
Tabela 22 – Relação entre MU_R e MU_T das combinações da fração inerte. 85
Tabela 23 - Relação entre MU_R e MU_T das combinações secas das argamassas. 86
Tabela 24 - Consumo e teor de água das argamassas produzidas 87
Tabela 25 - Resumo das propriedades das argamassas com vermiculita seca 110
Tabela 26 - Resumo das propriedades das argamassas com vermiculita pré-umedecida 111

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação entre composição da vermiculita e suas propriedades ao ser aquecida 23
Quadro 2 - Características dos agregados leves 25

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

1.1 OBJETIVO 15

1.1.1 Objetivo Geral 15

1.1.2 Objetivo Específico 15

2 REFERENCIAL TEÓRICO 16

2.1 VERMICULITA 16

2.2 VERMICULITA EXPANDIDA 20

2.3 VERMICULITA NA CONSTRUÇÃO CIVIL 24

2.4 ARGAMASSA DE REVESTIMENTO COM VERMICULITA 27

2.4.1 Trabalhabilidade e consumo de água 33

2.4.2 Densidade de massa fresca e teor de ar 36

2.4.3 Densidade endurecida e porosidade 39

2.4.4 Coeficiente de capilaridade 43

2.4.5 Resistência à compressão e à tração na flexão 46

2.4.6 Condutividade térmica 54

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL 59

3.1 Materiais 61

3.1.1 Cimento 61

3.1.2 Cal 61

3.1.3 Agregados 61

3.1.4 Água 61

3.2 Métodos 62

3.2.1 Caracterização dos materiais 62

3.2.2 Produção das argamassas 70

3.2.3 Propriedades das argamassas no estado anidro 72

3.2.4 Propriedades das argamassas no estado fresco 72

3.2.5 Propriedades das argamassas no estado endurecido 74
3.2.6 Ensaios térmicos 78
3.2.6.1 Condutividade térmica 78
3.2.6.2 Transferência de calor por meio de protótipo 79
3.2.6.3 Simulação da transmitância térmica em paredes com blocos de concreto ... 80
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 84
4.1 Análise no estado anidro 84
4.1.1 Massa unitária teórica e Massa unitária real 84
4.2 Análise no estado fresco 86
4.2.1 Consistência e consumo de água 86
4.2.2 Retenção de água 89
4.2.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado 90
4.3 Análise no estado endurecido 93
4.3.1 Densidade de massa e índice de vazios 93
4.3.2 Absorção de água por capilaridade e imersão 96
4.3.3 Resistência à compressão e à tração 100
4.3.4 Desempenho térmico 103
4.3.4.1 Condutividade térmica 103
4.3.4.2 Transferência de calor por meio de protótipo 105
4.3.4.3 Simulação da transmitância térmica em paredes de bloco de concreto 107
5 CONCLUSÕES 110
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 115
REFERÊNCIAIS BIBLIOGRÁFICAS 116

1 INTRODUÇÃO

As atividades industriais, o crescente uso de combustíveis fósseis e o desenfreado consumo de recursos naturais acarretaram, ao longo dos anos, diversas mudanças climáticas, como o aumento da temperatura global, que, segundo relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2019), aumentou de 0,8 °C a 1,2 °C em relação a temperatura média do século XX.

Como consequência desse aumento da temperatura, sensações térmicas maiores são experimentadas pela população global, principalmente em climas tropicais, onde as temperaturas são naturalmente mais elevadas. Para atenuar o calor, sistemas de refrigeração são amplamente utilizados para melhorar o conforto ambiental. Segundo a nota técnica da Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2018), nos anos de 2014 e 2015, foram registradas ondas térmicas mais intensas em relação aos anos anteriores. Paralelamente, o número de vendas de aparelhos de ar-condicionado registrou picos nesse mesmo período. Além desse dado, o estudo da EPE mostra que, no ano de 2017, os condicionadores de ar figuravam na quarta posição entre os aparelhos que mais consumiam energia nas residências brasileiras, com um aumento de 7% em sua participação entre os anos de 2005 e 2017.

Em face desse aumento da temperatura e do desconforto térmico, políticas públicas foram criadas com o objetivo de estabelecer diretrizes para melhorar a eficiência energética das edificações, proporcionando conforto e economia ao consumidor final. Destacam-se, nesse contexto, a Lei nº 10.295 (BRASIL, 2001) e a NBR 15.575 (ABNT, 2013). A norma técnica determina o desempenho térmico da edificação a partir de parâmetros mínimos de transmitância térmica e capacidade térmica do elemento de vedação, classificando, assim, a eficiência térmica do edifício com base nesses dados.

Para atingir o conforto térmico de um ambiente, Lamberts (2016) diz que é importante observar as propriedades térmicas dos materiais constituintes da edificação, tais como: massa aparente, condutividade térmica e calor específico. O autor aponta que o uso de materiais com baixa condutividade térmica permite um menor fluxo de calor através da parede, diminuindo a troca de calor entre o ambiente externo e interno.

Soluções que promovem baixa condutividade térmica e maior inércia térmica são constantemente buscadas a fim de reduzir a troca de calor entre ambientes. Diversos materiais podem ser aplicados com o intuito de promover esse isolamento térmico, tais como: lã de vidro, lã de rocha, poliestireno expandido, concreto celular e agregados leves. A característica comum entre esses materiais é o baixo peso específico. Segundo Stancato (2000), a condutividade

térmica possui relação com a massa específica do material, diminuindo à medida que aumenta a quantidade de ar no seu interior, o que consequentemente reduz seu peso específico. A vermiculita se enquadra nesse grupo de materiais, sendo material isolante devido às suas características químicas, mineralógicas, estruturais, o que resulta em benefícios às propriedades dos materiais ou elementos nos quais são aplicados, isso proporciona ausência de toxidez, incombustibilidade, capacidade de absorção de líquidos, ação lubrificante para altas temperaturas, isolamento térmico e acústico (CINTRA *et al.*, 2014). Este agregado já é conhecido na construção com o objetivo promover o conforto térmico, porém é pouco utilizado compósitos cimentícios, em razão da sua alta absorção de água, este fator torna-se um problema, pois ele interfere na trabalhabilidade do material, consequentemente em outras propriedades no estado fresco e endurecido.

Em vista dos benefícios das argamassas térmicas, do alto valor de mercado desse produto e da baixa trabalhabilidade ocasionada pelo uso da vermiculita, esta pesquisa visa estudar a composição granulométrica da fração inerte de argamassas produzidas com vermiculita e a influência desse parâmetro sobre as propriedades nos estados anidro, fresco e endurecido.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a influência da granulometria e do pré-umedecimento da vermiculita sobre as propriedades anídrica, fresca, endurecida e térmicas das argamassas.

1.1.2 Objetivo Específico

- Estudar as características dos materiais constituintes das argamassas e as propriedades do estado anidro das argamassas produzidas e da fração inerte contendo vermiculita;
- Analisar as propriedades nos estados fresco e endurecido de argamassas produzidas com vermiculita de granulometria fina e superfina, e em diferentes estados de hidratação;
- Analisar a condutividade térmica das argamassas produzidas e simular sua influência quando utilizadas no revestimento de paredes de blocos de concreto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 VERMICULITA

Vermiculita é o nome geológico dado a um grupo de minerais laminares hidratados que são silicatos de alumínio-ferro-magnésio, que se assemelham à mica em aparência (FRANÇA *et al.,* 2016). A Encyclopedia Britannica (2018) descreve a vermiculita como sendo um argilomineral com estrutura similar à montmorilonita ($(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$), com tendência de inchamento na presença de água e alta capacidade de troca iônica. A vermiculita é de origem supergênica (intemperismo químico) e/ou hidrotermal (ação da água e temperatura em conjunto), produzida a partir da alteração ou substituição de:

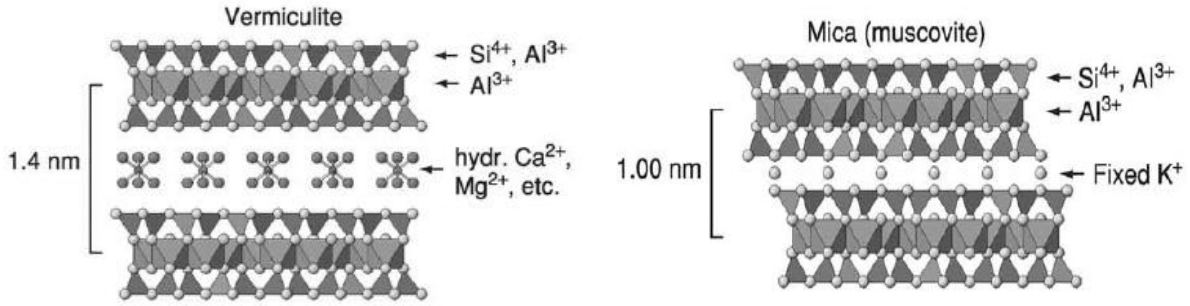
- Flogopita ($KMg_3Si_3AlO_{10}(OH,F)_2$);
- Biotita ($K(Mg,Fe^{2+})_3[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$ ou $K(Mg,Fe^{2+})_3(Al,Fe^{3+})Si_3O_{10}(OH,F)_2$);
- Clorita ($(Mg,Al,Fe)_{12}[(Si,Al)_8O_{20}](OH)_{16}$);
- E entre outras micas máficas (origem vulcânica) em vários tipos de rocha (NAVARRO *et al.*, 2018).

Bassett (1961) aponta que a vermiculita ocorre nas categorias macroscópica e microscópica, sendo esta última predominante nos depósitos, e se apresentando em quatro tipos de rochas: (1) ultramáfica e máfica (rochas ígneas com presença de sílica e altos teores de silicatos ferromagnéticos); (2) gnaisse e xisto (rochas metamórficas); (3) rochas carbonáticas; e (4) rochas graníticas. Por meio de um levantamento experimental e bibliográfico, Bassett (1961) sugere que a formação da vermiculita se dá predominantemente por meio supérgeno (intemperismo químico).

Por se originar a partir das alterações de minerais micacios, Schulze (2005) aponta a vermiculita como um silicato argiloso com partículas menores que 2 μm, com estrutura cristalina formada por camadas do tipo 2:1, ou seja, possuem duas camadas de tetraédricos compostas geralmente por óxidos de silício e, entre elas, há uma camada de octaédricos formada por óxidos de alumínio. Entre duas camadas de folhetos, existe uma camada intersticial de água e cátions monovalentes ou bivalentes. A Figura 1 mostra a semelhança entre as estruturas cristalinas das micas e da vermiculita. Bush (2001) ressalta que a intercamada de minerais como mica e biotita apresenta átomos de potássio em sua constituição; porém, na vermiculita, a intercamada apresenta moléculas de água combinadas com átomos de magnésio.

.

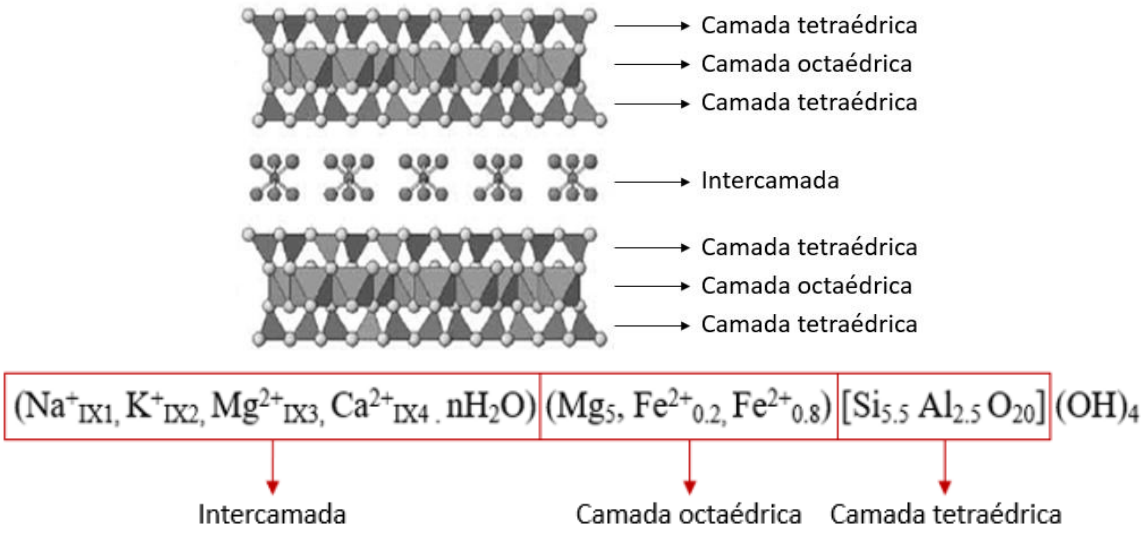
Figura 1 - Estrutura molecular da vermiculita e da mica



Fonte: Schulze (2005)

De acordo com Hindman (2006), a vermiculita apresenta uma constituição química diversificada, sendo isso em função dos elementos constituintes da mica original e das mudanças químicas durante o desgaste e troca iônica. A partir de uma análise de mais de 60 vermiculitas, Hindman (2006) propôs uma fórmula química comum para as vermiculitas (Figura 2).

Figura 2 - Composição química da vermiculita



Fonte: Schulze (2005) e Hindman (2006), adaptado pelo autor (2020)

A vermiculita pode apresentar composição química diferente. A Tabela 1, transcrita de Nascimento (2008), aponta uma variação possível dos óxidos constituintes da vermiculita. Outros minerais ou concentrações maiores de algum óxido na constituição da vermiculita podem causar alterações na composição química da vermiculita e nas suas características, sendo a origem mineralógica um dos fatores principais para essa diferença nos teores de óxidos. Como exemplo, de acordo com Ugarte *et al.* (2005) uma das formas de surgimento da vermiculita é

por alteração da biotita, a qual apresenta um grande concentrado de óxido de ferro. Como consequência dos altos teores desse óxido, Barros (2018) aponta uma coloração avermelhada na vermiculita em virtude desse concentrado, contrapondo a tradicional coloração marrom-claro ou escuro.

Tabela 1 - Percentual dos elementos constituintes da vermiculita

Elemento	**% por peso**
SiO_2	38,00 – 46,00
Al_2O_3	10,00 – 16,00
MgO	16,00 – 35,00
CaO	1,00 – 5,00
K_2O	1,00 – 6,00
Fe_2O_3	6,00 – 13,00
TiO_2	1,00 – 3,00
H_2O	8,00 – 16,00
Outros	0,20 – 1,20

Fonte: Nascimento (2008)

Outro elemento químico relevante para as características da vermiculita é o potássio, este pode provocar alterações na expansão do material. Marcos e Rodriguez (2010) estabelecem no seu estudo, que as vermiculitas comerciais podem ser distinguidas em dois tipos, dependendo da composição da intercamada:

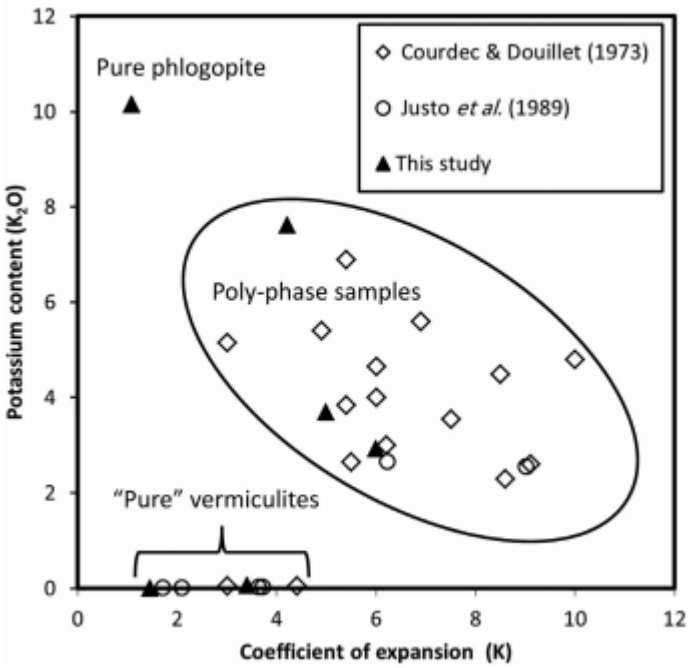
TIPO 1: Predominância de cátions Mg^{2+} ou Mg^{2+} com K^+ em teores menores que 1%

TIPO 2: Presença de K^+ em teores igual ou maior que 1%, combinado com e/ou Na^+ e/ou Ca^{2+}, podendo apresentar teores de Mg^{2+}

Marcos e Rodriguez (2010) ainda apontam como consequência dessa variação de constituição da vermiculita, que a tipo 2 apresenta um maior potencial de expansão por apresentar maior teor de potássio. De fato, Hillier (2013) demonstra que em amostras com teores de potássio menores que 1% tem-se uma maior presença do mineral vermiculita e uma menor taxa expansão, e para valores aproximadamente 5% observa-se redução na quantidade do mineral vermiculita e aumento na taxa de expansão. As amostras com aproximadamente 5% de potássio possuem mais de uma fase/mineral constituindo o floco, sendo comummente encontrado a mica juntamente à vermiculita formando um intermediário chamado hidrobiotita, que geralmente possui maior taxa de expansão.

Para existir uma maior taxa de expansão, Hillier (2013) explica que é necessário a presença de minerais de micas e/ou hidrobiotitas no floco que sofrerá a expansão, pois estes minerais atuam como barreiras impedindo o escape do vapor de água gerado pelo aquecimento do floco de vermiculita, assim o vapor força sua saída separando as camadas de octaédricas e tetraédricas, expandindo a vermiculita. A Figura 3 relaciona os teores de potássio (K_2O) e a taxa de expansão da vermiculitas (K) de diferentes autores, e observa-se que vermiculitas puras ("Pure" Vermiculites) apresentam um baixo teor de potássio e baixa taxa de expansão, porém vermiculitas com mais de uma fase constituintes (poly-phases samples) apresentam maior taxa de expansão. Conclui-se que o floco de vermiculita para ter maior expansão deve apresentar teores de potássio entre 3% e 5%, esse intervalo significa que existem fases de micas e/ou hidrobiotitas no material, proporcionando um aprisionamento do vapor gerado no aquecimento, assim provocando a expansão da vermiculita.

Figura 3 - Relação entre teor de potássio e taxa de expansão



Fonte: Hillier (2013)

Em razão das características obtidas pela vermiculita no processo de expansão, que serão apresentadas nos tópicos seguintes, esse material possui uma ampla diversidade de aplicação, fazendo a vermiculita ter um bom apreço comercial, sendo explorada em diversos países, e segundo a United States Geological Survey – USGS (2020) a produção mundial de vermiculita em 2019 foi de 500 mil toneladas, sendo Estados Unidos, África do sul e Brasil os

maiores produtores, com a produção de 40%, 36% e 12%, respectivamente. No território brasileiro, a Agência Nacional de Mineração - ANM (2017) aponta que as reservas nacionais de vermiculita em 2016 estavam distribuídas em cinco estados: Goiás (69,75%), Paraíba (17,31%), Bahia (12,07%), Piauí (0,84%) e Pernambuco (0,03%). Sendo que no mesmo ano, a produção nacional de vermiculita beneficiada ficou concentrada nos estados de Goiás (75,8%), Paraíba (21,2%) e Pernambuco (3,0%).

Diante do exposto, a vermiculita possui origem a partir de alterações na estrutura cristalina e composição atômica de outros minerais. Estas mudanças de átomos podem promover variações nas características da vermiculita, tais como coloração e taxa de expansão. Estas características são apreciáveis para avaliar o potencial de uso comercial da vermiculita, principalmente quando ela é expandida, sendo este assunto abordado nos tópicos seguintes.

2.2 VERMICULITA EXPANDIDA

A vermiculita ao ser expandida adquire características que tornam o seu consumo comercial apreciável em diversos setores industriais. As utilidades dadas à vermiculita, segundo Ugarte *et al.* (2005), ocorrem devido às suas propriedades únicas, obtidas principalmente no processo de expansão, como, por exemplo: baixa elasticidade, baixa densidade, elevada área superficial, porosidade e elevada capacidade de adsorção e absorção devido a sua carga superficial negativa. Estas características são adquiridas quando a vermiculita passa pelo processo de expansão.

No processo de expansão, segundo Nascimento (2008), a vermiculita aumenta o seu volume em aproximadamente 6 e 20 vezes, e para que este processo ocorra o agregado deve aquecido a uma temperatura entre 800-1000 °C. Todavia Rashad (2016) alerta que a temperatura de expansão não pode ser superior a 1000 °C, por poder converter a vermiculita em clinoenstatite, provocando a perda da propriedade de isolamento térmico.

É durante o processo de expansão que a vermiculita adquire as características como baixa densidade e baixa condutividade térmica, pois nesse processo de aquecimento ocorrem perdas de massa na vermiculita, devido a evaporação da água presente no seu interior, assim fazendo o agregado aumentar de volume e incorporar vazios no seu interior. Segundo Campos *et al.* (2009) esta perda de massa ocorre em três etapas:

I. **20 °C < T < 100 °C**: Perda de água absorvida pela superfície;
II. **110 °C < T < 500 °C**: Perda de água existente nas moléculas;

III. **T > 850 °C**: Evaporação da água presente na camada intersticial da vermiculita.

Hambostel (1991) explica que o procedimento de expansão consiste, inicialmente, pelo desmonte, trituração e separação da rocha em flocos com diferentes dimensões, posteriormente tem-se o aquecimento dos flocos em um forno vertical, finalizando com separação da vermiculita expandida em diferentes granulometrias.

Mediante as Tabelas 2 e 3, é exposto que a classificação grosso, média, fina, super fina e mícron do sistema internacional equivale à classificação 1,2,3,4 e 5, respectivamente, do sistema americano, porém os tamanhos máximos da faixa de diâmetros americana é levemente menor que a internacional, e a faixa mínima é maior em relação ao mesmo parâmetro do sistema internacional. Em relação à faixa de distribuição granulométrica, o padrão brasileiro apresenta diâmetros menores para a mesma classificação em relação ao sistema internacional.

Tabela 2 - Classificação granulométrica da vermiculita pelo sistema Americano e Internacional

Sistema	**Classificação**	**Faixa de diâmetros (mm)**		**Faixa de distribuição granulométrica**
		Máxima	**Mínima**	
Americano	1	7,00	3,33	-
	2	3,50	1,75	-
	3	2,00	0,6	80% das partículas maiores que 0,60 mm
	4	0,85	0,212	80% das partículas maiores que 0,30 mm
	5	0,30	-	55% das partículas maiores que 0,30 mm
Internacional	Grossa	8,00	2,8	60 ~ 70% das partículas maiores que 4,00 mm
	Média	4,00	1,4	60 ~ 70% das partículas maiores que 2,00 mm
	Fina	2,00	0,71	60 ~ 70% das partículas maiores que 1,00 mm
	Super fina	1,00	0,355	60 ~ 70% das partículas maiores que 0,50 mm
	Mícron	0,71	0,25	60 ~ 70% das partículas maiores que 0,25 mm

Fonte: Reis (2002) e The Vermiculite Association (2022), adaptado pelo autor.

Tabela 3 - Classificação granulométrica da vermiculita pelo sistema Brasileiro

Sistema	Classificação	Faixa de diâmetros (mm)		Faixa de distribuição granulométrica
		Máxima	Mínima	
Brasileiro	-	-	-	-
	Média	-	-	55 ~ 95% das partículas maiores que 2,40 mm
	Fina	-	-	65 ~ 95% das partículas maiores que 1,20 mm
	Super Fina	-	-	70 ~ 95% das partículas maiores que 0,60 mm
	Micron	-	-	80 ~ 100% das partículas maiores que 0,30 mm

Fonte: Reis (2002)

Para o processo de expansão da vermiculita, é necessária a evaporação da água presente em seu interior. No entanto, o mecanismo de expansão ainda é considerado intrigante e carece de explicações completamente definidas. Em virtude disso, adota-se a explicação proposta por Hillier (2013), segundo a qual o processo de expansão ocorre quando o vapor gerado pela evaporação da água contida entre as camadas lamelares do floco de vermiculita produz forças internas que aumentam a distância entre essas camadas. Todavia, é importante ressaltar que, para que haja uma expansão mais significativa da vermiculita, o floco mineral deve ser preferencialmente composto por partículas grandes de vermiculita, associadas à presença de fases que atuem como barreira ao escape do vapor gerado durante o tratamento térmico. Essas fases geralmente são representadas por mica ou hidrobiotita, que possuem cátions de potássio fixos, os quais dificultam a liberação do vapor.

No Quadro 1, Hillier (2013) demonstra que amostras com múltiplas fases, denominadas em seu estudo como VER-2, MK-1 e PB, apresentam maior taxa de expansão e, como consequência, o produto gerado apresenta uma redução mais acentuada na massa aparente. As amostras com predominância de vermiculita e baixos teores de potássio — KL-2 (0,014%) e VER-18 (0,076%) — apresentaram, a 900 °C, densidades aparentes de 482 ± 18 kg/m³ e 241 ± 3 kg/m³, respectivamente. Apesar dessas amostras apresentarem uma considerável redução na densidade aparente, tal diminuição ocorreu principalmente pela perda de água, sem, contudo, resultar em um aumento expressivo de volume. Isso é evidenciado pelas baixas taxas de expansão, de 1,5 para a KL-2 e 3,4 para a VER-18.

Por outro lado, as amostras com múltiplas fases constituintes e teores de potássio de aproximadamente 5% — VER-2 (4,68%), MK-1 (4,63%) e PB (6%) — apresentaram, respectivamente, densidades aparentes, a 900 °C, de 169 kg/m³, 145 kg/m³ e 117 kg/m³. Em razão da perda de massa e das elevadas taxas de expansão dessas amostras, observa-se que houve significativa evaporação de água e grande aumento de volume, reforçando a hipótese de que a expansão depende da presença de água nos flocos de vermiculita e da hidrobiotita. Na amostra PHL-3, observa-se que a presença de altos teores de potássio, por si só, não garante a expansão do material, caso o mineral vermiculita esteja ausente. Isso ocorre porque é a vermiculita que contém a água interlamelar necessária para a expansão.

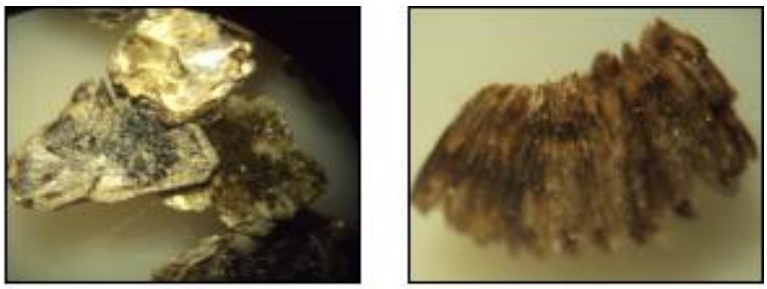
Quadro 1 - Relação entre composição da vermiculita e as suas propriedades ao ser aquecida

Composição predominante	**Amostra**	**Teor de médio de potássio (%)**	**Densidade Aparente (kg/m³)**			**Perda de massa (%)**		**Expansão (K)**	
			20 °C	**400 °C**	**900 °C**	**400 °C**	**900 °C**	**400 °C**	**900 °C**
Vermiculita	KL-2	0,014	689 ± 15	644 ± 17	482 ± 18	13,8 ± 0,3	19,8 ± 0,7	1,1 ± 0,02	1,5 ± 0,05
	VER-18	0,076	818 ± 9	680 ± 14	241 ± 3	10,7 ± 0,3	19,5 ± 0,4	1,2 ± 0,03	3,4 ± 0,02
Hidrobiotita	VER-2	4,68	827 ± 21	466 ± 8	169 ± 1	9,3 ± 0,0	14,0 ± 0,4	1,7 ± 0,04	5,0 ± 0,06
	MK-1	4,63	852 ± 25	262 ± 8	145 ± 2	10,9 ± 0,3	15,2 ± 0,4	3,2 ± 0,04	6,0 ± 0,05
	PB	6,00	491 ± 9	219 ± 4	117 ± 1	5,8 ± 0,5	8,2 ± 0,7	2,2 ± 0,04	4,2 ± 0,12
Flogopita	PHL-3	10,16	214 ± 6	225 ± 6	201 ± 3	0,5 ± 0,0	0,7 ± 0,3	0,9 ± 0,09	1,1 ± 0,09

Fonte: Hillier (2013)

Após o tratamento térmico, a vermiculita adquire uma forma alongada, semelhante a um verme ou a uma estrutura sanfonada, conforme ilustrado na Figura 4. Além dessa mudança morfológica, Nascimento (2008) e Gellert (2010) apontam que a vermiculita expandida apresenta alterações em propriedades físicas, tais como: baixa densidade (0,15–0,25 g/cm³), aumento da área superficial específica, maior absorção de água, isolamento termoacústico e resistência ao fogo. Essas propriedades — especialmente a baixa densidade, o isolamento termoacústico e a resistência ao fogo — são altamente valorizadas na construção civil, o que torna a vermiculita um material amplamente utilizado na produção de sistemas construtivos mais leves e eficientes do ponto de vista térmico e acústico.

Figura 4 - Fragmentos de vermiculita bruta (A) e vermiculita expandida (B) ao microscópio



(A) (B)

Fonte: Quartarone (2012)

2.3 VERMICULITA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Em compósitos cimentícios, a vermiculita é comumente utilizada como a fração inerte da mistura, ou seja, como o agregado. Segundo Mehta e Monteiro (2014) esta fração ocupa cerca de 60 a 80% do volume dos compósito cimentícios. Carneiro e Cincotto (1999) destacam o agregado como elemento fundamental para algumas propriedades dos compósitos cimentícios, uma vez que são responsáveis pela retenção de água, pela redução do consumo de água e manutenção da trabalhabilidade, além de atenuarem tensões oriundas do processo de endurecimento e reduzirem a permeabilidade, quando apresentam granulometria contínua.

Segundo Ribeiro et al. (2013), os agregados podem ser classificados conforme suas formas de obtenção, massa específica e forma dos grãos. Bauer (2008) observa que, em relação à massa específica aparente, os agregados podem ser classificados como: leves (massa menor que 1 kg/dm³), médios (entre 1 e 2 kg/dm³) e pesados (superior a 2 kg/dm³). Os agregados leves se caracterizam por apresentarem poros abertos e alta absorção de água, o que aumenta a porosidade dos compósitos cimentícios e reduz sua massa específica, devido ao acréscimo de vazios na estrutura interna do material.

Rossignolo (2009) afirma que tais agregados influenciam negativamente nas resistências mecânicas e contribuem para o aumento da perda de água e da retração nos compósitos cimentícios. Por outro lado, o uso desses materiais traz benefícios quanto à condutividade térmica, pois o ar aprisionado nos poros reduz a absorção e a transferência de calor no interior do compósito. Em função dessas características, os agregados leves têm sido estudados e aplicados em sistemas construtivos com os objetivos de reduzir o peso próprio da estrutura e proporcionar isolamento termoacústico. Entre os agregados leves, destaca-se a vermiculita como um material comumente empregado em argamassas voltadas ao isolamento termoacústico. Um dos principais objetivos da utilização de agregados leves em compósitos

cimentícios é promover leveza e diminuir a condutividade térmica da mistura. Nesse sentido, Sousa (2010) menciona como exemplos de agregados leves: argila expandida, xisto expandido, vermiculita expandida, perlita expandida, pedra-pomes, escória de alto-forno expandida, cinzas volantes, poliestireno expandido (EPS), vidro expandido e agregados orgânicos.

A escória de alto-forno e as cinzas volantes, apesar de serem amplamente conhecidas como adições minerais, podem ser utilizadas como agregados, dependendo do processo de fabricação. Neville e Brooks (2013) explicam que, quando a escória de alto-forno é resfriada por pulverização com água (spray), ela adquire forma de pelotas com estrutura cristalina e porosa, podendo ser utilizada como agregado leve. Já as cinzas volantes, conforme Mehta e Monteiro (2014), quando submetidas a processos de peletização e sinterização a temperaturas entre 1000 °C e 1200 °C, também podem ser empregadas como agregados leves. Além desses materiais amplamente utilizados, Bezerra (2014) apresenta o EVA (etileno-acetato de vinila) como uma alternativa viável de agregado leve em compósitos cimentícios. O Quadro 2 apresenta algumas características desses agregados.

Quadro 2 - Características dos agregados leves

Agregado	Densidade aparente (kg/m^3)	Condutibilidade térmica (W/m.K)
Argila expandida	966 ~1118	0,81
Xisto expandido	450 ~1050	0,13 ~0,93
Vermiculita expandida (menor que 1 mm)	125	0,04 ~0,05
Vermiculita expandida (1 - 2 mm)	95	
Vermiculita expandida (3 - 6 mm)	80	
Vermiculita expandida (3 -10 mm)	65	
Perlita expandida (menor que 0,9 mm)	40 ~50	0,05
Perlita expandida (menor que 1,2 mm)	50 ~60	
Perlita expandida (menor que,2 mm)	75 ~85	
Pedra pomes	400 ~ 900	0,09 ~ 0,17
Escoria granular de alto-forno expandida (menor que 6,3 mm)	1000	0,13
Escoria granular de alto-forno expandida (6,3 – 12,5 mm)	900	
Escoria granular de alto-forno expandida (12,5 - 25 mm)	800	

Cinza volantes (menor que 5 mm)	1040	0,14
Cinza volantes (5 - 8 mm)	835	
Cinza volantes (8- 13mm)	770	
EVA (Etileno acetato de vinila)	100 ~ 350	-
Polistireno expandido (EPS)	12 ~ 14	0,035

Fonte: Sousa (2010) e Bezerra (2014)

As propriedades de baixa massa aparente e baixa condutividade térmica, tornam a vermiculita expandida atrativa em diversos setores industriais. Assim, este material é utilizado em materiais de construção (agregado para concretos e argamassas), em isolamentos (preenchimento solto, ladrilhos acústicos), na horticultura (agregado, alteração do solo, fertilizante transportadora) e diversos outros usos (BUSH, 2001).

A exploração e aplicação da vermiculita remonta do início do século XX, relatado por Schaeffer (1935), o material se destaca por apresentar baixo peso específico e baixa condutividade térmica. O autor aponta que a vermiculita era utilizada com o objetivo de promover o isolamento térmico das edificações, sendo principalmente utilizada como uma alternativa da lã mineral para enchimento de paredes e lajes, outras aplicações de vermiculita ocorriam na produção de blocos leves e capas para tubos. Os relatos sobre o uso da vermiculita em compósitos cimentícios nas primeiras décadas do século XX são praticamente nulos, porém Pence e Blount (1944) apontam que o uso da vermiculita como agregado leve para concreto já se apresentava bastante consolidado, dessa forma propondo o uso desse material na produção de peças cerâmicas e demonstrando a possibilidade de produção de blocos cerâmicos termo isolantes.

Apesar do amplo uso em concretos, a quantificação da influência da vermiculita sobre as propriedades de compostos cimentícios permaneceram por muito tempo um mistério. Em virtude disso, Hansen (1953) estudou a influência de agregados leves sobre a condutividade térmica de concretos aluminosos, um dos agregados em estudos era a vermiculita. Através da pesquisa ficou demonstrado que a condutividade térmica obedece a uma relação direta com o aumento da temperatura, e inversa com teor de vermiculita na mistura, ou seja, quanto mais vermiculita no compósito, menor foi a condutividade do mesmo. No estudo de Low (1984) comprovou-se a influência do tamanho e o empacotamento de partículas sobre a condutividade térmica e o potencial uso desse material em elementos de construção civil. Esse estudo apontou que o uso de partículas menores de vermiculita proporcionam uma menor condutividade térmica, porém essas partículas ao serem prensadas e formarem um corpo rígido, o elemento

apresentou um aumento na condutividade térmica e redução na resistência, dessa forma o autor recomenda uma combinação entre a vermiculita e um ligante, a fim de se obter um material resistente e de baixa condução de calor.

Mesmo apresentando alta capacidade de ser utilizada em produtos cimentícios, poucas pesquisas focam a influência da vermiculita e suas peculiaridades nas argamassas, podendo se destacar a pesquisa realizada por Silva *et al*. (2010), em que propõe a substituição parcial do agregado miúdo convencional por vermiculita, o que demonstra a redução da condutividade térmica desse compósito, porém compromete o desempenho mecânico do mesmo. Em vista disso, a seguir serão apresentadas algumas pesquisas em que a vermiculita foi aplicada em argamassas para revestimento de edificações.

2.4 ARGAMASSA DE REVESTIMENTO COM VERMICULITA

Obras da mais simples até a mais complexa são constituídas por sistemas, tais como fundação, estrutura, instalações, revestimento etc. O revestimento é caracterizado por proteger os demais sistemas fornecendo a eles mais resistência aos choques e abrasão, além de prover impermeabilização e isolamento termoacústico, e por fim proporcionar o embelezamento à edificação, tornando a aparência como projetado na arquitetura.

De modo geral, o revestimento é dividido em camadas constituídas por argamassas. Segundo a NBR 13529 (ABNT, 2013), argamassa de revestimento é "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 endurecimento". De acordo com Marvila (2018), as camadas de revestimento em argamassa podem ser classificadas e definidas da seguinte forma::

- **Chapisco**: amada aplicada para preparar a base, promovendo o aumento das propriedades de aderência entre o substrato e a camada subsequente;
- **Emboço**: camada utilizada para cobrir a base, proporcionando uma superfície que permita a aplicação de uma nova camada (reboco) ou de revestimentos decorativos, como os cerâmicos;
- **Reboco:** camada aplicada sobre o emboço, oferecendo uma superfície adequada para o recebimento de revestimentos decorativos como pintura, ou atuando como acabamento final;
- **Camada única**: revestimento constituído por apenas uma camada, aplicada diretamente sobre a base, sobre a qual se pode aplicar um acabamento decorativo, como a pintura. É popularmente conhecida como "massa única" ou "reboco paulista".

- **Revestimento decorativo monocamada (monocapa ou RDM)**: revestimento com função simultânea de regularização e acabamento decorativo. Trata-se de um produto industrializado, de composição variável.

As argamassas de revestimento têm por função proteger os demais sistemas construtivos, contribuir para a regularização das superfícies e garantir o bom aspecto estético do ambiente. No entanto, para que essas funções sejam plenamente atendidas, não basta que a argamassa resista apenas a impactos e choques; é necessário que ela seja também capaz de suportar as agressões do meio em que está inserida, contribuindo para a durabilidade da construção. Nesse contexto, as argamassas devem apresentar características como boa estanqueidade à água, isolamento termoacústico e resistência ao fogo.

Visando garantir que as argamassas produzidas em obra sejam capazes de cumprir adequadamente suas funções, a NBR 13281 (ABNT, 2005) estabelece parâmetros mínimos para sete propriedades essenciais das argamassas, os quais estão apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 - Classificação das argamassas segundo a NBR 13281/2005

Classe	P	M	R	C	D	U	A
	MPa	kg/m³	MPa	g/dm²/min$^{1/2}$	kg/m³	%	Mpa
1	≤ 2,0	≤ 1200	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1400	≤ 78	≤ 0,20
2	1,5 a 3,0	1000 a 1400	1,0 a 2,0	1,0 a 2,5	1200 a 1600	72 a 85	> 0,20
3	2,5 a 4,5	1200 a 1600	1,5 a 2,7	2,0 a 4,0	1400 a 1800	80 a 90	≥ 0,30
4	4,0 a 6,5	1400 a 1800	2,0 a 3,5	3,0 a 7,0	1600 a 2000	86 a 94	-
5	5,5 a 9,0	1600 a 2000	2,7 a 4,5	5,0 a 12,0	1800 a 2200	91 a 97	-
6	> 8,0	> 1800	> 3,5	> 10,0	> 2000	-	-

Legenda:

P = Resistência à compressão / M = Densidade de massa aparente no estado endurecido

R = Resistência à tração na flexão / C = Coeficiente de capilaridade/ D = Densidade de massa no estado fresco

U = Retenção de água/ A = Resistência potencial de aderência à tração

Fonte: ABNT (2005)

Na Tabela 4 é visto que a NBR 13281 (ABNT, 2005) classifica as argamassas em seis classes, a partir da quantificação das seguintes propriedades: Resistência à compressão (P), Densidade de massa (M), Resistência à tração na flexão (R), Coeficiente de capilaridade (C), Densidade de massa no estado fresco (D), Retenção de água (U) e Resistência potencial de aderência (A). Apesar de a norma brasileira classificar as argamassas de revestimento com base

na quantificação de suas propriedades, os resultados são apresentados em intervalos abertos, sem definição de limites ideais. Segundo Selmo et al. (2002) e Sinhorelli (2019), a norma também não especifica qual classe deve ser utilizada para cada situação de uso da argamassa.

Diferentemente da norma brasileira, o Portland Cement Association – PCA (2002) informa que a norma americana ASTM C 1329 classifica as argamassas nos tipos N, S e M, estabelecendo valores mínimos e máximos para suas propriedades, de acordo com seu uso. Como apresentado na Tabela 5, a resistência mínima à compressão varia entre 6,2 MPa e 20 MPa, a retenção de água deve ser, no mínimo, 70% e o teor máximo de ar incorporado varia entre 17% e 15%.

Tabela 5 - Tipos e especificações de argamassas de acordo com ASTM C 1329

Tipo da argamassa	Aplicação	Resistência à compressão mínima (MPa)	Retenção de água mínima (%)	Teor de ar incorporado máximo (%)
N	Parede externa carregada e não carregada, Parede interna carregada e não carregada, Parede de parapeito	6,2	70	17
S	Parede externa carregada, Parede interna carregada	14,5	70	15
M	Paredes externas	20,0	70	15

Fonte: Portland Cement Association (2022), adptado pelo autor (2022)

As propriedades das argamassas sofrem influência direta dos tipos e proporções dos materiais constituintes. Segundo Carneiro e Cincotto (1999), esses materiais podem ser divididos em duas frações: a fração ativa (ligantes) e a fração inerte (agregado). Os autores apontam que os ligantes são os principais responsáveis pela resistência mecânica e pela

capacidade de deformação do compósito, enquanto o agregado influencia a trabalhabilidade, a retenção de água, as resistências mecânicas, a capacidade de deformação e a permeabilidade. O tipo do agregado também influencia na densidade das argamassas, segundo Caraseck (2010) as argamassas podem ser classificadas quanto à densidade no estado fresco (D_f) em leve (D_f < 1,40 g/cm³), normal (1,40 ≤ D_f ≤ 2,30 g/cm³) e pesada (D_f > 2,30 g/cm³). A redução ou o aumento da densidade pode ser promovido pela utilização de agregados de menor ou maior massa específica. No caso da redução da densidade, o uso de agregados leves, como a vermiculita, é um dos principais fatores.

O uso de agregados leves como a vermiculita promove o melhoramento de propriedades de isolamento termoacústico e diminuição na massa específica, porém provoca redução nas propriedades mecânicas e aumento na absorção de água. As propriedades das argamassas são fatores determinantes para o bom desempenho do material, estas sofrem influência direta das proporções e dos tipos de materiais utilizados na mistura. O agregado é uma fração fundamental nesse aspecto. Segundo Mehta e Monteiro (2014), as propriedades de materiais cimentícios no estado fresco são determinadas pela porosidade, massa específica, composição granulométrica, forma e textura superficial do agregado e as propriedades do estado endurecido são influenciadas pela composição mineralógica e pela porosidade do agregado.

Com o objetivo de analisar os efeitos da vermiculita em argamassas, foram compilados dados de diversos autores que estudaram as propriedades desse compósito nos estados anidro, fresco e endurecido. Destacam-se, nesse contexto, os estudos de Silva et al. (2010), Cintra (2014), Palomar et al. (2015), Barros (2018), Sinhorelli (2019) e Gündüz e Kalkan (2019). A Tabela 6 apresenta as composições utilizadas nesses estudos, cujas dosagens contemplam cimento, cal, areia e vermiculita, sendo esta utilizada como substituição parcial e/ou total da areia.

Tabela 6 - Composições das dosagens de outras pesquisas sobre argamassas com vermiculita

Autor	Amostras	Traço (Cim:Cal:Areia: Verm.)	Cimento	Cal	Areia	Verm.	Água	A/C
Silva *et al.* (2010)	SV10V0	1:1:6,33:0 (Massa)	12% -	12% -	76% -	0% -	- -	1,9
	SV10V2	1:1:6,17:0,16 (Massa)	12% -	12% -	74% -	2% -	- -	2,25
	SV10V3,5	1:1:6,08:0,33 (Massa)	12% -	12% -	72,5% -	3,5% -	- -	2,5

	SV10V5	1:1:5,92:0,42 (Massa)	12% -	12% -	71% -	5% -	- -	2,8
	SV10V10	1:1:5,5:0,83 (Massa)	12% -	12% -	66% -	10% -	- -	3,5
Cintra *et al.* (2014)	CT14V40	1:0,8:0,48:1,6 (Massa)	25% -	20% -	12% -	40% -	80% -	3,2
	CT14V40	1:0,75:1,4:1,7 (Massa)	20% -	15% -	28% -	34% -	70% -	3,5
Palomar *et al.* (2015)	P15V0	1:1:6 (Vol.) 1:0,32:7:0 (Massa)	12 % 214 Kg/m3	3,81 % 68 kg/m³	84,19 % 1502 kg/m³	0 % 0,00 kg/m³	- 140 kg/m³	0,65
	P15V3	1:1:6 (Vol.) 1:032:5,2:0,19 (Massa)	14,76% 214 Kg/m3	4,69% 68 kg/m³	77,72% 1127 kg/m³	2,83% 41 kg/m³	- 270 kg/m³	1,26
	P15V7	1:1:6 (Vol.) 1:032:3,5:0,38 (Massa)	19,19% 214 Kg/m3	6,10% 68 kg/m³	67,35% 751 kg/m³	7,35% 82 kg/m³	- 300 kg/m³	1,40
Barros (2018)	B18V0	1:1:6 (Vol.) 1:0,42:6,66:0 (Massa)	12,38 % 214,5 kg/m³	5,16 % 89,4 kg/m³	82,46 % 1428,8 kg/m³	0 % 0,00 kg/m³	- 308,8 kg/m³	1,44
	B18V3	1:1:6 (Vol.) 1:0,42:5:0,18 (Massa)	15,16% 238,6 kg/m³	6,32 % 99,5 kg/m³	75,74 % 1192,1 kg/m³	2,78 % 43,7 kg/m³	- 377,0 kg/m³	1,58
	B18V7	1:1:6 (Vol.) 1:0,42:3,33:0,37 (Massa)	19,55% 239,4 kg/m³	8,16 % 99,9 kg/m³	65,14 % 797,6 kg/m³	7,15 % 87,6 kg/m³	- 526,8 kg/m³	2,20
	B18V15	1:1:6 (Vol.) 1:0,42:1,67:0,55 (Massa)	27,54 % 246,4 kg/m³	11,48 % 102,7 kg/m³	45,86 % 410,4 kg/m³	15,12 % 135,3 kg/m³	- 652,9 kg/m³	2,65
	B15V34	1:1:6 (Vol.) 1:0,42:0:0,73 (Massa)	46,54 % 239,9 kg/m³	19,40 % 100 kg/m³	0 % 0,00 kg/m³	34,06 % 175,6 kg/m³	- 779,7 kg/m³	3,25
Sinhorelli (2019)	S19V0	1:1:6 (Vol.) 1:0,7:9,8:0 (Massa)	8,70 % 174 kg/m³	6,09 % 121,8 kg/m³	85,22 % 1704,9 kg/m³	0 % 0,0 kg/m³	- 250,5 kg/m³	1,44
	S19V5	1:1:6 (Vol.) 1:0,7:5,85:0,38 (Massa)	12,60 % 179,3 kg/m³	8,82 % 125,5 kg/m³	73,80 % 1050,6 kg/m³	4,78 % 68,1 kg/m³	- 401 kg/m³	2,24
	S19V9	1:1:6 (Vol.) 1:0,7:3,91:0,58 (Massa)	16,15 % 187,4 kg/m³	11,31 % 131,2 kg/m³	63,17 % 732,9 kg/m³	9,37 % 108,7 kg/m³	- 460,4 kg/m³	2,46
	S19V17	1:1:6 (Vol.) 1:0,7:1,95:0,77 (Massa)	22,63 % 198,3 kg/m³	15,84 % 138,8 kg/m³	44,11 % 386,6 kg/m³	17,42 % 152,7 kg/m³	- 524,3 kg/m³	2,64
Gündüz e Kalkan (2019)	G19V0	1:024:2,07:0 (Massa)	30 % -	7,2 % -	62 % -	0 % -	- -	1,22
	G19V24	1:0,24:1,26:0,8 (Massa)	30 % -	7,2 % -	38 % -	24 % -	- -	2,48

Fonte: Koksal *et al.* (2015), Palomar *et al.* (2015), Barros (2018), Sinhorelli (2019) e Koksal *et al.* (2020) (Adaptado pelo autor, 2022)

Na Tabela 6, observa-se que Silva et al. (2010), Cintra et al. (2014) e Gündüz e Kalkan (2019) apresentam as composições das argamassas em porcentagem em relação à massa total

dos materiais secos. A partir dessas porcentagens, e dividindo-as pela porcentagem de cimento de cada traço, foram obtidos os traços em massa.

No estudo de Silva et al. (2010), o consumo de cimento (12%) e cal (12%) foi mantido fixo, variando apenas os teores dos agregados, compostos por areia e vermiculita. A areia foi parcialmente substituída por vermiculita nas proporções de 2%, 3,5%, 5% e 10%. De forma semelhante, Gündüz e Kalkan (2019) mantiveram o teor de cimento (30%) e cal (7,2%), substituindo a areia por vermiculita em 24%. Diferentemente dos dois autores anteriores, Cintra et al. (2014) variaram os teores de todos os componentes da argamassa. Observa-se, por exemplo, que quando a quantidade de vermiculita foi reduzida de 40% para 34%, houve, possivelmente, uma correção nos consumos de materiais para manter o volume constante de argamassa.

Os estudos de Palomar et al. (2015), Barros (2018) e Sinhorelli (2019) apresentaram as composições das argamassas em traço unitário em volume e consumo de cada material em kg/m³. A partir desses dados, calcularam-se os traços unitários em massa e as porcentagens que cada componente representa em relação ao total de materiais secos, permitindo uma comparação com os demais estudos.

Palomar et al. (2015) utilizaram o traço 1:1:6 (cimento:cal:agregado) com substituição parcial do agregado convencional por vermiculita, nos teores de 25% e 50% do volume. O consumo de cimento (214 kg/m³) e de cal (68 kg/m³) foi mantido fixo, variando apenas o teor de vermiculita. Entretanto, o aumento da vermiculita reduziu a massa total de material seco, resultando em maior representatividade da massa de cimento no total da mistura, passando de 12% (P15V0) para 14,76% (P15V3) e 19,19% (P15V7).

De maneira semelhante, Barros (2018) propôs a substituição parcial e total do agregado convencional por vermiculita, utilizando também o traço 1:1:6 (volume), com substituições de 25%, 50%, 75% e 100%. Nessa pesquisa, os teores de ligantes também aumentaram progressivamente, o que, aliado ao aumento da vermiculita, acarretou elevação significativa no consumo de água e na relação água/cimento (a/c). Como em Palomar et al. (2015), a vermiculita reduziu a massa total de material seco, aumentando a representatividade da massa de cimento na mistura: 12,38% (B18V0), 15,16% (B18V3), 19,55% (B18V7), 27,54% (B18V15) e 46,54% (B18V34).

Seguindo a mesma linha de raciocínio, Sinhorelli (2019) realizou um estudo focado na reologia das argamassas com vermiculita. Para isso, utilizou o traço 1:1:6 (volume), com substituições parciais do agregado convencional por vermiculita nas proporções de 40%, 60% e 80%, com variações também nos consumos de cimento e água. Assim como Barros (2018), a

representatividade da massa de cimento aumentou conforme o teor de vermiculita, passando de 8,70% (S19V0) para 12,60% (S19V5), 16,15% (S19V9) e 22,63% (S19V17)..

Dessa forma, a partir da compilação dos dados desses autores, os tópicos seguintes analisam as propriedades das argamassas estudadas. Para melhor comparação entre os resultados, foram elaborados gráficos relacionando as propriedades analisadas com os teores de vermiculita e/ou cimento, a fim de demonstrar o impacto da variação desses parâmetros sobre o desempenho das argamassas.

2.4.1 Trabalhabilidade e consumo de água

Trabalhabilidade é propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea (CARASEK, 2010). Os efeitos adversos na trabalhabilidade das argamassas causados pelo uso de agregados leves ainda são pouco discutidos. Os efeitos adversos do uso de agregados leves sobre a trabalhabilidade das argamassas ainda são pouco discutidos na literatura. Lanzón e Garcia-Ruiz (2008) apontam que agregados leves possuem uma estrutura porosa com alta retenção de água e, quando utilizados em argamassas, exigem aumento no consumo de água para garantir boas condições de manuseio.

A seguir, são apresentados os resultados de Palomar et al. (2015), Barros (2018) e Sinhorelli (2019), com o objetivo de analisar a influência da vermiculita sobre a trabalhabilidade e o consumo de água das argamassas.

Como forma de mensurar a trabalhabilidade das argamassas, os autores utilizaram o ensaio na mesa de consistência (flow table), por meio da medição do diâmetro de espalhamento dos compósitos. Na pesquisa de Palomar *et al*. (2015), a autora produziu argamassas com consumo fixo de cimento e cal, permitindo avaliar o efeito da variação do teor de vermiculita sobre a trabalhabilidade e o consumo de água. Para o estudo da trabalhabilidade, a autora seguiu as recomendações da norma UNE-EN 1015-3:2000, obtendo, para as amostras P15V0, P15V3 e P15V7, respectivamente, diâmetros de espalhamento de 169 mm, 175 mm e 177 mm.

Diferentemente da autora citada anteriormente, Barros (2018) e Sinhorelli (2019) seguiram as recomendações da NBR 13276 (ABNT, 2016) e buscaram produzir argamassas com espalhamentos dentro do intervalo especificado de 260 ± 5 mm. As argamassas produzidas por essas duas pesquisadoras apresentaram consumo crescente de cimento, cal e vermiculita, o que resultou em aumento proporcional no consumo de água.

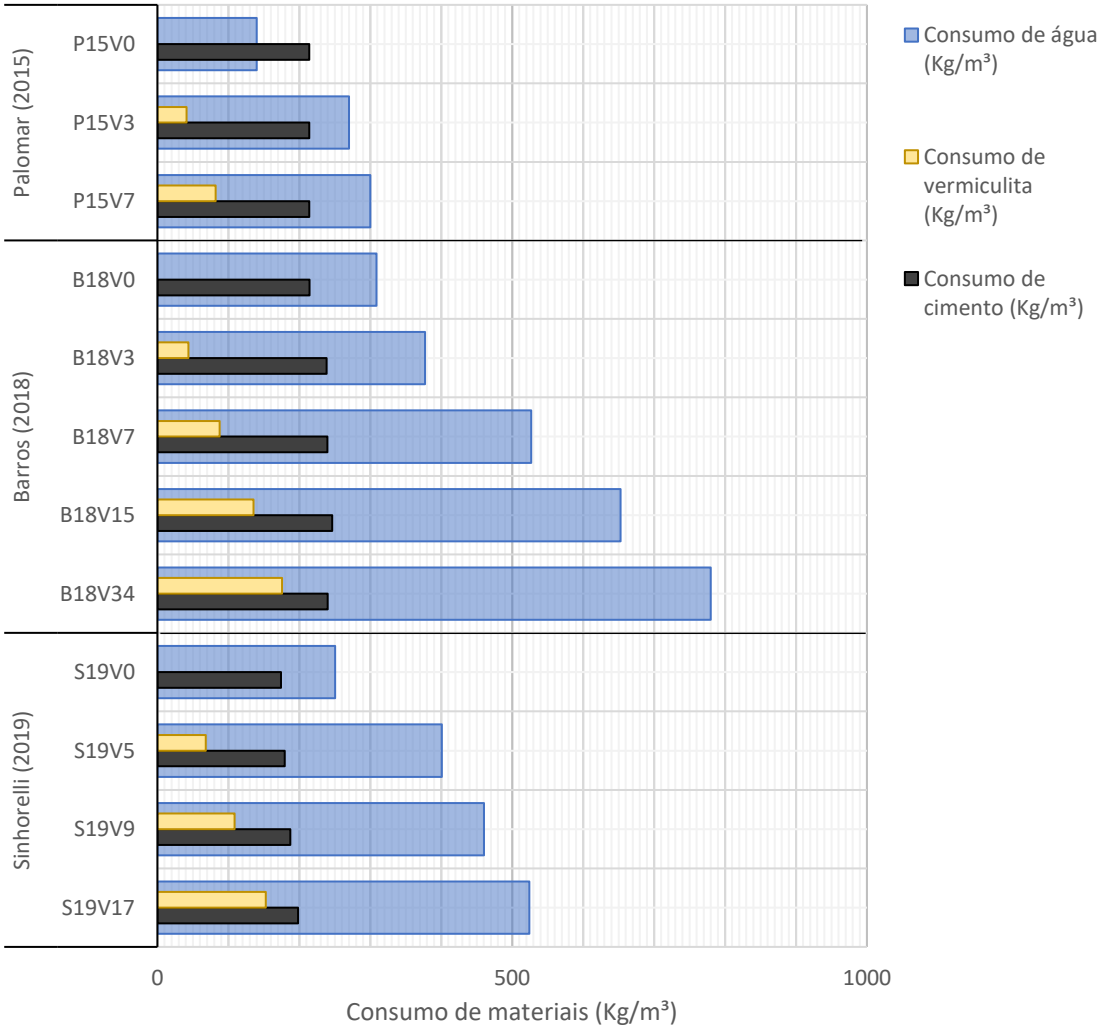
Conforme mencionado, para obter argamassas minimamente trabalháveis e que atendessem às recomendações técnicas, os autores aumentaram o consumo de água à medida que os teores de vermiculita e ligantes foram elevados nas misturas. A Tabela 7 e a Figura 5 relacionam o consumo de água com os consumos de cimento e vermiculita nas argamassas estudadas por esses autores.

Tabela 7 - Consumo de cimento, vermiculita e água de argamassas com vermiculitas

Autor	Amostras	Consumo de cimento (kg/m³)	Consumo de vermiculita (kg/m³)	Consumo de água (kg/m³)
Palomar (2015)	P15V0	214	0	140
	P15V3	214	41	270
	P15V7	214	82	300
Barros (2018)	B18V0	214,5	0,00	308,8
	B18V3	238,6	43,7	377
	B18V7	239,4	87,6	526,8
	B18V15	246,4	135,3	652,9
	B18V34	239,9	175,6	779,7
Sinhorelli (2019)	S19V0	174	0,00	250,5
	S19V5	179,3	68,1	401
	S19V9	187,4	108,7	460,4
	S19V17	198,3	152,7	524,3

Fonte - Palomar *et al.* (2015), Barros (2018) e Sinhorelli (2019)

Figura 5 - Relação entre consumo de água, cimento e vermiculita



Fonte - Palomar *et al.* (2015), Barros (2018) e Sinhorelli (2019)

O estudo de Palomar *et al*. apresenta as menores variações no consumo de água, em virtude da fixação do consumo de cimento (214 kg/m³) e de cal (68 kg/m³), bem como pelo uso de pequenas quantidades de vermiculita, representando 3% do total de material seco na mistura P15V3 e 6% na mistura P15V6. Apesar de os teores de vermiculita representarem uma pequena fração do total de materiais secos, essa variação foi suficiente para provocar um aumento significativo no consumo de água, passando de 140 kg/m³ (P15V0) para 270 kg/m³ (P15V3) e 300 kg/m³ (P15V6), o que corresponde a um acréscimo de 92% e 114%, respectivamente.

Nos trabalhos de Barros (2018) e Sinhorelli (2019), observa-se um aumento no consumo de cimento à medida que se eleva o teor de vermiculita, justificado pela necessidade de manter um mesmo volume de argamassa. Em Barros (2018), o consumo crescente de cimento e vermiculita resulta em elevação expressiva do consumo de água, que evolui de 308,8 kg/m³

(B18V0) para 377 kg/m³ (B18V3), 526,8 kg/m³ (B18V7), 652,9 kg/m³ (B18V15) e 779,7 kg/m³ (B18V34). Esses valores representam aumentos de 22%, 70%, 111% e 152%, respectivamente, em relação à amostra de referência.

Semelhantemente ao estudo anterior, o trabalho de Sinhorelli (2019) também apresenta teores crescentes de cimento e vermiculita, porém em proporções menores quando comparado ao de Barros (2018). Esse comportamento progressivo na adição de ligante e agregado leve acarretou aumentos graduais no consumo de água, que passou de 250,5 kg/m³ (S19V0) para 401 kg/m³ (S19V5), 460,4 kg/m³ (S19V9) e 524,3 kg/m³ (S19V17). Em relação à amostra de referência, esses consumos representam acréscimos de 60%, 83,7% e 109%, respectivamente. Outro fator que justifica o menor consumo de água nas argamassas de Sinhorelli (2019), em comparação com as de Barros (2018), está relacionado à granulometria da vermiculita utilizada. Enquanto Barros (2018) utilizou vermiculita classificada como super-fina (conforme o padrão brasileiro), Sinhorelli (2019) empregou vermiculita classificada como fina. Segundo Silva et al. (2010) e Rojas-Ramírez et al. (2019), argamassas produzidas com vermiculita super-fina tendem a apresentar maior absorção de água devido à maior área superficial específica desse tipo de agregado.

Apesar de os autores abordarem aspectos relevantes relacionados ao consumo de água necessário para manter a trabalhabilidade das argamassas com vermiculita em níveis ideais, os estudos específicos dessa propriedade e propostas de melhoramento ainda são escassos. Como alternativa para mitigar os efeitos da elevada absorção de água pelo agregado leve, Rossignolo (2009) e Koksal et al. (2015) recomendam o pré-umedecimento da vermiculita, com o objetivo de reduzir seus impactos negativos sobre o desempenho das argamassas.

2.4.2 Densidade de massa fresca e teor de ar

Compreende-se densidade como sendo uma relação entre a massa do material e o volume que ele ocupa. Esta propriedade é intrinsicamente ligada à massa específica dos materiais utilizados e o ar incorporado no interior da mistura. Cardoso (2009) aponta que a presença de ar na microestrutura de compósitos cimentícios aumenta o volume ocupado pela pasta, facilita o espalhamento e aumenta a coesão. Diversos outros fatores estão atrelados ao teor de ar incorporado, entre eles, segundo Romano *et al.* (2018) está a distribuição granulométrica do agregado e o teor de agregado presente, este primeiro, segundo o autor, quanto mais descontinua for a distribuição granulométrica do agregado, maior será o teor de ar incorporado, e em relação à quantidade de agregado, quanto maior a presença de material inerte, menor será a presença de aglomerante, assim tem-se uma mistura mais seca e mais porosa. Para

Struble e Jiang (2004) a presença de teores de ar até 25% proporciona benefícios à trabalhabilidade das argamassas, pois mesmo aumentando a tensão entre as partículas de ar e cimento, o ar incorporado diminui a viscosidade do composto, facilitando o escoamento.

A normalização brasileira não estabelece limites máximos e mínimos acerca do teor de ar incorporado, especificando apenas limites para a densidade no estado fresco, através da NBR 13281 (ABNT,2005), recomendando como limites máximos e mínimos os valores de 2000 e 1400 kg/m³, respectivamente. Já a normalização americana (ASTM C270/1999) recomenda valores para incorporação de ar entre 12% e 18%, e a BS 4887/1986 trabalha com a faixa entre 14% e 20%. Nesse aspecto, autores como Gomes e Neves (2002) recomendam como valores ideais de teor ar incorporado entre 8% e 17% para traços de argamassas.

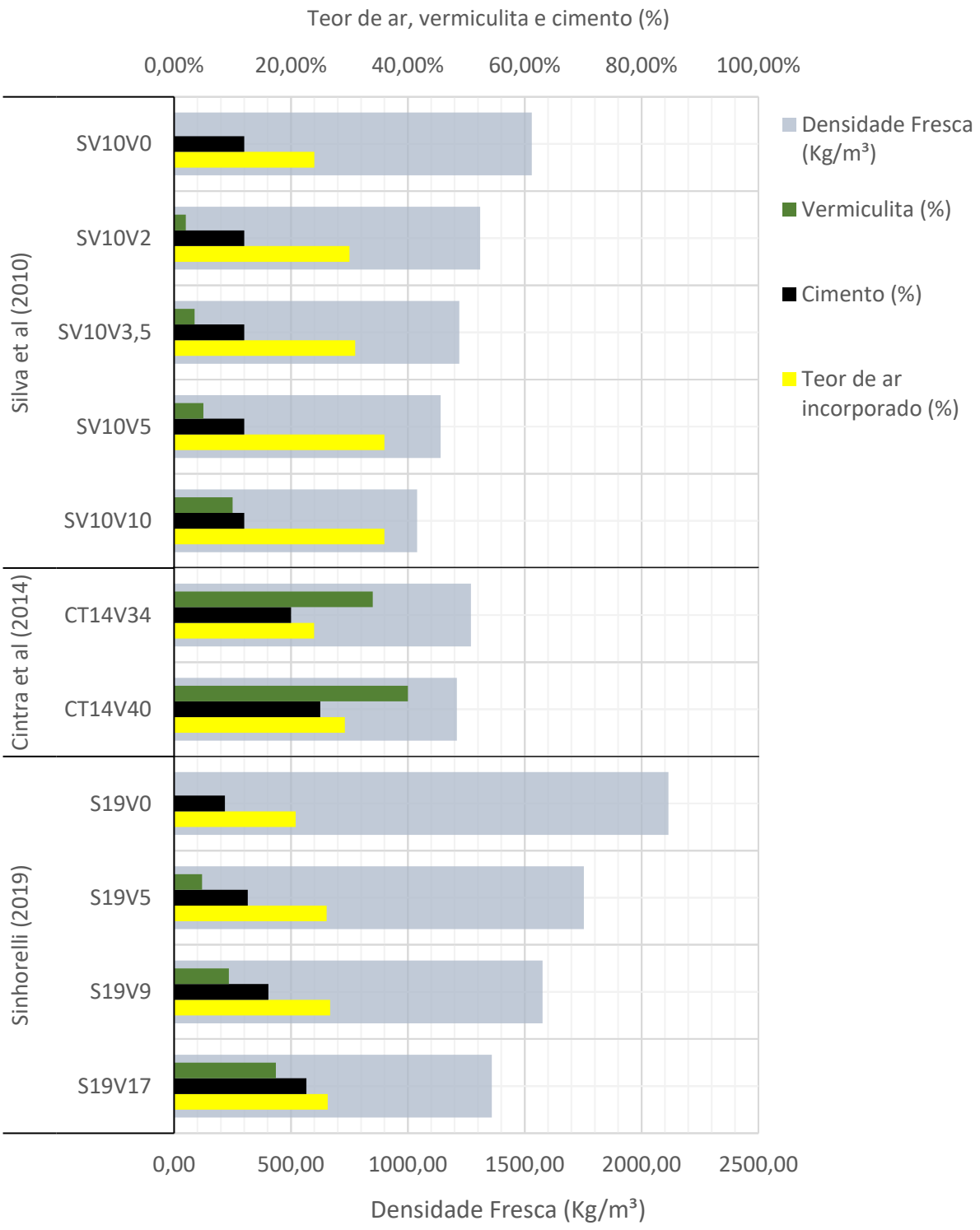
Os autores Silva *et al.* (2010), Cintra *et al.* (2014), Palomar *et al.* (2015), Barros (2018), Sinhorelli (2019) e Gunduz e Kalkan (2019) demonstram que a incorporação da vermiculita nas argamassas provocam a redução da massa especifica fresca dessas misturas. Tal redução de densidade fresca se dá em razão do aumento do teor de ar incorporado provocado pela adição de vermiculita. Os estudos de Silva *et al.* (2010), Cintra *et al.* (2014) e Sinhorelli (2019) demonstram (Tabela 8 e Figura 6) a relação entre o teor de vermiculita nas misturas e as propriedades de densidade fresca e teor de ar incorporado das argamassas produzidas.

Tabela 8 - Densidade fresca, teor de ar incorporado, teor de cimento e vermiculita de diferentes autores

Autor	Amostras	Teor de cimento (%)	Teor de vermiculita (%)	Teor de ar incorporado (%)	Densidade fresca (kg/m³)
Sinhorelli (2019)	S19V0	8,70%	0%	20,80%	2115,00
	S19V5	12,60%	5%	26,10%	1753,20
	S19V9	16,15%	9%	26,70%	1576,30
	S19V17	22,63%	17%	26,30%	1358,90
Cintra *et al.* (2014)	CT14V34	20,00%	34,00%	23,95%	1270,00
	CT14V40	25,00%	40,00%	29,23%	1210,00
Silva *et al.* (2010)	SV10V0	12,00%	0,00%	24,00%	1530,00
	SV10V2	12,00%	2,00%	30,00%	1310,00
	SV10V3,5	12,00%	3,50%	31,00%	1220,00
	SV10V5	12,00%	5,00%	36,00%	1140,00
	SV10V10	12,00%	10,00%	36,00%	1040,00

Fonte – Silva *et al.* (2010), Cintra *et al.* (2014) e Sinhorelli (2019)

Figura 6 - Relação entre densidade fresca, teor de ar, cimento e vermiculita



Fonte – Silva *et al.* (2010), Cintra *et al.* (2014) e Sinhorelli (2019)

No estudo de Silva *et al.* (2010), a autora utiliza a vermiculita em pequenos teores de 2%; 3,5%; 5% e 10%, essa quantidade fez o teor de ar incorporado nas misturas aumentar de 24% para 30%, 31%, 36% e 36%, respectivamente. E esse incremento de ar nas argamassas

reduziu a densidade fresca das mesmas de 1530 kg/m³ (SV10V0) para 1310 kg/m³ (SV10V2), 1220 kg/m³ (SV10V3,5), 1140 kg/m³ (SV10V5) e 1040 kg/m³ (SV10V10), assim aferindo, respectivamente, uma redução de 14,38%; 20%; 25% e 32%.

Diferente do estudo anterior, em Cintra *et al.* (2014) foi utilizado teores elevados de vermiculita, na ordem 34% (CT14V34) e 40% (CT14V40), e essas argamassas apresentaram teores de ar incorporados, respectivamente, de 23,95% e 29,23%, sendo menores que em Silva *et al.* (2010). Essa variação de aproximadamente 6% no teor de vermiculita e de ar incorporado, reduziu a densidade fresca de 1270 kg/m³ para 1210 kg/m³, representando uma variação de 5%. Apesar da quantidade elevada de vermiculita, Cintra *et al.* (2014) apresentaram amostras com vermiculita com teores de ar incorporado próximos a amostra sem vermiculita de Silva *et al.* (2010), a razão para este comportamento pode ser atribuída ao alto uso de cimento, que tiveram teores de 20% e 25% para as amostras CT14V34 e CT14V40, respectivamente, e também pela utilização da sílica ativa (3%) como adição mineral, assim favorecendo um refinamento dos vazios.

No estudo de Sinhorelli (2019) é percebido a redução da densidade fresca de 2115 kg/m³ para 1753 kg/m³, 1563 kg/m³ e 1358,90 kg/m³, e essas diminuições ocorrem quando se tem a vermiculita, respectivamente, nos teores de 3%, 7%, 15% e 34%. Apesar de haver redução na densidade fresca, as amostras com vermiculita apresentaram aumento fixo de aproximadamente 6% em relação à amostra padrão (20%), ou seja, apesar de haver o aumento no teor de vermiculita e redução gradativa na massa específica, as argamassas com vermiculita apresentaram teores de ar incorporado na ordem de 26%, tal acontecimento pode ser atribuído ao crescentes teores de cimento e cal, que por serem materiais com granulometrias menores favoreceram a diminuição dos vazios.

Pela análise dos trabalhos mencionados é notório que o incremento de vermiculita nas argamassas tendem a provocar um aumento no teor de ar incorporado, e consequentemente reduzir a densidade fresca delas. E nos trabalhos de Cintra *et al.* (2014) e Sinhorelli (2019) é visto que uma forma de mitigar esse aumento de ar incorporado é a utilização de maior quantidade de ligantes.

2.4.3 Densidade endurecida e porosidade

Assim como na densidade fresca, o uso da vermiculita provoca redução da massa específica endurecida, em razão da sua capacidade de incorporar vazios. A Tabela 9 e Figura 7 compila os resultados de Silva *et al.* (2010), Palomar *et al.* (2015) e Barros (2018). De modo

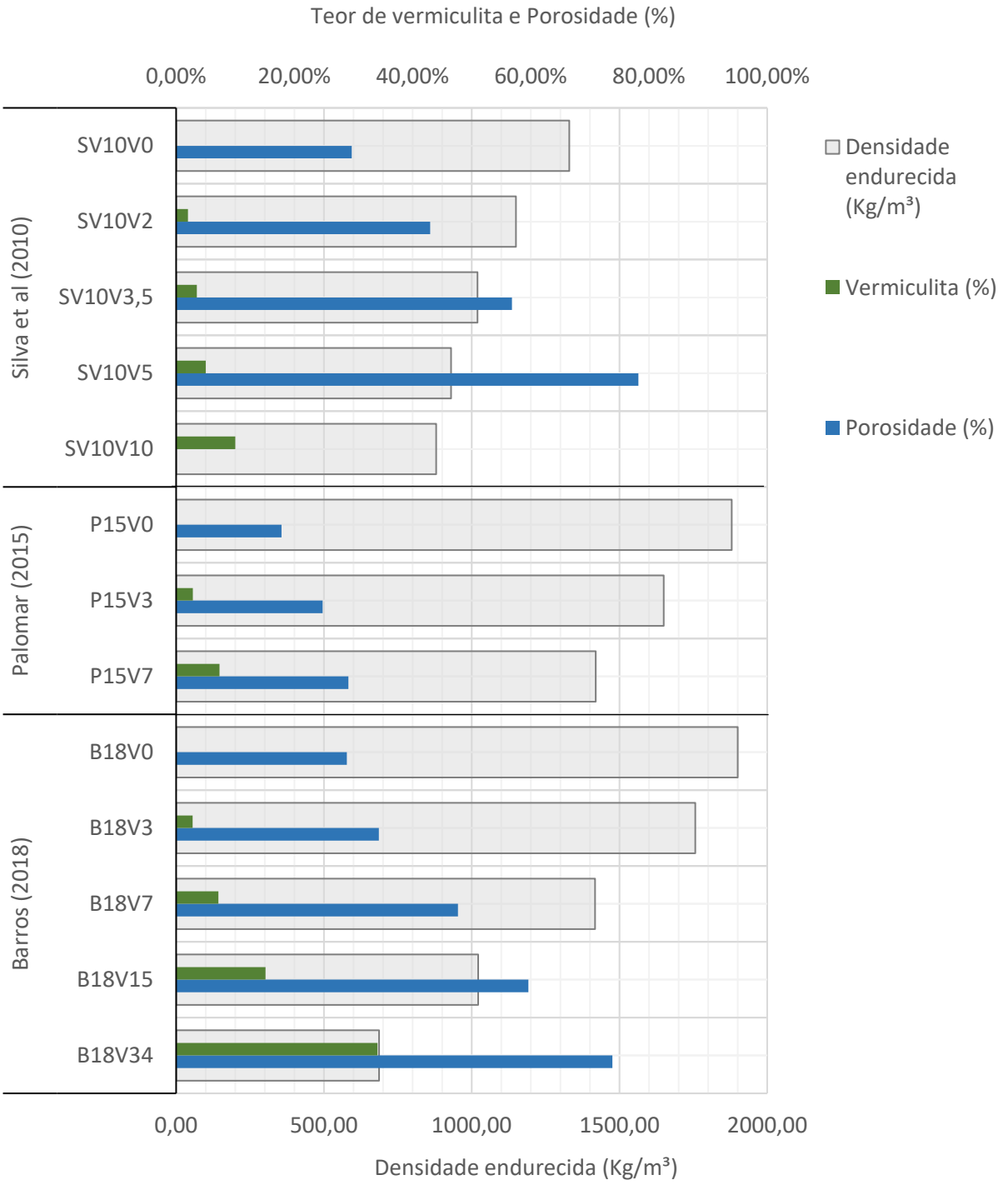
geral é visto um aumento na porosidade das argamassas conforme aumenta o teor de vermiculita, e consequentemente tem-se a redução da densidade endurecida.

Tabela 9 - Relação entre porosidade, densidade endurecida e teor de vermiculita

Autor	Amostras	Teor de vermiculita (%)	Densidade endurecida	Porosidade (%)
Silva *et al.* (2010)	SV10V0	0,00%	1330,00	29,70%
	SV10V2	2,00%	1150,00	43,00%
	SV10V3,5	3,50%	1020,00	56,80%
	SV10V5	5,00%	930,00	78,20%
	SV10V10	10,00%	880,00	-
Palomar (2015)	P15V0	0,00%	1880,00	17,83%
	P15V3	3,00%	1650,00	24,79%
	P15V7	7,00%	1420,00	29,16%
Barros (2018)	B18V0	0%	1900,30	28,90%
	B18V3	3%	1756,70	34,30%
	B18V7	7%	1417,90	47,70%
	B18V15	15%	1022,20	59,60%
	B18V34	34%	686,40	73,80%

Fonte: Silva *et al.* (2010), Palomar *et al.* (2015) e Barros (2018).

Figura 7 - Relação entre porosidade, densidade endurecida e teor de vermiculita



Fonte: Silva *et al.* (2010), Palomar *et al.* (2015) e Barros (2018)

Nos estudos de Silva *et al.* (2010), Palomar *et al.* (2015) e Barros (2018) foram elaboradas argamassas com a vermiculita substituindo parcialmente a areia, logo apresentaram maiores valores de densidade endurecida. Todavia é visível que pequenos teores de vermiculita provoca significantes redução na densidade das argamassas.

O estudo de Silva *et al.* (2010) apresentou os menores valores de densidade endurecida em comparação com Palomar *et al.* (2015) e Barros (2018). As argamassas produzidas por esta autora apresentaram teores fixo de cimento e cal, na ordem 12% cada, e a vermiculita foi incrementada nas proporções de 2%; 3,5%; 5% e 10%, este aumento nos teores de vermiculita ocasionou um crescimento na porosidade de 29,70% (SV10V0) para 43% (SV10V2); 56,80% (SV10V3,5) e 78,20% (SV10V5), porém para a amostra SV10V10 a autora não apresentou resultados de porosidade. Em razão do aumento da porosidade, as amostras SV10V0; SV10V2; SV10V3,5; SV10V5 e SV10V10 apresentaram, respectivamente, valores de densidade endurecida de 1330 kg/m³, 1150 kg/m³, 1020 kg/m³, 930 kg/m³ e 880 kg/m³, assim aferindo, respectivamente, reduções na ordem de 13,5%; 23,3%; 30% e 33,8%.

No estudo de Palomar *et al.* (2015) foi elaborado argamassas com consumo de cimento e cal fixos em 214 kg/m³ e 68 kg/m³, respectivamente, e a vermiculita variou em teores de zero a 41 kg/m³ (3%) e 82 kg/m³ (7%). Note-se que o teor de vermiculita das argamassas de Palomar *et al.* (2015) se assemelham com as de Silva *et al.* (2010), porém a porosidade aferida por Palomar *et al.* (2015) foram menores, estando na ordem de 17,83% (P15V0), 24,79% (P15V3) e 29,16% (P15V7), tal fato pode ser atribuído a uma menor presença de água nessas misturas, que é percebido comparando a relação A/C desses dois autores. Em razão da pequena presença de vermiculita e relações A/C relativamente baixas, as argamassas de Palomar *et al.* (2015) apresentam densidade endurecida maiores que os demais autores citados, porém o comportamento decrescente é visto conforme o teor de vermiculita aumenta, sendo aferido reduções na ordem de 12% e 24%, respectivamente, para as amostras P15V3 e P15V7.

No estudo de Barros (2018), a autora apresentou argamassas com teores de vermiculita na ordem de 0%, 3%, 7%, 15% e 34% em relação a massa total de material seco, para esses valores do agregado foi obtido, respectivamente, porosidade de 28,90%; 34,30%; 47,70%; 59,60% e 73,80%. Pela Tabela 6, as argamassas de Barros (2018) apresentaram porosidades maiores que Palomar *et al.* (2015), porém obteve densidades secas próximas, apresentando para as amostras B18V0, B18V3, B18V7, B18V15 e B18V34 , respectivamente, os valores de 1900 kg/m³; 1756,70 kg/m³; 1417,90 kg/m³; 1022 kg/m³ e 686,40 kg/m³. Essa semelhança na densidade seca, pode ser justificado pelo consumo crescente de ligantes nas argamassas de Barros (2018), ou seja, há um incremento de materiais densos (cimento e cal) conforme o teor consumo de vermiculita aumenta, assim mitigando a redução da densidade provocada pela vermiculita.

Pelos estudos apresentados nota-se que há uma relação direta entre a porosidade e teor de vermiculita, ou seja, conforme o teor de vermiculita na mistura aumenta, a porosidade

também aumenta. E em razão desse crescimento no teor de poros, há uma diminuição gradual na densidade endurecida das argamassas. Segundo Koksal *et al.* (2020) o aumento no consumo de aglomerante proporciona uma redução no consumo do agregado leve e consequente redução na porosidade, podendo ser uma alternativa para mitigar os efeitos negativos do uso da vermiculita. Todavia o uso da vermiculita inevitavelmente reduz a densidade endurecida, e proporciona o aumento na porosidade das argamassas, e consequentemente afeta outras propriedades como o coeficiente de capilaridade, resistência mecânica e condutividade térmica.

2.4.4 Coeficiente de capilaridade

Em seu estudo, Carneiro (1993) aponta que uma das funções principais da argamassa de revestimento é apresentar estanqueidade à água, uma vez que a penetração da água ocorre através de poros e/ou fissuras presentes no elemento de revestimento. O autor afirma que a estanqueidade é preservada através de uma argamassa com baixa capilaridade e boa densidade, através de um traço rico em aglomerante e em camadas espessas.

A capilaridade é uma das propriedades responsáveis pela água absorvida pelos revestimentos de argamassas, trata-se da movimentação de água pelos capilares sem pressão hidrostática significativa (SINHORELLI, 2019). A autora ressalva que esta propriedade está ligada com outras propriedades, como a densidade de massa no estado endurecido, teor de vazios e ar incorporado.

Salvador (2005) explica que a permeabilidade das argamassas depende da quantidade e tipo de aglomerante utilizado, da granulometria do agregado e das características do substrato, sendo diretamente proporcional à relação água/ligante, e inversamente proporcional a resistência da argamassa. Baía e Sabbatini (2000) destaca que a permeabilidade não só depende da composição e dosagem da argamassa, é necessário ter uma boa técnica de execução, boa espessura da camada de revestimento e do acabamento final. De modo geral a capilaridade depende tanto da porosidade quanto das dimensões, distribuição e continuidade dos poros (NEVILLE, 2016), e os materiais e técnicas empregadas na elaboração do revestimento que visam atenuar a porosidade da camada executada.

No caso de argamassas com uso de agregados leves é amplamente percebido um aumento na porosidade da mistura, todavia Silva *et al.* (2010) explicam que a permeabilidade e a porosidade de argamassas produzidas com agregados leves não estão diretamente ligadas à porosidade do agregado, mas à capacidade do mesmo em incorporar vazios a mistura.

Assim, como forma de analisar a permeabilidade à água das argamassas com vermiculita, utiliza-se o índice de capilaridade desses compósitos cimentícios como meio de

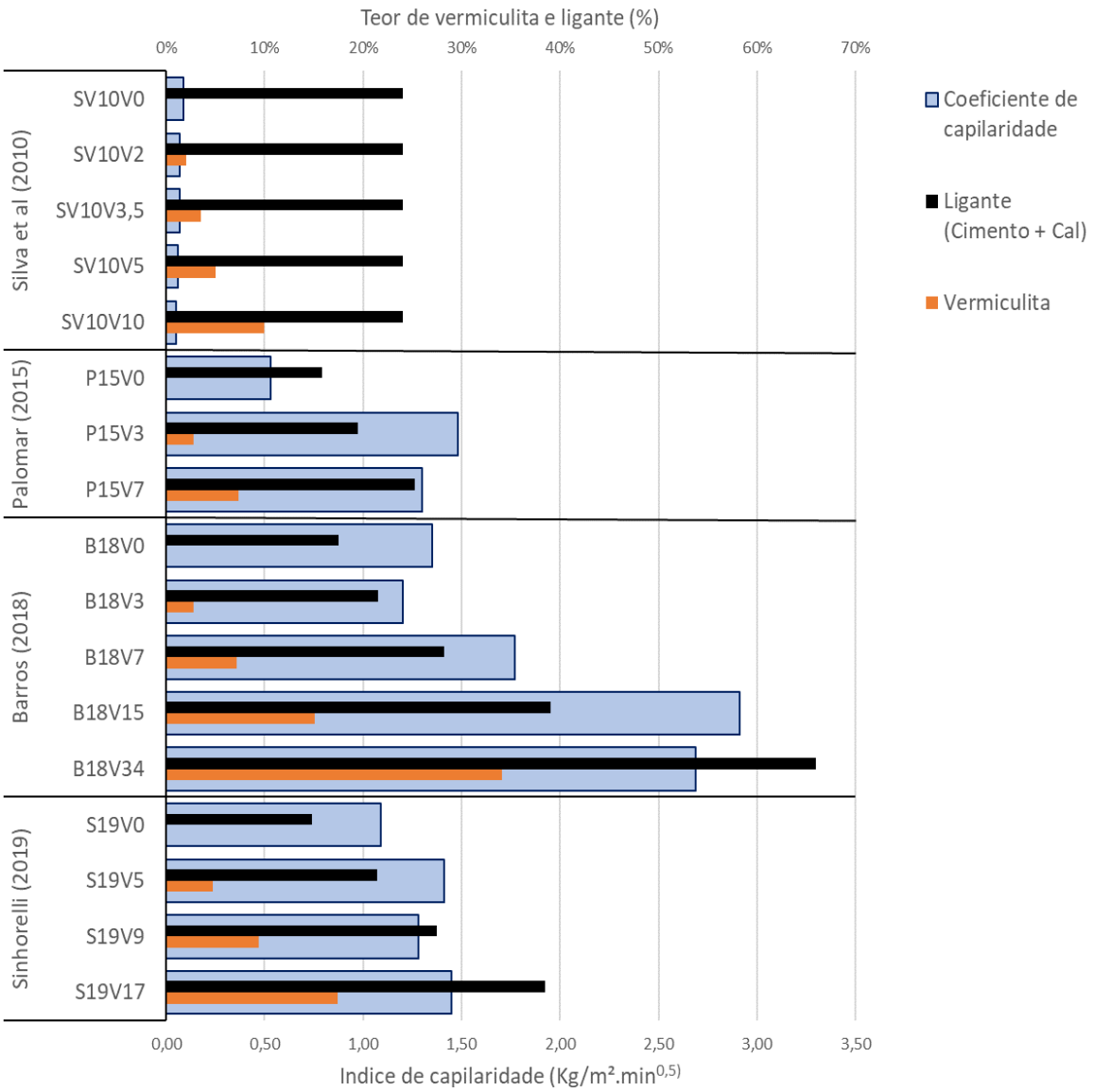
quantificar e estudar esse comportamento. Para analisar o efeito da vermiculita sobre essa propriedade foram compilados os resultados de Silva *et al.* (2010), Palomar *et al.* (2015), Barros (2018) e Sinhorelli (2019) na Tabela 10 e Figura 8, e estes resultados dos índices de capilaridade apresentados foram convertidos para uma única unidade em comum de $kg/m^2.min^{0,5}$.

Tabela 10 - Valores de índice de capilaridade e teor de vermiculita dos artigos estudados

Autor	Amostras	Teor de vermiculita (%)	Índice de capilaridade ($kg/m^2.min^{0,5}$)
Silva *et al.* (2010)	SV10V0	0,00%	0,09
	SV10V2	2,00%	0,07
	SV10V3,5	3,50%	0,07
	SV10V5	5,00%	0,06
	SV10V10	10,00%	0,05
Palomar (2015)	P15V0	0,00%	0,53
	P15V3	2,83%	1,48
	P15V7	7,35%	1,30
Barros (2018)	B18V0	0%	1,35
	B18V3	3%	1,20
	B18V7	7%	1,77
	B18V15	15%	2,91
	B18V34	34%	2,69
Sinhorelli (2019)	S19V0	0%	1,09
	S19V5	5%	1,41
	S19V9	9%	1,28
	S19V17	17%	1,45

Fonte: Silva *et al.* (2010), Palomar *et al.* (2015), Barros (2018) e Sinhorelli (2019)

Figura 8 - Relação entre os valores de índice de capilaridade e teor de vermiculita dos artigos estudados



Fonte: Silva *et al.* (2010), Palomar *et al.* (2015), Barros (2018) e Sinhorelli (2019)

De forma peculiar, o estudo de Silva *et al.* (2010) apresentou uma porosidade crescente conforme o teor de vermiculita aumentava, porém os coeficientes de capilaridade das argamassas dessa autora apresentaram um comportamento decrescente e valores significantemente baixos. No caso em questão, foi anotado para esta propriedade valores de 0,09 Kg/m².min^{0,5} (SV10V0); 0,07 Kg/m².min^{0,5} (SV10V2); 0,07 Kg/m².min^{0,5} (SV10V3,5); 0,06 Kg/m².min^{0,5} (SV10V5) e 0,05 Kg/m².min^{0,5} (SV10V10). Na Figura 8, observa-se que o teor de ligante (Cimento + Cal) são constantes para todas as misturas, assim Silva *et al.* (2010) explicam que essa redução no índice de capilaridade é em virtude da vermiculita utilizada nas

misturas apresentar uma granulometria muito fina, assim atuando como um filler, o que proporcionou o refinamento dos poros e mitigou a interligação entre eles. Entretanto outro fator que pode ter pesado nos baixos coeficientes de capilaridade é o tipo de cal utilizada, no estudo em questão foi utilizado a cal aérea e em teores mais elevados (12%) que os demais estudos, segundo Coelho *et al.* (2009) o coeficiente de capilaridade de argamassas com cal aérea é menor que com a cal hidráulica.

Diferente da pesquisa anterior, nos estudos de Palomar el al (2015), Barros (2018) e Sinhorelli (2019), é notório que a substituição do agregado convencional por vermiculita provoca o aumento na absorção por capilaridade do compósito.

Analisando os resultados obtidos de Barros (2018) percebe-se uma leve redução na capilaridade para teores de vermiculita até 3%, a autora acredita essa faixa como sendo ideal para não ter uma grande absorção de água por capilaridade, uma vez que para teores superiores a 3% nota-se uma crescente na capilaridade chegando a ser duas vezes maior do que a amostra padrão. Nos estudos de Palomar *et al.* (2015) e Sinhorelli (2019), as amostras P15V3 e S19V5 contendo, respectivamente, 3% e 5% de vermiculita apresentaram um crescimento na capilaridade em relação as amostras de referência, porém quando o teor de vermiculita aumenta de 3% para 7% no estudo de Palomar *et al*. (2015) e de 5% para 9% no estudo de Sinhorelli (2019), foi observado um leve decaimento na capilaridade na ordem de 12% e 9%, respectivamente.

Apesar de haver um aumento no teor de ligante à medida que o teor de vermiculita nas misturas aumentava, os estudos apontam que o aumento da capilaridade se dá pela porosidade gerada com o acréscimo da vermiculita na mistura. Nesse contexto Sinhorelli (2019) destaca o fator água/cimento como influente na porosidade do concreto, em vista que o uso da vermiculita traz a necessidade de aumentar a demanda de água para tornar a argamassas minimamente trabalhavel, assim a água evaporada ocasiona um maior número de vazios na estrutura interna da argamassa. Pode-se perceber o efeito do teor de água analisando o gráfico de Barros (2018), pois a autora apresentou um maior consumo de água, o que juntamente com a vermiculita contribuiu para um maior teor de vazios e índice de capilaridade.

2.4.5 Resistência à compressão e à tração na flexão

Carasek (2010) aponta que uma das principais características das argamassas deve ser a capacidade de resistir a impactos e a deformações da edificação. Para tal, é necessário que o compósito cimentício proporcione boa resistência à compressão e à tração. Estas propriedades

são influenciadas, principalmente, pelo tipo de aglomerante utilizado, fator água/cimento, tipo de agregado e composição granulométrica do mesmo.

Bauer *et al.* (2005) aponta o cimento como um dos principais ligantes para proporcionar aderência e resistência à argamassa. Todavia o autor ressalva que o uso excessivo de cimento provoca diminuição na trabalhabilidade, aumenta retração e fissuração por secagem. O uso da cal é opção para combater o efeito adverso causado pelo excesso de cimento, Rago e Cincotto (1999) e o manual de revestimento da ABCP (2002) apontam o uso da cal em pequenas proporções como benéfico em argamassas mistas, proporcionando a estes compósitos melhor trabalhabilidade, aderência e resistência à deformação, os autores afirmam que tal benefício é proporcionado devido à alta finura da cal e seu formato hexagonal, permitindo a este material maior retenção de água, assim evitando a perda da água de amassamento para o substrato ou por evaporação. Apesar de a cal melhorar a trabalhabilidade das argamassas, ela causa a diminuição da resistência à compressão (SILVA, 2006).

Porém, o uso da cal em conjunto com adições pozolânicas também proporcionam melhoramento nas propriedades de argamassas e concretos, por meio da reação pozolânica. Este processo ocorre através da interação entre o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) proveniente da hidratação da cal e a adição pozolanica, como resultado se tem a formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Grist *et al.* (2013) demonstraram em seu estudo que argamassas produzidas com cal e 30% sílica ativa conseguiram atingir 28 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de cura, superando a argamassa de referência feita com cal e cimento portland.

Outro fator influente sobre as propriedades mecânicas das argamassas a distribuição granulométrica e tipo de agregado utilizado. Carneiro e Cincotto (1999) destacam a continuidade da curva granulométrica do agregado como benéfica para o aumento da resistência mecânica das argamassas, uma vez que permite um melhor empacotamento das partículas e reduz a quantidade de vazios. Para Mehta e Monteiro (2014), o empacotamento das partículas promove uma redução na porosidade e na demanda de água, mitigando a redução das propriedades mecânicas.

Entretanto o tipo de agregado vem demonstrando ser outro fator influente nas propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios, como por exemplo os agregados leves. Rossignolo (2009) aponta que o uso desse tipo de agregado em compósitos cimentícios promove a redução das propriedades mecânicas, devido a um aumento na porosidade do material, para mitigar este efeito o autor aponta a necessidade do aumento do teor de aglomerante. No caso de argamassas com uso de vermiculita, autores como Silva *et al.* (2010), Cintra *et al.* (2014), Palomar *et al.* (2015), Barros (2018), Gündüz e Kalkan (2019) e Sinhorelli

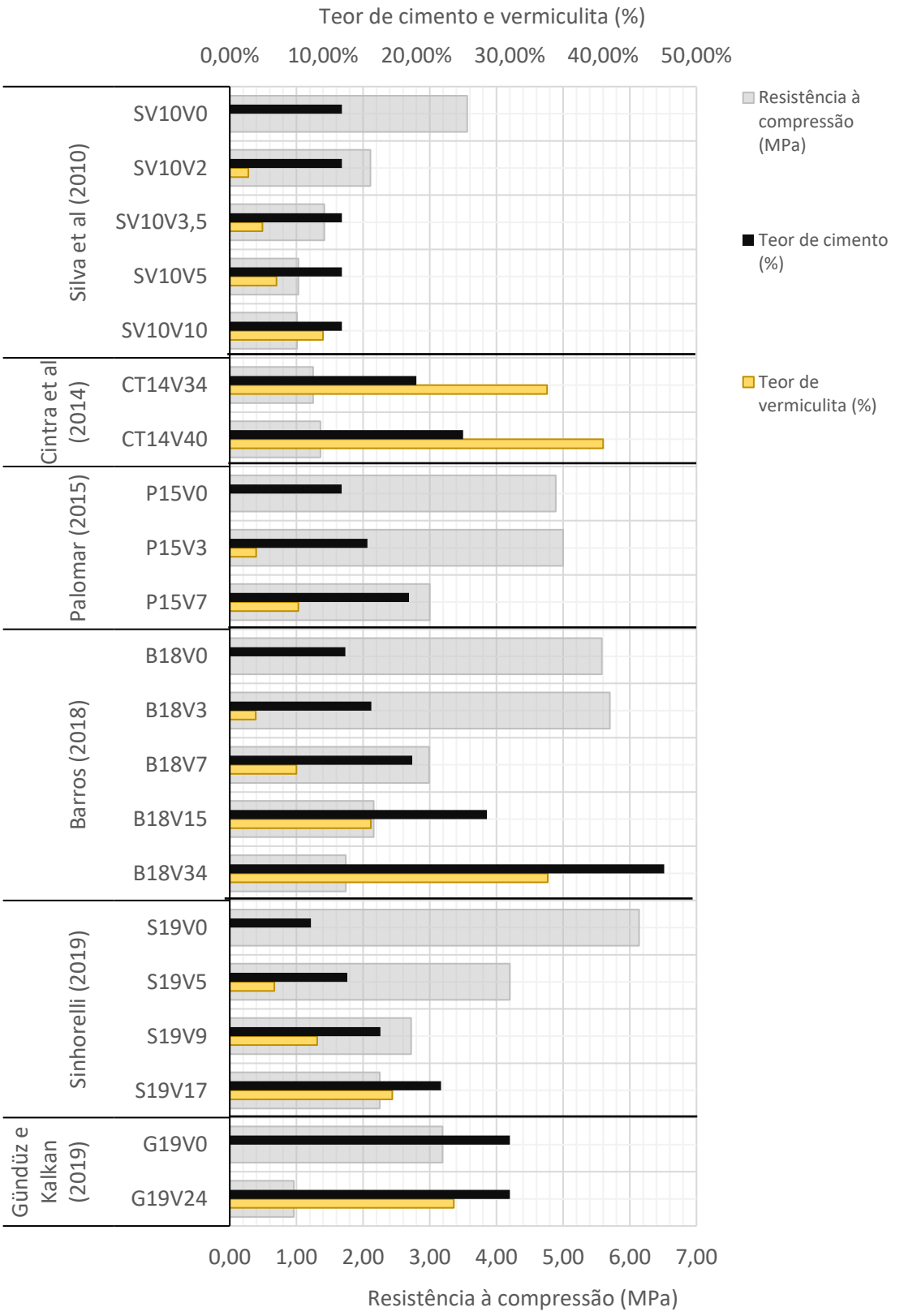
(2019) demonstram uma redução nas resistências à compressão (Tabela 11 e Fig. 9) e à tração na flexão (Tabela 12 e Fig. 10) conforme aumenta o teor de vermiculita.

Tabela 11 - Valores de resistência à compressão, teor de cimento e vermiculita dos artigos estudados.

Autor	Amostra	Teor de cimento (%)	Teor de vermiculita (%)	Resistencia à compressão (MPa)
Silva *et al.* (2010)	SV10V0	12,00%	0,00%	3,56
	SV10V2	12,00%	2,00%	2,11
	SV10V3,5	12,00%	3,50%	1,42
	SV10V5	12,00%	5,00%	1,03
	SV10V10	12,00%	10,00%	1,01
Cintra *et al.* (2014)	CT14V34	20,00%	34,00%	1,25
	CT14V40	25,00%	40,00%	1,36
Palomar (2015)	P15V0	12,00%	0,00%	4,89
	P15V3	14,76%	2,83%	5,00
	P15V7	19,19%	7,35%	3,00
Barros (2018)	B18V0	12,38%	0%	5,58
	B18V3	15,16%	3%	5,70
	B18V7	19,55%	7%	2,99
	B18V15	27,54%	15%	2,16
	B18V34	46,54%	34%	1,74
Sinhorelli (2019)	S19V0	8,70%	0%	6,14
	S19V5	12,60%	5%	4,20
	S19V9	16,15%	9%	2,72
	S19V17	22,63%	17%	2,25
Gündüz e Kalkan (2019)	G19V0	30,00%	0,00%	3,19
	G19V24	30,00%	24,00%	0,96

Fonte: Silva *et al.* (2010), Cintra *et al.* (2014), Palomar *et al.* (2015), Barros (2018), Gündüz e Kalkan (2019) e Sinhorelli (2019)

Figura 9 - Relação entre os valores de resistência à compressão, teor de cimento e vermiculita dos artigos estudados.



Fonte: Silva *et al.* (2010), Cintra *et al.* (2014), Palomar *et al.* (2015), Barros (2018), Gündüz e Kalkan (2019) e Sinhorelli (2019)

Nas argamassas que apresentam teores fixos de cimento como é o caso de Silva *et al.* (2010) e Gündüz e Kalkan (2019), foi notado um significante diminuição na resistência à compressão. No caso de Silva *et al.* (2010), a autora fixou o teor de cimento e cal, e variou o teor de vermiculita em 0%, 2%; 3,5%; 5% e 10%, essa pequena quantidade desse agregado reduziu a resistência à compressão, respectivamente, de 3,56 Mpa (SV10V0) para 2,11 MPa (SV10V2); 1,42 MPa (SV10V3,5); 1,03 MPa (SV10V5) e 1,01 MPa (SV10V10), o que representou diminuições nas ordens de 41%, 60%, 71% e 72%, respectivamente. E de forma semelhante, Gündüz e Kalkan (2019) elaboraram argamassas com teor de fixo de cimento em 30% e de cal em 7,20%, e variou o teor de vermiculita de 0% para 24%, o que ocasionou uma redução na resistência à compressão na ordem de 70%. Dessa forma, fica nítido que argamassas com teores fixo de cimento apresentam queda expressiva na resistência à compressão conforme o teor de vermiculita aumenta, assim para mitigar esse comportamento faz necessário que haja um aumento no teor de ligante conforme o teor de vermiculita aumenta.

As argamassas produzidas por Cintra *et al.* (2014), Palomar *et al.* (2015), Barros (2018) e Sinhorelli (2019) apresentaram teores de cimento e vermiculita crescentes em relação ao total de material seco. E apesar da vermiculita provocar diminuição na resistência à compressão, os teores crescentes de cimento impediram que essa redução atingisse os níveis das argamassas de Silva *et al.* (2010) e Gündüz e Kalkan (2019).

Em Palomar *et al.* (2015), apesar da autora utilizar o consumo de cimento fixo em 300 kg/m³, a representatividade desse consumo sobre o total de material seco é crescente, assim o teor de cimento variou de 12% até 19,19%, e o teor de vermiculita também apresenta o mesmo comportamento, o qual apresentou valores de 0%, 3% e 7%. Em razão do aumento do teor de cimento, amostra com 3% de vermiculita (P15V3) não apresentou diminuição na resistência à compressão. No entanto, amostra com 7% (P15V7) demonstrou uma redução na ordem de 39%.

No estudo de Barros (2018), a autora apresenta algumas amostras com teores de cimento e vermiculita semelhantes aos de Palomar *et al.* (2015), porém o consumo (kg/m³) de cimento e cal apresenta valores variados. Assim como no estudo de Palomar *et al.* (2015), a argamassa de Barros (2018) com 3% de vermiculita não apresentou mudança significante na resistência à compressão, contudo o aumento no teor de vermiculita para 7%, 15% e 34% provocou reduções na resistência à compressão, respectivamente, na ordem de 46%, 61% e 69%. Comparando os estudos de Palomar *et al.* (2015) e Barros (2018) com o de Silva *et al.* (2010), percebe-se que para as argamassas com vermiculita não apresentem resistências significantemente baixas é necessário que haja um alto consumo de cimento.

O estudo de Sinhorelli (2019) também apresentou um consumo de cimento crescente à medida que o teor de vermiculita também aumentava de 0% para 5%, 9% e 17%. Essa variação de vermiculita na mistura fez a resistência à compressão diminuir, respectivamente, de 6,14 MPa para 4,20 MPa; 2,72 MPa e 2,25 MPa. Comparando os resultados de Palomar *et al.* (2015) e Barros (2018) com os de Sinhorelli (2019), fica percebido que argamassas com consumo de cimento mínimo de 214 kg/m³ e teor de vermiculita até 3% total de material seco não apresentam grandes mudanças na resistência à compressão, porém as argamassas com consumo de cimento menor que 200 kg/m³ e/ou teor de vermiculita maior que 3% apresentam redução na resistência à compressão. E apesar do aumento do teor de cimento mitigar a redução na resistência à compressão, o estudo de Cintra *et al.* (2014) observa que quando se tem argamassas com teores de vermiculita crescentes e maiores que o de cimento, as resistências à compressão das argamassas apresentam valores baixos, no estudo em questão o autor apresentou as amostras CT14V34 com 20% de cimento e 36% de vermiculita, e a CT14V40 com 25% de cimento e 40% de vermiculita, essas argamassas apresentaram, respectivamente, 1,25 MPa e 1,36 MPa de resistência à compressão.

Assim como na resistência à compressão, a vermiculita causa influência negativa sobre a resistência à tração das argamassas. Os estudos de Silva *et al.* (2010), Barros (2018) e Sinhorelli (2019) demonstram reduções gradativas nessa propriedade conforme o teor de vermiculita aumenta.

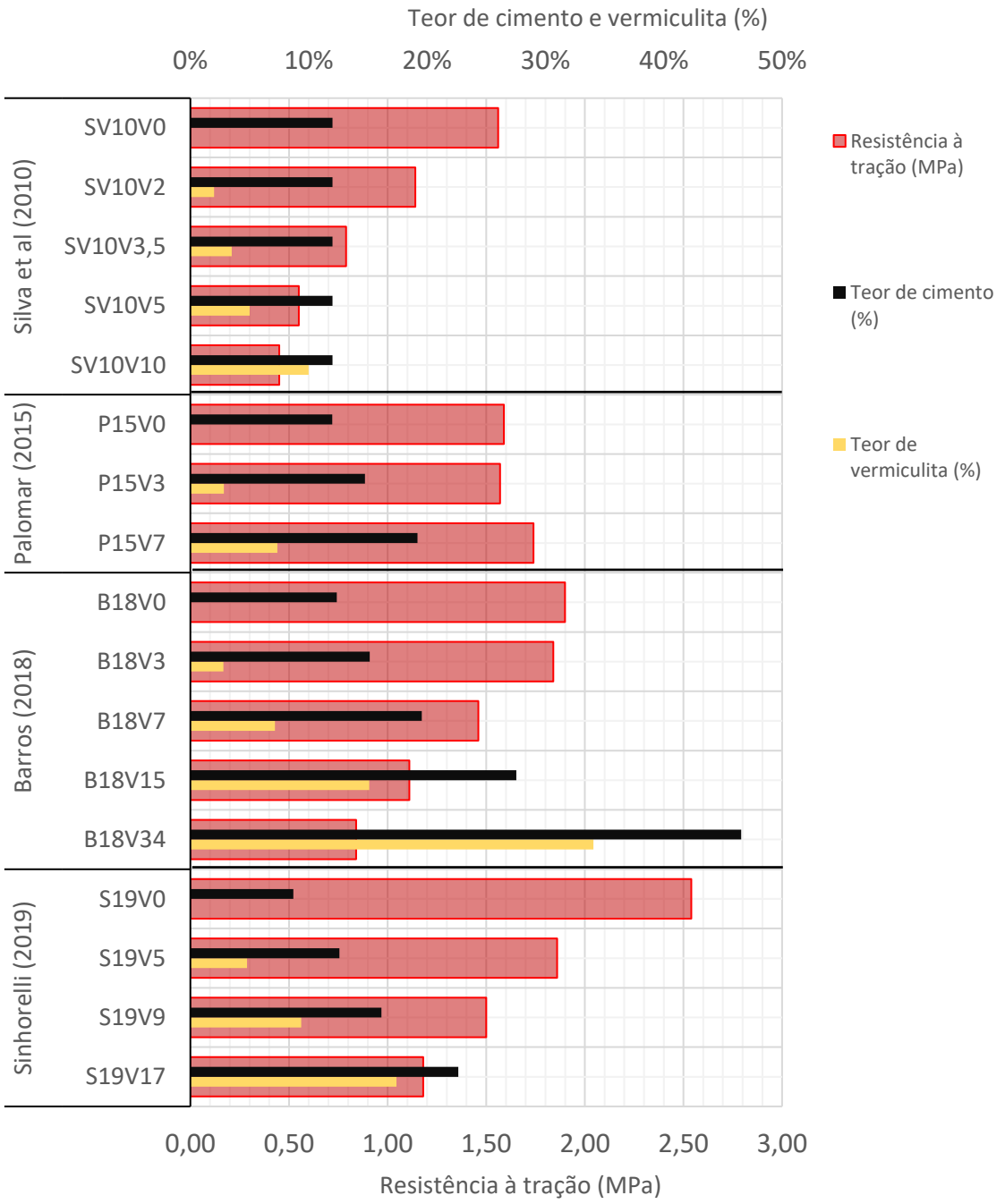
Tabela 12 - Valores de resistência à tração, teor de cimento e vermiculita dos artigos estudados.

Autor	Amostra	Teor de cimento (%)	Teor de vermiculita (%)	Resistencia à tração (MPa)
Silva *et al.* (2010)	SV10V0	12,00%	0,00%	1,56
	SV10V2	12,00%	2,00%	1,14
	SV10V3,5	12,00%	3,50%	0,79
	SV10V5	12,00%	5,00%	0,55
	SV10V10	12,00%	10,00%	0,45
Palomar (2015)	P15V0	12,00%	0,00%	1,59
	P15V3	14,76%	2,83%	1,57
	P15V7	19,19%	7,35%	1,74
Barros (2018)	B18V0	12,38%	0%	1,90
	B18V3	15,16%	3%	1,84
	B18V7	19,55%	7%	1,46
	B18V15	27,54%	15%	1,11
	B18V34	46,54%	34%	0,84

Sinhorelli (2019)	S19V0	8,70%	0%	2,54
	S19V5	12,60%	5%	1,86
	S19V9	16,15%	9%	1,50
	S19V17	22,63%	17%	1,18

Fonte: Silva *et al.* (2010), Koksal *et al.* (2015), Barros (2018), Sinhorelli (2019) e Koksal *et al.* (2020)

Figura 10 - Relação entre os valores de resistência à tração, teor de cimento e vermiculita dos artigos estudados.



Fonte: Silva *et al.* (2010), Koksal *et al.* (2015), Barros (2018), Sinhorelli (2019) e Koksal *et al.* (2020)

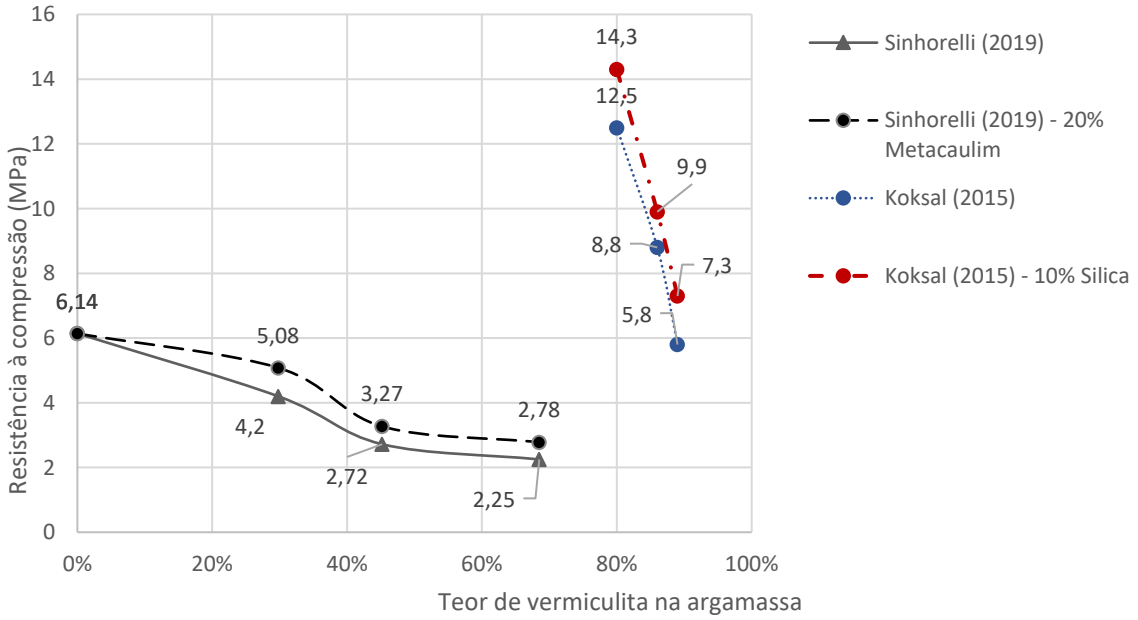
No estudo de Silva *et al.* (2010), fica percebido uma fixação no teor de cimento e cal, e variação no teor de vermiculita de 0% até 10%. Esse aumento da vermiculita nas misturas provocou uma redução na resistência à tração de 1,56 MPa (SV10V0) até 0,45 MPa (SV10V10). Assim, como na resistência à compressão, uma forma de mitigar a diminuição da resistência à tração é por meio do aumento no teor de cimento das misturas, isso fica nítido nos estudos de Palomar *et al.* (2015), Barros (2018) e Sinhorelli (2019).

As argamassas de Palomar *et al.* (2015) tiveram consumo de cimento fixo em 214 kg/m³, apesar do consumo desse aglomerante ser fixo, a participação dele sobre o total de material seco foi crescente conforme a vermiculita era incrementada, como consequência disso as argamassas de Palomar *et al.* (2015) não apresentaram diminuição na resistência à tração.

Nos estudos de Barros (2018) e Sinhorelli (2019), as autoras apresentaram consumo de cimento crescente conforme o consumo de vermiculita aumentava, logo a representação desse aglomerante sobre o total de material seco apresentou comportamento crescente. Em Barros (2018), o teor de cimento variou de 12,38% até 46,54%, e o teor de vermiculita passou de 0% até 34%, e mesmo com aumento no consumo de cimento, a resistência à tração das argamassas dessa autora obtiveram valores decrescentes, variando de 1,90 MPa (B18V0) até 0,84 MPa (B18V34). Já na pesquisa de Sinhorelli (2019), o teor de cimento variou de 8,70% até 22,63%, e o de vermiculita de 0% até 17%, o que proporcionou reduções na resistência à tração de 2,54 MPa até 1,18 MPa.

A redução nas propriedades mecânicas, é justificado por Silva *et al.* (2010), devido capacidade incorporação de vazios da vermiculita, uma vez que esse material é poroso e fino, assim promovendo uma maior demanda de água, consequentemente gerando mais vazios, após a evaporação da água. Rossignolo (2009), aponta como solução para se trabalhar com material leva e controlar a demanda de água, é o pré-saturamento do agregado, para evitar que o mesmo retira água destinada para hidratação do cimento. Outra solução a ser considerada, é a utilização de adições minerais, como proposto por Koksal *et al.* (2015) e Sinhorelli (2019), ambos os autores demonstram que o uso de adições minerais promove um refinamento dos poros, reduzindo-os, assim beneficiando o aumento das propriedades mecânicas das argamassas, como mostrado na Figura 11. Os resultados de Sinhorelli (2019) que o uso de metacaulim, em um traço 1:1:6 com 20% da adição mineral, promove o aumento da resistência à compressão na faixa de 20% a 23%. E no estudo de Koksal *et al.* (2015) houve um aumento na resistência à compressão em um intervalo entre 12% e 25% com o uso de sílica ativa na proporção de 15% dessa adição em traços 1:4, 1:6 e 1:8.

Figura 11 - Relação entre teor de vermiculita na mistura e resistência à compressão em amostras com e sem adição mineral



Fonte: Koksal *et al.* (2015) e Sinhorelli (2019) (Adaptado pelo Autor, 2021)

2.4.6 Condutividade térmica

Estudos sobre o uso de revestimento térmicos são amplamente desenvolvidos na comunidade cientifica, em seu estudo Bastos (2017) mostrou que o uso de argamassas com vermiculita para revestimento externo e interno proporcionam a redução no consumo de energia para resfriar um cômodo em aproximadamente 20%. Carneiro (1993) aponta que a condutividade térmica do material está relacionada a sua massa específica, e aponta que em um sistema de vedação, o isolamento térmico é garantido por uma baixa condutividade térmica dos elementos constituintes e pela garantia de não umedecimento.

Por apresentarem um índice de vazios maior, argamassas com vermiculita, assim como outros agregados leves e incorporadores de ar tendem a apresentar baixa condutividade térmica, a ABNT NBR 15220 (2003) especifica que argamassas comuns, argamassas celulares a base de cimento e argamassa de gesso com vermiculita apresentam condutividade térmica (λ) de 1,15 W/(m.K), 0,40 W/(m.K) e 0,30 W/(m.K), respectivamente. Nas argamassas de cimento com uso de vermiculita, o ar presente no agregado e nos vazios formados na mistura endurecida, possui baixa condutividade térmica, e por consequência, alta resistência à passagem de calor (BARROS, 2018).

Ainda em seu estudo, na Tabela 13, Barros (2018) demonstrou que a substituição da areia por vermiculita contribuiu para a diminuição da condutividade térmica, capacidade

térmica e difusividade térmica, e proporcionou aumento na resistividade térmica. Estas propriedades representam, respectivamente: a quantidade de fluxo de calor que atravessa uma unidade de espessura do material, capacidade de um material em armazenar calor, a velocidade com que o calor se difunde por meio de um material, o quanto o material resiste ao fluxo de calor. Estas propriedades estão relacionadas com a adição da vermiculita na mistura aumenta a quantidade de vazios nas argamassas, e o ar contido nos vazios atua como uma barreira térmica, uma vez que a condutividade térmica do ar é baixa (aproximadamente 0,03 W/m.K). Para efeitos práticos, o uso de argamassas com vermiculita para revestimentos reduz a troca de calor entre faces das paredes e proporciona um melhor isolamento térmico dos ambientes.

Tabela 13 - Propriedade térmica das argamassas com vermiculita.

Propriedades	**Vermiculita (%)**				
	0%	**25%**	**50%**	**75%**	**100%**
Condutividade térmica (W/m.K)	1,34	1,08	0,62	0,34	0,24
Resistividade térmica (m.K/W)	0,746	0,927	1,605	2,981	4,256
Capacidade calorífica volumétrica (MJ/m³K)	2,42	2,18	1,50	1,32	1,23
Difusividade térmica (mm²/s)	0,57	0,50	0,42	0,26	0,19

Fonte: Barros (2018)

Nos trabalhos de Palomar *et al.* (2015), Koksal *et al.* (2015), Barros (2018), Sinhorelli (2019), Gündüz e Kalkan (2019) e Koksal *et al.* (2020) é demonstrado uma relação indireta entre o teor de vermiculita e condutividade térmica das argamassas leves. A diminuição da condutividade térmica conforme aumenta-se o teor de vermiculita, é justificado pelo aumento da porosidade das argamassas provocado pela adição desse agregado leve. Nas Figuras 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19 são relacionados os resultados de condutividade térmica e porosidade dos autores Palomar *et al.* (2015), Koksal *et al.* (2015), Barros (2018) e Koksal *et al.* (2020), por meio deles fica nítido que há uma relação entre o aumento da porosidade das argamassas e a diminuição da condutividade térmica.

No estudo de Palomar *et al.* (2015) (Fig. 12), é mostrado uma baixa condutividade térmica para a argamassas sem vermiculita (0,37 W/m.K), apesar disso, com a adição da vermiculita nos teores de 3% e 7% a condutividade térmica reduziu para 0,27 W/m.K e 0,20 W/m.k, Esta redução tem uma forte correlação com o aumento da porosidade (Fig. 13), e é definida por uma função de 1° grau com um alto coeficiente de determinação ($R^2 = 1$).

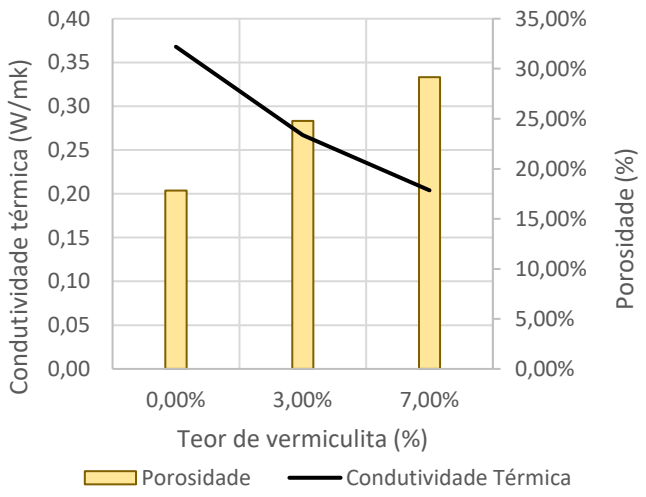
Na pesquisa se Barros (2018), as argamassas apresentaram teores de vermiculita de 0%, 3%, 7%, 15% e 34%, e obtiveram valores de porosidade variando de 28,90% até 73,80%, esse aumento de porosidade provocou uma redução na condutividade térmica de 1,34 W/m.k a 0,24 W/m.k (Fig. 14). E assim como no estudo de Palomar *et al.* (2015), no estudo de Barros (2018) também há uma grande correlação entre a porosidade e condutividade térmica (Fig. 15), porém a função que melhor explica a correlação dessas duas variáveis é do tipo exponencial, que obteve um coeficiente de determinação igual a 0,997.

As argamassas produzidas no estudo de Koksal *et al.* (2015) apresentaram porosidade variável de 37,50%, 39,49% e 43,20% conforme o teor de vermiculita aumentava, respectivamente, de 16% para 22% e 30%, esse aumento na quantidade de poros reduziu a condutividade térmica de 0,61 W/m.K até 0,25 W/m.K, e esses valores de porosidade e condutividade térmica também demonstraram uma forte correlação e obtiveram um coeficiente de determinação igual a 0,9995.

Diferente do estudo anterior, em Koksal *et al.* (2020) as argamassas apresentaram teores maiores de vermiculita, estes variaram de 75% a 88%, e consequentemente a porosidade também foi maior e variou de 45% a 65%, proporcionando uma redução na condutividade térmica de 0,38 W/m.K até 0,10 W/m.K.

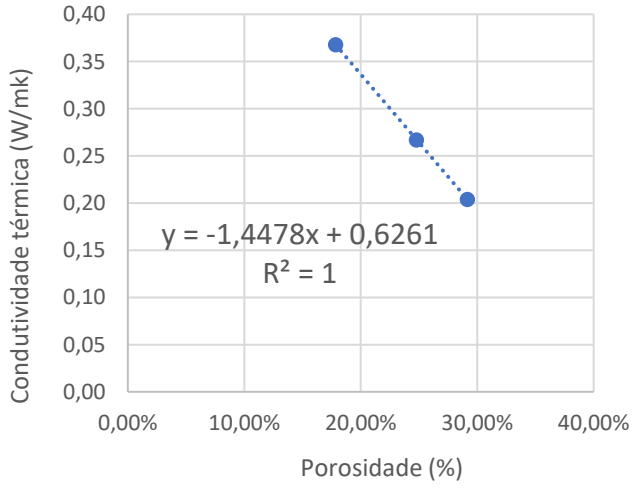
Nos estudos supracitados, é notório que as argamassas com vermiculita apresentaram maiores teores de porosidade, isso pode ser atribuído a natureza porosa e alta capacidade absorção de água desse agregado. Assim, conforme o teor de vermiculita aumentava, a porosidade também apresentava comportamento crescente. Como consequência desse aumento de porosidade, foi observado reduções na condutividade térmica das argamassas, e por meio dos coeficientes de determinação (R^2), nota-se uma forte correlação entra a porosidade e condutividade térmica das argamassas.

Figura 12 - Relação entre teor de vermiculita, condutividade térmica e porosidade do estudo de Palomar *et al.* (2015)



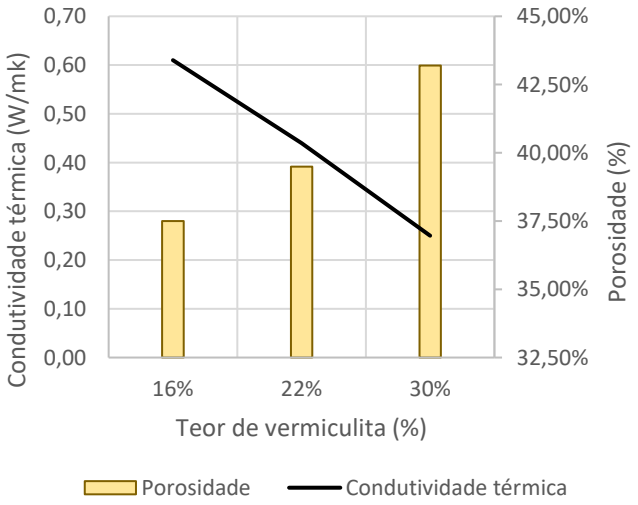
Fonte: Palomar *et al.* (2015)

Figura 13 - Relação entre condutividade térmica e porosidade do estudo de Palomar *et al.* (2015)



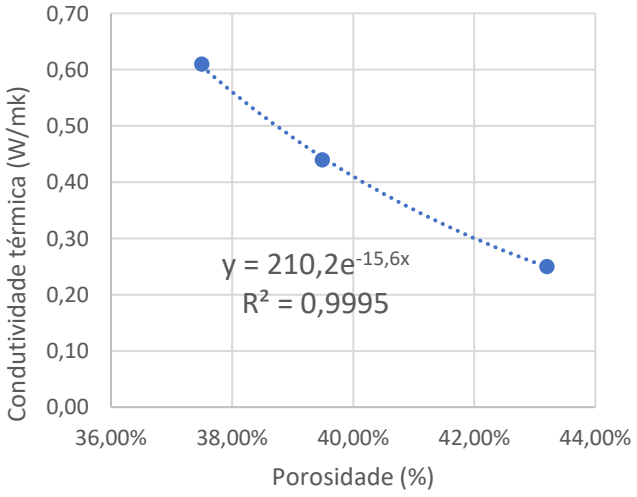
Fonte: Palomar *et al.* (2015)

Figura 14 - Figura 14 - Relação entre teor de vermiculita, condutividade térmica e porosidade do estudo de Koksal *et al.* (2015)



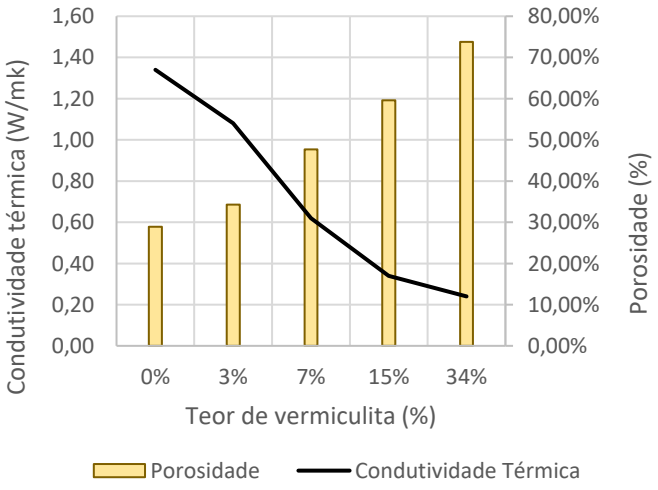
Fonte: Koksal *et al.* (2015)

Figura 15 - Relação entre condutividade térmica e porosidade do estudo de Koksal *et al.* (2015)



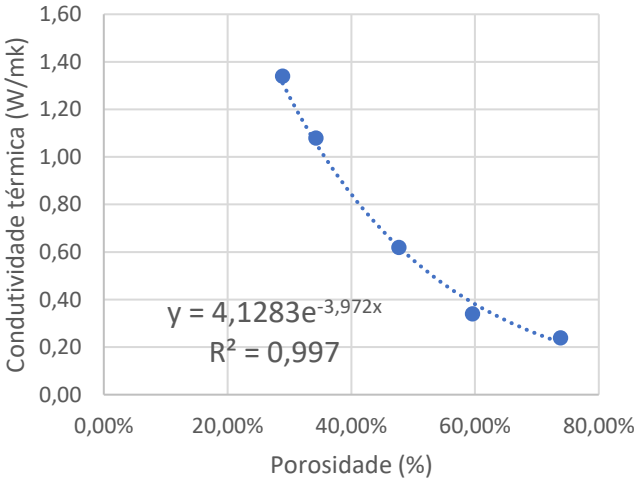
Fonte: Koksal *et al.* (2015)

Figura 16 - Relação entre teor de vermiculita, condutividade térmica e porosidade do estudo de Barros (2018)



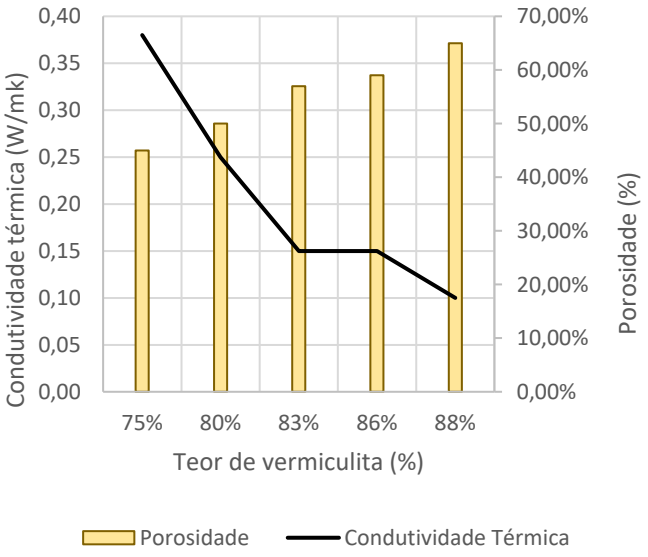
Fonte: Barros (2018)

Figura 17 - Relação condutividade térmica e porosidade do estudo de Barros (2018)



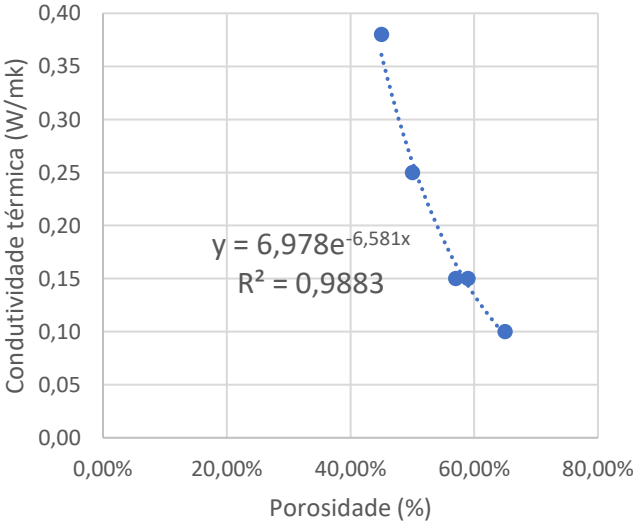
Fonte: Barros (2018)

Figura 18 - Relação entre teor de vermiculita, condutividade térmica e porosidade do estudo de Koksal *et al.* (2020)



Fonte: Koksal *et al.* (2020)

Figura 19 - Relação condutividade térmica e porosidade do estudo de Koksal *et al.* (2020)



Fonte: Koksal *et al.* (2020)

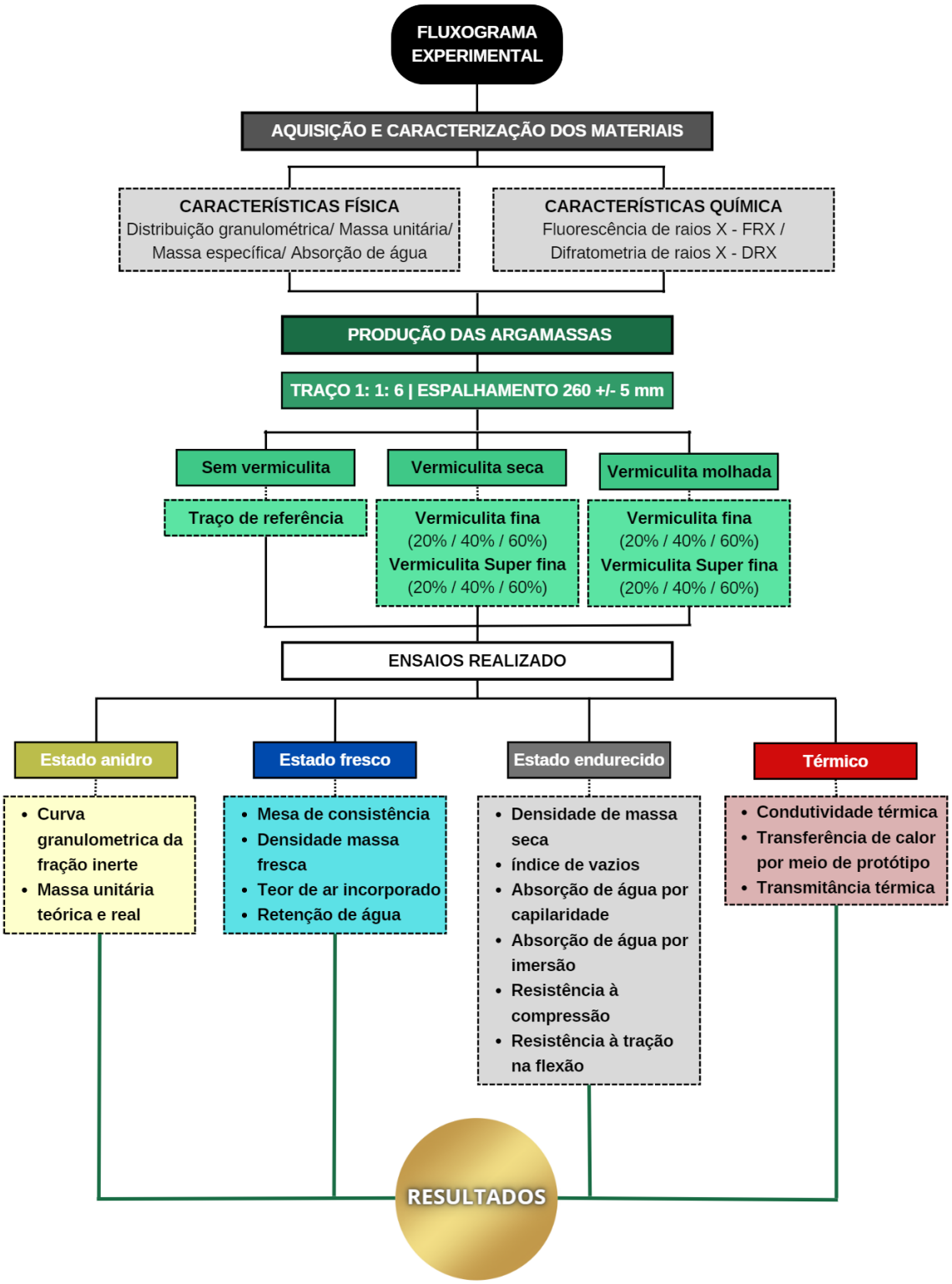
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A metodologia dessa pesquisa teve como base os estudos de Barros (2018) e Sinhorelli (2019), a partir do estudo do estado da arte, foi estabelecido o traço básico em 1:1:6 em volume (Cimento: cal: agregado), tendo sido realizado a substituição parcial da areia por vermiculita nas proporções de 20%, 40% e 60%, e a determinação do teor de água da mistura foi estabelecido para a quantidade de água necessária para atingir um espalhamento de 260 ± 5 mm.

Com o objetivo de mitigar e analisar os efeitos da vermiculita nas argamassas, investigou-se a influência de diferentes granulometrias (fina e superfina) e das condições de umidade da vermiculita (seca e pré-umedecida) sobre as propriedades das argamassas nos estados anidro, fresco e endurecido. Assim, as amostras contendo vermiculita foram divididas em dois grandes grupos: um com uso da vermiculita seca e outro com vermiculita úmida. Cada grupo, por sua vez, foi subdividido de acordo com a classificação granulométrica da vermiculita utilizada (fina e superfina).

Para o estudo e averiguação das propriedades das argamassas elaboradas seguiu-se o fluxograma experimental representado na Figura 20. De modo geral foi realizado os ensaios tradicionais para a determinação das propriedades nos estados fresco e endurecido, com o diferencial dos ensaios térmicos.

Figura 20 - Fluxograma experimental



Fonte: Autor (2023)

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento

O ligante hidráulico utilizado na pesquisa foi o cimento Portland de Alta resistência inicial (CP V ARI), normatizado pela NBR 16697 (ABNT, 2018), fabricado e fornecido pela empresa Nacional.

A escolha desse tipo de cimento se justifica pelo fato desse aglomerante possuir um valor mínimo de adição mineral, descartando a influência das adições sobre as propriedades das argamassas.

3.1.2 Cal

A cal utilizada foi a tipo CH I, normatizada pela NBR 7175 (ABNT, 2003), e fabricada pela Mibra Minérios.

3.1.3 Agregados

Para a produção das argamassas foram utilizados dois tipos de agregados (Figura 21), a areia natural, obtida no comércio local da cidade de João Pessoa/ PB, e as vermiculitas expandidas, sendo a vermiculita de granulometria fina fabricada e fornecida pela empresa Maia Macedo, e a com granulometria super fina foi fabricada pela empresa Brasil Minérios.

Figura 21 - Agregados Utilizados: Areia natural (a), Vermiculita fina (b) e Vermiculita Super fina (c)

(a) (b) (c)

Fonte: Autor (2023)

3.1.4 Água

A água utilizada para hidratação dos componentes das argamassas foi a potável, fornecida pela companhia de Águas e Esgoto da Paraíba (CAGEPA).

3.2 Métodos

O procedimento experimental deste trabalho iniciou-se com a caracterização dos materiais em estado anidro, com o objetivo de determinar as propriedades físicas dos insumos utilizados. Posteriormente, foram definidos os traços e as proporções de dosagem dos materiais. Por fim, realizaram-se os ensaios para avaliação das propriedades no estado fresco, no estado endurecido e do desempenho térmico.

3.2.1 Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados na pesquisa foram caracterizados quanto aos seus aspectos físicos, químicos e mineralógicos, para este objetivo foram utilizados os ensaios contidos na Tabela 14.

Tabela 14 - Ensaios e normas empregados para a caracterização da vermiculita.

Ensaios	Descrição	NBR
Análise Física	Distribuição granulométrica - Areia	NBR NM 248/ 2003
	Distribuição granulométrica - Vermiculita	NBR 11.355/ 2015
	Massa unitária	NBR NM 45/2006
	Massa específica - Agregados	NBR NM 52/ 2009
	Massa específica - Finos	NBR 16605/ 2017
	Absorção de água - Vermiculita	-
Análise química	Fluorescência de raios-x - FRX	-
Análise mineralógica	Difratometria de raios-x - DRX	-

Fonte: Autor (2023)

a) Análise física

O estudo das propriedades físicas dos materiais iniciou-se pela determinação das massas unitárias (NBR NM 45/2006) dos mesmos, as quais foram determinadas por meio de um recipiente de massa e volume conhecidos, este foi preenchido por completo com cada material e realizado leituras da massa total do sistema (Recipiente + material), e em seguido foi subtraído a massa do recipiente, e os resultados foram divididos pelo volume do mesmo, este procedimento foi feito três vezes para cada material e a média dos resultados foi o valor considerado para a massa unitária.

Posteriormente, realizou-se o ensaio de massa específica dos materiais. Para a areia e os aglomerantes (cimento e cal), seguiram-se as metodologias estabelecidas nas normas NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR 16605 (ABNT, 2017), respectivamente. No entanto, para a vermiculita — por se tratar de um material leve — utilizou-se a metodologia adotada por Barros (2018) e Sinhorelli (2019), que consiste no uso de uma proveta de vidro graduada e um infusor de chá (Figura 22). O procedimento teve início com a determinação da massa do infusor seco e o volume de água por ele deslocado. Em seguida, determinou-se a massa do conjunto "infusor + vermiculita" e o volume de água deslocado por ele. Com esses valores, foi possível calcular a massa específica da vermiculita. Os resultados obtidos nos referidos ensaios foram compilados na Tabela 15.

Figura 22 - Ensaio para determinação das massas específicas das vermiculitas

Fonte: Autor (2023)

Tabela 15 - Propriedades físicas dos materiais utilizados na pesquisa.

Material	**Massa Específica (kg/dm³)**	**Massa Unitária (kg/dm³)**
Cimento	3,024	0,974
Cal	2,581	0,804
Areia	2,622	1,539
Vermiculita Fina	0,690	0,141
Vermiculita Super Fina	0,615	0,155

Fonte: Autor (2023)

Outra característica investigada neste trabalho foi a absorção de água das vermiculitas utilizadas, devido à sua elevada porosidade e capacidade de absorção. Para esse ensaio, foi

elaborado um recipiente vazado (Figura 23), revestido externamente com tecido e internamente com filtro de papel, de modo a impedir a fuga do material.

Inicialmente, o recipiente vazio foi imerso em um balde com água para umedecer o papel e o tecido, sendo pesado em seguida. Depois, o recipiente foi totalmente preenchido com 250 g de vermiculita seca e submerso novamente em um balde com água. O conjunto "recipiente + vermiculita" foi pesado em diferentes intervalos: 10, 20, 30, 60, 90 e 120 minutos, e após 3, 6, 9, 12, 24, 36 e 48 horas.

Os resultados (Figura 24) demonstram que as vermiculitas fina e superfina apresentaram, nos primeiros 10 minutos, absorção de água de 297% e 279%, respectivamente, em relação à massa seca do material. A estabilização da absorção foi observada após 24 horas de ensaio, com valores finais de 317% (vermiculita fina) e 369% (vermiculita superfina).

Figura 23 – Recipiente para ensaio de absorção de água da vermiculita aberto (A) e fechado (B)

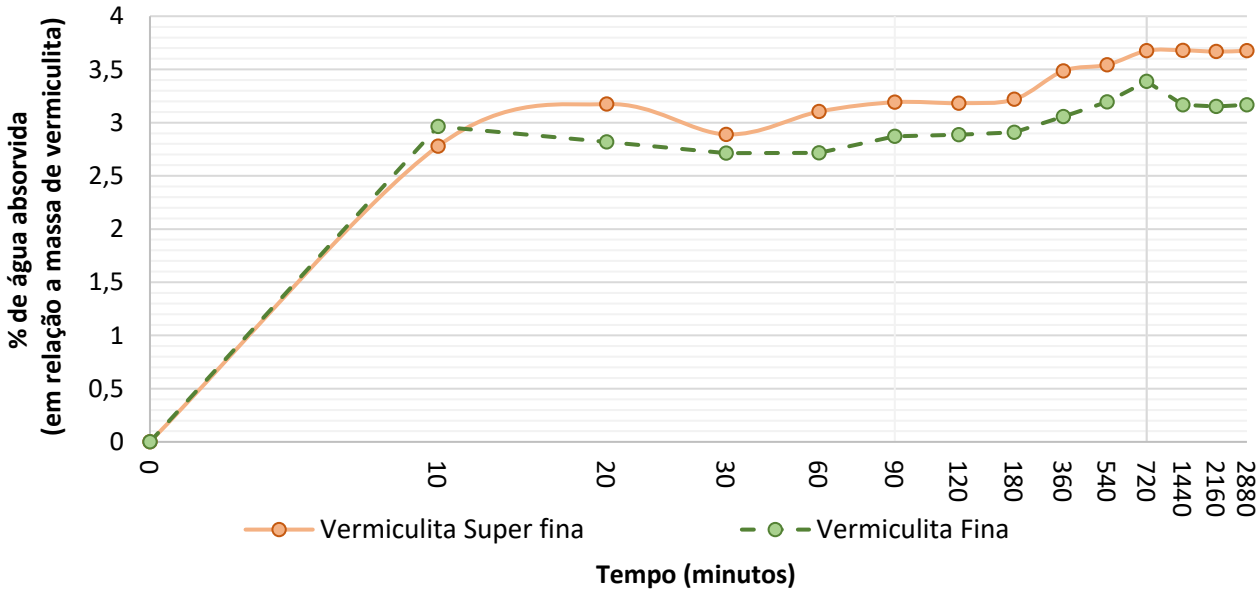
(A)

Fonte: Autor (2023)

(B)

Fonte: Autor (2023)

Figura 24 - Resultados do ensaio de absorção de água das vermiculitas

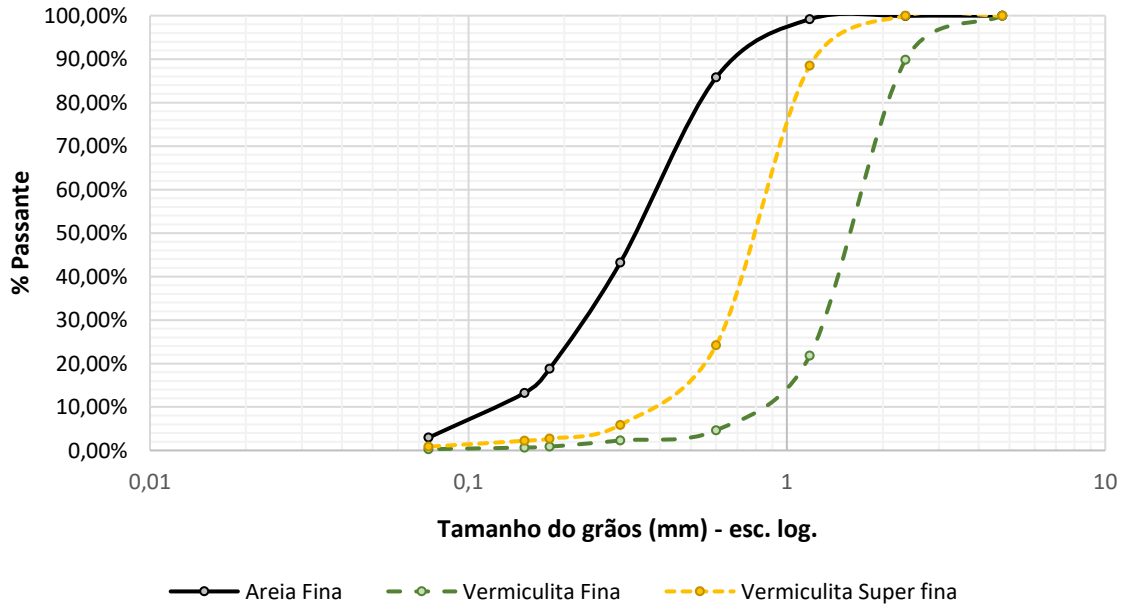


Fonte: Autor (2023)

Por fim, foi caracterizada a distribuição granulométrica dos agregados. O ensaio seguiu a metodologia da NBR NM 28 (ABNT, 2003) para a areia e da NBR 11.355 (ABNT, 2015) para as vermiculitas. Os procedimentos descritos nessas normas são semelhantes, diferindo apenas na quantidade de material utilizada no ensaio, pois, segundo a NBR 11.355, recomenda-se o uso de uma quantidade menor de vermiculita, devido ao seu maior volume em relação à areia convencional.

Com os resultados obtidos, foram elaborados os gráficos das curvas granulométricas dos agregados (Figura 25). Observa-se que a areia apresenta granulometria mais fina, com diâmetro máximo de 1,18 mm. A vermiculita superfina, por sua vez, apresenta granulometria mais grossa que a areia, com diâmetro máximo de 2,36 mm e 75,78% das partículas iguais ou maiores que 0,6 mm. Já a granulometria da vermiculita fina apresenta distribuição ainda mais grossa, com diâmetro máximo de 4,75 mm e 78,20% das partículas iguais ou maiores que 1,18 mm. Com base nesses resultados, confirma-se que as vermiculitas utilizadas neste estudo pertencem, de fato, às classificações "fina" e "superfina" segundo os padrões brasileiros.

Figura 25 - Curvas granulométricas dos agregados utilizados



Na mecânica dos solos, segundo Pinto (2006), a uniformidade e a curvatura da distribuição granulométrica dos agregados podem ser avaliadas com base nos coeficientes de uniformidade (Cu) e de curvatura (Cc). O coeficiente de uniformidade é definido como a razão entre os diâmetros correspondentes a 60% (D60) e 10% (D10) do material passante (Equação 1), indicando, de forma quantitativa, se o material é “bem graduado” ou “mal graduado”. Em

O coeficiente de curvatura, por sua vez, é definido como a razão entre o quadrado do diâmetro correspondente a 30% do material passante (D30) e o produto entre D60 e D10 (Equação 2). Esse valor indica o formato da curva granulométrica e possíveis descontinuidades ou concentrações de grãos.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{(Equação 1)} \qquad CC = \frac{(D_{30})^2}{D_{60}.D_{10}} \quad \text{(Equação 2)}$$

Para definição de parâmetros ideais e classificação dos agregados, Caputo (1988) estabelece que para:

- Coeficiente de uniformidade (Cu):
  - Cu < 5 → material muito uniforme;
  - 5 < Cu < 15 → uniformidade média;
  - Cu > 15 → pouco uniforme.
- Coeficiente de curvatura (Cc):
  - 1 < Cc < 3 → material bem graduado;
  - Cc < 1 ou Cc > 3 → material mal graduado.

Com base nesses critérios, os agregados utilizados nesta pesquisa apresentaram coeficiente de uniformidade inferior a 5 e coeficiente de curvatura entre 1 e 3, sendo, portanto, classificados como materiais muito uniformes e bem graduados.

A graduação do agregado é um fator que interfere diretamente nas propriedades fresca e endurecida das argamassas, pois os agregados bem graduados, quando misturados com cimento, produzem concreto com grande compacidade e resistência mecânica (CARNEIRO e CINCOTTO, 1999). No entanto, esse parâmetro não pode ser considerado como suficiente para análise da influência do agregado na mistura, pois outras características, como a composição mineralógica, microestrutural e dimensões dos grãos são importantes para avaliação do desempenho da argamassa (BARROS, 2018). No caso das vermiculitas, devido a sua estrutura porosa, e consequente baixa massa específica e alta absorção de água, as argamassas produzidas com esse tipo de agregado terão as suas características afetados, tanto no cálculo do consumo de materiais, quanto nas propriedades do estado fresco e endurecido, como mostrado nas pesquisas de Silva *et al.* (2010), Palomar *et al.* (2015), Barros (2018) e Sinhorelli (2019).

b) Análise química e mineralógica

As análises química e mineralógica foram realizadas, respectivamente, pelos ensaios de FRX (Fluorescência de raios X) e DRX (Difração de raios X). A determinação da composição química dos materiais (Tabela 16 e 17) foi feita de forma semiquantitativa, expressa em teores de óxidos, por meio de um equipamento SHIMADZU modelo EDX-7000.

Tabela 16 - Composição química dos ligantes com base do ensaio de FRX.

Material	CaO (%)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	SO_3 (%)	Outros (%)
CP V - ARI	78,389	10,777	3,872	4,824	2,138
CAL CH-I	95,940	2,897	0,787	-	0,378

Fonte: Autor (2023)

A cal utilizada nas misturas não apresentou teores de MgO, mas registrou 95,94% de CaO. Segundo a NBR 7175 (ABNT, 2003), essa cal pode ser classificada como do tipo CH-I. Da mesma forma, no ensaio de FRX do cimento CP-V ARI, também não foram detectados teores de MgO, impossibilitando aferir se o cimento atende aos requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018), que estabelece um limite máximo de 6,5% para o óxido de magnésio. Além desse parâmetro, a norma também limita o teor de trióxido de enxofre (SO_3) a 4,5%. Na caracterização química do cimento, esse composto apresentou um valor de 4,824%, excedendo o limite normativo em 7,2%.

Tabela 17 - Composição química dos agregados com base do ensaio de FRX

Material	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	TiO_2 (%)	ZrO_2 (%)	P_2O_5 (%)	CaO (%)	K_2O (%)	Outros (%)
Areia	85,960	1,308	4,587	4,562	2,144	1,105	0,072	0,262
Vermiculita Fina	42,715	33,130	3,413	0,228	1,201	8,716	8,220	2,378
Vermiculita Super fina	43,405	44,885	3,940	0,052	-	3,387	1,341	2,991

Fonte: Autor (2023)

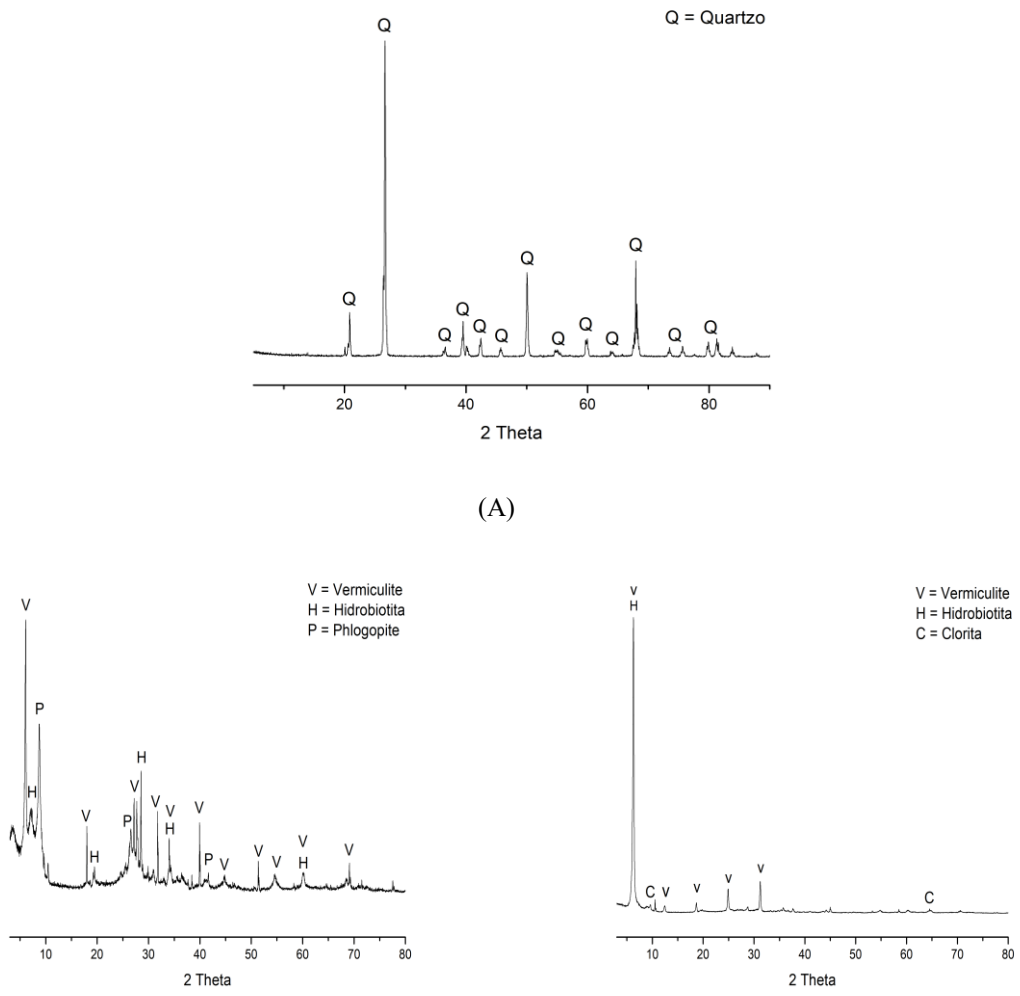
Na análise por fluorescência de raios X dos agregados, como esperado, foi detectada alta concentração de dióxido de silício (SiO_2) na areia, representando 85,96% de sua massa. Nas vermiculitas fina e superfina, foram detectadas altas concentrações de dióxido de silício e óxido de ferro III. Os teores de SiO_2 nas vermiculitas fina e superfina foram, respectivamente, de 42,715% e 43,405%. Já os teores de Fe_2O_3 foram de 33,13% para a vermiculita fina e de 44,885% para a vermiculita superfina.

Em termos de dióxido de silício, as vermiculitas utilizadas nesta pesquisa apresentaram valores próximos aos encontrados por Nascimento (2008) e Koksal et al. (2015). Quanto ao

óxido de ferro III, os teores observados foram semelhantes aos da vermiculita estudada por Barros (2018). Esse alto teor de ferro pode ser explicado pelo fato de a vermiculita pertencer ao grupo dos minerais micáceos, compostos por vários tipos de silicatos hidratados de magnésio, alumínio e ferro (BARROS, 2018).

A análise mineralógica foi feita para as amostras da areia natural, vermiculita fina e vermiculita super fina por meio da difração de raios-x desses materiais, este ensaio foi realizado num equipamento Siemens Bruker D5000, que utiliza radiação CuKα, voltagem de 30kv e corrente de 30Ma. E sobre a velocidade de leitura, foi adotado para a areia natural uma velocidade de 1°/min num intervalo de 5° a 90° 2θ, e para as vermiculitas foi utilizada uma velocidade de 0,5°/min em um intervalo de 3° a 80° 2θ. Por fim, a identificação dos picos foi feita no software X'Pert HighScore Plus, e nas Figura 26 é mostrado os difratogramas da areia natural, vermiculita fina e vermiculita super fina.

Figura 26 - Difratograma da areia natural (A), vermiculita fina (B) e vermiculita super fina (C).



(A)

(B)

(C)

Fonte: Autor (2023)

Ao analisar os difatogramas, observa-se que a areia natural apresenta picos predominantes de quartzo. A vermiculita fina apresentou fases predominantes de vermiculita e hidrobiotita, e com alguns picos de flogopita, assim como observado no estudo de Koksal *et al.* (2015). E a vermiculita super fina, assim como na pesquisa de Barros (2018), apresentou predominantemente picos de Vermiculita e uma fase de hidrobiotita. Com relação às vermiculitas percebeu-se que as amostras são cristalograficamente diferentes, isso pode ser justificado em razão das jazidas onde as rochas extraídas para a produção desse agregado foram diferentes, consequentemente os minareis presentes na rocha original possuem cristalografias diferentes.

3.2.2 Produção das argamassas

Em razão da alta absorção de água da vermiculita, este estudo dividiu as argamassas produzidas em dois grupos: um utilizou a vermiculita totalmente seca, e o outro a empregou pré-umedecida, com o objetivo de verificar a influência desse agregado, nesses dois estados, sobre o consumo total de água e as propriedades das argamassas. Em cada grupo, foram produzidos seis traços contendo vermiculita, nos quais se variaram o teor e a granulometria do material.

Com base nos trabalhos de Barros (2018) e Sinhorelli (2019), é notório que a substituição da areia por vermiculita em proporções superiores a 60% provoca perdas significativas nas propriedades das argamassas. Para mitigar essas perdas, torna-se necessária a dosagem de traços com elevados teores de cimento. Assim como as autoras mencionadas, nesta pesquisa foi utilizado um traço 1:1:6 (cimento: cal: agregado), comumente empregado em obras de construção civil.

Na Tabela 18, é apresentada a composição dos traços formulados (em volume). Neles, a areia natural foi parcialmente substituída por vermiculita de diferentes granulometrias (fina e superfina), nas proporções de 20%, 40% e 60%. Para fins de comparação, foi também dosada uma argamassa de referência com 0% de substituição.

Precedendo a definição dos traços, foi realizada uma pré-análise da trabalhabilidade das argamassas, a fim de determinar os consumos ideais de água que permitissem obter espalhamentos próximos ao limite de 260 ± 5 mm. Para isso, os traços propostos foram preparados, e, durante o processo de mistura, foi adicionada água gradualmente, com a respectiva medição do espalhamento para cada volume de água. Dessa forma, foi possível determinar a quantidade necessária de água para alcançar o espalhamento desejado

Entretanto, é importante destacar que, nas argamassas com vermiculita pré-umedecida, observou-se que a água absorvida pela vermiculita durante o processo de molhagem era parcialmente liberada durante a mistura. Assim, essa água absorvida foi considerada como parte integrante da água de amassamento das argamassas.

Após a definição do consumo necessário de cada material, foram dosadas as argamassas definitivas, e para cada traço foi produzido 6 corpos de provas com dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm e utilizado a quantidade material presente na Tabela 18, assim foi totalizado 13 traços analisados e 78 corpos de provas produzidos.

Tabela 18 - Composição das dosagens realizadas

Grupo	Amostra	Granulometria da vermiculita	Traço em volume (Cim.: Cal: Areia: Verm.)	Traço unitário (massa) (Cim.: Cal: Areia: Verm.: água)
Sem vermiculita	REF.	-	1:1:6:0	1: 0,825: 9,48: 0: 1,733
Vermiculita seca	V20F	Fina	1:1:4,8:1,2	1: 0,825: 7,58: 0,17: 1,78
	V40F	Fina	1:1:3,6:2,4	1: 0,825: 5,69: 0,35: 1:87
	V60F	Fina	1:1:2,4:3,6	1: 0,825: 3,79: 0,52: 1,97
	V20SF	Super fina	1:1:4,8:1,2	1: 0,825: 7,58: 0,19: 1,74
	V40SF	Super fina	1:1:3,6:2,4	1: 0,825: 5,69: 0,38: 1:80
	V60SF	Super fina	1:1:2,4:3,6	1: 0,825: 3,79: 0,57: 1,86
Vermiculita pré-umedecida	V20F	Fina	1:1:4,8:1,2	1: 0,825: 7,58: 0,17: 1,78
	V40F	Fina	1:1:3,6:2,4	1: 0,825: 5,69: 0,35: 1:86
	V60F	Fina	1:1:2,4:3,6	1: 0,825: 3,79: 0,52: 1,99
	V20SF	Super fina	1:1:4,8:1,2	1: 0,825: 7,58: 0,19: 1,80
	V40SF	Super fina	1:1:3,6:2,4	1: 0,825: 5,69: 0,38: 1,90
	V60SF	Super fina	1:1:2,4:3,6	1: 0,825: 3,79: 0,57: 1,96

Fonte: Autor (2023)

Para o preparo das misturas, foi necessário determinar a quantidade exata de cada material. A partir dos valores de massa unitária, o traço básico em volume foi convertido para um traço unitário em massa. Em seguida, com base na densidade de massa no estado fresco de cada mistura, foi calculado o consumo de cada componente em kg/m³ (Tabela 19).

Tabela 19 - Consumo de material (Kg) por m³ de argamassa

Grupo	**Amostras**	**Cimento**	**Cal**	**Areia**	**Vermiculita**	**água**
Sem vermiculita	REF.	156,16	128,90	1480,47	-	270,63
Vermiculita seca	V20F	172,59	142,46	1308,97	34,87	307,21
	V40F	188,29	155,43	1071,04	76,09	352,10
	V60F	208,14	171,81	789,31	126,17	410,04
	V20SF	173,53	143,25	1316,16	33,14	301,95
	V40SF	191,59	158,15	1089,84	73,18	344,87
	V60SF	211,87	174,89	803,47	121,38	394,09
	V20F	173,59	143,29	1316,60	35,08	308,13

	V40F	193,87	160,04	1102,81	78,35	360,61
	V60F	217,82	179,80	826,02	132,03	433,46
Vermiculita pré-umedecida	V20SF	173,30	143,05	1314,35	33,09	311,94
	V40SF	193,36	159,61	1099,90	73,85	367,39
	V60SF	219,16	180,91	831,08	125,55	429,55

Fonte: Autor (2023)

3.2.3 Propriedades das argamassas no estado anidro

a) Massa unitária teórica e Massa unitária

No estudo das propriedades no estado anidro das argamassas, foram aferidas medições sobre a massa unitária teórica (MU_T) e massa unitária real (MU_R) das frações inertes e das argamassas (Ligante + fração inerte) produzidas. As MU_T foram calculadas por meio das equações 3 e 4.

Para a determinação da massa unitária real, utilizou-se um volume de material que obedecesse às proporções volumétricas dos traços adotados. Com o auxílio de uma proveta graduada, a mistura foi cuidadosamente vertida no recipiente, e aferiu-se o volume ocupado. A MUR foi então calculada pela razão entre a massa total da mistura e o volume ocupado na proveta.

$$V_{Comp.} = \frac{m_{comp.}}{\gamma_{comp.}} \qquad \text{Equação 3}$$

$$MU_T = \frac{\sum m_{comp.}}{\sum V_{comp.}} \qquad \text{Equação 4}$$

Onde:

m_{comp} = massa seca de cada componente da argamassa (g)

V_{comp} = Volume de cada componente da argamassa (cm³)

γ_{comp} = massa unitária de cada componente da argamassa (g/cm³)

3.2.4 Propriedades das argamassas no estado fresco

a) Índice de consistência

O índice de consistência foi determinado conforme a metodologia descrita na NBR 13276 (ABNT, 2016), buscando-se atingir um espalhamento próximo ou dentro do intervalo especificado de 260 ± 5 mm. Para alcançar esse objetivo, o teor de água da mistura é um fator crucial. Assim, para determinar a quantidade adequada de água em cada traço, volumes

conhecidos de água foram adicionados gradualmente à mistura, até que esta atingisse a consistência desejada.

Com os resultados obtidos na mesa de consistência, para cada volume de água adicionado, foi possível traçar um gráfico correlacionando o teor de substituição do agregado à relação água/cimento.

b) Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa e o teor de ar incorporado foram calculados seguindo a metodologia da NBR 13278 (ABNT, 2005). A densidade de massa consiste na relação entre a massa da argamassa que ocupa um recipiente de volume conhecido. Para determinar o teor de ar foi utilizado a equação 5, apresentada na norma referida

$$A = 100\ X\ \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \qquad \text{Equação 5}$$

Onde:

A = Teor de ar incorporado na mistura (%)

d = Densidade de massa da argamassa no estado fresco (kg/m³)

d_t= Densidade teórica da argamassa

A norma estabelece que a densidade teórica das argamassas dosadas e obra é calculada pela equação 6:

$$d_t = \frac{\sum mi}{\sum \frac{mi}{\gamma i}} \qquad \text{Equação 6}$$

Onde:

mi = massa seca de cada componente da argamassa, incluindo a água (g)

γi = massa específica de cada componente da argamassa (g/cm³)

c) Retenção de água

A retenção de água foi determinada com base na metodologia descrita na NBR 13277 (ABNT, 2005). Para esse procedimento, foi utilizado o conjunto de peças e equipamentos ilustrado na Figura 27, composto por bomba de vácuo, funil de Büchner, disco de papel-filtro, vacuômetro e frasco cônico. Com base nos resultados obtidos no ensaio, a retenção de água foi calculada por meio das Equações 7 e 8.

Figura 27 - Conjunto de equipamentos utilizados para o ensaio de retenção de água

Fonte: Autor (2023)

$$R_a = \left[1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF(m_a - m_v)}\right] x\ 100 \qquad \text{Equação 7}$$

Sendo:

$$AF = \frac{m_w}{m - m_w} \qquad \text{Equação 8}$$

Onde:

m_a = Massa do conjunto com argamassas, em gramas;

m_s = Massa do conjunto após a sucção, em gramas;

m_v = Massa do conjunto vazio, em gramas;

AF = Fator água/argamassa;

m_w = Massa total de água acrescentada à mistura, em gramas;

m = Soma das massas dos componentes anidros no caso de argamassa de obra, em gramas;

3.2.5 Propriedades das argamassas no estado endurecido

a) Densidade de massa

A determinação da densidade de massas seguiu o procedimento estabelecido na NBR 13280 (ABNT, 2005). Para o procedimento foram utilizados 3 corpos de prova prismáticos (4

cm x 4 cm x 16 cm) com 28 dias de cura, e o cálculo consiste na relação entre a massa do corpo de prova (g) e o volume do mesmo (m³) como mostra a equação 9.

$$\rho_{máx} = \frac{m_{cp}}{V_{cp}} \qquad \text{Equação 9}$$

Onde:

$\rho_{máx}$ = Densidade de massa [kg/m³]

m_{cp} = Massa do corpo de prova [kg]

V_{cp} = Volume do corpo de prova [m³]

b) Absorção de água por capilaridade

A absorção por capilaridade foi determinada conforme a metodologia descrita na NBR 9779 (ABNT, 2012). O resultado dessa propriedade foi obtido a partir da média das absorções por capilaridade de três corpos de prova.

Para a realização dessa análise, inicialmente foram determinadas as massas das amostras secas. Em seguida, elas foram imersas em uma lâmina de água com altura de 5 ± 1 mm (Figura 28), sendo registradas as massas após 24 horas e após 7 dias de imersão. Com base nesses resultados, a absorção por capilaridade foi calculada por meio da Equação 10.

Figura 28 - Ensaio de absorção de água por capilaridade sendo realizado

Fonte: Autor (2023)

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \qquad \text{Equação 10}$$

Onde:

C = Absorção de água por capilaridade $[g/dm^2]$;

m_{sat} = Massa saturada do corpo de prova que permanece com a uma das faces em contato com a água (g);

m_s = Massa saturada do corpo de seco (g);

S = Área da seção transversal (dm²)

c) Absorção de água por imersão e índice de vazios

Para a determinação da absorção de água por imersão, foi utilizada a metodologia estabelecida pela NBR 9778 (ABNT, 2005), a qual determina o valor dessa propriedade com base na média da absorção de água por imersão de duas amostras de cada traço. Os valores foram calculados por meio da Equação 11.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} X\ 100 \qquad \text{Equação 11}$$

Onde:

A = Absorção de água por imersão [%];

m_{sat} = Massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

m_s = Massa da amostra seca em estufa.

Utilizando os parâmetros medidos nos ensaios da NBR 9778 (ABNT, 2005), foi calculado também o índice de vazios dos traços dosados, através da equação 12.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i}\ x\ 100 \qquad \text{Equação 12}$$

Onde:

I_v = Índice de vazios [%];

m_{sat} = Massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

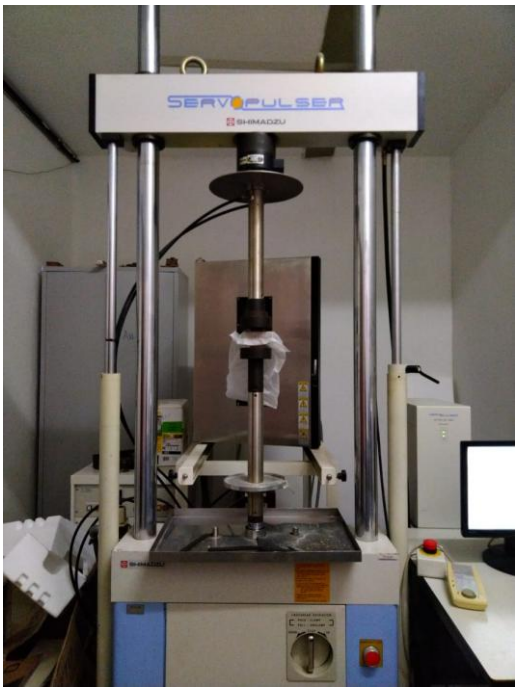
m_s = Massa da amostra seca em estufa;

m_i = Massa da amostra saturada imersa em água após fervura medida em balança hidrostática.

d) Resistência à compressão e à tração na flexão

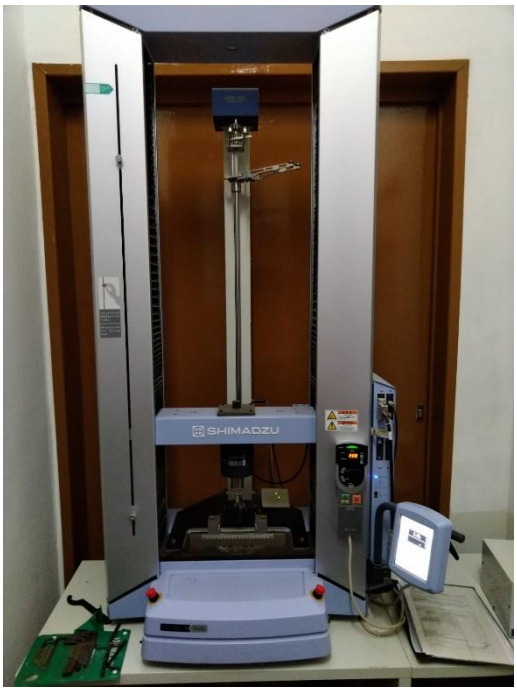
As propriedades mecânicas das argamassas foram avaliadas por meio dos ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão, aos 28 dias de idade, conforme a metodologia descrita na NBR 13279 (ABNT, 2005). Para esses procedimentos, foram utilizadas duas prensas hidráulicas da marca Shimadzu: uma com capacidade para 50 kN (Figura 29) e outra com capacidade para 10 kN (Figura 30), empregadas, respectivamente, nos ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão.

Figura 29 - Prensa hidráulica da Shimadzu com capacidade para 50 kN



Fonte: Autor (2023)

Figura 30 - Prensa hidráulica da Shimadzu com capacidade para 10 kN



Fonte: Autor (2023)

Os ensaios de resistência mecânica iniciaram-se com a medição da resistência à tração na flexão. Para isso, foram utilizadas três amostras de cada traço, submetidas a carregamento até a ruptura, com velocidade de aplicação da carga de 50 ± 10 N/s, utilizando uma máquina universal de ensaios. Com base nos resultados obtidos, foi possível determinar o valor da resistência à tração na flexão das argamassas por meio da Equação 13.

$$R_f = \frac{1{,}5 \; x \; F_f \; x \; L}{40^3} \qquad \text{Equação 13}$$

Onde:

R_f é a resistência à tração na flexão, em megapascals (MPa);

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons (N);

L é a distância entre os suportes, em milímetros;

Para a análise da resistência à compressão, utilizaram-se as metades dos três corpos de prova anteriormente ensaiados à tração, totalizando seis amostras por traço. Assim como no ensaio de tração na flexão, os corpos de prova foram submetidos a carregamento até a ruptura, porém com velocidade de aplicação da carga de 500 ± 50 N/s. A resistência à compressão foi então determinada com base nos resultados obtidos, utilizando-se a Equação 14.

$$R_C = \frac{F_C}{1600} \qquad \text{Equação 14}$$

Onde:

R_c é a resistência à compressão, em megapascals (MPa)

F_c é a carga máxima aplicada, em newtons (N);

1600 é a área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 40 mm x 40 mm, em milímetros quadrados (mm²)

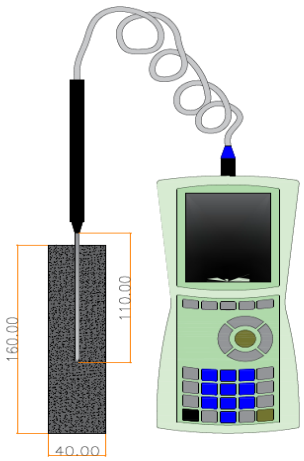
3.2.6 Ensaios térmicos

3.2.6.1 Condutividade térmica

A avaliação do desempenho térmico das argamassas produzidas foi realizada por meio da medição da condutividade térmica das amostras. Para esse fim, foi utilizado o equipamento ISOMET 2114 (Figura 31). Os ensaios foram conduzidos em corpos de prova prismáticos com dimensões de 4 × 4 × 16 cm, nos quais foram realizados furos perpendiculares à menor face, com dimensões adequadas à introdução da sonda de agulha (Figura 31).

Segundo o manual do fabricante (APPLIED PRECISION, 2011), o princípio de funcionamento do equipamento baseia-se na resposta térmica do material a impulsos de fluxo de calor emitidos pela sonda de agulha. Esse fluxo é gerado por meio de aquecimento elétrico, promovido por uma resistência interna à própria sonda.

Figura 31 - Desenho esquemático do ensaio com o ISOMET 2114



Fonte: Autor (2023)

3.2.6.2 Transferência de calor por meio de protótipo

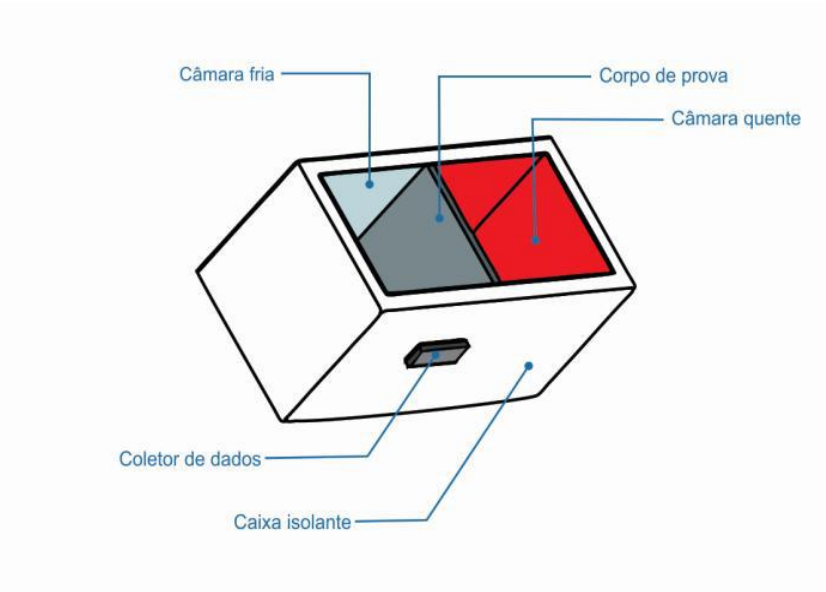
Para simular e avaliar o desempenho térmico do sistema de vedação de uma edificação, a NBR 15575 (ABNT, 2013) recomenda o uso de um protótipo. Para esse ensaio, foram utilizadas placas com dimensões de 30 × 30 × 3 cm, produzidas com as argamassas elaboradas (Figura 32). Por meio do protótipo, foi possível aferir a diferença de temperatura entre as faces das placas e calcular a taxa de transferência de calor.

Figura 32 - Placa de argamassa utilizada para o ensaio de transferência de calor

Fonte: Autor (2023)

O equipamento e a metodologia utilizados neste ensaio foram baseados no estudo de Barros (2018) (Figuras 33 e 34), no qual foi empregada uma caixa de isopor com dimensões internas de 71 cm de comprimento, 46 cm de largura e 32 cm de altura, com paredes de 4 cm de espessura. Essa caixa foi dividida em duas câmaras, separadas pela placa de argamassa, com o intuito de simular um ambiente fechado de uma edificação com revestimento exposto a uma fonte de calor, representando a incidência solar.

Figura 33 - Modelo esquematizado do protótipo proposto por Barros (2018)



Fonte: Barros (2018)

Figura 34 - Protótipo em funcionamento

Fonte: Autor (2023)

O ensaio utilizou o método da placa quente protegida, no qual a placa foi posicionada a 40 cm de distância de uma fonte de calor composta por três lâmpadas, com potência total de 450 W. Essa fonte aquece uma das faces da placa, situada na câmara quente. A face oposta, denominada câmara fria, com 16 cm de comprimento, não possuía nenhuma fonte de calor ou dissipador térmico.

Para a obtenção dos resultados, foi posicionado um termopar na face quente e outro na face fria. Com as leituras realizadas, foi possível calcular a diferença de temperatura entre as faces da placa.

3.2.6.3 Simulação da transmitância térmica em paredes com blocos de concreto

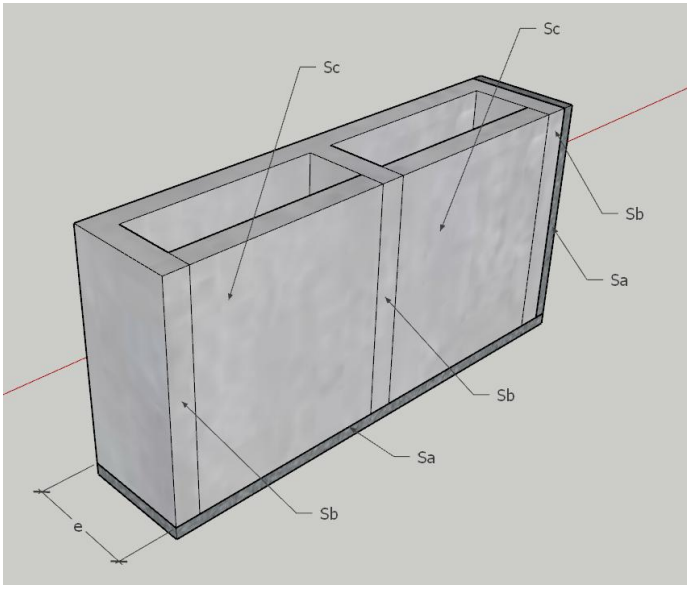
Para a avaliação do desempenho térmico das argamassas, foi calculada a transmitância térmica (U), simulando um sistema de vedação construído com blocos de concreto e revestido com as argamassas produzidas neste estudo. Para isso, foi utilizado o método simplificado proposto na NBR 15220-2 (ABNT, 2003).

A escolha por simular paredes construídas com blocos de concreto foi feita com base na análise do estudo de Barros (2018), no qual se verificou que as paredes construídas com tijolos cerâmicos, revestidas com argamassa tradicional ou com argamassas contendo vermiculita, apresentaram valores de transmitância térmica dentro do limite estabelecido pela norma de desempenho NBR 15575-4 (ABNT, 2013) ($U \leq 2{,}5$ W/m²·K). No entanto, as paredes feitas com

blocos de concreto só atenderam a esse requisito quando revestidas com argamassas contendo 75% e 100% de vermiculita.

Dessa forma, considerando que a transmitância térmica depende da condutividade térmica dos materiais constituintes da parede e da espessura dos elementos, este estudo analisou a transmitância térmica de paredes feitas com blocos de concreto (Figura 35), com dimensões de 9 × 39 × 19 cm e 14 × 39 × 19 cm, ambas revestidas em suas duas faces com as argamassas produzidas neste trabalho, nas espessuras de 2 cm, 2,5 cm e 3 cm.

Figura 35 – Modelo de bloco de concreto e indicações das seções S_a, S_b e S_c



Fonte: Autor (2023)

Como mencionado, para o cálculo da transmitância térmica foi adotado o método simplificado apresentado na NBR 15220-2 (ABNT, 2003). Segundo a referida norma, o cálculo deve considerar os valores de condutividade térmica (Tabela 20), as dimensões dos blocos e a espessura do revestimento.

Tabela 20 – Condutividade térmica da Argamassa comum e do concreto

Propriedade	Argamassa comum	Concreto
Condutividade térmica (W/Mk)	1,15	1,75

Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2003)

Além disso, deve-se considerar a direção do fluxo de calor. Neste estudo, considerou-se o fluxo de calor na direção horizontal. Com base nisso, foram determinadas as resistências

térmicas superficiais interna e externa (Tabela 21), e definidas as seções pelas quais o fluxo de calor atravessa, denominadas:

- S_a (Revestimento + Argamassa de Assentamento + Revestimento);
- S_b (Revestimento + Concreto + Revestimento);
- S_c (Revestimento + Concreto + Ar + Concreto + Revestimento).

Tabela 21 - Resistências térmicas superficial interna e externa

R_{si} (m².K)/W			R_{se} (m².K)/W		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
⇨ ▏	▔ ⇧	⇩ ▁	⇨ ▏	▔ ⇧	⇩ ▁
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2003)

A partir desses parâmetros, foram calculadas as resistências térmicas de cada seção (R_i) por meio da soma das resistências térmicas de cada componente que constitui a seção (Equação 15). Em seguida, determinou-se a resistência térmica das seções (R_t) por meio da Equação 16, que considera as áreas das seções e suas respectivas resistências térmicas. O valor obtido foi somado às resistências térmicas superficial interna e externa (Equação 17), resultando na resistência térmica total do sistema (R_T). Por fim, a transmitância térmica foi determinada pelo inverso da resistência térmica total do sistema.

$$R_i = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}} + R_{ar} * + \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} \qquad \text{Equação 15}$$

Onde:

R_i: corresponde a resistência térmica da seção do sistema de blocos de concreto (m².K/W);
e_{reboco}: espessura da camada de revestimento (m);

λ_{reboco}: condutividade térmica da argamassa de revestimento (W/(m.K));

$e_{concreto}$: espessura do septo do bloco de concreto (m);

$\lambda_{concreto}$: condutividade térmica do bloco de concreto (W/(m.K));

R_{ar}: resistência térmica do ar, conforme Tabela B.1 da ABNT NBR 15220 (2003).

*A resistência térmica do ar é considerada quando há bolsa de ar entre as camadas constituintes da seção.

$$R_t = \sum \frac{n_i . S_i}{\frac{n_i . S_i}{R_i}} \qquad \text{Equação 16}$$

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} \qquad \text{Equação 17}$$

Onde:

R_t: Resistência térmica das seções (m².K/W);

n_i: quantidade de seção repetidas no sistema;

S_i: área da seção (m²);

R_i: corresponde a resistência térmica da seção em análise (m².K/W);

R_T: resistência térmica total do sistema (m².K/W);

R_{si}: Resistência térmica superficial interna (m².K/W);

R_{se}: Resistência térmica superficial externa (m².K/W);

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

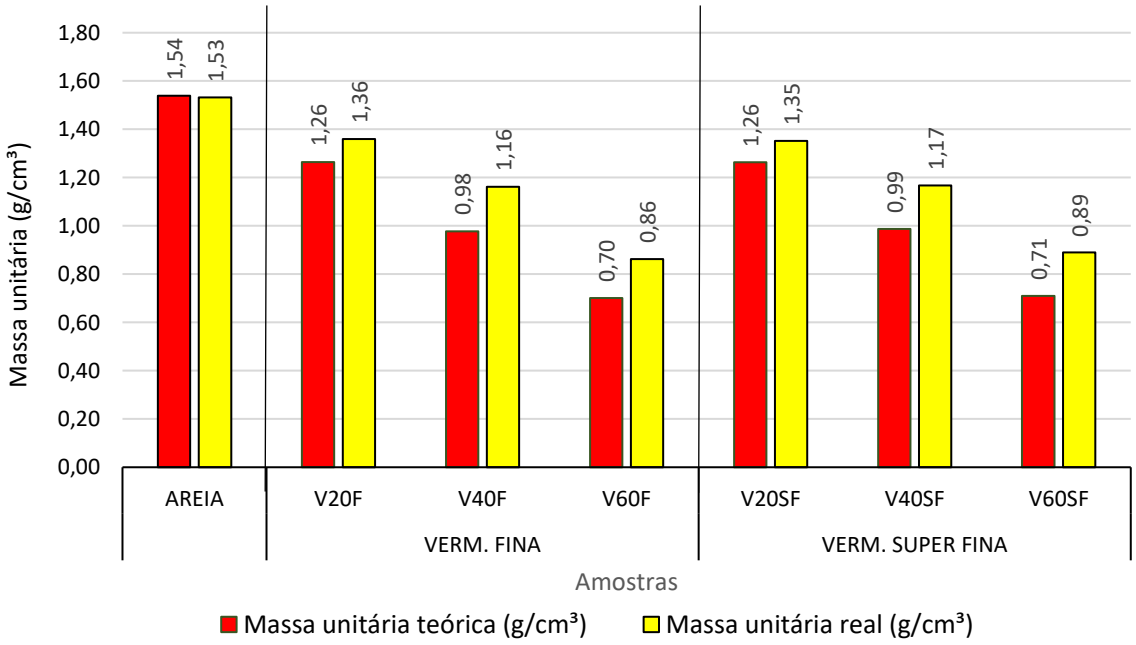
4.1 Análise no estado anidro

No que tange o estudo do estado anidro, foram realizadas aferições em relação as massas aparente das frações inertes e das misturas dos componentes secos das argamassas (Ligantes + fração inerte)

4.1.1 Massa unitária teórica e Massa unitária real

Nos compostos cimentícios como argamassas e concretos, os agregados são os componentes com maior massa unitária. Nesse estudo foi comparado massa unitária real (MU_R), encontrada em laboratório, das frações inertes com massa unitária teórica (MU_T).

Figura 36 - Massa unitária teórica x real da fração inerte



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 36, observa-se que, no caso da MUT, as amostras V20 F, V40 F, V60 F, V20 SF, V40 SF e V60 SF apresentaram reduções, em comparação com a massa unitária da areia, nas ordens de 18%, 36%, 54%, 18%, 36% e 54%, respectivamente. Já as MUR dessas mesmas amostras apresentaram reduções de 11%, 24%, 44%, 12%, 24% e 42%, respectivamente, em relação à MUR da areia. Com base nessa análise, observa-se que, em ambos os casos, houve redução na massa unitária à medida que o teor de vermiculita aumentou, pois, para manter o mesmo volume de agregado nas misturas, a massa de vermiculita utilizada na substituição foi

menor. Como a vermiculita possui menor massa unitária, isso resultou em reduções nas massas unitárias das composições como um todo..

Outro aspecto a ser destacado é que a massa unitária real das composições contendo vermiculita foi superior às respectivas massas unitárias teóricas. Na Tabela 22, verifica-se que, à medida que o teor de vermiculita aumenta, a diferença percentual entre MUR e MUT também se eleva.

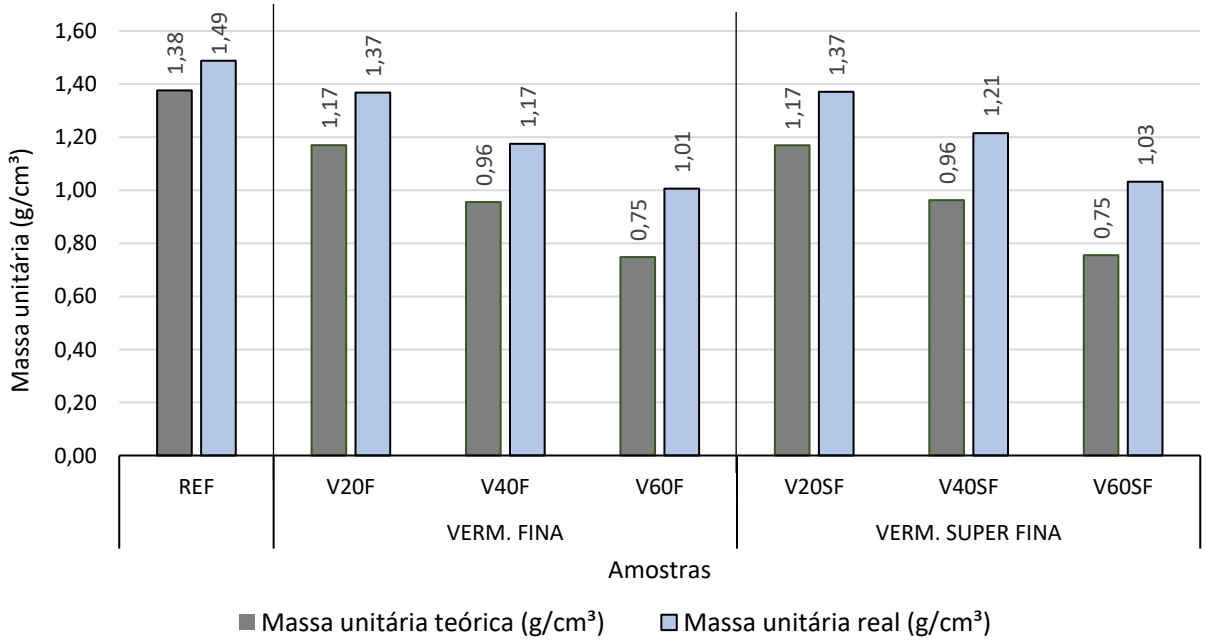
Tabela 22 – Relação entre MU_R e MU_T das combinações da fração inerte.

Argamassa	V20 Fina	V40 Fina	V60 Fina	V20 S. Fina	V40 S. Fina	V60 S. Fina
MU_T	1,26	0,98	0,70	1,26	0,99	0,71
MU_R	1,36	1,16	0,86	1,35	1,17	0,89
$\Delta_{MUR-MUT}$	0,1	0,18	0,16	0,09	0,18	0,18
$\Delta_{(MUR-MUT)/MUT\ [\%]}$	8%	18%	23%	7%	18%	25%

Fonte: Autor (2023)

Esse fenômeno ocorre porque, apesar da tentativa de manter o mesmo volume e massa de material para o cálculo da MUR e MUT, na prática há um empacotamento entre os grãos de areia e vermiculita. Os vazios existentes entre os grãos são reduzidos, resultando na diminuição do volume efetivamente ocupado e, consequentemente, em valores de MUR superiores aos de MUT.

Figura 37 - Massa unitária teórica x real das argamassas



Fonte: Autor (2023)

Tabela 23 - Relação entre MU_R e MU_T das combinações secas das argamassas.

Argamassa	V20 Fina	V40 Fina	V60 Fina	V20 S. Fina	V40 S. Fina	V60 S. Fina
MU_T	1,17	0,96	0,75	1,17	0,96	0,75
MU_R	1,37	1,17	1,01	1,37	1,21	1,03
$\Delta_{MUR-MUT}$	0,2	0,21	0,26	0,2	0,25	0,28
$\Delta_{(MUR-MUT)/MUT\ [\%]}$	17%	22%	35%	17%	26%	37%

Fonte: Autor (2023)

A Figura 37 e a Tabela 23 apresentam os valores das massas unitárias teóricas e reais das misturas dos componentes anidros das argamassas dosadas nesta pesquisa. Assim como ocorreu com as frações inertes, as amostras de argamassas no estado anidro apresentaram valores de massa unitária real superiores às respectivas massas unitárias teóricas. Em termos percentuais, as amostras REF, V20 FS, V40 FS, V60 FS, V20 SFS, V40 SFS e V60 SFS apresentaram massas unitárias reais, respectivamente, 8%, 17%, 22%, 35%, 17%, 26% e 37% superiores aos valores de massa unitária teórica.

Assim como na análise das frações inertes, o fato de a massa unitária real ser maior está associado ao empacotamento entre os grãos dos materiais constituintes das argamassas, o que proporcionou uma redução no volume efetivamente ocupado pelas partículas para uma mesma massa de material.

4.2 Análise no estado fresco

Para as análises das características no estado fresco foram realizados ensaios do espalhamento na mesa de consistência, massa específica fresca e teor de ar incorporado. Os resultados e as análises são expostos nos tópicos seguintes.

4.2.1 Consistência e consumo de água

A consistência é uma propriedade diretamente relacionada à quantidade de água utilizada na mistura. A partir dos ensaios preliminares realizados, foi determinada a quantidade ideal de água para atingir o espalhamento desejado, conforme apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Consumo e teor de água das argamassas produzidas

Amostra		Material seco (kg/m³)	Água (kg/m³)	Teor de água (%)
	REF	1765,54	270,63	15%
Seca	V20 FS	1658,13	307,97	19%
	V40 FS	1488,80	354,15	24%
	V60 FS	1291,13	414,34	32%
	V20 SFS	1666,08	301,95	18%
	V40 SFS	1512,77	344,87	23%
	V60 SFS	1311,62	394,09	30%
Pré-umedecida	V20 FM	1667,80	308,90	19%
	V40 FM	1532,97	362,71	24%
	V60 FM	1351,14	438,00	32%
	V20 SFM	1663,80	311,94	19%
	V40 SFM	1526,72	367,39	24%
	V60 SFM	1356,70	429,55	32%

Fonte: Autor (2023)

Como observado no item 3.2.1, a vermiculita possui elevada capacidade de absorver e reter água. Essa característica influencia diretamente o consumo de água nas argamassas que contêm esse material. Nas argamassas com vermiculita seca, o grupo com vermiculita fina apresentou maior consumo de água em relação ao grupo com vermiculita superfina. Em comparação ao teor de água necessário para produzir 1 m³ da argamassa de referência, a mistura com 20% de vermiculita fina apresentou um acréscimo de 14% no consumo de água; para 40%, o aumento foi de 31%; e para 60%, esse percentual chegou a 53%. Já nas argamassas com vermiculita superfina seca, os acréscimos observados foram de 12%, 27% e 46% para os teores de 20%, 40% e 60%, respectivamente.

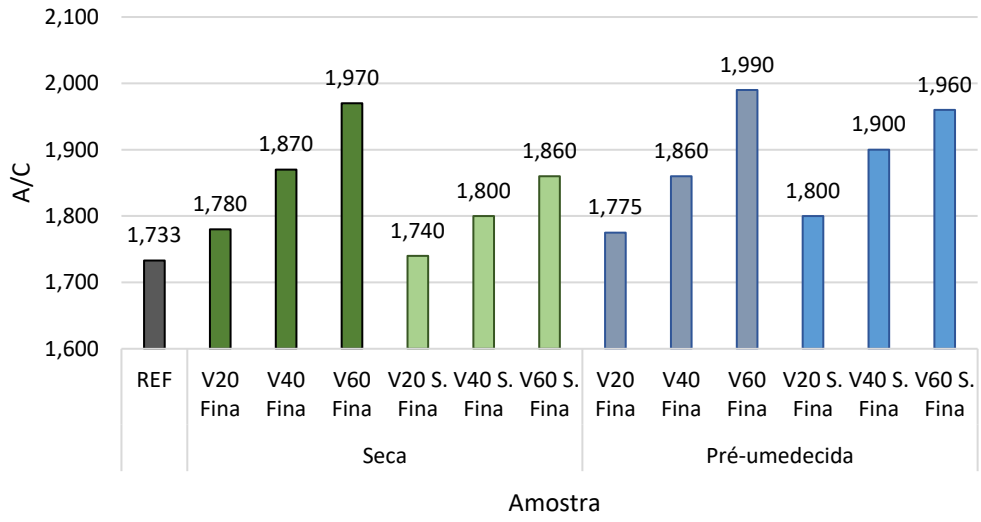
Com o objetivo de minimizar o efeito da absorção de água pela vermiculita no consumo total da mistura, foram realizadas argamassas utilizando vermiculita pré-umedecida. Durante o processo de mistura, observou-se que a vermiculita pré-umedecida liberava parte da água absorvida, promovendo a hidratação dos finos. No entanto, foi necessário controlar a quantidade de água retida na vermiculita após o período de molhagem, pois sua elevada capacidade de absorção poderia, ao liberar o excesso de água durante a mistura, causar um espalhamento superior a 260 ± 5 mm e, consequentemente, segregar a argamassa.

No grupo de misturas com vermiculita pré-umedecida, a mistura com 20% de vermiculita fina apresentou aumento de 14% no consumo de água; com 40%, o aumento foi de 34%; e com 60%, o acréscimo chegou a 62%. Para as argamassas com vermiculita superfina

pré-umedecida, os aumentos observados foram de 15%, 36% e 59% para os teores de 20%, 40% e 60%, respectivamente. Com base nesses resultados, observa-se que o uso de vermiculita pré-umedecida não reduziu o consumo efetivo de água, já que parte da água contida na vermiculita foi liberada durante a mistura. Assim, ao somar essa água à que foi adicionada diretamente, obteve-se um volume total próximo ao das argamassas com vermiculita seca.

Como consequência do aumento no consumo de água, observou-se um comportamento crescente na relação água/cimento, conforme indicado na Figura 38. Os grupos com vermiculita fina seca, vermiculita fina pré-umedecida e vermiculita superfina pré-umedecida apresentaram valores de relação a/c semelhantes entre si para as argamassas com o mesmo percentual de vermiculita. Contudo, o grupo com vermiculita superfina seca apresentou valores de relação a/c menores que os das demais amostras contendo o mesmo percentual de agregado leve.

Figura 38 - Relação água/cimento das argamassas produzidas



Fonte: Autor (2023)

Apesar do aumento da relação água/cimento, as amostras produzidas neste estudo apresentaram relações a/c inferiores às encontradas por Barros (2018), mesmo tendo sido utilizados traço e teores de vermiculita semelhantes. Esse fato pode estar associado à diferença no consumo de cimento adotado. No estudo de Barros (2018), o consumo de cimento variou entre 214,5 kg/m³ e 239,9 kg/m³, enquanto, neste trabalho, os valores ficaram entre 156,16 kg/m³ e 220,10 kg/m³, o que também resultou em menor consumo de água.

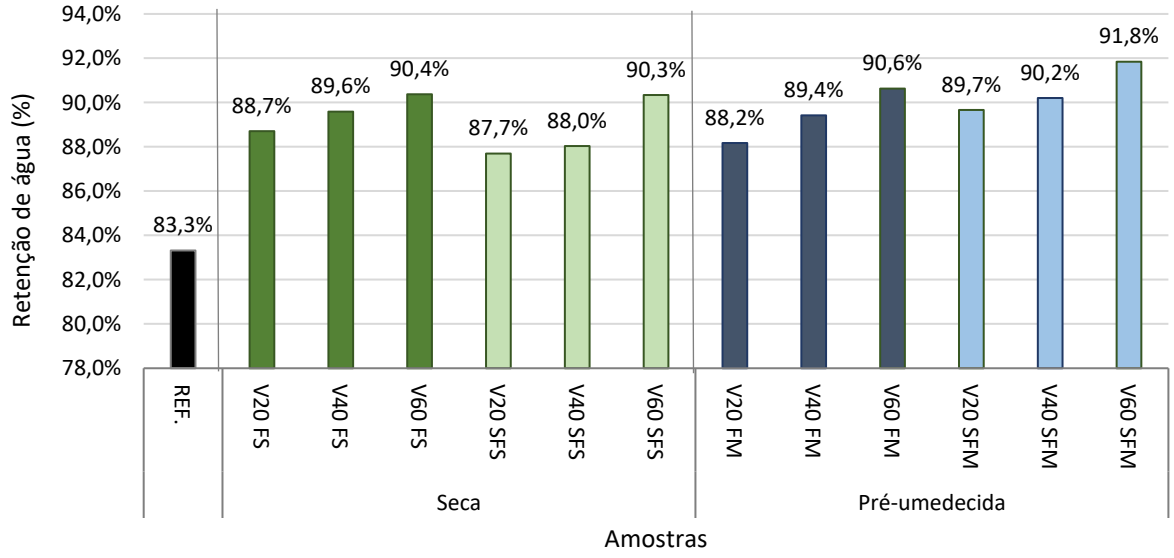
Todavia, é consenso entre as pesquisas de Palomar et al. (2015), Silva et al. (2010), Barros (2018) e Sinhorelli (2019) que, para se obter uma argamassa com consistência plástica

e trabalhabilidade adequadas à aplicação prática, é necessário um aumento no teor de água das misturas.

4.2.2 Retenção de água

Na Figura 39 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de retenção de água das argamassas. Diante do exposto, percebe-se que o aumento da quantidade de vermiculita nas misturas proporcionou uma maior retenção de água.

Figura 39 - Valores da retenção de água das argamassas elaboradas



Fonte: Autor (2023)

De acordo com o método de dosagem de argamassas do CETA-BA, proposto por Gomes e Neves (2002), é recomendável que as argamassas apresentem retenção de água superior a 75%. Conforme observado nos resultados, a argamassa de referência apresentou o menor valor de retenção (83,3%), ainda assim atendendo à recomendação mencionada.

Com a introdução da vermiculita nas misturas, observou-se um aumento na retenção de água, comportamento semelhante ao registrado nos estudos de Cintra et al. (2014) e Barros (2018), nos quais as argamassas apresentaram retenção superior a 90%. Neste estudo, verificou-se que as argamassas com vermiculita fina, independentemente de o agregado estar pré-umedecido ou não, apresentaram aumento na retenção em relação à amostra de referência, variando de 6% a 8% conforme o teor de vermiculita aumentava. Para as amostras com vermiculita superfina, as misturas com o agregado seco apresentaram variações entre 5% e 8%.

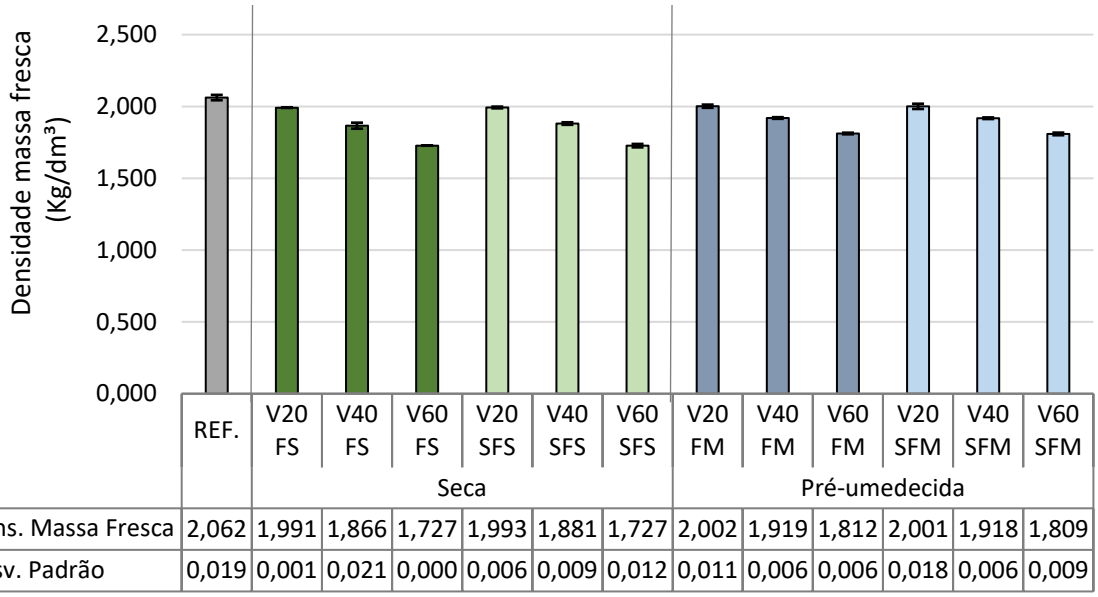
Já as misturas com vermiculita superfina pré-umedecida obtiveram aumento na retenção de água na ordem de 8% a 10%.

Diante desses resultados, torna-se evidente que o uso da vermiculita superfina pré-umedecida proporciona maior retenção de água em comparação com as demais combinações. Esse comportamento pode ser atribuído à maior capacidade de retenção hídrica da vermiculita superfina, conforme demonstrado na Figura 25.

4.2.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A vermiculita, por apresentar massa específica aproximadamente 70% inferior à da areia, proporciona, quando incorporada às argamassas, uma redução na massa específica fresca desse compósito cimentício. Na Figura 40, é possível verificar a influência da variação do teor de vermiculita sobre a massa específica fresca das argamassas.

Figura 40 - Valores das densidades de massa fresca das argamassas dosadas



	REF.	V20 FS	V40 FS	V60 FS	V20 SFS	V40 SFS	V60 SFS	V20 FM	V40 FM	V60 FM	V20 SFM	V40 SFM	V60 SFM
Dens. Massa Fresca	2,062	1,991	1,866	1,727	1,993	1,881	1,727	2,002	1,919	1,812	2,001	1,918	1,809
Desv. Padrão	0,019	0,001	0,021	0,000	0,006	0,009	0,012	0,011	0,006	0,006	0,018	0,006	0,009

Amostras

Fonte: Autor (2023)

Ao analisar os grupos com vermiculita fina seca e vermiculita superfina seca, observou-se que, para 20% de vermiculita na mistura, houve pouca variação: a massa específica reduziu de 2,036 g/cm³ (REF) para 1,966 g/cm³ (V20FS) e 1,968 g/cm³ (V20SFS), representando, em ambos os casos, uma diminuição de aproximadamente 3,5% em relação à argamassa de referência. Com a substituição de 40% e 60% da areia por vermiculita, foram aferidos, para as amostras V40FS, V40SFS, V60FS e V60SFS, valores de massa específica fresca,

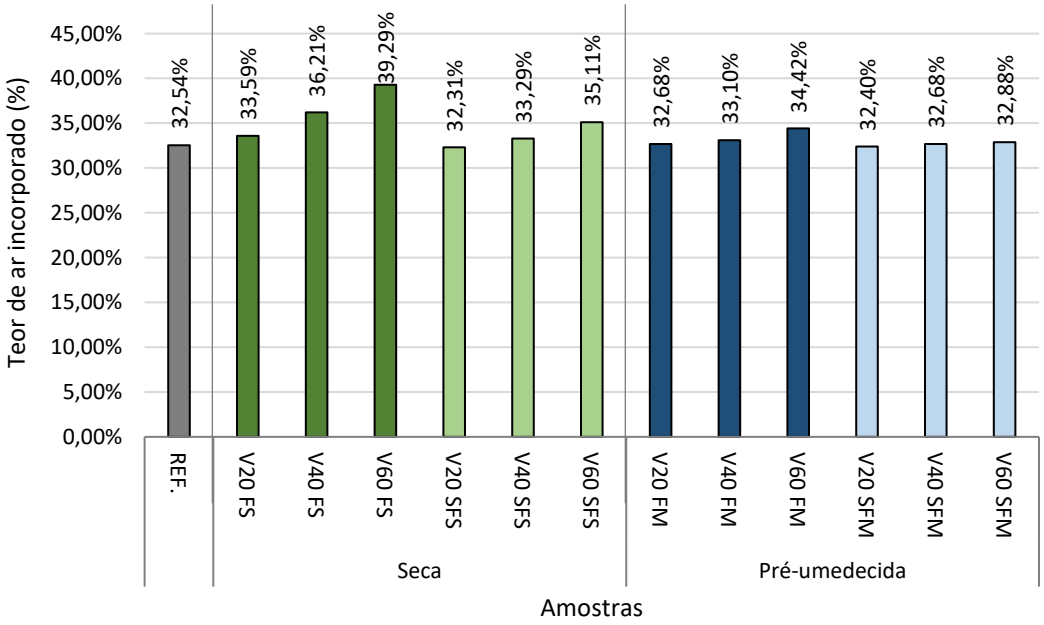
respectivamente, de 1,843 g/cm³, 1,858 g/cm³, 1,705 g/cm³ e 1,706 g/cm³, o que representa reduções de 9% nas amostras com 40% de vermiculita e de 16% nas amostras com 60%.

Com relação às dosagens com vermiculita pré-umedecida, observou-se que, para 20% de substituição, as amostras V20FM e V20SFM apresentaram massas específicas frescas de 1,977 g/cm³ e 1,976 g/cm³, respectivamente, representando reduções de apenas 3%, assim como no grupo com vermiculita seca. Nas argamassas com 40% e 60% de vermiculita pré-umedecida, foram obtidos valores de densidade fresca de 1,896 g/cm³, 1,894 g/cm³, 1,789 g/cm³ e 1,786 g/cm³, respectivamente, para as amostras V40FM, V40SFM, V60FM e V60SFM. Esses resultados indicam reduções, em relação à amostra de referência, de 7% para as dosagens com 40% de vermiculita pré-umedecida e de 12% para as com 60%. Com base nesses dados, observa-se que o uso de vermiculita seca proporcionou uma redução levemente maior na massa específica fresca das argamassas em comparação às dosagens com vermiculita pré-umedecida.

As argamassas produzidas neste trabalho apresentaram densidade de massa fresca variando entre 2,00 g/cm³ e 1,73 g/cm³, valores que, de acordo com Carasek (2010), classificam-nas como argamassas normais, aptas a aplicações convencionais, uma vez que a classificação é atribuída a argamassas com densidade de massa fresca entre 1,40 g/cm³ e 2,30 g/cm³. Esses resultados corroboram com os estudos de Cintra et al. (2014), Barros (2018) e Sinhorelli (2019), que também observaram reduções na massa específica fresca ao utilizarem a vermiculita como substituição parcial do agregado convencional.

Nas argamassas estudadas, foram observados valores consideravelmente elevados de teor de ar incorporado (Figura 41), com a argamassa de referência (REF) apresentando 32,54% de ar incorporado. Com a adição gradual de vermiculita e o consequente aumento no consumo de água, a incorporação de ar nas misturas também aumentou.

Figura 41 - Valores dos teores de ar das argamassas dosadas



Fonte: Autor (2023)

No grupo das argamassas com vermiculita fina seca, o teor de ar incorporado aumentou 3,24%, 11,29% e 20,75% em relação à argamassa de referência, respectivamente para os teores de 20% (V20FS), 40% (V40FS) e 60% (V60FS). No grupo com vermiculita superfina seca, observaram-se valores de incorporação de ar menores, sendo que a amostra V20SFS apresentou um teor 0,71% inferior ao da amostra REF, enquanto V40SFS e V60SFS apresentaram aumentos de aproximadamente 2,31% e 7,91%, respectivamente.

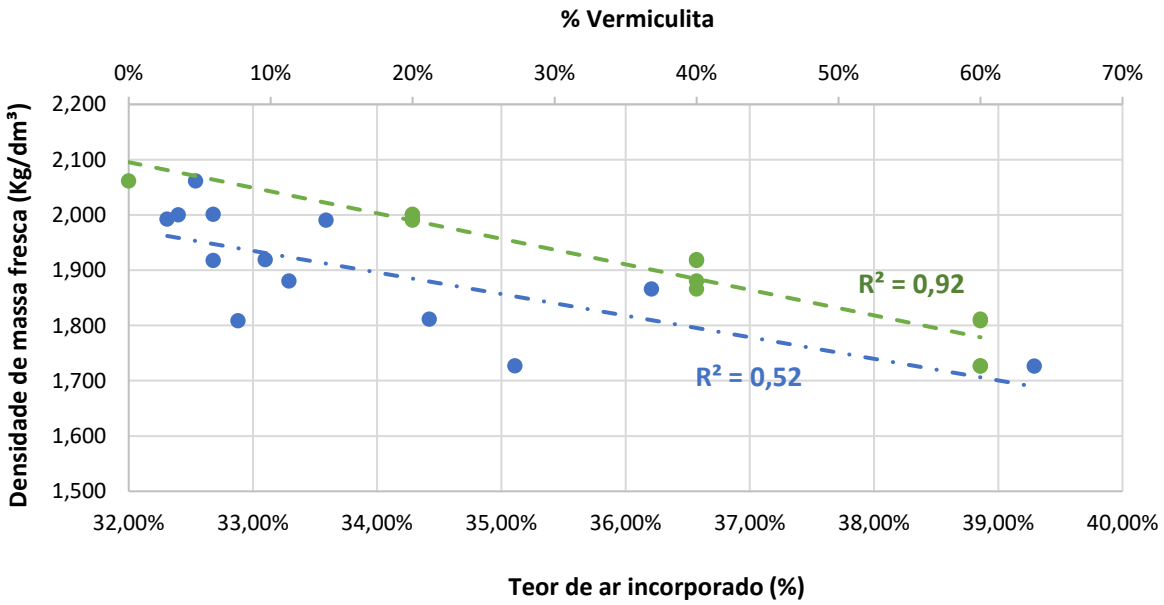
Nas argamassas com vermiculita pré-umedecida, exceto a amostra V20SFM, que apresentou teor de ar incorporado 0,42% inferior ao da amostra de referência, todas as demais — V20FM, V40FM, V60FM, V40SFM e V60SFM — apresentaram valores superiores ao da REF. Esses acréscimos foram, respectivamente, de 0,42%, 1,72%, 5,78%, 0,42% e 1,05%.

Ao observar os resultados das massas específicas frescas e dos teores de ar incorporado nas argamassas com vermiculita, verifica-se que as amostras contendo vermiculita pré-umedecida apresentaram teores de ar levemente menores que as amostras com vermiculita seca. Consequentemente, apresentaram também massas específicas frescas ligeiramente maiores.

Com base nos resultados apresentados, percebe-se que o teor de ar incorporado variou pouco com o aumento do teor de vermiculita. Ao analisar a Figura 42, nota-se que o teor de ar incorporado teve pouca influência na redução da densidade de massa fresca, já que a correlação entre essas variáveis foi de apenas 52% ($R^2 = 0,52$). Por outro lado, ao correlacionar a densidade de massa fresca com o teor de vermiculita, observa-se uma forte correlação ($R^2 = 0,92$).

Considerando que a vermiculita possui massa específica significativamente inferior à da areia, pode-se concluir que a redução na densidade de massa fresca está diretamente associada ao aumento gradual da proporção desse agregado leve na mistura.

Figura 42 – Correlação entre densidade de massas fresca X Teor de ar incorporado e % de Vermiculita



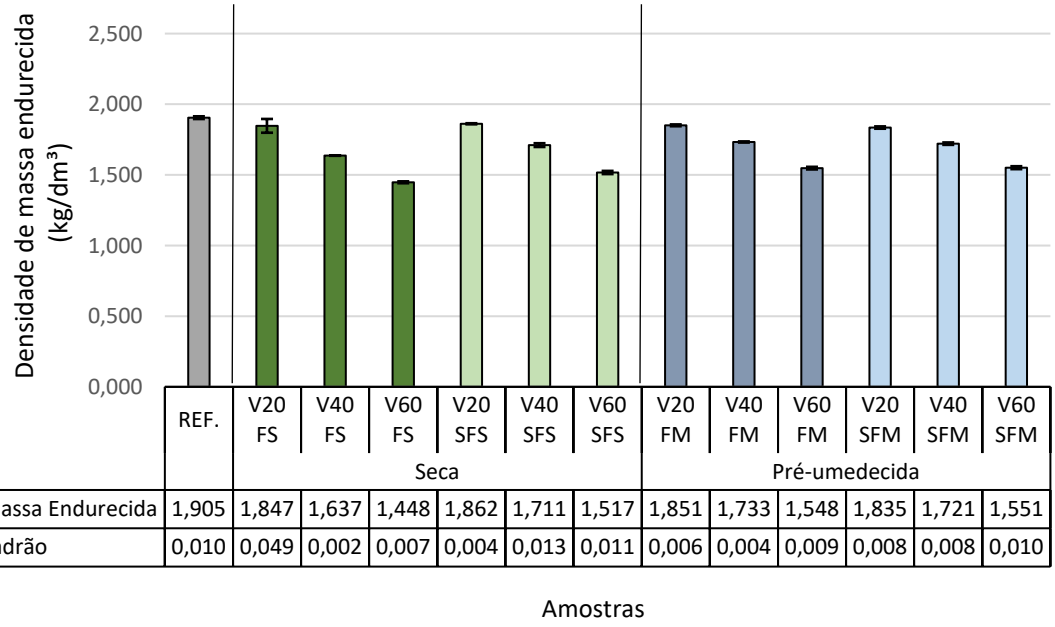
Fonte: Autor (2023)

4.3 Análise no estado endurecido

4.3.1 Densidade de massa e índice de vazios

A análise do estado endurecido foi iniciada pela medição da densidade de massa seca e do índice de vazios das argamassas. Nas Figuras 43 e 44, foram compilados os resultados referentes a essas propriedades.

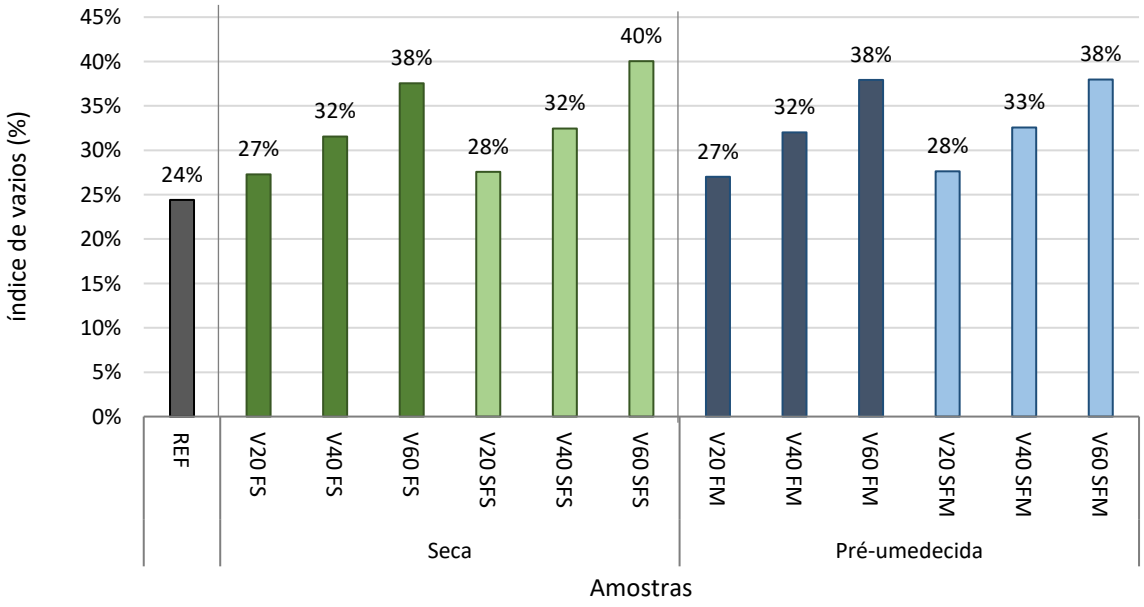
Figura 43 - Valores das densidades de massa seca das argamassas dosadas



	REF.	V20 FS	V40 FS	V60 FS	V20 SFS	V40 SFS	V60 SFS	V20 FM	V40 FM	V60 FM	V20 SFM	V40 SFM	V60 SFM
Dens. Massa Endurecida	1,905	1,847	1,637	1,448	1,862	1,711	1,517	1,851	1,733	1,548	1,835	1,721	1,551
Desv. Padrão	0,010	0,049	0,002	0,007	0,004	0,013	0,011	0,006	0,004	0,009	0,008	0,008	0,010

Fonte: Autor (2023)

Figura 44 - Valores dos índices de vazios das argamassas dosadas



Fonte: Autor (2023)

Como esperado, o uso da vermiculita nas argamassas promoveu a redução da densidade de massa seca. Como parâmetro de referência, a amostra REF, com 0% de vermiculita, apresentou densidade de 1905 kg/m³. Com a aplicação gradual e crescente de teores de vermiculita nas misturas, as argamassas com 20% de substituição apresentaram valores de densidade variando entre 1835 kg/m³ e 1862 kg/m³; as com 40% apresentaram valores entre

1637 kg/m³ e 1733 kg/m³; e o grupo com 60% de vermiculita obteve os menores valores, entre 1448 kg/m³ e 1551 kg/m³.

No grupo das argamassas com vermiculita de granulometria fina, observou-se que o uso do agregado em estado seco proporcionou uma maior redução na densidade seca em comparação com o uso da vermiculita pré-umedecida. Para efeito de comparação, as amostras V20FS, V40FS e V60FS apresentaram, respectivamente, reduções da ordem de 3,0%, 14,1% e 24,0%. Já as amostras com vermiculita pré-umedecida — V20FM, V40FM e V60FM — apresentaram diminuições de 2,8%, 9,0% e 18,7%, respectivamente.

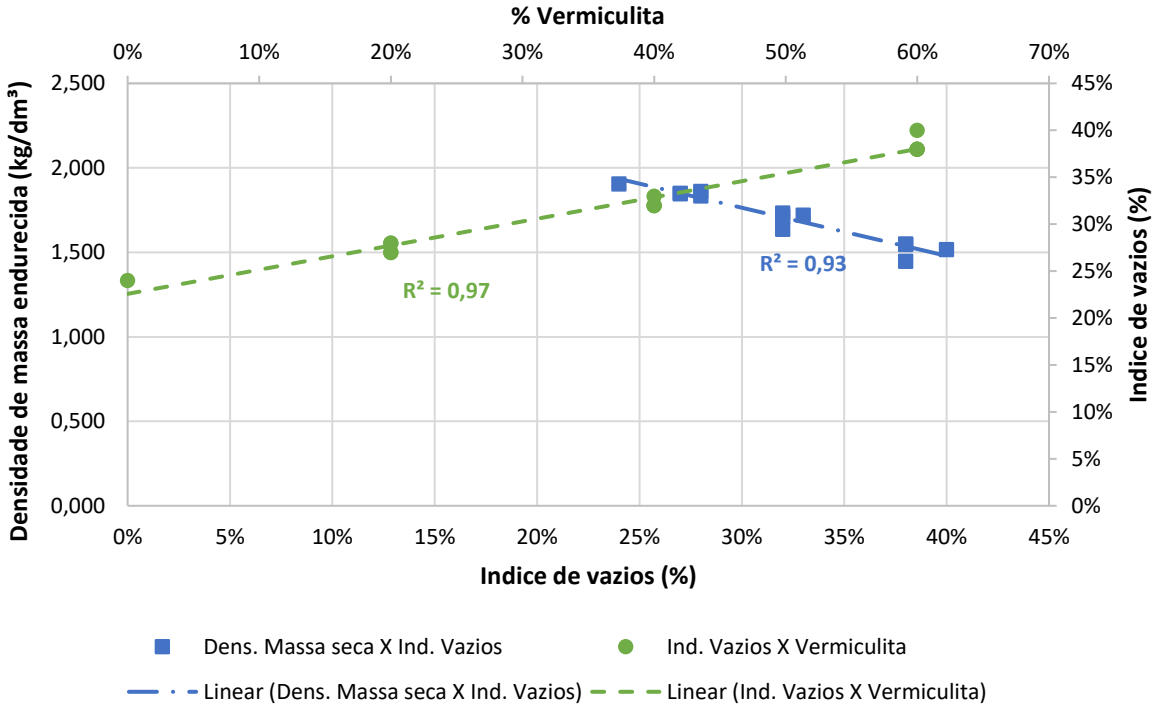
No grupo com vermiculita superfina, observou-se comportamento semelhante, com exceção das amostras com 20% de vermiculita, nas quais a amostra V20SFM apresentou uma redução 0,5% superior à da amostra com vermiculita seca (V20SFS). Para os demais teores, as amostras V40SFS e V60SFS apresentaram reduções de 10,2% e 20,4%, enquanto V40SFM e V60SFM obtiveram reduções de 9,7% e 18,6%, respectivamente.

Por meio dos ensaios conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005), fica evidente que a diminuição da densidade de massa seca está associada ao aumento do índice de vazios, ocasionado pelo uso da vermiculita. Na Figura 44, observa-se que o índice de vazios aumenta proporcionalmente ao teor de vermiculita incorporado às argamassas. Além disso, verifica-se que o estado de umidade do agregado leve e a granulometria apresentaram pouca ou nenhuma influência sobre essa propriedade.

Para efeito de comparação, a argamassa de referência (REF) apresentou índice de vazios de 24%, enquanto as argamassas com 20% de vermiculita apresentaram valores entre 27% e 28%. Para o grupo com 40% do agregado leve, os índices variaram entre 32% e 33%, e as argamassas com 60% de vermiculita apresentaram índices de vazios entre 38% e 40%.

Na Figura 45, observa-se uma forte correlação entre o índice de vazios e a densidade de massa endurecida ($R^2 = 0,93$), ou seja, a densidade tende a diminuir à medida que o índice de vazios aumenta. Esse aumento nos vazios ocorre, principalmente, em razão da utilização da vermiculita, pois esse agregado possui microestrutura porosa e eleva o consumo de água da mistura, o que, por sua vez, contribui para o aumento dos vazios e, consequentemente, para a redução da densidade de massa endurecida. Isso também fica evidente na forte correlação observada entre o teor de vazios e o percentual de vermiculita ($R^2 = 0,97$), conforme apresentado na Figura 45.

Figura 45 -Correlação entre Densidade de massa endurecida x Indice de vazios e Indice de vazios x % Vermiculita

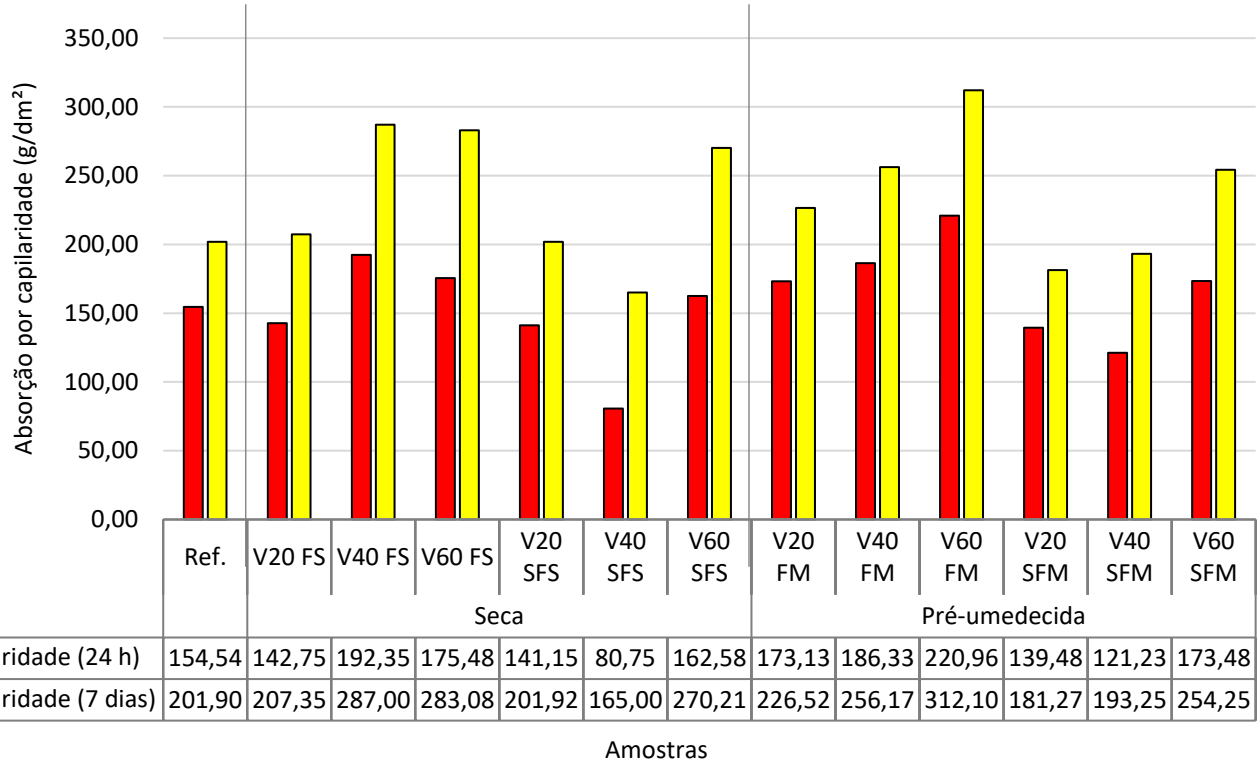


Fonte: Autor (2023)

4.3.2 Absorção de água por capilaridade e imersão

Na Figura 46 são apresentados os resultados da absorção de água por capilaridade das argamassas produzidas. Para a realização desse ensaio, seguiram-se as recomendações da NBR 9779 (ABNT, 2012), que sugere a medição da absorção até o terceiro dia. Contudo, neste estudo, a absorção de água por capilaridade foi monitorada até o sétimo dia, pois, até esse período, as argamassas continuaram a apresentar incremento na quantidade de água absorvida. Assim, para observar a absorção máxima das argamassas e a evolução dessa propriedade ao longo do tempo, realizaram-se medições aos 1 e 7 dias.

Figura 46 - Valores das absorções de água por capilaridade das argamassas dosadas



	Ref.	V20 FS	V40 FS	V60 FS	V20 SFS	V40 SFS	V60 SFS	V20 FM	V40 FM	V60 FM	V20 SFM	V40 SFM	V60 SFM
Abs. Capilaridade (24 h)	154,54	142,75	192,35	175,48	141,15	80,75	162,58	173,13	186,33	220,96	139,48	121,23	173,48
Abs. Capilaridade (7 dias)	201,90	207,35	287,00	283,08	201,92	165,00	270,21	226,52	256,17	312,10	181,27	193,25	254,25

Fonte: Autor (2023)

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que as argamassas com vermiculita fina, em sua maioria, apresentaram maior absorção de água em comparação com aquelas com vermiculita superfina. Especificamente, nas amostras com vermiculita fina seca, com 1 dia de ensaio, a amostra com 20% de vermiculita apresentou uma absorção 8% menor que a amostra de referência, enquanto as amostras com 40% e 60% registraram aumentos de 24% e 14%, respectivamente. Assim como no estudo de Sinhorelli (2019), observou-se maior absorção na amostra com 40% em relação à de 60%. Já aos 7 dias, a argamassa com 20% de vermiculita apresentou absorção 3% superior à da referência, enquanto as com 40% e 60% registraram aumentos de 42% e 40%, respectivamente. Esses resultados indicam que as argamassas com vermiculita fina seca apresentaram comportamento crescente na absorção de água para teores superiores a 20%.

No grupo das argamassas com vermiculita fina pré-umedecida, observou-se comportamento mais previsível, com aumento da absorção conforme cresciam o teor de vermiculita e o tempo de ensaio. Essas argamassas apresentaram valores superiores às de vermiculita fina seca. Nas primeiras 24 horas, os aumentos observados foram de 12%, 21% e 43% para os teores de 20%, 40% e 60%, respectivamente. No sétimo dia, os aumentos foram de 12%, 27% e 55%, nas mesmas proporções.

Diferentemente dos grupos anteriores, as argamassas com 20% e 40% de vermiculita superfina, tanto seca quanto pré-umedecida, apresentaram menor absorção de água por capilaridade em comparação à amostra de referência nas primeiras 24 horas. As amostras V20SFS, V40SFS, V20SFM e V40SFM apresentaram reduções de 9%, 48%, 10% e 22%, respectivamente. Já as amostras com 60% de vermiculita seca e pré-umedecida registraram aumentos de 5% e 12%. No sétimo dia, o comportamento foi semelhante ao das primeiras 24 horas, com exceção da amostra V20SFS, cuja absorção foi praticamente igual à da argamassa de referência. Nas demais, observou-se redução de 18% (V40SFS), 10% (V20SFM) e 4% (V40SFM). As argamassas V60SFS e V60SFM apresentaram aumentos de 34% e 26%, respectivamente.

Pelos resultados expostos, as argamassas com vermiculita apresentaram, em sua maioria, absorções de água por capilaridade maiores em comparação com a amostra de referência e crescente conforme aumentava o teor de vermiculita nas misturas. Este aumento na capilaridade ocorre em razão das argamassas com vermiculita possuírem uma maior quantidade de poros.

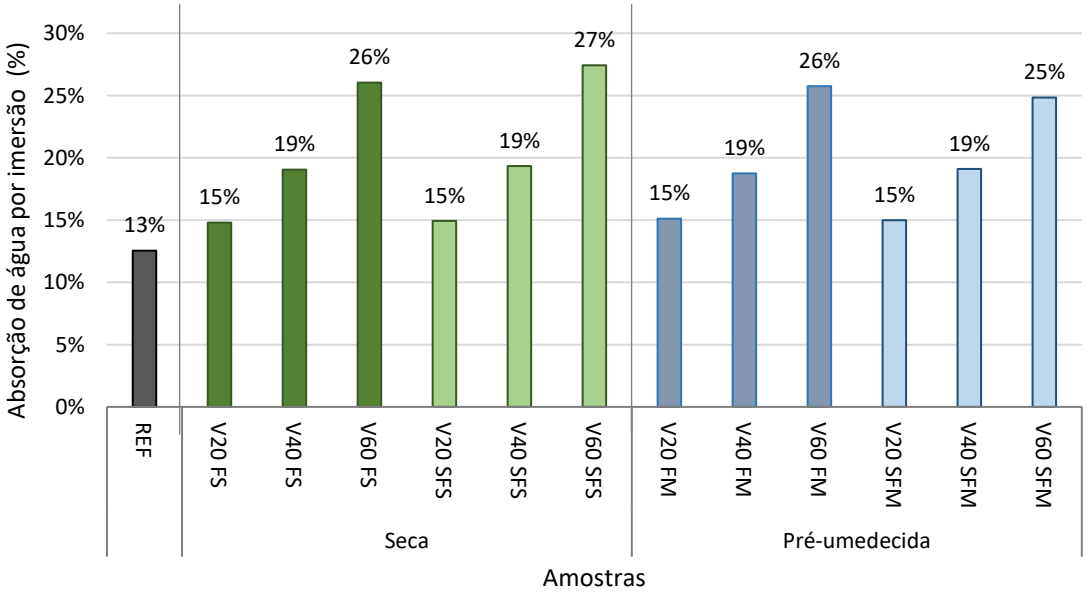
Apesar de o agregado leve contribuir para o aumento da porosidade, isso não implica, necessariamente, em maior absorção por capilaridade. Segundo Rossignolo (2009), a permeabilidade dos compósitos cimentícios está mais relacionada à conectividade entre os poros do que à sua quantidade. Assim, mesmo com o uso de agregados leves, a conectividade porosa pode ser reduzida. De fato, as amostras V40SFS, V20SFM e V40SFM, que utilizaram vermiculita superfina, apresentaram absorção por capilaridade inferior à da argamassa de referência — comportamento também observado por Barros (2018), cuja amostra com 25% de vermiculita apresentou baixa absorção. A autora atribui esse resultado ao preenchimento dos poros do agregado leve pela pasta de cimento, o que minimiza a formação de poros capilares.

Dessa forma, com base nos resultados deste estudo e no de Barros (2018), pode-se considerar teores entre 25% e 40% de vermiculita superfina como possivelmente ideais para reduzir a absorção de água por capilaridade. Contudo, como ressaltado por Sinhorelli (2019), outros fatores também influenciam a porosidade das argamassas, como a relação água/cimento. Além disso, a metodologia empregada neste ensaio avalia a absorção de forma macroscópica, sendo insuficiente para um entendimento detalhado, o que exigiria análises microestruturais do material.

Além da absorção por capilaridade, este estudo também avaliou a absorção de água por imersão, cujos resultados estão apresentados na Figura 47. Pelos dados obtidos, observa-se que a absorção por imersão aumentou proporcionalmente ao teor de vermiculita, embora não tenha

sido verificada influência significativa da granulometria ou do estado de hidratação do agregado. As amostras com 20%, 40% e 60% de vermiculita apresentaram absorção média de 15%, 19% e 26%, respectivamente.

Figura 47 - Valores das absorções de água por imersão das argamassas dosadas



Fonte: Autor (2023)

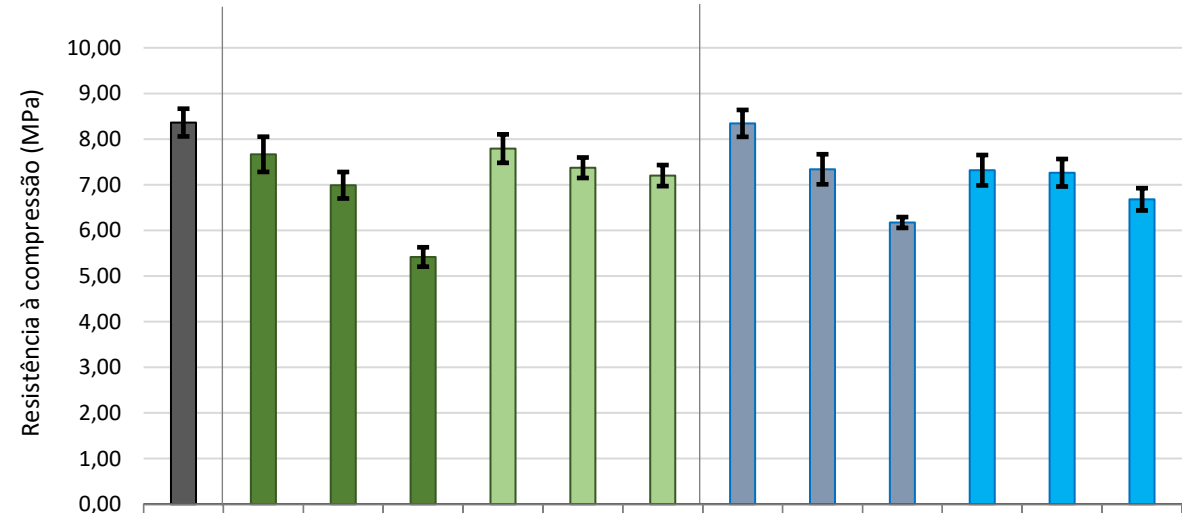
Os valores apresentados demonstraram comportamento crescente conforme o teor de vermiculita aumentava, similarmente ao observado por Barros (2018). No entanto, os resultados deste estudo se diferenciam em relação aos de Barros (2018), que utilizou um traço 1:1:6 e obteve absorções de 15,7%, 20,4%, 36,2% e 60,0% para teores de 0%, 25%, 50% e 75%, respectivamente. Essa diferença pode estar relacionada às menores relações a/c adotadas neste trabalho, resultando em menor índice de vazios.

Pelos resultados apresentados neste estudo e dos autores mencionados, é notório que a adição de vermiculita nas argamassas proporciona um aumento na absorção de água por imersão, assim como na absorção por capilaridade. Porém estas propriedades não são apenas afetadas pela absorção natural do agregado leve, mas também pelos vazios entre as partículas dos demais materiais, que surgem quando a água de amassamento é perdida por evaporação, ou quando o efeito do empacotamento é reduzido pelo uso de agregados mal graduados, característica esta da areia natural e vermiculita expandida utilizadas (BARROS, 2018).

4.3.3 Resistência à compressão e à tração

Os resultados de resistência à compressão e à tração na flexão aos 28 dias estão apresentados nas Figuras 48 e 49, respectivamente. Verifica-se que a incorporação da vermiculita resultou na diminuição tanto da resistência à compressão quanto da resistência à tração na flexão.

Figura 48 - Valores das resistências à compressão das argamassas dosadas



	REF	V20 FS	V40 FS	V60 FS	V20 SFS	V40 SFS	V60 SFS	V20 FM	V40 FM	V60 FM	V20 SFM	V40 SFM	V60 SFM
		Seca						Pré-umedecida					
Rest. Comp.	8,36	7,67	6,99	5,42	7,79	7,37	7,20	8,34	7,34	6,17	7,32	7,26	6,68
Desv. Padrão	0,30	0,39	0,29	0,21	0,31	0,22	0,23	0,29	0,33	0,12	0,33	0,30	0,24

Amostras

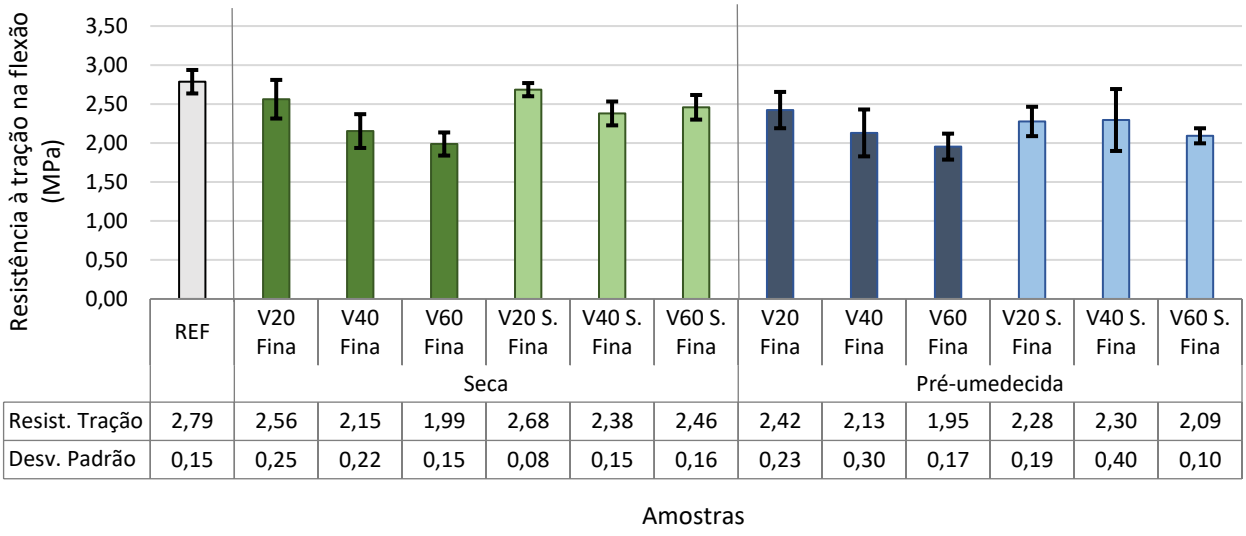
Fonte: Autor (2023)

Nas argamassas produzidas com vermiculita fina seca, foram observadas reduções na resistência à compressão, da ordem de 8%, 16% e 35% para as misturas com 20%, 40% e 60% de vermiculita, respectivamente, em comparação com a argamassa de referência. Quando se utilizou vermiculita fina pré-umedecida, as reduções foram menores: 0,2%, 12% e 26% para os mesmos teores, respectivamente.

No grupo com vermiculita superfina, as argamassas que utilizaram esse agregado no estado seco apresentaram resistência à compressão ligeiramente superior em comparação com as argamassas contendo os mesmos teores do agregado no estado pré-umedecido. Para fins de comparação, as amostras com 20%, 40% e 60% de vermiculita superfina seca apresentaram reduções de 7%, 12% e 14%, respectivamente, em relação à amostra de referência. Já nas amostras com vermiculita superfina pré-umedecida, as reduções observadas foram de

aproximadamente 12% e 13% para os teores de 20% e 40%, respectivamente, e de 20% para a amostra com 60%.

Figura 49 - Valores das resistências à tração na flexão das argamassas dosadas



	REF	V20 Fina	V40 Fina	V60 Fina	V20 S. Fina	V40 S. Fina	V60 S. Fina	V20 Fina	V40 Fina	V60 Fina	V20 S. Fina	V40 S. Fina	V60 S. Fina
		Seca						Pré-umedecida					
Resist. Tração	2,79	2,56	2,15	1,99	2,68	2,38	2,46	2,42	2,13	1,95	2,28	2,30	2,09
Desv. Padrão	0,15	0,25	0,22	0,15	0,08	0,15	0,16	0,23	0,30	0,17	0,19	0,40	0,10

Fonte: Autor (2023)

Quanto à resistência à tração na flexão, as argamassas produzidas com vermiculita fina, tanto seca quanto pré-umedecida, apresentaram valores similares entre si. Em relação à amostra de referência, as argamassas com vermiculita fina seca apresentaram reduções de 8%, 23% e 29%, para os teores de 20%, 40% e 60%, respectivamente. As argamassas com vermiculita fina pré-umedecida apresentaram reduções de aproximadamente 13%, 24% e 30% para os mesmos teores.

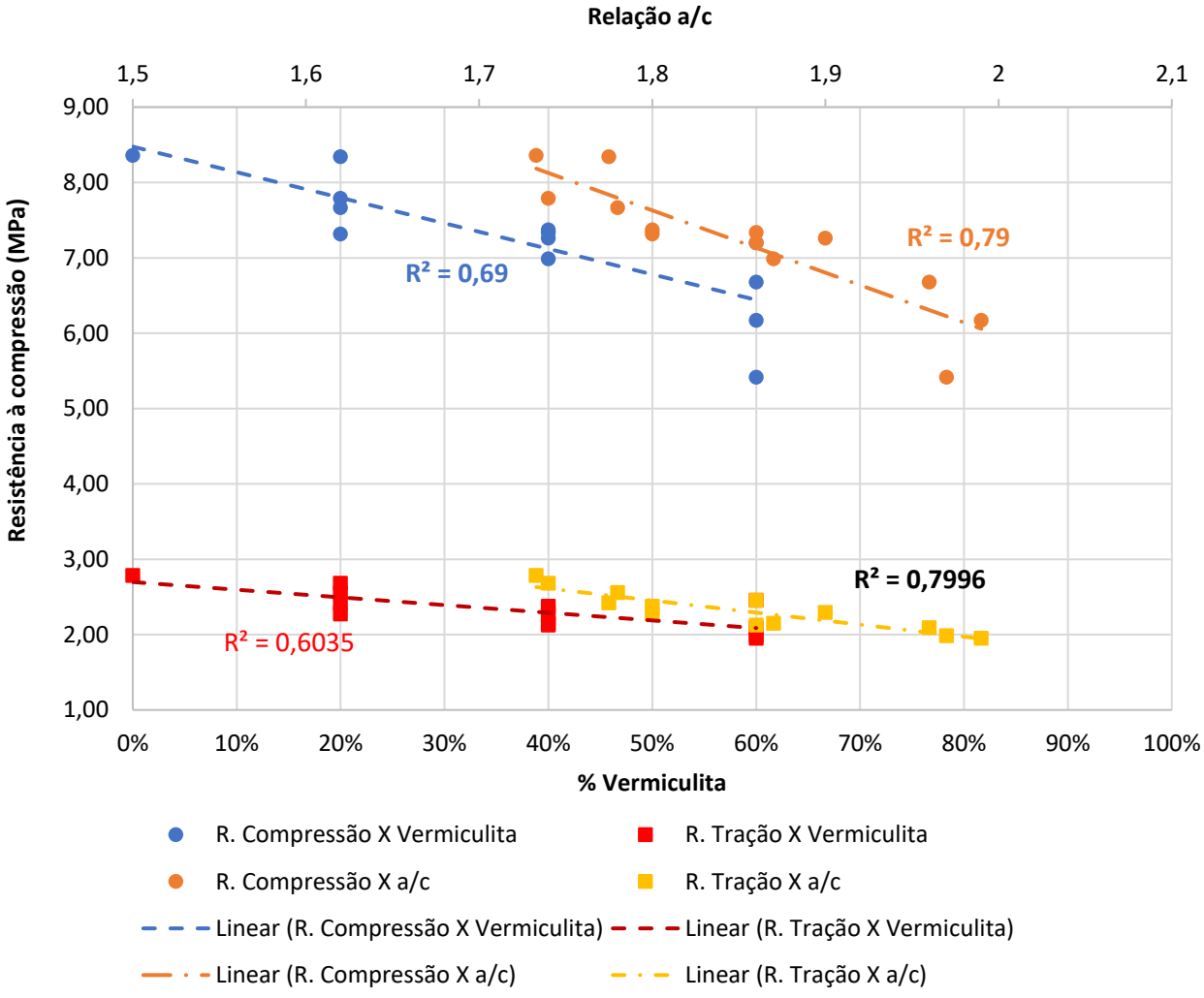
Nas amostras com vermiculita superfina seca, observou-se, de modo geral, uma redução na resistência à tração na flexão em comparação com a amostra de referência. A amostra com 20% de vermiculita apresentou redução de 4%, enquanto as com 40% e 60% apresentaram reduções de 15% e 12%, respectivamente. Já as argamassas com vermiculita superfina pré-umedecida apresentaram resistências ainda menores quando comparadas às suas contrapartes secas, e, em relação à amostra de referência, apresentaram reduções da ordem de 18% para os teores de 20% e 40%, e de 25% para o teor de 60%.

Com base nas médias dos resultados, verifica-se que a introdução da vermiculita nas argamassas provocou redução nas resistências mecânicas. Contudo, ao analisar o desvio padrão, nota-se que, em comparação com a amostra de referência, apenas as amostras V60FS, V60FM e V60SFM apresentaram reduções significativas na resistência à compressão — ou seja,

somente essas amostras apresentaram diferença superior a 1 MPa entre o valor máximo da amostra REF e os valores mínimos das argamassas com vermiculita.

Com base nos dados apresentados, observa-se que a vermiculita exerce influência sobre os valores de resistência à compressão. Na Figura 50, nota-se uma correlação considerável entre as resistências mecânicas e o percentual de vermiculita ($R^2_{comp.}$ = 0,69 e $R^2_{Tração}$ = 0,60). No entanto, a principal razão para a redução da resistência mecânica é o aumento na demanda de água provocado pelo uso desse agregado, o que eleva a relação a/c. Na mesma figura, percebe-se que a correlação entre as resistências mecânicas e a relação a/c é ainda mais significativa, evidenciando que a razão a/c é um fator determinante para o desempenho mecânico das argamassas.

Figura 50 – Correlação resistência mecânica X % Vermiculita e Relação a/c



Fonte: Autor (2023)

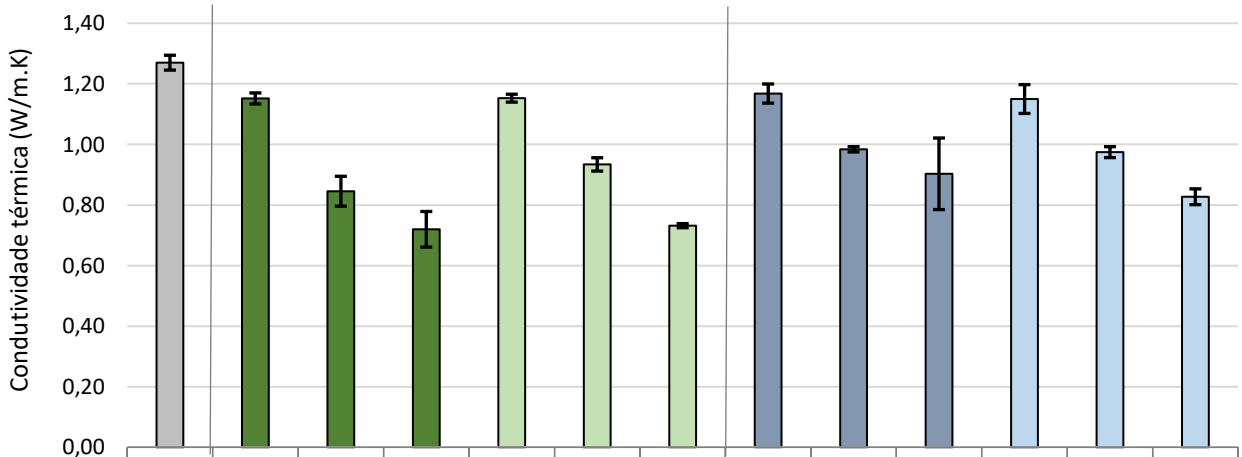
Ao comparar os resultados obtidos neste estudo com os apresentados por Silva et al. (2010), Palomar (2015), Barros (2018) e Sinhorelli (2019), observa-se que as argamassas produzidas nesta pesquisa apresentaram valores de resistência à compressão e à tração superiores aos obtidos pelos autores mencionados. Essa diferença pode ser atribuída às menores relações água/cimento adotadas neste estudo, bem como ao maior consumo de cimento nas argamassas com maior teor de vermiculita, o que contribuiu para o melhor desempenho mecânico.

4.3.4 Desempenho térmico

4.3.4.1 Condutividade térmica

A análise térmica das argamassas foi realizada por meio da determinação da condutividade térmica de cada mistura produzida, e os resultados estão apresentados na Figura 51.

Figura 51 - Condutividade térmica das argamassas dosadas



	REF	V20 FS	V40 FS	V60 FS	V20 SFS	V40 SFS	V60 SFS	V20FM	V40 FM	V60 FM	V20 SFM	V40 SFM	V60 SFM
Cond. Térmica	1,27	1,15	0,85	0,72	1,15	0,93	0,73	1,17	0,98	0,90	1,15	0,97	0,83
Desv. Padrão	0,02	0,02	0,05	0,06	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,12	0,05	0,02	0,03

Fonte: Autor (2023)

Ao analisar os dados, observa-se que a amostra sem vermiculita apresentou o maior valor de condutividade térmica (1,27 W/m·K), valor semelhante ao das amostras de referência nos estudos de Barros (2018) e Sinhorelli (2019). Com a introdução da vermiculita, foram

observadas reduções graduais na condutividade térmica à medida que o teor do agregado leve aumentava..

Para as argamassas com 20% de vermiculita, os valores de condutividade térmica variaram entre 1,15 W/m·K e 1,17 W/m·K, o que representa uma redução de 8% a 10% em relação à amostra de referência. Nesse teor, não foi possível identificar influência significativa da granulometria ou do estado de hidratação da vermiculita sobre a condutividade térmica.

No grupo com 40% de vermiculita, as amostras V40FS, V40SFS, V40FM e V40SFM apresentaram reduções na condutividade térmica de 33%, 27%, 23% e 23%, respectivamente. A partir desse teor, observou-se influência das diferentes granulometrias e do estado de hidratação do agregado. Destaca-se que as amostras com vermiculita seca apresentaram os menores valores de condutividade térmica, sendo a V40FS (com vermiculita fina seca) a que apresentou o menor valor absoluto (0,85 W/m·K)..

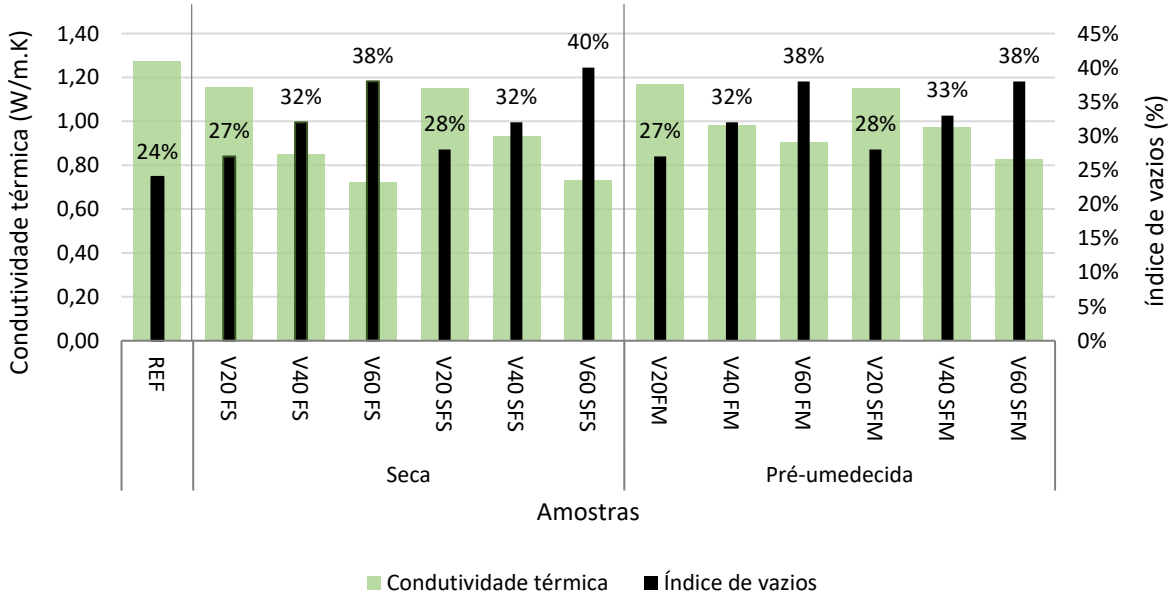
Para as argamassas com 60% de vermiculita, as reduções em relação à amostra de referência foram de 43%, 43%, 29% e 35%, respectivamente, para as amostras V60FS, V60SFS, V60FM e V60SFM. Assim como no grupo anterior, o uso de vermiculita seca resultou em condutividades térmicas inferiores às obtidas com o uso de vermiculita pré-umedecida.

Com base nos resultados, as amostras que apresentaram as menores condutividades térmicas foram V40FS, V60FS e V60SFS. No entanto, ao considerar o desvio padrão, observa-se que V40FS e V60FS podem apresentar valores próximos. Dessa forma, conclui-se que a amostra V60SFS apresentou o melhor desempenho térmico entre todas as testadas.

Pelos resultados apresentados, o uso da vermiculita nas argamassas proporciona a redução da condutividade térmica do composto cimentício, assim condizendo com as características desse agregado leve. Uma vez que as características intrínsecas, alta porosidade, estrutura lamelar e baixa densidade, da vermiculita expandida, são as principais responsáveis por favorecer o ganho de desempenho térmico da argamassa, uma vez que o ar, presente no agregado e nos vazios formados na mistura endurecida, possui baixa condutividade térmica, e por consequência, alta resistência à passagem de calor (BARROS, 2018).

Considerando que a condutividade térmica do ar é baixa (aproximadamente 0,02 W/m·K) e que a incorporação de vermiculita aumenta a quantidade de vazios na argamassa, observa-se uma redução da condutividade térmica proporcional ao aumento do índice de vazios, como evidenciado na Figura 52. Esses resultados corroboram os apresentados por Palomar et al. (2015), Barros (2018) e Koksal et al. (2020), os quais também registraram reduções na condutividade térmica variando de 27% a 46%, 19% a 82% e 32% a 73%, acompanhadas de aumentos no índice de vazios de 18% a 29%, 29% a 74% e 44% a 65%, respectivamente.

Figura 52 - Relação condutividade térmica x índice de vazios das argamassas produzidas



Fonte: Autor (2023)

Ao analisar a Figura 52, observa-se que as amostras com 40% e 60% de vermiculita fina e superfina não apresentaram grande variação no teor de ar incorporado. Todavia, a condutividade térmica das amostras com vermiculita pré-umedecida foi maior do que nas amostras com vermiculita seca, mesmo apresentando índices de vazios semelhantes. Esse comportamento pode estar associado ao maior consumo de ligantes nas argamassas com vermiculita pré-umedecida. Segundo Xie et al. (2018), o aumento no consumo de ligantes tende a reduzir a porosidade do compósito cimentício, e Koksal et al. (2020) destacam que, nas argamassas com vermiculita, o cimento pode preencher os vazios internos da estrutura do agregado, reduzindo o tamanho dos poros e, consequentemente, aumentando a condutividade térmica do material.

4.3.4.2 Transferência de calor por meio de protótipo

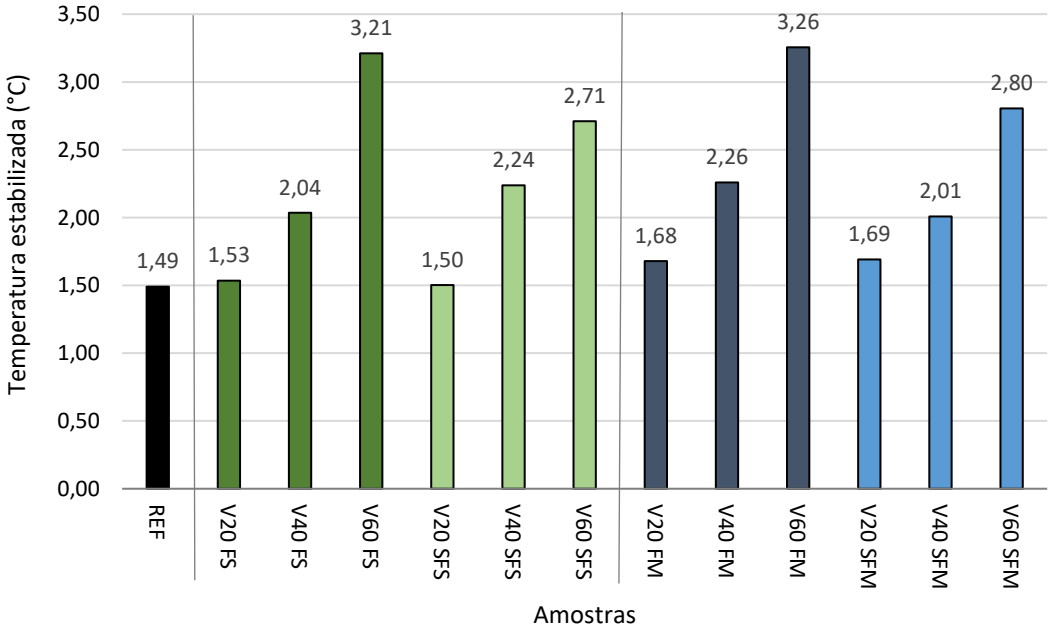
Além do ensaio realizado com o equipamento ISOMET 2114, também foi avaliada a transferência de calor das argamassas por meio de um protótipo. Esse ensaio consistiu em submeter uma das faces da amostra a uma fonte de calor constante durante um período de 6 horas. Com o auxílio de um termopar instalado em cada face, foi monitorada a evolução da temperatura ao longo do tempo, e, com base nesses dados, foi calculada a diferença de temperatura entre as faces.

Os resultados indicaram que todas as amostras apresentaram uma diferença de temperatura máxima, que começou a diminuir após esse pico e tornou-se constante

aproximadamente após 5 horas de ensaio, indicando estabilização térmica e, portanto, uma redução no desempenho térmico ao longo do tempo.

Na Figura 53, são apresentadas as médias das diferenças de temperatura registradas durante a última hora do ensaio. Por meio desses dados, observou-se que a diferença de temperatura entre as faces foi crescente com o aumento do teor de vermiculita. No entanto, essas diferenças não foram significativamente superiores à da amostra de referência, sendo que apenas as argamassas com 60% de vermiculita apresentaram uma diferença superior a 1 °C.

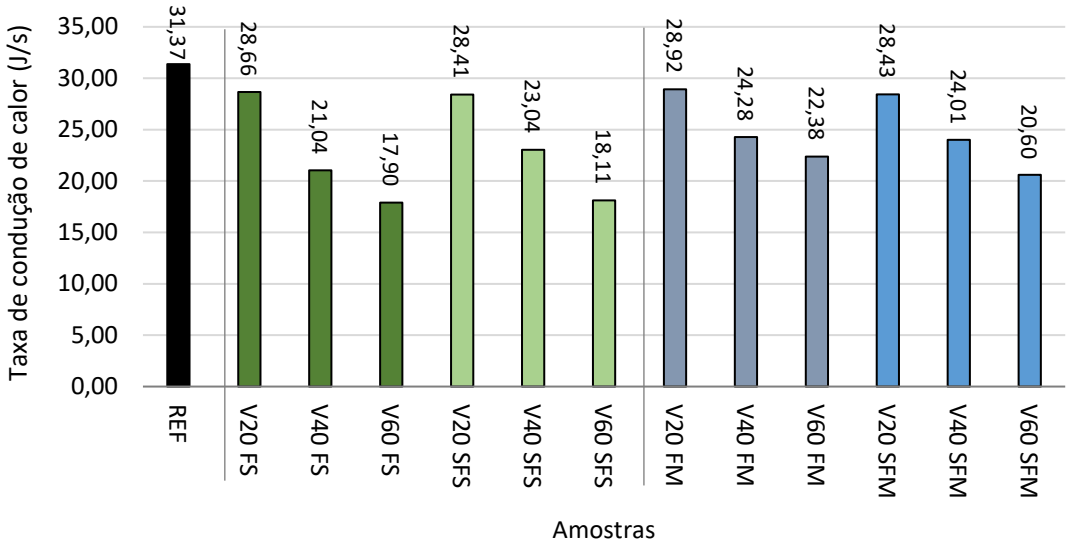
Figura 53 - Médias das diferenças de temperatura entre as faces na última hora do ensaio



Fonte: Autor (2023)

Com base nos resultados obtidos, foi possível calcular a taxa de transferência de calor das placas (Figura 54), permitindo uma análise mais precisa do desempenho térmico dos materiais, uma vez que essa propriedade depende da condutividade térmica, da geometria da peça, da espessura e da diferença de temperatura entre as superfícies.

Figura 54 - Taxa de transferência de calor das argamassas



Fonte: Autor (2023)

Os valores das taxas de transferência de calor demonstraram redução à medida que o teor de vermiculita aumentava, resultado semelhante ao encontrado por Barros (2018). No entanto, é importante destacar que as amostras com 40% e 60% de vermiculita pré-umedecida apresentaram taxas de transferência superiores às suas contrapartes com vermiculita seca, o que indica que as amostras com vermiculita seca oferecem melhor desempenho de isolamento térmico. Porém os resultados da diferença de temperatura das placas indicam que as amostras com 40% de vermiculita apresentaram valores próximos de diferença de temperaturas, já as amostras com 60% de vermiculita fina seca e pré-umedecida apresentaram resultado levemente melhores que as amostras com mesmo percentual de vermiculita super fina, pois houve uma diferença de aproximadamente 0,5 °C entre essas amostras.

Essa diferença pode indicar que as placas com 60% de vermiculita fina apresentaram maior porosidade em relação às que continham vermiculita superfina com o mesmo teor. Esse comportamento pode estar associado à maior relação água/cimento das argamassas com vermiculita fina e à menor eficiência no empacotamento dos grãos, decorrente da combinação da areia natural com a vermiculita fina. Essa combinação pode favorecer a formação de poros maiores e em maior quantidade, contribuindo para a redução da condutividade térmica.

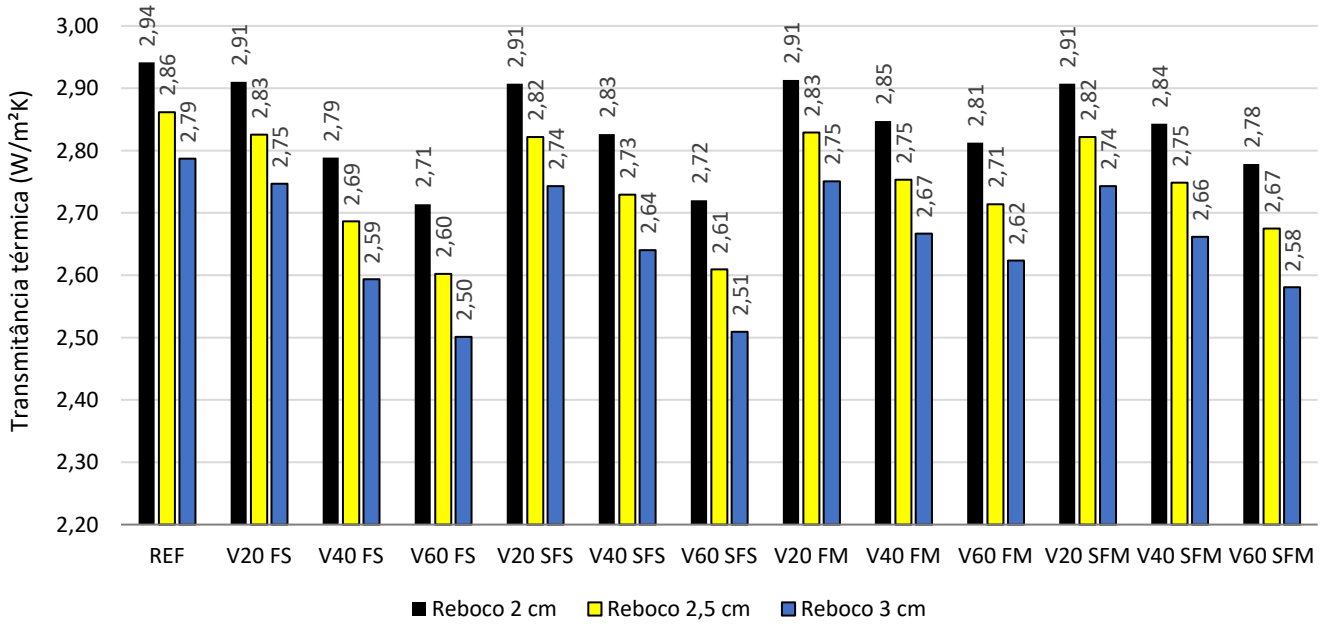
4.3.4.3 Simulação da transmitância térmica em paredes de bloco de concreto

A transmitância térmica aceitável, segundo a NBR 15575-4 (ABNT, 2013), para as zonas bioclimáticas 1 e 2 deve ser inferior a 2,5 W/m²·K. Para as zonas bioclimáticas 3, 4, 5, 6,

7 e 8, o valor máximo permitido é de 3,7 W/m²·K quando a absortância à radiação solar da superfície externa da parede (α^a) for menor ou igual a 0,6, e de 2,5 W/m²·K quando α^a for superior a 0,6.

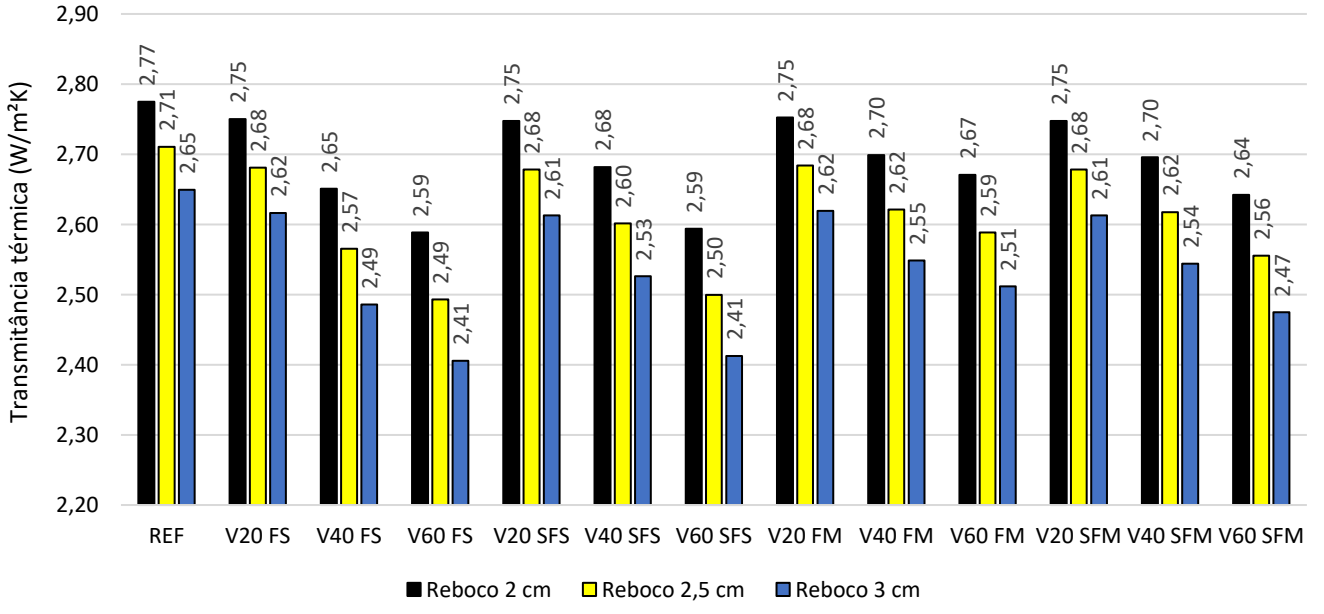
Neste estudo, buscou-se identificar o tipo de argamassa e a espessura de revestimento capazes de atender ao parâmetro mais restritivo da norma, ou seja, uma transmitância térmica inferior a 2,5 W/m²·K..

Figura 55 - Transmitância térmica (W/m²K) para bloco de concreto com 9 cm de espessura



Fonte: Autor (2023)

Figura 56 - Transmitância térmica (W/m²K) para bloco de concreto com 14 cm de espessura



Fonte: Autor (2023)

As Figuras 55 e 56 mostram, respectivamente, o comportamento da transmitância térmica em paredes construídas com blocos de concreto com 9 cm e 14 cm de espessura, de acordo com o tipo e a espessura da argamassa de revestimento. Na simulação com blocos de 9 cm, as argamassas com 60% de vermiculita fina seca (V60FS) e vermiculita superfina seca (V60SFS), aplicadas com 3 cm de espessura, foram capazes de satisfazer os limites exigidos pela norma.

Na simulação com blocos de 14 cm, devido à maior espessura da parede, as mesmas argamassas (V60FS e V60SFS), com espessura de 2,5 cm, também demonstraram ser suficientes para atender ao limite de transmitância térmica de 2,5 $W/m^2 \cdot K$.

Assim como observado no estudo de Barros (2018), os resultados indicam que, para atingir os requisitos da norma de desempenho em paredes construídas com blocos de concreto, é necessário utilizar argamassas com teor de vermiculita igual ou superior a 60% e espessura de revestimento igual ou superior a 2,5 cm.

5 CONCLUSÕES

Com base nas análises dos resultados experimentais das argamassas produzidas com vermiculita em diferentes teores substituição da areia natural, e com variação da granulometria da vermiculita e do estado de hidratação desse agregado leve, pode-se concluir que:

- **Propriedades no estado anidro**

A análise das propriedades anídricas ficou restrita ao estudo das massas unitárias teóricas (MUT) e reais (MUR). Com base nos dados apresentados, verificou-se que o uso da vermiculita possibilita a elaboração de misturas mais leves.

Entretanto, é importante destacar que, na determinação das massas unitárias reais, observou-se que o volume ocupado pelas partículas nas composições foi menor do que o previsto nos cálculos teóricos, uma vez que, na prática, ocorre o empacotamento das partículas. Como consequência, as massas unitárias reais foram superiores às massas unitárias teóricas.

Essa redução no volume efetivamente ocupado resulta em menor rendimento das argamassas, mesmo quando se utilizam proporções e quantidades equivalentes de materiais constituintes.

Com relação às propriedades no estado fresco, endurecido e térmico, as Tabelas 25 e 26 apresentam um resumo dos valores de resistência à compressão, densidade de massa seca, resistência à tração na flexão, densidade de massa fresca das amostras, além da classificação conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005). Também são expostos os resultados referentes à absorção de água por capilaridade, condutividade térmica e transmitância térmica, embora estas últimas propriedades não estejam associadas a classificações normativas.

Tabela 25 - Resumo das propriedades das argamassas com vermiculita seca

PROPRIEDADE		REF	VERMICULITA SECA					
			V20 FS	V40 FS	V60 FS	V20 SFS	V40 SFS	V60 SFS
RESISTENCIA À COMPRESSÃO (Mpa)	VALOR	8,1	7,46	6,99	5,46	7,96	7,28	7,17
	VARIAÇÃO	0%	-8%	-14%	-33%	-2%	-10%	-11%
	CLASSE	5	5	5	4	5	5	5
DENSIDADE DE MASSA SECA (Kg/dm³)	VALOR	1,905	1,847	1,637	1,448	1,862	1,711	1,517
	VARIAÇÃO	0%	-3%	-14%	-24%	-2%	-10%	-20%
	CLASSE	5	5	4	3	5	5	4
RESISTENCIA À TRAÇÃO (Mpa)	VALOR	2,79	2,56	2,15	1,99	2,68	2,38	2,46
	VARIAÇÃO	0%	-8%	-23%	-29%	-4%	-15%	-12%
	CLASSE	5	4	4	3	4	4	4
DENSIDADE DE MASSA FRESCA (Kg/dm³)	VALOR	2,062	1,991	1,866	1,727	1,993	1,881	1,727
	VARIAÇÃO	0%	-3%	-10%	-16%	-3%	-9%	-16%
	CLASSE	5	5	5	4	5	5	4

RETENÇÃO DE ÁGUA (%)	VALOR	83,30%	88,70%	89,60%	90,40%	87,70%	88,00%	90,30%
	VARIAÇÃO	0%	6%	8%	9%	5%	6%	8%
	CLASSE	3	4	4	4	4	4	4
ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (g/dm²) 1 DIA	VALOR	154,54	142,75	192,35	175,48	141,15	80,75	162,58
	VARIAÇÃO	0%	-8%	24%	14%	-9%	-48%	5%
7 DIAS	VALOR	201,9	207,35	287	283,08	201,92	165	270,21
	VARIAÇÃO	0%	3%	42%	40%	0%	-18%	34%
CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W/m.K)	VALOR	1,27	1,16	0,85	0,72	1,15	0,93	0,73
	VARIAÇÃO	0%	-9%	-33%	-43%	-9%	-27%	-43%

Fonte: Autor (2023)

Tabela 26 - Resumo das propriedades das argamassas com vermiculita pré-umedecida

PROPRIEDADE		**REF**	**VERMICULITA PRÉ-UMEDECIDA**					
			V20 FM	**V40 FM**	**V60 FM**	**V20 SFM**	**V40 SFM**	**V60 SFM**
RESISTENCIA À COMPRESSÃO (Mpa)	VALOR	8,1	8,06	7,34	6,17	7,32	7,26	6,68
	VARIAÇÃO	0%	0%	-9%	-24%	-10%	-10%	-18%
	CLASSE	5	5	5	4	5	5	5
DENSIDADE DE MASSA SECA (Kg/dm³)	VALOR	1,905	1,851	1,733	1,548	1,835	1,721	1,551
	VARIAÇÃO	0%	-3%	-9%	-19%	-4%	-10%	-19%
	CLASSE	5	5	5	4	5	5	4
RESISTENCIA À TRAÇÃO (Mpa)	VALOR	2,79	2,42	2,13	1,95	2,28	2,3	2,09
	VARIAÇÃO	0%	-13%	-24%	-30%	-18%	-18%	-25%
	CLASSE	5	4	4	3	4	4	4
DENSIDADE DE MASSA FRESCA (Kg/dm³)	VALOR	2,062	2,002	1,919	1,812	2,001	1,918	1,809
	VARIAÇÃO	0%	-3%	-7%	-12%	-3%	-7%	-12%
	CLASSE	5	5	5	4	5	5	4
RETENÇÃO DE ÁGUA (%)	VALOR	83,30%	88,20%	89,40%	90,60%	89,70%	90,20%	91,80%
	VARIAÇÃO	0%	6%	7%	9%	8%	8%	10%
	CLASSE	3	4	4	4	4	4	4
ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (g/dm²) 1 DIA	VALOR	154,54	173,13	186,33	220,96	139,48	121,23	173,48
	VARIAÇÃO	0%	12%	21%	43%	-10%	-22%	12%
7 DIAS	VALOR	201,9	226,52	256,17	312,1	181,27	193,25	254,25
	VARIAÇÃO	0%	12%	27%	55%	-10%	-4%	26%
CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W/m.K)	VALOR	1,27	28,92	24,28	22,38	28,43	24,01	20,6
	VARIAÇÃO	0%	-8%	-23%	-29%	-9%	-23%	-34%

Fonte: Autor (2023)

- **Propriedades no estado fresco**

Em razão da alta capacidade de absorção de água da vermiculita, as argamassas produzidas com esse agregado apresentaram consumo crescente de água à medida que o teor de vermiculita foi aumentado. Assim como observado em outras pesquisas, para manter a trabalhabilidade e atingir o espalhamento de 260 mm ± 5, foi necessário elevar o consumo de água conforme se aumentava o teor de vermiculita na mistura. Consequentemente, houve um

aumento na relação água/cimento, o que impactou negativamente o desempenho das argamassas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Durante o processo de mistura das argamassas com vermiculita pré-umedecida, observou-se que parte da água previamente absorvida foi liberada, contribuindo para a hidratação dos ligantes. Isso exigiu maior atenção na adição complementar de água, a fim de evitar a segregação da mistura. A utilização dessa metodologia não se mostrou eficaz na redução do consumo efetivo de água, visto que a água liberada pela vermiculita pré-umedecida, somada à água adicionada diretamente à mistura, resultou em quantidades semelhantes às utilizadas nas argamassas com vermiculita seca.

Um dos efeitos decorrentes da utilização da vermiculita é a redução da massa específica fresca. Neste estudo, observou-se uma diminuição variando de 3% a 16%, conforme o teor de vermiculita aumentava de 20% para 60%. Com base nas Tabelas 20 e 21, verifica-se que, apesar da leve redução na densidade de massa fresca, as argamassas com 20% e 40% de vermiculita mantiveram a mesma classificação da argamassa de referência (classe 5). Já as argamassas com 60% de vermiculita foram enquadradas na classe 4. Todavia, essa classificação pouco representa o comportamento real dessa propriedade, pois, segundo Carasek (2010), todas as argamassas produzidas podem ser classificadas como de densidade fresca normal.

A utilização da vermiculita também resultou em um pequeno aumento no teor de ar incorporado nas argamassas. No entanto, a correlação entre o teor de ar incorporado e a redução da densidade de massa fresca foi considerada baixa. Por outro lado, a correlação entre o teor de vermiculita na mistura e a redução da densidade fresca mostrou-se bastante significativa, indicando que essa redução está mais associada à substituição progressiva da areia — um material de maior densidade — pela vermiculita, que é mais leve e porosa.

Devido à sua elevada capacidade de absorção e retenção de água, as argamassas contendo vermiculita apresentaram alta capacidade de retenção hídrica, com valores próximos de 90% para os teores de 20% e 40%, e levemente superiores a 90% para os teores de 60%. De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), a argamassa de referência foi classificada como classe 3 em relação a essa propriedade, enquanto as argamassas com vermiculita atingiram a classificação 4.

- **Propriedades no estado endurecido**

Em razão da evaporação da água durante o processo de cura, as argamassas apresentaram redução de até 16% na massa específica ao passarem do estado fresco para o endurecido. Em comparação com a argamassa de referência, o uso da vermiculita nas misturas

proporcionou uma redução entre 2% e 24% na densidade de massa seca. As argamassas que apresentaram redução de até 10% (V20FS, V20SFS, V40SFS, V20FM, V40FM, V20SFM, V40SFM) obtiveram, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), a mesma classificação da amostra de referência (classe 5). Por outro lado, as argamassas V40FS, V60SFS, V60FM e V60SFM, que apresentaram reduções entre 14% e 20%, foram classificadas como classe 4. A amostra V60FS, que apresentou a maior redução (24%), obteve classificação 3.

Apesar do empacotamento das partículas nas composições em estado anidro, o uso da vermiculita promoveu aumento no índice de vazios, resultado do maior consumo de água necessário quando esse agregado leve é utilizado. Em relação à amostra de referência, observou-se um acréscimo no índice de vazios entre 12,5% e 67% à medida que o teor de vermiculita variava de 20% a 60%. No entanto, não se identificou influência significativa da granulometria da vermiculita ou de seu estado de hidratação, destacando-se o teor de vermiculita e o consumo de água como os principais fatores que afetam o índice de vazios.

Como consequência do aumento no índice de vazios, as argamassas com vermiculita apresentaram, em geral, maior absorção por capilaridade em comparação com a amostra de referência. Entretanto, as argamassas com 20% e 40% de vermiculita superfina, tanto seca quanto pré-umedecida, apresentaram absorções por capilaridade levemente inferiores às da argamassa de referência.

A resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas diminuiu conforme o teor de vermiculita aumentou. No entanto, em comparação com outras pesquisas, as argamassas produzidas neste estudo apresentaram reduções menores, possivelmente em decorrência das menores relações água/cimento adotadas. Apesar da queda na resistência à compressão, as argamassas com vermiculita, com exceção das amostras V60FS e V60FM, mantiveram a mesma classificação da amostra de referência (classe 5). Quanto à resistência à tração, a amostra REF foi classificada como classe 5; as amostras V60FS e V60FM foram enquadradas na classe 3, enquanto as demais misturas obtiveram classificação 4.

- **Propriedades térmicas**

O aumento gradual do teor de vermiculita nas misturas reduziu a condutividade térmica das argamassas em até 43% em relação à argamassa de referência. As amostras com 20% de vermiculita apresentaram apenas uma leve redução na condutividade térmica em comparação à referência. Contudo, entre essas amostras, não foram observadas diferenças significativas na condutividade térmica em função da variação da granulometria ou do estado de hidratação do agregado.

Nas argamassas com 40% e 60% de vermiculita, observou-se que as amostras com vermiculita fina seca e superfina seca apresentaram condutividade térmica inferior às suas respectivas contrapartes com vermiculita pré-umedecida. Esse comportamento pode estar relacionado ao maior consumo de ligantes nas argamassas com vermiculita pré-umedecida, o que contribui para um refinamento da estrutura porosa.

Nos ensaios realizados com o protótipo, verificou-se um leve aumento na diferença de temperatura entre as faces das amostras à medida que se elevava o teor de vermiculita. Destacam-se, nesse contexto, as amostras com 60% de vermiculita fina seca e fina pré-umedecida, que apresentaram as maiores diferenças de temperatura — aproximadamente 115% superiores à da amostra de referência.

A aplicação de argamassas com vermiculita em paredes de blocos de concreto demonstrou ser eficaz na redução da transmitância térmica do sistema de vedação. Entretanto, para que sejam atendidas as exigências da NBR 15575-4 (ABNT, 2013), é necessário utilizar argamassas com teor volumétrico de vermiculita igual ou superior a 60% e espessura de revestimento mínima de 2,5 cm.

Com base no exposto, conclui-se que a substituição parcial da areia por vermiculita proporciona efeitos positivos, como a redução da massa específica e a melhoria no desempenho térmico das argamassas. No entanto, como efeitos adversos, o uso desse agregado leve resulta na diminuição das resistências mecânicas, aumento da porosidade e maior absorção de água.

A NBR 13281 (ABNT, 2005) apresenta uma classificação para argamassas, mas não estabelece qual classe deve ser exigida para cada tipo de aplicação. Assim, adotando como critérios mínimos a resistência à compressão de 6,2 MPa, conforme estipulado pela norma americana ASTM C 1329, e a capacidade de atingir transmitância térmica inferior a 2,5 $W/m^2 \cdot K$ em paredes de blocos de concreto, destaca-se a argamassa com 60% de vermiculita superfina seca (V60SFS) como a que apresentou melhor desempenho térmico e mecânico combinado.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do exposto neste estudo, pode-se recomendar para pesquisas futuras os seguintes temas:

- Estudar traços com sílica ativa ou metacaulim e teores de vermiculita superior a 60%;
- Analisar a incorporação de aditivos na argamassa com o intuito de diminuir o aumento no teor de água com a introdução de vermiculita;
- Aplicar a argamassa com vermiculita em paredes e avaliar o sistema o sistema (Parede + argamassa) de acordo com norma de desempenho (NBR 15.575 (ABNT, 2013);
- Analisar a influência da vermiculita expandida na durabilidade das argamassas;

REFERÊNCIAIS BIBLIOGRÁFICAS

APPLIED PRECISION. **ISOMED 2114: Thermal properties analyzer**. 2011, 31 p. User's Guide version 1.6.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175** – **Cal hidratada para argamassas – requisitos.** Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR 7217** – **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 1987.

____. **NBR 9778** – **Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2012.

____. **NBR 9779** – **Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 2012.

____. **NBR 11355** – **Vermiculita expandida - Análise granulométrica - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2015.

____. **NBR 13276 – Argamassa para assentamento e revestimento de parede e tetos – Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.

____. **NBR 13277 – Argamassa para assentamento e revestimento de parede e tetos – Determinação da retenção de água.** Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 13278 – Argamassa para assentamento e revestimento de parede e tetos – Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2005.

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

____. **NBR 13280 – Argamassa para assentamento e revestimento de parede e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 13281 – Argamassa para assentamento e revestimento de parede e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.

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

____. **NBR 15220** – **Desempenho térmico de edificações.** Rio de Janeiro, 2003.

____.**NBR 15575 - Edificações habitacionais - desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

____. **NBR 16541 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios**, Rio de Janeiro, 6p. 2016.

____. **NBR 16605 - Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**, Rio de Janeiro, 4p. 2017.

____.**NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

____. **NBR NM 45 - Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios**, 8p. 2006

____. **NBR NM 52 - Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**, 6p. 2009

____. **NBR NM 248 - Agregados – Determinação da composição granulométrica**, Rio de Janeiro, 6p. 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Manual de revestimento de argamassa.** São Paulo, 2002.

American Society for Testing and Materials. **ASTM 270 – Standard specification for mortar for unit masonry.** United States, 1999.

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

BASSET, W. A. **The Geology of vermiculite ocurrences.** Argilas clay miner. 10, p. 61-69, 1961.

BASTOS, P. K. X; CASTRO, E. B. P; ZAMBRANO, L. M. A. **Potencial de redução do consumo de energia em edificações brasileiras pelo uso de argamassa de revestimento isolante.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 12., 2017, São Paulo. Anais do XII SBTA.

BAUER, E. **Revestimentos de argamassa – características e peculiaridades**. Brasília: LEM-UnB; Sinduscon, 2005. 92 p.

BAUER, L. A. **Materiais de construção - volume 1**. 5º Edição. Rio de janeiro, 488 p, 2008.

BEZERRA, A. J. V. **Concretos com substituição parcial do agregado natural por resíduo de EVA – Influência em propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade**. 269f. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de tecnologia e geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

BRASIL. Congresso. Câmara dos Deputados. Constituição (2001). Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. **Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e Dá Outras Providências**. Brasil.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração – ANM. **Sumário Mineral 2017**. Brasília. ANM. 2017. 201 p.

BRITANNICA - THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA. **Vermiculite**. In *Encyclopedia Britannica*, recuperado de https://www.britannica.com/science/vermiculite. 2018.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 4887-1 - Mortar admixtures. Specification for air-entraining (plasticizing) admixtures.** United Kingdom, 1986

BUSH, A. L. **Materiais de construção: agregados leves**. In Enciclopédia de Materiais: Ciência e Tecnologia, p. 1550–1558, Elsevier, 2001.

COELHO, A. Z. G.; TORGAL, F. P.; JALALI, S. **A Cal na Construção.** 1 ªed. Guimarães/ Portugal, Universidade de Minho, 2009.

CAMPOS, A.; MORENO, S.; MOLINA, R. **Characterization of vermiculite by XRD and Spectroscopic techniques.** Earth Sciences Research Journal, v. 13, n. 2, p. 108-118. 2009.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 6ª Edição. São Paulo, 1988.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, G. C (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2 ªed. São Paulo, IBRACON, 2010. Vol.1. p. 893-943.

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

CARNEIRO, A. M. P. **Revestimento externo em argamassa de cimento, cal e areia – Sistemática das empresas de construção civil de Porto Alegre.** Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 1993.

CARNEIRO, A.M.P CINCOTTO, M. A. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas.** Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, 14 p, EPUSP, São Paulo, 1999.

CINTRA, C. L. D; PAIVA, A. E. M; BALDO, J. B. **Argamassa de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus – Propriedades relevantes.** Revista Cerâmica, n° 60, pag. 69-76, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Uso de ar condicionado no setor residencial brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética.** Brasília/ DF, 2018 (Nota Técnica EPE 030/2018)

FRANÇA, S. C. A; BRAGA, P. F. A; COUTO, H. J. B.; GONÇALVES, C. C. **Vermiculita, mais que um mineral termo acústico.** In: SIMPÓSIO DE MINERAIS INDUSTRIAIS DO NORDESTE, 4., 2016, João Pessoa/PB.

GELLERT, R. **Materiais minerais inorgânicos para isolamento em edifícios**. In Materiais para eficiência energética e conforto térmico em edifícios*, p. 193–228, 2010.*

GOMES, A. de O.; NEVES, C. M. M. **Proposta de método de dosagem racional de argamassas contendo argilominerais.** Ambiente construído, Porto Alegre, v.2, n.2, p. 19-30, 2002.

GRIST, E. R; PAINE, K. A; HEATH, A; NORMAN, J; PINDER, H. **Compressive strengh development of binary and ternary lime-pozzolan mortars.** Revista Materials & Design, v. 52, p. 514 – 523, maio 2013.

GUNDUZ, L. KALKAN, S. O. **A technical evaluation on the determination of thermal comfort parametric properties of different originated expanded and exfoliated aggregates**. Arabian Journal of Geosciences (2019).

HANSEN, W. C.; LIVOVICH, A. F. **Thermal conductivity of refractory insulating concrete.** In Journal of the American Ceremic Society, v. 36, n. 11, 1953.

HOMBOSTEL, Caleb. **Vermiculita**. In Construction Materials: Types, Uses and applications. Nova York: John Wiley & Sons, Inc., 1991

HILLIER, S.; MARWA, E.; RICE, C. M. **On the mechanism of exfoliation of vermiculite**. *In* Clay Minerals, v. 48, p. 563 – 582, 2013.

HINDMAN, J. R. **Vermiculite**. *In* Industrial Minerals e Rocks: Commodities, markets and uses. 7° Edição. Colorado/ USA, p. 1015 - 1026, 2006.

IPCC – PAINEL INTERGOVERNAMETAL SOBRE MUDANÇAS CLIMATICAS. **Aquecimento global de 1,5°C**. Brasil, 2019.

KOKSAL, F., GENCEL, O., KAYA, M. **Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures.** Construction and Building Materials 88: 175-187, 2015.

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

LAMBERTS, R. **Desempenho térmico de edificações.** Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2016.

LANZÓN, M., GARCÍA-RUIZ, P. A. **Lightweight cement mortars: Advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability.** Construction and Building Materials 22: 1798-1806, 2008.

LOW, N. M. P. **Journal of building physics.** Journal of Building physics. 1984.

MARCOS, C.; RODRÍGUEZ, I. **Expansion Behaviour of comercial vermiculites at 1000° C.** In Applied Clay Science, v 48, p. 492 – 498, 2010.

MARVILA, M. T. Desenvolvimento de um aditivo para argamassas de múltiplos uso com uma composição argila-calcário. Dissertação para mestrado na UENF. Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 2ª Edição. São Paulo, 2014.

NASCIMENTO, Marco César Bezerra do. **Argamassas térmica produzida com resíduos da exploração e processamento mineral de caulim e vermiculita expandida.** 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mineral), Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

NAVARRO, G. R. B.; ZANARDO, A.; MONTIBELLER, C. C.; LEME, T. G. **Livro de referência de minerais comuns e economicamente relevantes: Filossilicatos.** Museu de Minerais, Minérios e Rochas Prof. Dr. Heinz Ebert. 2018.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto.** 5. Ed. São Paulo: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M. & BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**, 2° Edição. Porto Alegre. 2013

QUARTARONE, Priscila; NEVES, Márcia Angélica F. S.; CALDAS, Luiz Fernando S. **Estudo da vermiculita como adsorvente de íons cobre (II) em solução aquosa.** Perspectiva da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, v.4, n. 1/2, 2012.

PALOMAR, I.; BARLUENGA, G.; PUENTES, J. **Lime–cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance.** Revista Construction and Building Materials. V. 75, p. 306-314, 2015.

PENCE, F. K.; BLOUNT, E. B. **Vermiculite as a raw material in ceramic manufacture.** In Journal of the American Ceremic Society, 1944.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânico dos solos em 16 aulas.** 3 ed., Oficina de textos: São Paulo, 2006.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION – **PCA. Masonry information – Mortar cement: Product data sheet**. Setembro de 2002. Disponível em: https://www. https://www.cement.org/docs/default-source/fc_mat-app_pdfs/masonry/is281-mortar-cement-product-data-sheet.pdf?sfvrsn=6&sfvrsn=6>. Acesso em 20 abr. 2020.

RASHAD, A. M. **Vermiculite as a construction material – A short guide for civil engineer.** Constructon and Building Materials, 2016.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil.** 4º Ed. Belo Horizonte. Editora UFMG, 2013

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. **Influência do tipo da cal hidratada na reologia de pastas.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999. Boletim Técnico n. 233.

REIS, E. **Vermiculita no Brasil – Situação atual. Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT)**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), 2002.

ROJAS-RAMÍREZ, R. A.; MACIEL M. H.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G.; COELHO, A. C. V. **Impacto do uso de resíduo de vermiculita no estado endurecido de argamassas.** Cerâmica, São Paulo, v. 65, n. 373, Jan./Mar. 2019.

ROMANO, R. C. de O.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. **Incorporação de ar em materiais cimentícios: uma nova abordagem para o desenvolvimento de argamassas de revestimento**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 289-308, abr./jun. 2018

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. São Paulo: Pini, 2009

SALVADOR, Gorge Andres Bannura. **Otimização da distribuição granulométrica do agregado miúdo para uso em revestimentos de argamassas na cidade de Sant'Ana do Livramento – RS**. 2005. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

SABBATINI, F. H.; BAÍA, L. L. M. **Projeto e execução de revestimento de argamassa.** São Paulo: O Nome da Rosa, 2000.

SCHAEFFER, J. A. **Mineral Wool na Vermiculite as Insulation.** *In* Industrial & Engineering chemistry, p. 1298 – 1303, 1935.

SCHULZE, D. G. **Clay Minerals**. Encyclopedia of Soils in the Environment. Elsevier / Academic Press, Vol. 1, pág. 246-254, 2005.

SELMO, S.M.S.; NAKAKURA, E.H.; MIRANDA, L.F.R; MEDEIROS, M.H.F; SILVA, C.O. **BT/ PCC/ 310 - Propriedades e especificações de argamassas industrializadas de múltiplo uso**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP, 2002 (Boletim Técnico).

SINHORELLI, K. S. **Influência de adições minerais e vermiculita na reologia e propriedades térmicas da argamassa de revestimento.** Dissertação para mestrado na UFPB. João Pessoa, Paraíba, 2019.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. **Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XI. 2006, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ANTAC, 2006. p. 4343-4358

SILVA, L. M.; RIBEIRO, R. A.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M. **Role of lightweight fillers on the properties of a mixes-binder morta.** Cement & Concrete Composites, 2010.

SOUSA, A. J. C. S. **Aplicação de argamassas leves de reboco e assentamento em alvenarias.** 2010, 113 f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto.

STANCATO, A. C. **Determinação da condutividade térmica e da resistência mecânica em argamassa leve.** Dissertação, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas/SP, 2000.

STRUBLE, L.J; JIANG Q. **Effects of air entrainment on rheology**. ACI Materials Journal 101(6), p.448–456, 2004.

TVA – The Vermiculite Association. **Exfoliated Vermiculite Data**. Harrisburg/ EUA (2020)

UGARTE, J. F. O.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Vermiculita**. In: Rochas & minerais industriais: usos e especificações. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. Parte II. Cap.32. p.677-698.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. **Mineral Commodity Summaries.** Janeiro de 2020. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/vermiculite-statistics-and-information>. Acesso em: 14 abr. 2020

Y. XIE, J. LI, Z. LU, J. JIANG, Y. NIU – **Effects of bentonite slurry on air-void structure and properties of foamed concrete**, Constr. Build. Mater. 179 (2018) 207 – 219.