



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Ilana Maria da Silva Barros**

**ANÁLISE TÉRMICA E MECÂNICA DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM  
ADIÇÃO DE VERMICULITA EXPANDIDA EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO**

**Natal/RN  
2018**

**Ilana Maria da Silva Barros**

**ANÁLISE TÉRMICA E MECÂNICA DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM  
ADIÇÃO DE VERMICULITA EXPANDIDA EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Andreza Kelly Costa Nóbrega

Natal/RN  
2018

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Barros, Ilana Maria da Silva.

Análise térmica e mecânica de argamassas de revestimento com  
adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado /  
Ilana Maria da Silva Barros. - 2018.  
86 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do  
Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Civil. Natal, RN, 2018.

Orientadora: Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral.

Coorientador: Profa. Dra. Andreza Kelly Costa Nóbrega.

1. - Argamassa leve - Dissertação. 2. Argamassa térmica -  
Dissertação. 3. Desempenho térmico - Dissertação. 4. Norma de  
desempenho - Dissertação. I. Cabral, Kleber Cavalcanti. II.  
Nóbrega, Andreza Kelly Costa. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 691.53

**Ilana Maria da Silva Barros**

**ANÁLISE TÉRMICA E MECÂNICA DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM  
ADIÇÃO DE VERMICULITA EXPANDIDA EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr. Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral – Orientador

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Andreza Kelly Costa Nóbrega – Coorientadora

---

Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – Examinador interno (UFRN)

---

Prof. Dr. Wendell Rossine Medeiros de Souza – Examinador externo (UFERSA)

**Natal/RN, 09 de março de 2018.**

# **ANÁLISE TÉRMICA E MECÂNICA DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM ADIÇÃO DE VERMICULITA EXPANDIDA EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO**

**Ilana Maria da Silva Barros**

Orientador: Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Andreza Kelly Costa Nóbrega

## **RESUMO**

A busca por materiais de construção que levam a avanços, principalmente quanto ao aspecto de eficiência energética de edifícios, está cada vez mais constante na atualidade. No Brasil, a NBR 15575 (2013) estabelece os padrões mínimos sobre a eficiência das edificações no país, trazendo, entre critérios de estabilidade estrutural e vida útil, as diretrizes para obtenção do conforto térmico e acústico e da segurança contra incêndios. Nesse contexto, é crescente o número de pesquisas voltadas a investigar o emprego de agregados leves, como a vermiculita, que possui importantes propriedades, especificamente baixa condutividade térmica e elevada resistência ao fogo. Desse modo, a presente pesquisa buscou avaliar o desempenho térmico de argamassas no traço em volume 1:1:6, com adição de vermiculita expandida em porcentagens definidas de substituição ao agregado miúdo (25%, 50%, 75% e 100%). O procedimento experimental foi iniciado com a caracterização química, mineralógica, microestrutural e térmica da vermiculita, e com a caracterização física desta e da areia constituinte. Foi realizada a análise das propriedades de consistência, retenção de água, absorção por capilaridade, porosidade e resistência mecânica de cada mistura. A fim de determinar a eficiência energética do revestimento, foram realizados ensaios de caracterização térmica. Nos resultados do estado fresco e endurecido constatou-se que as argamassas contendo vermiculita expandida apresentaram maior consumo e retenção de água, menor densidade, redução da resistência mecânica e aumento da absorção por capilaridade e do índice de vazios. Na análise do desempenho térmico, nos sistemas de vedação com tijolos cerâmicos, quaisquer que sejam as argamassas utilizadas, todos atenderam aos requisitos de transmitância térmica exigidos pela NBR 15575

(2013), e apenas a argamassa com 100% de vermiculita não atendeu ao limite de capacidade térmica. No sistema com blocos de concreto, todas foram consideradas adequadas para os limites de capacidade térmica, mas para os de transmitância, apenas as argamassas com 75% e 100% estavam apropriadas. Desse modo, admite-se que a adição de vermiculita expandida resulta em argamassas com bom desempenho térmico, sendo a de 25% a mais indicada para utilização como revestimento por ter sido a que apresentou os melhores resultados termomecânicos.

**Palavras-chave:** desempenho térmico, argamassa leve, argamassa térmica, Norma de desempenho.

# **THERMAL AND MECHANICAL ANALYSIS OF COATING MORTARS WITH ADDITION OF EXPANDED VERMICULITE INSTEAD OF AGGREGATE**

**Ilana Maria da Silva Barros**

Adviser: Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral  
Co-Adviser: Prof.<sup>a</sup> Dra. Andreza Kelly Costa Nóbrega

## **ABSTRACT**

The search for building materials that lead to advances, especially as regards to the aspect of energy efficiency of buildings, is increasingly constant nowadays. In Brazil, the NBR 15575 (2013) establishes the minimum standards about the efficiency of buildings in the country, bringing among criteria of structural stability and useful life, the guidelines to obtain thermal and acoustic comfort, and fire safety. In this context, there is a growing number of studies aiming to investigate the use of lightweight aggregates, such as vermiculite, which has important properties, specifically low thermal conductivity and high fire resistance. Thus, the current research sought to evaluate the thermal performance of mortars in the 1: 1: 6 volume, with the addition of expanded vermiculite (superfine) in defined percentages of replacement to the small aggregate (25%, 50%, 75%, and 100%). The experimental procedure was initiated with the chemical, mineralogical, microstructural and thermal characterization of the vermiculite, and with its physical characterization and with the constituent sand. The analysis of the properties of workability, water retention, capillary absorption, porosity, and mechanical strength of each mixture was performed. In order to determine the energy efficiency of the coating, thermal characterization tests were carried out. In the results of the fresh and hardened state, it was observed that the mortars containing expanded vermiculite presented higher water consumption and retention, lower mass density, reduction of mechanical strength, and increased capillary absorption and index of voids. In the analysis of the thermal performance, it was observed that in ceramic brick sealing systems, whatever the mortars used, all adhered the thermal transmittance requirements, and

only the mortar with 100% of vermiculite did not meet the established limit of thermal capacity. In the concrete block system, all were considered adequate for the thermal capacity limits, however, only 75% and 100% replacement mortars contributed with all the thermal transmittance requirements. Thus, it is indicated that the addition of expanded vermiculite results in mortars with good thermal performance, being that of 25% the most suitable for use as a coat because it was the one that presented the best thermomechanical results.

**Keywords:** thermal performance, lightweight mortar, thermal mortar, performance standard.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida, por me dar força em todos os momentos e por tudo o que conquistei e o que ainda hei de conquistar.

Aos meus pais, Antonia e Espedito, por todo amor e também por todo incentivo e investimento na minha educação.

A minha irmã, Isabel, e ao meu cunhado, Marcos, por todo apoio e por serem, assim como meus pais, minha inspiração.

A minha sobrinha, Marina, por todos os momentos de carinho e alegria.

Ao meu orientador, Kleber Cavalcanti, por todo incentivo, disponibilidade, compreensão e pelo patrocínio de equipamentos e de todos os materiais usados na pesquisa.

A minha coorientadora, Andreza Nóbrega, pela paciência, incentivo e colaboração na realização da dissertação.

Aos meus amigos da UFERSA que muito me ajudaram a tornar possível a realização desse mestrado longe do meu local de trabalho, principalmente, ao engenheiro Emanuel, meu chefe Jansen, Cecília, Wilson, Eliana e Fabricia.

Aos professores, Antonio Eduardo Martinelli e George Marinho, pela disponibilização de laboratórios e equipamentos, e ao professor, Wendell Rossine, pelas sugestões na realização dos ensaios de análises térmicas.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil por todo conhecimento transmitido, em especial, Andreza, Kleber, Marcos, Vitória e Arnaldo.

Aos amigos do mestrado, Ruan, Jhéssica e Rísia pelo apoio e por todas as dicas durante a realização dessa pesquisa.

À Amanda e ao técnico de laboratório, Sandro, pelo auxílio na fase experimental.

A toda estrutura laboratorial disponibilizada pela UFRN e pela UFERSA.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....	xiii
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
Introdução e relevância da pesquisa.....	1
1.1 Justificativa .....	2
1.2 Objetivos da Pesquisa.....	3
1.2.1 Objetivo Geral.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos .....	3
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>5</b>
Fundamentação teórica .....	5
2.1 Vermiculita .....	5
2.1.1 Vermiculita na Indústria da construção civil .....	6
2.1.2 Vermiculita expandida como agregado leve.....	7
2.2 Argamassa .....	8
2.3 Argamassa leve.....	9
2.4 Argamassa térmica.....	10
2.5 Argamassa com vermiculita .....	11
2.6 Propriedades térmicas .....	13
2.7 Norma de desempenho (ABNT NBR 15575:2013).....	14
2.7.1 Desempenho térmico.....	15
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>19</b>
Programa experimental .....	19
3.1 Materiais .....	19
3.1.1 Cimento.....	19
3.1.2 Cal.....	20
3.1.3 Agregados .....	20
3.1.4 Água .....	20
3.2 Métodos .....	20
3.2.1 Caracterização dos agregados .....	20
3.2.2 Produção das argamassas.....	22
3.2.3 Propriedades das argamassas no estado fresco .....	24
3.2.3.1 Índice de consistência .....	24
3.2.3.2 Densidade de massa .....	25
3.2.3.3 Retenção de água .....	25
3.2.4 Moldagem e cura dos corpos de prova.....	26
3.2.5 Propriedades das argamassas no estado endurecido .....	26
3.2.5.1 Resistência à compressão e à tração na flexão.....	26
3.2.5.2 Densidade de massa .....	27
3.2.5.3 Absorção de água por capilaridade .....	27
3.2.5.4 Índice de vazios .....	28
3.2.5.5 Módulo de elasticidade dinâmico.....	28
3.2.5.6 Ensaio térmicos .....	28
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>35</b>
Resultados e discussões.....	35

4.1 Caracterização química, mineralógica e microestrutural da vermiculita expandida.....	35
4.2 Caracterização física dos agregados.....	37
4.2.1 Composição granulométrica.....	37
4.3 Caracterização das argamassas no estado fresco.....	39
4.3.1 Índice de consistência.....	39
4.3.2 Densidade de massa.....	42
4.3.3 Retenção de água.....	44
4.4 Caracterização das argamassas no estado endurecido.....	44
4.4.1 Microestrutura das argamassas.....	44
4.4.1 Densidade de massa.....	46
4.4.2 Resistência à compressão e à tração na flexão.....	47
4.4.3 Módulo de elasticidade dinâmico.....	50
4.4.4 Absorção de água por capilaridade.....	51
4.4.5 Absorção de água por imersão e índice de vazios.....	53
4.5 Análise térmica das argamassas.....	55
4.5.1 Propriedades térmicas.....	55
4.5.2 Análise do desempenho térmico.....	59
CAPÍTULO 5.....	64
Conclusões.....	64
Referências bibliográficas.....	67

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 2

- Figura 2.1 – Vermiculita: (a) no aspecto natural, (b) expandida, após aquecimento...5  
 Figura 2.2 – Zoneamento bioclimático brasileiro..... 16

### Capítulo 3

- Figura 3.1 – Fluxograma experimental..... 19  
 Figura 3.2 – Determinação da massa específica da vermiculita expandida.....22  
 Figura 3.3 – Ensaio de Índice de consistência: (a) Mistura dos materiais e (b) Espalhamento. ....25  
 Figura 3.4 – Ensaio mecânico: (a) resistência à tração na flexão e (b) resistência à compressão.....27  
 Figura 3.5 – Ensaio de absorção por capilaridade. ....28  
 Figura 3.6 – Determinação das propriedades térmicas: (a) KD-2 Pro e câmara térmica e (b) sonda com pasta térmica e câmara térmica preenchida com isopor granulado. ....29  
 Figura 3.7 – Parede de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces.....30  
 Figura 3.8 – Parede com blocos de concreto rebocados em ambas as faces. ....30  
 Figura 3.9 – Protótipo de análise térmica: Modelo esquematizado. ....33  
 Figura 3.10 – Protótipo de análise térmica: (a) preparação e (b) experimento em andamento. ....34

### Capítulo 4

- Figura 4.1 – Gráfico do DRX da vermiculita expandida..... 36  
 Figura 4.2 – Curva TG da vermiculita expandida. ....36  
 Figura 4.3 – Imagens do MEV da vermiculita expandida. ....37  
 Figura 4.4 – Curvas granulométricas da areia natural (AN) e da vermiculita expandida (VE).....38  
 Figura 4.5 – Relação água/cimento em função dos teores de substituição do agregado. ....40

Figura 4.6 – Gráficos do espalhamento versus relação água/cimento: (a) A25, (b) A50, (c) A75 e (d) A100.....	41
Figura 4.7 – Densidade de massa no estado fresco. ....	43
Figura 4.8 – Retenção de água. ....	44
Figura 4.9 – MEV das argamassas: (a) 0%, (b) 25%, (c) 50%, (d) 75%, (e) e (f) 100% de substituição do agregado. ....	45
Figura 4.10 – Densidade de massa no estado endurecido. ....	46
Figura 4.11 – Resistência à compressão aos 7 e 28 dias. ....	48
Figura 4.12 – Resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias. ....	48
Figura 4.13 – Módulo de elasticidade dinâmico. ....	50
Figura 4.14 – Absorção por capilaridade.....	52
Figura 4.15 – Coeficiente de capilaridade. ....	52
Figura 4.16 – Absorção de água por imersão. ....	54
Figura 4.17 – Índice de vazios.....	55
Figura 4.18 – Condutividade térmica das argamassas. ....	57
Figura 4.19 – Índice de vazios versus condutividade térmica. ....	57
Figura 4.20 – Capacidade calorífica das argamassas.....	58
Figura 4.21 – Variação da temperatura versus tempo. ....	61
Figura 4.22 – Taxa de transferência de calor. ....	62

## LISTA DE TABELAS

### Capítulo 2

Tabela 2.1 – Classificação granulométrica – padrão brasileiro .....	8
Tabela 2.2 – Transmitância térmica de paredes externas.....	18
Tabela 2.3 – Capacidade térmica de paredes externas. ....	18

### Capítulo 3

Tabela 3.1 – Ensaio realizado para a caracterização da areia. ....	21
Tabela 3.2 – Ensaio realizado para a caracterização da vermiculita expandida....	21
Tabela 3.3 – Propriedades físicas dos materiais constituintes. ....	23
Tabela 3.4 – Traços e relação água/cimento (a/c). ....	23
Tabela 3.5 – Consumo de materiais por m <sup>3</sup> de argamassa.....	24
Tabela 3.6 – Propriedades térmicas dos materiais do SVVE. ....	31
Tabela 3.7 – Resistência térmica superficial interna e externa. ....	32

### Capítulo 4

Tabela 4.1 – Composição química da vermiculita expandida.....	35
Tabela 4.2 – Análise granulométrica dos agregados utilizados.....	37
Tabela 4.3 – Propriedades físicas dos agregados. ....	38
Tabela 4.4 – Propriedades térmicas das argamassas. ....	56
Tabela 4.5 – Desempenho térmico de argamassas em SVVE.....	59

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AN – Areia Natural  
CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção  
CH I – Cal Hidratada tipo I  
CP – Corpo-de-prova  
CP V ARI - RS – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – Resistente ao ataque por sulfato  
CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment  
EPS – Poliestireno Expandido  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura  
NBR – Norma Brasileira  
NM – Norma Mercosul  
SVVE – Sistemas de Vedações Verticais Externas  
TVA – The VermiculiteAssociaton  
VE – Vermiculita Expandida

## CAPÍTULO 1

# Introdução e relevância da pesquisa

A busca por materiais de construção que venham a trazer maiores benefícios quanto ao aspecto de eficiência energética de edifícios está cada vez mais constante nos dias de hoje. Construções energeticamente eficientes passam a ter uma maior visibilidade, principalmente devido ao novo cenário da construção civil, que vem trazendo a preocupação com a qualidade e desempenho das edificações.

A necessidade de se obter edifícios com bom desempenho em vários aspectos leva a desenvolver novos materiais ou ainda aperfeiçoar materiais e sistemas construtivos já existentes. Atualmente no Brasil, a Norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013) norteia os padrões mínimos no que se refere à eficiência das edificações no país, trazendo as diretrizes para obtenção do conforto, estabilidade estrutural, vida útil adequada e segurança contra incêndios.

Agregados leves tais como, a perlite, pedra-pomes e argila expandida, com estrutura porosa ou celular, têm sido utilizados para a produção de blocos de alvenaria, painéis de parede, produtos de revestimentos e concretos leves (KOKSAL; GENCEL; KAYA, 2015). Esses agregados quando usados em argamassas ou concretos passam a desenvolver materiais de densidade reduzida, contribuindo com propriedades de isolamento térmico, acústico, resistência ao fogo, assim como na redução do peso próprio e das cargas sobre a estrutura.

A vermiculita é um mineral natural formado principalmente por alteração de minerais micáceos, composto por camadas tetraédricas e octaédricas alternadas, com espaçamento interlamelar, contendo em sua composição silicatos de alumínio e de magnésio hidratados. Quando aquecidas a temperaturas de 800 a 1100 °C, expandem-se de 8 a 30 vezes em relação ao seu tamanho original, formando partículas de placas finas separadas por camada de ar. Essa estrutura formada após aquecimento, por possuir alta porosidade e conter uma grande quantidade de vazios preenchidos por ar, favorece as propriedades de condutividade térmica, acústica e resistência ao fogo do mineral (KOKSAL; GENCEL; KAYA, 2015; FRANÇA; LUZ, 2002).

Koksal, Gencil e Kaya (2015) afirmam ainda que a vermiculita expandida além de possuir várias propriedades valiosas, tais como, baixa condutividade térmica e elevada absorção sonora, é um material eficaz ao isolamento térmico em temperaturas elevadas de até 1100 °C. Além disso, materiais produzidos com esse mineral adquirem resistência estável com o tempo, tornam-se incombustíveis, bio-estáveis e neutros à ação de ácidos, uma vez que o mineral não possui componentes orgânicos nem outros produtos combustíveis em sua composição.

O tema da pesquisa traz grande relevância tanto do ponto de vista da melhoria dos aspectos térmicos de edifícios, quanto da diminuição do peso próprio do revestimento de argamassa e conseqüente redução do peso total sobre a estrutura da edificação. Destaca-se ainda a preocupação com o conforto térmico em edifícios que se localizam no Estado do Rio Grande do Norte, no qual a pesquisa será desenvolvida, tendo como princípio o isolamento térmico da edificação e por efeito, a economicidade, uma vez que haverá redução no custo energético do consumo de aparelhos condicionadores de ar, tão comumente usados nas edificações. Arendt, Krzaczek e Florczuk (2011) relataram que a redução da perda de calor em edifícios diminui o consumo de energia e, assim, reduz os custos de aquecimento e arrefecimento.

Desta forma, o estudo do presente trabalho visa analisar o desempenho térmico de argamassas no traço 1:1:6 (cimento:cal:agregado) com adição de vermiculita expandida (superfina) em porcentagens definidas de substituição ao agregado miúdo (25%, 50%, 75% e 100%), bem como avaliar a trabalhabilidade e resistência mecânica que favoreçam o atendimento às exigências da Norma de desempenho, NBR 15575 (ABNT, 2013).

## **1.1 Justificativa**

Durante muito tempo as facilidades proporcionadas pelos sistemas de iluminação e climatização artificiais, largamente utilizados, induziram a uma despreocupação dos profissionais da construção civil frente à adequação dos edifícios quanto aos aspectos de obtenção de conforto térmico e redução do consumo de energia elétrica no ambiente construído. Em 2011, as edificações que incluem as residências, o comércio e o setor público no Brasil representaram 46,7% do total do consumo de energia elétrica, o qual a maior parte é devido aos sistemas

de condicionadores de ar, que chega a 20% na média nacional em residências. (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

O estudo de novas tipologias e tecnologias capazes de atender aos preceitos de conforto ambiental e eficiência energética na realização de um projeto traz benefícios de sustentabilidade na indústria da Construção Civil, que devido as suas atividades, pode ser considerada como a menos sustentável do planeta. (MEDEIROS; NOME; ELALI, 2012).

Lamberts, Dutra e Pereira (2014) afirmam que as condições de conforto do ambiente interior são fortemente influenciadas pelos materiais de construção utilizados na edificação, e que o entendimento das propriedades desses materiais é essencial para especificá-los e adequá-los às características de isolamento térmico ou proteção solar do projeto. Nesse contexto, Schackow *et al.* (2014) relatam que o uso de vermiculita expandida como agregado leve em materiais à base de cimento proporciona resistência térmica adequada à mistura, sendo possível o emprego em revestimentos de edifícios energeticamente eficientes.

Deste modo, a utilização de vermiculita expandida na confecção de argamassas é eficaz no aspecto de redução energética de edifícios, uma vez que possibilita a redução dos gastos de energia e conseqüentemente favorece a preservação do meio ambiente e do conforto térmico dos usuários em edificações economicamente e energeticamente sustentáveis.

## **1.2 Objetivos da Pesquisa**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Analisar o desempenho térmico e mecânico de argamassas produzidas com substituição parcial ou total da areia natural por vermiculita expandida.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- i. Avaliar as propriedades físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais da vermiculita expandida;
- ii. Analisar as propriedades das argamassas no estado fresco;
- iii. Analisar as propriedades no estado endurecido das argamassas;

- iv. Avaliar as propriedades térmicas das argamassas de acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013) por meio da caracterização térmica e do comportamento frente à ação de calor.

## CAPÍTULO 2

# Fundamentação teórica

### 2.1 Vermiculita

A vermiculita é um mineral derivado da alteração de micas, que quando submetida a altas temperaturas, aumenta seu volume através da expansão de suas lamelas (REIS, 2002). Tem sua formação por intemperismo, em zonas de falhas ou por alteração hidrotermal de piroxenitos, peridotitos, dunitos, carbonatitos e anfibolitos em baixa temperatura (acima de 350 °C a vermiculita é instável), tendo como principais minerais associados, a biotita, flogopita, talco, minerais argilosos, entre outros (PAULA, 2014).

Este mineral (Figura 2.1), de ocorrência natural, é composto de flocos brilhantes, assemelhando-se em aparência à mica, formado principalmente por alteração de minerais micáceos e constituídos por silicatos de alumínio e de magnésio hidratados, sendo o termo vermiculita utilizado para designar comercialmente um grupo de minerais constituído por cerca de dezenove variedades desses silicatos, incluindo ferro e outros elementos. A vermiculita possui uma faixa de composições que depende do tipo da mica que a originou, da variação química durante o intemperismo e da troca iônica durante o processo de formação (KOKSAL; GENCEL; KAYA, 2015; UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2005).



(a)

(b)

Figura 2.1 – Vermiculita: (a) no aspecto natural, (b) expandida, após aquecimento.

Na normatização brasileira, a vermiculita é definida pela NBR 11355 (ABNT, 2015) como um agregado mineral, incombustível, de estrutura triforme, que quando exposto a um choque térmico, expande-se de forma ortogonal e passa a ter um aspecto semelhante ao de uma sanfona. Esse processo de expansão ocorre a temperaturas na faixa de 800 a 1100 °C e consiste na remoção da água estrutural do mineral no menor tempo possível e com o melhor rendimento (FRANÇA; LUZ, 2002).

Os depósitos mundiais de vermiculita ocorrem principalmente dentro de zonas de complexos máficos-ultramáficos e carbonatitos, estando o Brasil com a terceira maior reserva, oriundo principalmente de carbonatitos no estado de Goiás. Em relação à produção, destacam-se como os maiores produtores de vermiculita a África do Sul (29,9%), considerado líder da produção, os Estados Unidos da América (23,0%) e o Brasil (15,6%), que em 2013 passou à frente da China (11,5%) na produção mundial (PAULA, 2014; REIS, 2002).

No Brasil existem jazidas de vermiculita nos estados da Bahia, Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Paraná, PiauÍ e Paraíba. Em 2013, a vermiculita produzida e beneficiada no país foi de aproximadamente 68.014 toneladas, tendo sido usada em sua forma expandida no mercado da construção civil, agricultura, indústrias químicas, equipamentos, materiais especiais e outros (PAULA, 2014).

A vermiculita tem sido utilizada benéficamente em numerosas aplicações industriais desde o final da década de 1940 (TVA, 2017). Os materiais e produtos produzidos que utilizam esse mineral são incombustíveis, bio-estáveis à ação de ácidos, isolantes termo-acústico, têm resistência estável com o tempo e resistência à deformação, o que garante inúmeras aplicações nos mais diversos setores (KOKSAL; GENCEL; KAYA, 2015).

### **2.1.1 Vermiculita na Indústria da construção civil**

O valor comercial da vermiculita está na sua forma expandida, tendo inúmeras aplicações no setor da construção civil. Devido às características de baixa densidade, condutividade térmica, pequena propagação sonora e alta resistência ao incêndio, a vermiculita expandida é usada na fabricação de argamassa, concreto e tijolos leves, câmara à prova de fogo e som, porta corta-fogo, isolante termo-acústico

para lajes, paredes e divisórias, bem como cargas em tintas e massas de coberturas (UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2005; REIS, 2002).

Apesar da vermiculita ainda ser considerada um produto alternativo, caro e de baixa disponibilidade, existem algumas indústrias de produtos manufaturados à base de vermiculita, principalmente localizados no sudeste do país, que fabricam argamassa termoisolante, argamassa acústica, tijolo isolante, fôrro, bem como agregados para reboco e concreto ultraleve (REIS, 2002).

### **2.1.2 Vermiculita expandida como agregado leve**

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), agregados que possuem massa unitária menor do que  $1120 \text{ kg/m}^3$ , geralmente, são considerados leves, devido a sua microestrutura celular e porosa, podendo ter a sua massa específica variada conforme a granulometria, diferentemente dos agregados tradicionais. A NBR 12655 (ABNT, 2015), por sua vez, define agregado leve como aquele que possui massa específica menor ou igual a  $2000 \text{ kg/m}^3$ , como exemplo, os agregados expandidos de argila, escória siderúrgica, ardósia, resíduos de esgoto sinterizado, vermiculita entre outros.

Após o processo de expansão, a vermiculita reduz sua massa específica aparente de  $640\text{-}960 \text{ kg/m}^3$  para  $56\text{-}192 \text{ kg/m}^3$ , o que lhe confere característica de agregado leve (UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2005). Em relação à origem ou processo de produção, Shannag (2011) destaca que os agregados leves podem ser materiais celulares orgânicos ou inorgânicos. A vermiculita expandida, por ser produzida a partir de fontes naturais e artificiais, assim como a perlite e argila expandida, é considerada um agregado leve inorgânico.

A alta porosidade e volume de vazios de agregados leves, como vermiculita, reduzem a densidade e a condutividade térmica dos materiais, bem como torna mais densa a interface entre os grãos e a pasta em materiais cimentícios, devido à grande absorção de água pelo agregado na mistura, desde que este seja utilizado na condição não saturada (SHOUKRY *et al.*, 2016; ELSHARIEF; COHEN; OLEK, 2005).

Assim como em agregados comuns, a vermiculita expandida pode ser classificada conforme tamanho dos grãos (Tabela 2.1), o que lhe proporciona diferentes usos. Aqueles mais finos são aplicados na produção de manufaturados

para construção civil, carreadoras de fertilizantes e alimentação para animais; já os mais grossos usados para fins de horticultura, cultivo, germinação de sementes entre outros (UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2005).

Tabela 2.1 – Classificação granulométrica – padrão brasileiro

<b>Padrão brasileiro</b>	<b>Tamanho (mm)</b>
Média	55-95% > 2,4
Fina	65-95% > 1,2
Superfina	70-95% > 0,6
Micrometro	80-100% > 0,3

Fonte: Reis (2002).

Quando se trata do uso de vermiculita expandida para argamassas, por exemplo, o segmento industrial define, normalmente, proporções em volume, utilizando o agregado nas granulometrias média, fina e superfina (UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2005).

## 2.2 Argamassa

As argamassas são materiais de construção obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo e água, que adquirem propriedades de aderência e endurecimento, podendo ainda conter na mistura, aditivos e adições minerais (CARASEK, 2010).

Segundo Carneiro (1999), uma argamassa pode ser definida como uma mistura composta por duas frações: uma ativa (aglomerante) e outra inerte (agregado), admitindo-se que os aglomerantes seriam responsáveis por grande parte da resistência mecânica e pela capacidade de deformação adquirida pela argamassa; e que a fração inerte, que não participa das reações químicas de endurecimento, influenciaria na trabalhabilidade, retenção de água, resistências mecânicas, capacidade de deformação e permeabilidade.

A argamassa é um material essencial em qualquer construção constituída de pedras, tijolos ou blocos cerâmicos, pois tem a função de juntar diversas unidades desses materiais entre si. A outra função básica da argamassa é o revestimento, o qual propicia uma maior proteção aos vários elementos construtivos, colaborando, conseqüentemente, com a durabilidade das edificações (SANTIAGO, 2007).

Para obtenção de uma argamassa de revestimento de qualidade, as condições de compacidade, impermeabilidade, aderência, constância de volume, resistência mecânica adequada e durabilidade devem ser atendidas. Além disso, é importante que o sistema de revestimento contribua com funções de isolamento térmico, isolamento acústico, segurança ao fogo e resistência ao desgaste e abalos superficiais, servindo também como base para acabamentos decorativos (SANTIAGO, 2007; CARASEK, 2010).

### **2.3 Argamassa leve**

As argamassas leves são aquelas que possuem grãos porosos e leves, ou aquelas que possuem uma quantidade de ar na sua massa, formando, desse modo, uma estrutura micro-alveolar, que reduz significativamente a sua densidade. Devido a essas características, as argamassas leves adquirem reduzida condutividade térmica e acústica, bem como resistência ao fogo (MARTINS; ASSUNÇÃO, 2010).

Assim como informa Carasek (2010), a massa específica da argamassa varia com o teor de ar incorporado e com a massa específica dos materiais constituintes, principalmente do agregado, sendo os principais usados em argamassas leves, a vermiculita, perlita e argila expandida. Já Ghosh (1983) destaca que argamassa leve é aquela produzida através da adição de agentes formadores de micro-bolhas para a obtenção do aumento da quantidade de poros, produzindo assim, uma argamassa menos densa e com resistência mecânica compatível com a resistência apresentada pelos materiais convencionais.

Segundo Carasek (2010), a argamassa pode ser classificada de acordo com o critério de densidade de massa, no qual a classifica em leve, normal ou pesada. Já para ser considerada leve, a argamassa deve ter densidade de massa no estado fresco menor que  $1,40 \text{ g/cm}^3$ . Quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável será a longo prazo, reduzindo o esforço de aplicação e assim resultando em maior produtividade, lhe conferindo também propriedades de isolamento térmico-acústico.

Bons resultados de isolamento acústico e térmico de materiais cimentícios também foram apresentados por Kim, Jeon e Lee (2012), que estudaram propriedades de concretos produzidos com agregado leve. Em contrapartida, argamassas formuladas com cimento e borracha, como agregado leve, que foram

avaliadas por Turatsinze, Bonnet e Granju (2007), apresentaram fragilidade, fissuras e baixa resistência à tração.

A baixa densidade das misturas de concreto e argamassa leve é induzida pelo uso de agregados leves, o que permite reduzir as cargas permanentes da edificação, dimensões de pilares, lajes e vigas, bem como o custo de transporte e manuseio de elementos fabricados com essas misturas, quando comparadas às convencionais. (BEN FRAJ; KISMI; MOUNANGA, 2010).

## **2.4 Argamassa térmica**

As argamassas tradicionais não possuem propriedades satisfatórias de isolamento térmico e acústico, sendo, portanto, necessária a realização de pesquisa e investigação de materiais alternativos para as argamassas térmicas de alvenaria (SOUSA, 2010).

Segundo Moura (2012), a primeira utilização de um sistema de revestimento e isolamento térmico em fachadas ocorreu em uma indústria na Alemanha, nos finais da década de 50, tendo sido introduzido em edificações residenciais, somente na década seguinte. Sousa (2010) destaca que os sistemas de revestimentos à base de argamassa têm sofrido modificações significativas devido ao emprego de novos materiais, como as argamassas leves, que apesar de possuírem resistências mecânicas inferiores às das argamassas tradicionais, possuem propriedades de isolamento térmico.

Lamberts, Dutra e Pereira (2014) afirmam que o desempenho térmico dos elementos construtivos está em função das propriedades térmicas dos materiais constituintes. Os materiais cimentícios, por exemplo, são tipicamente isolantes à passagem de calor, podendo o comportamento térmico ser representado pelas suas características de capacidade calorífica e condutividade térmica.

Vários materiais podem ser usados como isolantes térmicos, desde que tenham a função de reduzir a difusividade térmica, ou seja, reduzir a taxa de transferência de calor entre um sistema e o meio, mantendo um armazenamento adequado de energia no material (MENDES *et al.*, 2012).

Carasek (2010) relaciona a capacidade de isolamento térmico do revestimento em função da sua espessura, relatando que argamassas com espessura

aproximada de 35% em relação ao sistema de vedação podem ser responsáveis por 30% do isolamento térmico. Para Mendes (2002) a espessura é o fator principal a ser considerado na elaboração de um sistema de isolamento térmico, pois trata-se de um dado que está diretamente relacionado à condutividade térmica do material isolante.

De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2014), a baixa condutividade térmica do ar, presente na estrutura porosa de materiais de baixa densidade como cortiça, isopor, lã de vidro, entre outros, favorece a capacidade desses materiais em reduzir a transferência de calor de uma superfície mais quente para uma mais fria. Mendes (2002) destaca que em materiais porosos, a condutividade térmica varia conforme o tamanho das células, a densidade do material e o tipo de gás confinado nos poros. Oliveira (2009) afirma ainda que, em geral, os materiais cimentícios são de estrutura porosa e sua composição, quantidade de matéria sólida, umidade, distribuição e dimensões dos poros exercem grande influência na condutividade térmica do sistema onde são aplicados.

A energia consumida por condicionadores de ar pode ser reduzida através de um projeto adequado e da correta seleção dos materiais de construção. Desse modo, a partir da caracterização térmica dos materiais que compõem o revestimento e pelo método de isolamento usado, é possível avaliar e determinar o desempenho térmico da construção (OLIVEIRA, 2009).

## **2.5 Argamassa com vermiculita**

A partir de alguns estudos disponíveis, Rashad (2016) conclui que a trabalhabilidade de misturas contendo vermiculita expandida melhora com o aumento do conteúdo desse mineral, apesar de afirmar serem necessárias mais investigações relacionadas à trabalhabilidade dessas misturas. Ele destaca ainda que, a possível melhoria na trabalhabilidade poderia estar relacionada com o aumento do conteúdo de ar da mistura, o que leva a uma maior plasticidade. Koksal, Gencel e Kaya (2015) também relatam um aumento na trabalhabilidade de argamassas contendo vermiculita expandida, quando se aumenta a relação em volume de vermiculita/cimento. De acordo com os resultados da pesquisa, o aumento do espalhamento é de 6,7% e 23,8%, quando a relação aumenta de 4 para

6 e 8, respectivamente, e ao mesmo tempo aumenta-se o consumo de água de 540 kg/m<sup>3</sup> para 557 kg/m<sup>3</sup> e 569 kg/m<sup>3</sup>.

No entanto, Silva *et al.* (2009) destacam que, para assegurar a trabalhabilidade adequada de argamassas com diferentes teores de perlita e vermiculita, é necessário aumentar a água de amassamento da mistura. Na pesquisa de Palomar, Barluenga e Puentes (2014), também é possível concluir que, para manter a consistência plástica necessária em argamassas de revestimento contendo vermiculita, deve-se aumentar a relação água/aglomerante da composição.

Quanto à redução da densidade em argamassas contendo vermiculita, Schackow *et al.* (2014) relacionam o resultado com a presença de vazios, provocados pela vermiculita expandida e o EPS, bem como pelos interstícios entre as partículas agregadas. Na pesquisa de Xu *et al.* (2015), verifica-se redução de 20% e 24,67% na densidade aos 28 dias de argamassas com substituição de areia natural por parafina/vermiculita expandida em níveis de 50% e 100%, em volume. De acordo com Rashad (2016), o agregado de vermiculita expandida é um material excelente para produzir uma matriz leve para tijolos, telhas, pastas, concreto, argamassa etc.

Para Bellucio (2010), argamassa contendo vermiculita e fibras promove um significativo aumento na capacidade de deformação no estado endurecido. Segundo os estudos de Xu *et al.* (2015), a substituição de areia natural em argamassas por parafina/vermiculita expandida em níveis de 50% e 100%, em volume, proporcionam uma redução na resistência à compressão de 47,35% e 56,49%, respectivamente, enquanto a redução na resistência à flexão passa a ser menor, de 22,58% e 20,97%.

A partir de alguns estudos realizados em materiais cimentícios e vermiculita expandida, pode-se concluir que a inclusão do mineral na matriz aumenta sua porosidade e absorção de água (RASHAD, 2016). Os pesquisadores Koksall, Gencel, Kaya (2015) relacionam o aumento da porosidade na matriz contendo vermiculita expandida à alta porosidade das partículas desse mineral. Eles também relatam que esse aumento poderia estar relacionado com a natureza das partículas do mineral expandido, poros entre os flocos e o tamanho dos poros da matriz contendo partículas desse agregado leve.

Klyusov, Fattakhov e Klyusov (2005) relatam que a adição de vermiculita expandida em pastas de cimento previne a retração do cimento durante o período de cura, aumentando também a resistência a cargas dinâmicas e térmicas, o que promove um bom isolamento. De acordo com a pesquisa de Sundhakumar (2001), compósitos de cimento com vermiculita como material de preenchimento em painéis de telhados aumentam o conforto térmico no interior do edifício, já que esses painéis possuem boa capacidade de amortecimento térmico.

Koksal, Gencel e Kaya (2015) relatam uma redução na condutividade térmica aos 28 dias em argamassas com vermiculita expandida, quando se aumenta a razão vermiculita/cimento. Segundo os resultados, a redução na condutividade térmica passa a ser de 27,6% e 58,1% quando a relação aumenta de 4 para 6 e 8, respectivamente. Xu *et al.* (2015) também trazem em sua pesquisa bons resultados de desempenho térmico, quando substituem 50% e 100% de areia natural por parafina/vermiculita, e a condutividade térmica reduzem 49,3% e 64%, respectivamente.

Diante dos resultados, tem-se o destaque para a caracterização térmica, já que estes demonstraram boa redução na condutividade térmica das argamassas citadas. Isso se justifica pela grande quantidade de ar presente na estrutura lamelar da vermiculita expandida presente nas misturas, pois por ser um excelente isolante, o ar contido nas lamelas, favorece a redução da condutividade térmica do material. (SUTCU, 2015).

## **2.6 Propriedades térmicas**

A condutividade térmica e o calor específico são as propriedades térmicas mais importantes para caracterizar termicamente os elementos e sistemas construtivos (OLIVEIRA, 2009).

A seguir, têm-se a definição das propriedades relevantes para caracterização térmica e determinação do desempenho térmico da argamassa em estudo.

- **Condutividade térmica**

É uma propriedade que caracteriza os materiais ou produtos termicamente homogêneos, definida como a quantidade de fluxo de calor que atravessa uma

unidade de espessura do material, quando entre duas faces planas e paralelas se estabelece uma diferença unitária de temperatura (SANTOS; MATIAS, 2006).

- **Capacidade calorífica volumétrica**

A capacidade calorífica volumétrica é definida como sendo o produto da densidade de massa do material pelo seu calor específico (BORGES, 2009). Tanto a capacidade calorífica quanto o calor específico, representam a capacidade de um material em armazenar calor. Entretanto, o último representa essa função por unidade de massa, enquanto o primeiro, por unidade de volume, sendo também conhecido, portanto, por capacidade calorífica volumétrica (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

- **Difusividade térmica**

Representa a velocidade com que o calor se difunde por meio de um material, sendo a razão entre as duas propriedades essenciais para a avaliação do desempenho térmico, a condutividade e capacidade calorífica (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

## **2.7 Norma de desempenho (ABNT NBR 15575:2013)**

Oficialmente em vigor a partir de 19 de julho de 2013, a norma ABNT NBR 15575, sob o título geral “Edificações habitacionais – Desempenho”, torna-se um importante marco para a modernização tecnológica da construção brasileira, trazendo o conceito de comportamento em uso dos sistemas das edificações, o qual estabelece que a construção habitacional deva atender as exigências dos usuários ao longo dos anos, através da busca pelo conforto, estabilidade, segurança estrutural e contra incêndio e vida útil adequada da edificação (CBIC, 2013).

Gonçalves *et al.* (2003) definem desempenho como o comportamento de um produto, que deve apresentar certas propriedades e cumprir com sua função frente a determinadas influências ou ações durante a sua vida útil.

Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), o desempenho da edificação é definido a partir de requisitos (qualitativos), critérios (quantitativos ou premissas) e métodos

de avaliação, os quais traduzem as exigências dos usuários e permitem a mensuração do seu cumprimento.

De acordo ainda com a CBIC (2013), a Norma de desempenho é constituída por um conjunto normativo dividido em seis partes, os quais foram organizados por elementos de construção sequenciados por exigências relativas à segurança (estrutural, contra incêndios e no uso e operação da edificação), habitabilidade (estanqueidade, desempenho térmico, acústico, lumínico etc.) e sustentabilidade (durabilidade, manutenibilidade e adequação ambiental).

### **2.7.1 Desempenho térmico**

O desempenho térmico está relacionado ao conforto térmico no ambiente construído, dependendo de várias características do local e da edificação para que seja possível atingir o nível de satisfação de uma condição média, ou seja, condição que atenda à maior parte das pessoas (CBIC, 2013).

De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2014), o conforto térmico é definido por uma sensação humana, subjetiva, que depende de fatores físicos, fisiológicos e psicológicos. A análise das condições necessárias para concepção de um ambiente térmico adequado às atividades do homem, assim como o estabelecimento de métodos para uma detalhada avaliação térmica são diretrizes para estudos em conforto térmico, os quais se baseiam em fatores de satisfação humana; desempenho em atividades intelectuais, manuais e perspectivas; e conservação de energia.

Os estudos referentes ao conforto térmico no Brasil foram inicialmente desenvolvidos na década de 30 pelo Engenheiro Paulo Sá, o qual buscou em um de seus trabalhos, distinguir o conforto térmico nacional, através das análises dos vários métodos existentes na época, principalmente aqueles realizados no exterior (OLIVEIRA; LABAKI, 2001).

A avaliação do desempenho térmico é realizada confrontando os pré-requisitos, que atendem às exigências dos usuários, com fatores que são identificados pela resposta física de uma edificação frente às condições de uso dos ambientes e às solicitações do clima externo (LAMBERTS *et al.*, 2010).

Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), as edificações residenciais devem apresentar características que atendam ao desempenho térmico, considerando-se a região bioclimática definida pela norma ABNT NBR 15220, através do zoneamento ilustrado na Figura 2.2, que traz oito zonas distintas e seus respectivos percentuais em relação à área total do território brasileiro.

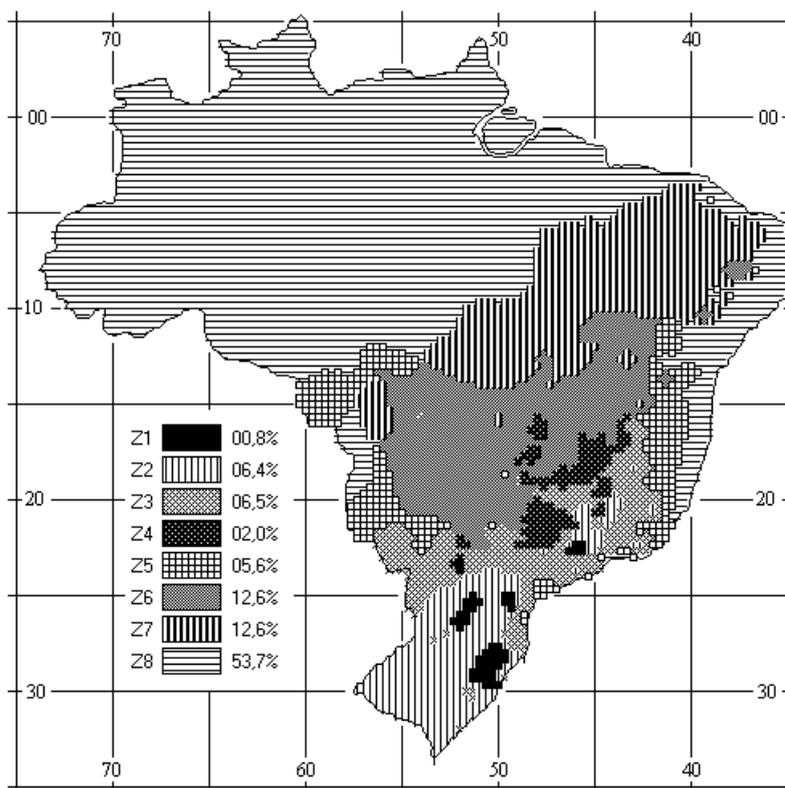


Figura 2.2 – Zoneamento bioclimático brasileiro.

Fonte: ABNT NBR 15220-3 (ABNT, 2003).

Além do zoneamento bioclimático, a NBR 15220 (ABNT, 2003) também define, para cada zona, as diretrizes construtivas com base na verificação do atendimento de parâmetros referentes a tamanho e proteção de aberturas, tipo de vedações externas, parede externa e cobertura e estratégias de condicionamento térmico passivo. A região principal do estudo dessa pesquisa está na condição bioclimática Z8, correspondente a cobertura de 53,7% do território, sendo necessário, portanto, que os tipos de vedações externas, tanto parede, quanto cobertura, sejam do tipo leve refletora.

A partir dos dados de posicionamento geográfico e dos parâmetros térmicos definidos pelos dias típicos de inverno e de verão das cidades zoneadas, é possível

avaliar o desempenho térmico nos diferentes procedimentos apresentados pela norma ABNT NBR 15575 (CBIC, 2013):

- **Procedimento 1 A – Simplificado:** é verificado o atendimento aos requisitos para os sistemas de vedação e coberturas, com base nos dados de transmitância térmica e capacidade térmica desses elementos;
- **Procedimento 1 B – Simulação computacional:** deve ser realizada simulação computacional para avaliação do desempenho térmico da edificação nos casos em que os resultados de transmitância térmica e capacidade térmica tornaram-se insatisfatórios conforme os critérios estabelecidos na parte 4 e 5 da norma;
- **Procedimento 2 – Medição in loco:** procedimento que não se sobrepõe aos anteriores, de caráter meramente informativo e que consiste na avaliação do atendimento aos requisitos estabelecidos pela norma, através da realização de medições em edificações ou protótipos construídos.

Os resultados dos procedimentos permitem prever o nível de atendimento atingido pelos sistemas de fachadas e coberturas. A avaliação simplificada fornece apenas o nível de atendimento obrigatório, ou seja, nível mínimo (M). No entanto, quando se pretende classificar o desempenho térmico do sistema de fachadas em níveis superiores, seja intermediário (I) ou superior (S), deverá ser realizado a simulação computacional ou a medição em protótipo (CBIC, 2013).

Considerando o sistema simplificado de análise para o atendimento aos níveis mínimos (M) de desempenho térmico e o requisito referente à adequação de paredes externas, os Sistemas de Vedações Verticais Externas (SVVE) podem ser avaliados conforme os seguintes critérios de Transmitância e Capacidade térmica estabelecidos pela NBR 15575 (ABNT, 2013):

#### **i. Transmitância térmica de paredes externas:**

É uma propriedade que representa a capacidade dos materiais de conduzir maior ou menor quantidade de energia por unidade de área e de diferença de temperatura, estando relacionada à permissão da passagem de energia, espessura

do componente e à condutividade térmica dos materiais constituintes (LAMBERTS *et al.*, 2010).

Para o cálculo de transmitância térmica deve-se determinar o inverso da resistência térmica total, sendo esta a relação entre a espessura ( $e$ ) e a condutividade térmica ( $\lambda$ ) de cada material que compõem o sistema. Os valores máximos admissíveis estabelecidos para a transmitância térmica estão apresentados na Tabela 2.2:

Tabela 2.2 – Transmitância térmica de paredes externas.

Transmitância Térmica (U)		
W/m <sup>2</sup> .K		
Zonas Z1 e Z2	Zonas Z3, Z4, Z5, Z6, Z7 e Z8	
$U \leq 2,5$	$\alpha^a \leq 0,6$ $U \leq 3,7$	$\alpha^a > 0,6$ $U \leq 2,5$

$\alpha^a$  é a absorptância à radiação solar da superfície externa da parede.

## ii. Capacidade térmica de paredes externas:

A capacidade térmica é a quantidade de energia necessária para variar em 1 °C a temperatura de um ambiente e consiste no produto da capacidade calorífica volumétrica ( $C_v$ ) pela espessura ( $e$ ) do material avaliado ou o produto entre essa espessura ( $e$ ), o calor específico ( $c$ ) e densidade de massa aparente ( $\rho$ ). Os valores mínimos admissíveis estão apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Capacidade térmica de paredes externas.

Capacidade Térmica (CT)	
kJ/m <sup>2</sup> .K	
Zona Z8 Sem exigência	Zonas Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6 e Z7 $\geq 130$

É importante destacar que para avaliação completa do desempenho térmico dos SVVE, a NBR 15575 (ABNT, 2013) traz ainda requisitos referentes a aberturas de ventilação, bem como a metodologia para simulação computacional quando os requisitos mínimos do procedimento simplificado não são atendidos. Porém, ambos métodos de avaliação não serão detalhados por não fazerem parte do foco da pesquisa.

## CAPÍTULO 3

# Programa experimental

As propriedades das argamassas produzidas nessa pesquisa foram avaliadas de acordo com o fluxograma experimental apresentado na Figura 3.1

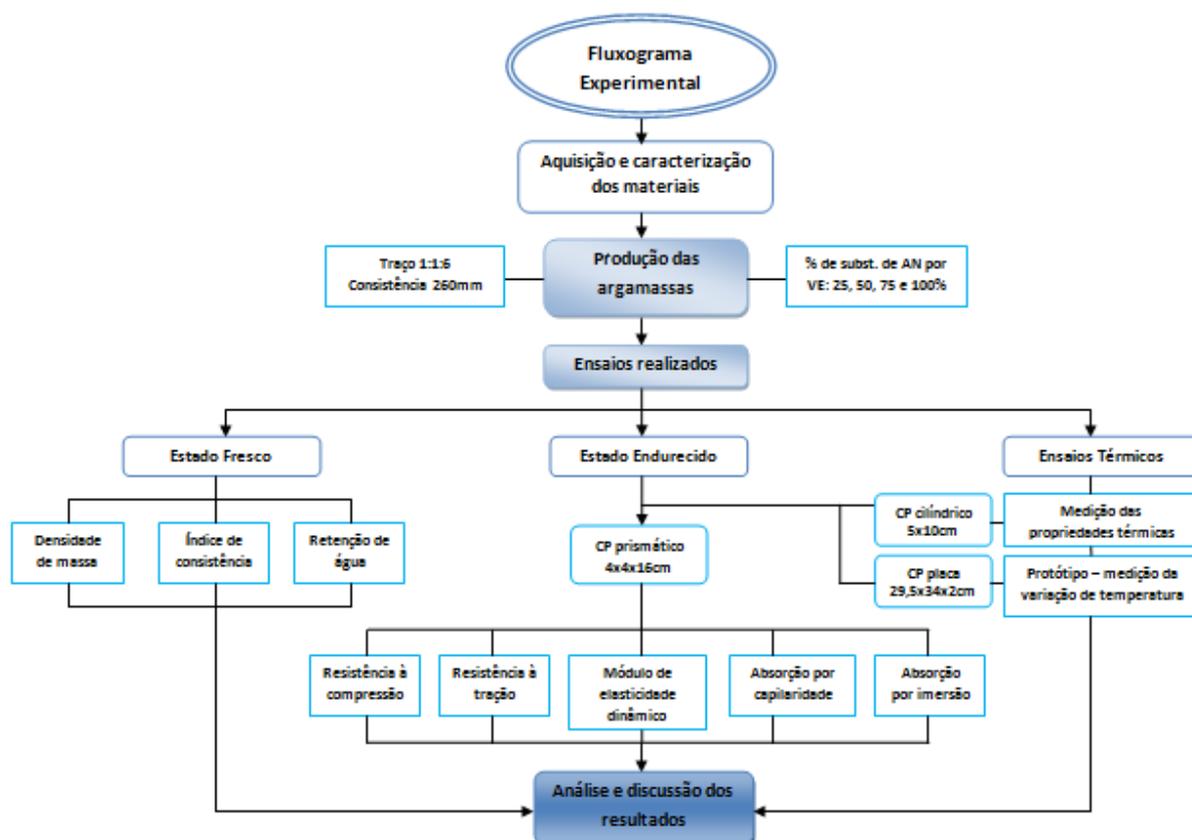


Figura 3.1 – Fluxograma experimental

Nota: AN (areia natural); VE (vermiculita expandida); CP (corpo-de-prova).

## 3.1 Materiais

### 3.1.1 Cimento

Para o desenvolvimento da presente pesquisa, foi utilizado o cimento Portland de Alta Resistência Inicial, resistente ao ataque de sulfatos (CP V ARI - RS), normatizado pela NBR 5733 (ABNT, 1991), fabricado e fornecido pela empresa MIZU.

O cimento foi devidamente armazenado e estocado em local seco, coberto e fechado, visando protegê-lo das intempéries, conservando assim suas propriedades.

### **3.1.2 Cal**

A cal utilizada foi a tipo CH I, fabricada pela empresa Carbomil e obtida em uma distribuidora da cidade de João Pessoa/PB, tendo como garantia de fabricação a conformidade com a NBR 7175 (ABNT, 2003).

### **3.1.3 Agregados**

As argamassas foram produzidas com a utilização de dois agregados, a areia natural, obtida no comércio local da cidade de Natal/RN, e a vermiculita expandida, que foi fornecida pela Indústria e Comércio Paulista Ltda, de Santo Amaro/SP.

### **3.1.4 Água**

A água utilizada na produção das argamassas foi potável, proveniente da Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN).

## **3.2 Métodos**

A metodologia se desenvolveu, inicialmente, com a aquisição e caracterização dos materiais. Em seguida, as proporções e os percentuais de substituição das argamassas foram definidos. E por fim, as propriedades no estado fresco, endurecido, bem como térmicas foram avaliadas.

### **3.2.1 Caracterização dos agregados**

A areia, após coletada, foi seca em estufa ( $105\pm 5$ ) °C por 48 horas e, posteriormente, resfriadas à temperatura ambiente. Após esse procedimento foi realizada a redução das amostras por quarteamento com base na NBR NM 27 (ABNT, 2001) até a obtenção da quantidade de material necessária para realização de cada ensaio.

O agregado natural foi caracterizado quanto suas propriedades físicas, de acordo com as normas apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Ensaio realizados para a caracterização da areia.

<b>Descrição</b>	<b>NBR</b>
Distribuição granulométrica	NM 248/2003
Massa unitária e índice de vazios	NM 45/2006
Massa específica e aparente	NM 52/2009
Inchamento	6467/2009

A vermiculita expandida utilizada foi caracterizada quanto suas propriedades físicas, químicas, microestruturais e térmicas, Tabela 3.2. Para cada ensaio realizado, o agregado leve passou por secagem em estufa ( $105\pm 5$ ) °C durante 48 horas, seguido do resfriamento à temperatura ambiente.

Tabela 3.2 – Ensaio realizados para a caracterização da vermiculita expandida.

<b>Ensaio</b>	<b>Descrição</b>	<b>NBR</b>
Físicos	Distribuição granulométrica	11355/2015
	Massa unitária	NM 45/2006
	Massa específica	-
Químicos	Florescência de Raios X - FRX	-
Mineralógicos	Difração de Raios X - DRX	-
Microestruturais	Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	-
Térmicos	Termogravimetria – TG/DTG	-

A granulometria de ambos agregados, que através da distribuição dos grãos, fornece o módulo de finura e dimensão máxima característica do material, foi determinada no Laboratório de Materiais de Construção Civil vinculado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) conforme ensaio de peneiramento utilizando-se peneiras da série normal. A massa unitária, massa específica e o inchamento da areia, parâmetros importantes para o cálculo das proporções das misturas, também foram determinados no mesmo laboratório.

Por ser inviável determinar a massa específica da vermiculita expandida através da NBR NM 52 (ABNT, 2009), optou-se por obtê-la a partir de um aparato (Figura 3.2) formado por uma proveta de vidro graduada e um infusor de aço inox. O ensaio consistiu na determinação da massa do infusor e do volume de água deslocado por este na proveta (considerado desprezível), e, em seguida, na determinação da massa do infusor preenchido por vermiculita expandida e do volume de água deslocado por este conjunto. Com os dados coletados, foi possível

determinar a relação entre a massa do agregado (conjunto menos infusor) e do volume deslocado, resultando, portanto, na massa específica do mineral.



Figura 3.2 – Determinação da massa específica da vermiculita expandida.

A análise química (FRX), obtida através do equipamento Shimadzu, modelo EDX-720 e a mineralógica (DRX), pelo equipamento Shimadzu DRX 6000, foram realizadas no Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais, pertencente ao Departamento de Engenharia e Ciência dos Materiais da UFRN. Já a análise microscópica foi realizada no Laboratório de microscopia eletrônica da Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA), através do equipamento Vega3 Tescan. A termogravimetria (TG/DTG), por sua vez, realizada no Laboratório de Análises Térmicas do Instituto de Química, também da UFRN, foi obtida por meio do equipamento Analisador termogravimétrico e calorímetro simultâneo, modelo SDTQ600 da TA Instruments.

As condições de realização dos ensaios mais específicos, referentes aos de análise química, mineralógica e microscópica, foram atendidas conforme recomendado para cada experimento.

### 3.2.2 Produção das argamassas

Com o intuito de promover o ganho de resistência mecânica na argamassa, que é reduzida significativamente pelo uso de agregado leve na mistura, as argamassas dessa pesquisa foram produzidas a partir do traço em volume 1:1:6

(cimento, cal e agregado), escolhido por ser aquele que apresenta o maior consumo de ligantes, entre os traços comumente usados nas obras de construção civil da cidade de Natal/RN.

Assim, como indicado na Tabela 3.4, foram formuladas argamassas utilizando teores de 25%, 50%, 75% e 100% de substituição da areia natural pela vermiculita expandida, tendo como parâmetro comparativo, uma argamassa de referência, com 0% de substituição. Além disso, foi determinada a relação água/cimento (a/c) para cada mistura, considerando a consistência de  $260 \pm 5$  mm, conforme recomenda a NBR 13276 (ABNT, 2005) – “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência”.

Para o preparo das misturas foram calculados os traços em massa, também indicado na Tabela 3.4, a partir dos resultados da massa unitária dos constituintes e do inchamento da areia (Tabela 3.3). Já o consumo de cada constituinte por metro cúbico de argamassa, necessário para análise das propriedades, foi determinado (Tabela 3.5) utilizando-se o teor em massa e a densidade de massa no estado fresco de cada mistura.

Tabela 3.3 – Propriedades físicas dos materiais constituintes.

<b>Materiais</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Inchamento</b>
Cimento	3,05	1,00	-
Cal	2,19	0,42	-
NA	2,59	1,51	1,36
VE	0,58	0,12	-

\*AN (areia natural); VE (vermiculita expandida).

Tabela 3.4 – Traços e relação água/cimento (a/c).

<b>Nomenclatura</b>	<b>Teor de substituição</b>	<b>Traço em volume c:c:a:ve</b>	<b>Traço em massa c:c:a:ve</b>	<b>Relação a/c</b>
AR	0%	1 : 1 : 6	1 : 0,42 : 6,6	1,44
A25	25%	1 : 1 : 4,5 : 1,5	1 : 0,42 : 5,0 : 0,18	1,58
A50	50%	1 : 1 : 3 : 3	1 : 0,42 : 3,3 : 0,36	2,20
A75	75%	1 : 1 : 1,5 : 4,5	1 : 0,42 : 1,7 : 0,55	2,65
A100	100%	1 : 1 : 0 : 6	1 : 0,42 : 0,0 : 0,73	3,25

\* c:c:a:ve (cimento:cal:areia:vermiculita expandida).

Tabela 3.5 – Consumo de materiais por m<sup>3</sup> de argamassa.

Traço	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Cal (kg/m <sup>3</sup> )	NA (kg/m <sup>3</sup> )	VE (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )
AR	214,5	89,4	1428,8	-	308,8
A25	238,6	99,5	1192,1	43,7	377,0
A50	239,4	99,9	797,6	87,6	526,8
A75	246,4	102,7	410,4	135,3	652,9
A100	239,9	100,0	-	175,6	779,7

\* AN (areia natural); VE (vermiculita expandida)

A homogeneização dos materiais, que foi realizada em um misturador mecânico de aço inoxidável, iniciou-se com a maturação da argamassa de cal e agregado miúdo durante 24 horas, antes da introdução do cimento. Para cada mistura, antes e após maturação, foi usada a velocidade baixa do equipamento durante quatro minutos, como recomendado pela NBR 13276 (ABNT, 2005), sendo adotada a seguinte sequência de adição dos constituintes: vermiculita expandida, areia natural, cal e por fim, após maturação de 24 horas, adição total do cimento antes de iniciar a última homogeneização.

### 3.2.3 Propriedades das argamassas no estado fresco

Para a determinação das propriedades físicas das argamassas no estado fresco foram executados três ensaios no Laboratório de Cimento da UFRN, o Índice de consistência, a densidade de massa e a retenção de água.

#### 3.2.3.1 Índice de consistência

Para determinar o índice de consistência das argamassas, foi adicionado, por tentativas, um volume de água conhecido, para que a mistura (Figura 3.3 (a)) chegasse a um espalhamento próximo ou dentro do limite de espalhamento de  $260 \pm 5$  mm requerido pela NBR 13276 (ABNT, 2005) – “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência”.

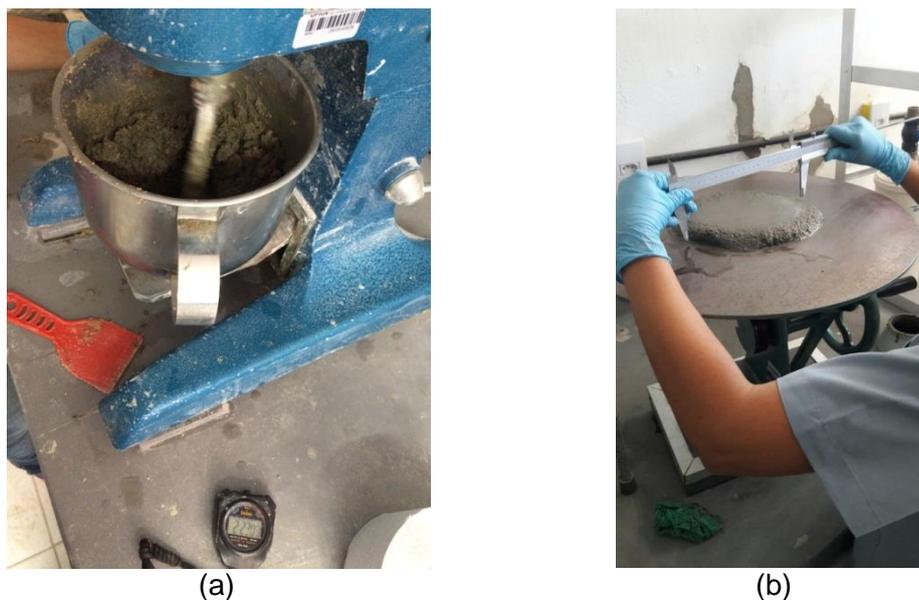


Figura 3.3 – Ensaio de Índice de consistência: (a) Mistura dos materiais e (b) Espalhamento.

Através dos resultados medidos na mesa de consistência para cada volume de água adicionado na mistura, foi possível traçar um gráfico que relaciona o espalhamento (Figura 3.3 (b)) com a relação água/cimento e assim, obter a água ideal para um índice de consistência dentro do limite especificado.

### 3.2.3.2 Densidade de massa

A densidade de massa da argamassa no estado fresco foi determinada de acordo com as prescrições da NBR 13278 (ABNT, 2005) a partir da relação entre a massa que uma argamassa fresca ocupa dentro de um recipiente cilíndrico de peso conhecido, e o volume deste.

### 3.2.3.3 Retenção de água

O ensaio de retenção de água consistiu na aplicação de um peso de 2 kg sobre a superfície de uma argamassa fresca coberta por um conjunto de 12 papéis-filtro e gaze, durante um intervalo de 2 min.

Para o cálculo da retenção, determinou-se, inicialmente, o peso dos 12 papéis-filtro secos e da argamassa dentro do recipiente, e posteriormente, imediatamente após término do ensaio, o peso dos papéis-filtro úmidos, conforme

estabelece a NBR 13277 (ABNT, 1995) – “Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água”.

### **3.2.4 Moldagem e cura dos corpos de prova**

Para os ensaios no estado endurecido, foi necessário realizar a moldagem de corpos-de-prova prismáticos nas dimensões 40x40x160 mm e na quantidade mínima estabelecida para cada ensaio, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005).

Para realização dos ensaios térmicos, foram confeccionados seis corpos-de-prova cilíndricos de 5x10 cm para cada mistura. A moldagem ocorreu a partir da formação de duas camadas de alturas aproximadamente iguais, adensadas com 30 golpes cada, através do uso de soquete metálico e finalização com a retirada do excesso de material da superfície. Já as placas de dimensões 29,5x34,0 cm e espessura de 2 cm foram adensadas com aplicação de golpes aleatórios em camada única, também com o uso de soquete, e finalização com uniformização da superfície.

Cada amostra permaneceu durante 48 horas nos moldes até serem desmoldadas, mantendo-se em temperatura ambiente para realização de cada ensaio na idade correspondente.

### **3.2.5 Propriedades das argamassas no estado endurecido**

Os ensaios da argamassa no estado endurecido foram realizados conforme especificações das normas vigentes de cada ensaio. O ensaio de resistência mecânica foi realizado no Laboratório de Metais e Ensaios Mecânicos da UFRN; os ensaios térmicos realizados no Laboratório de Transferência de Calor da UFRN e no Laboratório de Técnicas Construtivas da UFERSA; e os demais realizados no Laboratório de Cimentos, também na UFRN.

#### **3.2.5.1 Resistência à compressão e à tração na flexão**

O ensaio de resistência à compressão e à tração na flexão (Figura 3.4) foi realizado em corpos-de-prova prismáticos com 7 e 28 dias de idade, assim como preconiza a NBR 13279 (ABNT, 2005).

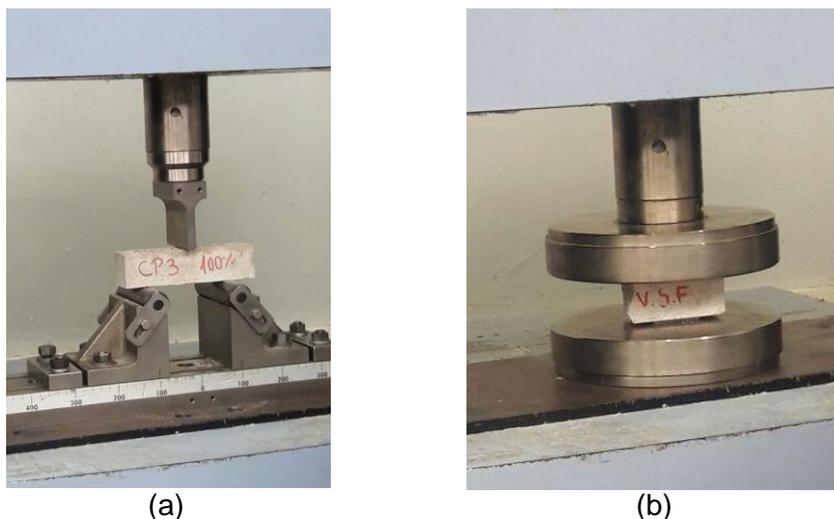


Figura 3.4 – Ensaio mecânico: (a) resistência à tração na flexão e (b) resistência à compressão.

Inicialmente, os corpos-de-prova foram posicionados sobre os suportes de apoio do equipamento para a realização do ensaio de resistência à tração na flexão, o qual ocorreu com a aplicação de carga a uma velocidade de  $50 \pm 10$  N/s até a ruptura. Após término, e com a metade de cada amostra resultante do ensaio de tração na flexão, foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial com aplicação de carga a uma velocidade de  $500 \pm 50$  N/s.

### 3.2.5.2 Densidade de massa

Para o ensaio, determinou-se a massa e o volume de três corpos-de-prova com idade de 28 dias, de acordo com o que estabelece a NBR 13280 (ABNT, 2005): Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.

### 3.2.5.3 Absorção de água por capilaridade

Para obtenção dos resultados de absorção por capilaridade, foram usados três corpos-de-prova com 28 dias de idade para cada mistura (Figura 3.5). Inicialmente determinou-se as massas das amostras secas e, após serem imersas em uma lâmina de água de 5 mm, foram obtidas as massas aos 10 e 90 minutos de ensaio, de acordo com as prescrições da NBR 15259 (ABNT, 2005). Além da absorção, pôde-se obter o coeficiente de capilaridade da argamassa.



Figura 3.5 – Ensaio de absorção por capilaridade.

#### **3.2.5.4 Índice de vazios**

O índice de vazios da argamassa foi determinado através da realização do ensaio de absorção de água por imersão em três corpos-de-prova prismáticos de 40x40x160 mm, para atender o volume mínimo recomendado pela NBR 9778 (ABNT, 2009), que prescreve o ensaio para determinação da absorção de água, do índice de vazios por imersão e fervura, e da massa específica da argamassa endurecida.

#### **3.2.5.5 Módulo de elasticidade dinâmico**

O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido de acordo com a norma NBR 15630 (ABNT, 2008), que relaciona o coeficiente de Poisson da argamassa, a velocidade de propagação de onda ultrassônica em corpos-de-prova com 28 dias de idade e a densidade de massa aparente dessas amostras obtida a partir da NBR 13280 (ABNT, 2005). Para o ensaio desta pesquisa foi usado o equipamento TICO – Ultrasonic Testing Instrument, da Proceq.

#### **3.2.5.6 Ensaio térmicos**

##### **3.2.5.6.1 Ensaio para determinação das propriedades térmicas**

As propriedades térmicas das amostras necessárias à pesquisa foram determinadas por meio do aparelho KD-2 Pro Thermal Properties (fabricado pela

Decagon Devices Incorporation), empregando-se a sonda SH-1, própria para materiais sólidos ou granulares. A sonda, composta por duas agulhas, uma que funciona como fonte de calor e outra como um termopar, é inserida no corpo-de-prova, previamente furado, e o equipamento, ligado à sonda, determina a condutividade térmica, resistividade, difusividade e capacidade calorífica volumétrica do material, através da comparação entre as quantidades de energia liberada pela fonte e absorvida pelo termopar, após um período de aproximadamente 12 minutos.

O ensaio (Figura 3.6 (a)), usando o respectivo aparelho, foi realizado em corpos-de-prova cilíndricos 5x10 cm no Laboratório de Transferência de Calor da UFRN e constou das seguintes etapas:

- A cobertura das agulhas da sonda com pasta térmica para garantir melhor contato com o corpo-de-prova, eliminando o ar interno dos furos (Figura 3.6 (b));
- Inserção das agulhas no interior do corpo-de-prova;
- Acondicionamento do corpo-de-prova no interior de uma câmara de isolamento térmica, formada por material plástico e preenchida internamente com isopor granulado (Figura 3.6 (b));
- Acionamento do medidor KD-2 Pro e coleta dos dados.



(a)



Figura 3.6 – Determinação das propriedades térmicas: (a) KD-2 Pro e câmara térmica e (b) sonda com pasta térmica e câmara térmica preenchida com isopor granulado.

Foram realizadas três medições por corpo-de-prova, que duravam cerca de 30 minutos cada, pois, além do tempo de funcionamento do aparelho, era necessária à espera de no mínimo 15 minutos, de acordo com recomendação do fabricante, para garantir que o calor formado no ensaio fosse liberado e não interferisse na medição seguinte.

Com os dados de condutividade térmica e capacidade calorífica volumétrica de cada argamassa coletados no aparelho, foi possível então, avaliar o desempenho térmico conforme procedimento simplificado definido pela NBR 15575 (2013), através da análise de dois sistemas de vedação, alvenaria de blocos cerâmicos (Figura 3.7) e alvenaria com blocos de concreto (Figura 3.8), revestidos com as argamassas formuladas.

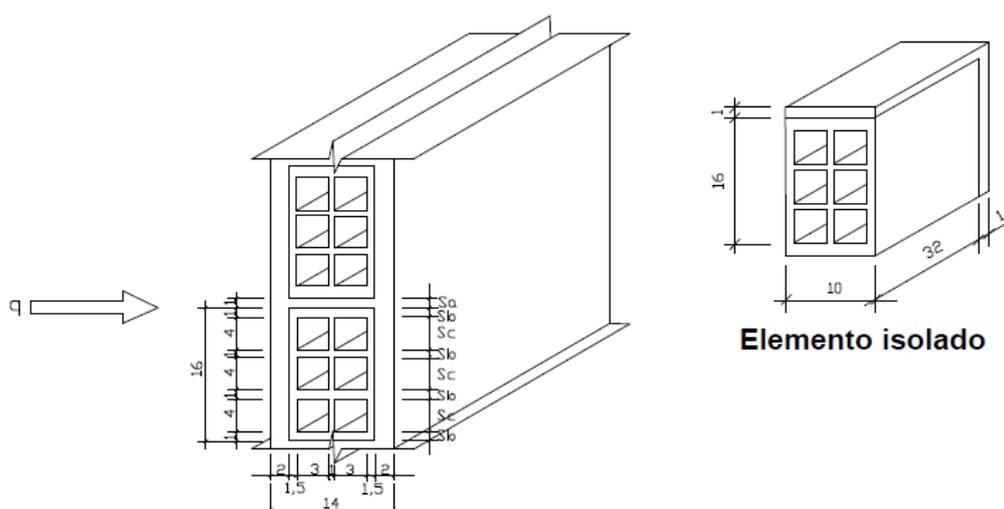


Figura 3.7 – Parede de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces.

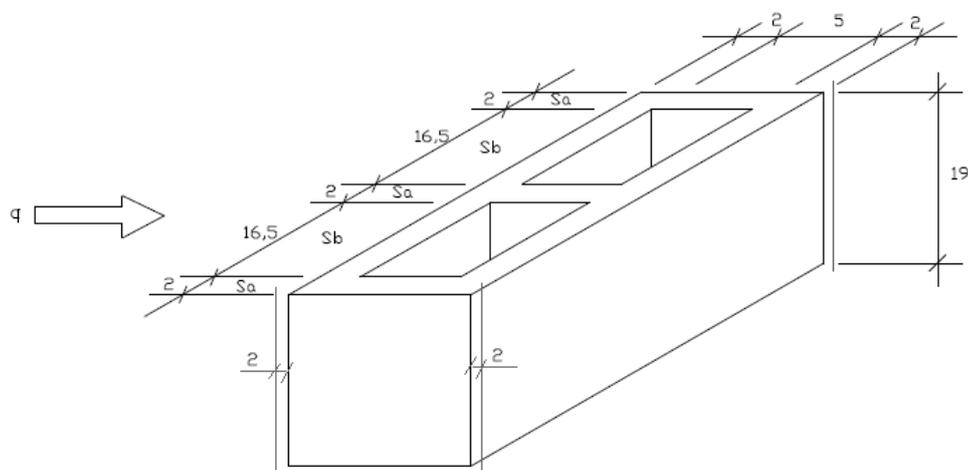


Figura 3.8 – Parede com blocos de concreto rebocados em ambas as faces.

Os sistemas propostos, que são frequentemente usados na construção civil no Brasil, estão exemplificados na NBR 15220 (ABNT, 2003), a qual traz também as propriedades térmicas (Tabela 3.6) e dimensões dos demais materiais, necessárias para o cálculo da transmitância e capacidade térmica do conjunto.

Tabela 3.6 – Propriedades térmicas dos materiais do SVVE.

Propriedades	Materiais		
	Argamassa comum	Tijolos cerâmicos	Concreto
Densidade de massa (kg/m <sup>3</sup> )	1800-2100	1300-1600	2200-2400
Condutividade térmica (W/mK)	1,15	0,90	1,75
Calor específico (kJ/kg.K)	1,00	0,92	1,00

Fonte: ABNT NBR 15220-2 (2003).

Além disso, considerou-se também para o cálculo o mesmo direcionamento (horizontal) da fonte de calor ( $q$ ) para os dois sistemas exemplificados, bem como as seções denominadas de Sa (revestimento – argamassa de assentamento – revestimento), Sb (revestimento – tijolo – revestimento) e Sc (revestimento – tijolo – ar – tijolo – ar – tijolo – revestimento) para o sistema de vedação com blocos cerâmicos (Figura 3.7); e Sa (revestimento – tijolo – revestimento) e Sb (revestimento – tijolo – ar – tijolo – revestimento) para o sistema de blocos de concreto (Figura 3.8).

A partir da definição das seções e do direcionamento da fonte de calor, calculou-se, inicialmente, a resistência térmica do sistema a partir do somatório da resistência térmica das camadas que compõem cada seção, conforme exemplificado na Equação (3.1), e posteriormente somou-se a resistência térmica das seções do sistema (Equação (3.2)) com a resistência térmica superficial interna ( $R_{si}$ ) e externa ( $R_{se}$ ) (Tabela 3.7).

$$R_b = \frac{e_{\text{revest}}}{\lambda_{\text{revest}}} + \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} + \frac{e_{\text{revest}}}{\lambda_{\text{revest}}} \quad (3.1)$$

Onde:

$R_b$  – corresponde a resistência térmica da seção b (Sb) do sistema de blocos de concreto ((m<sup>2</sup>.K)/W);

$e_{\text{revest}}$  – espessura da camada de revestimento (m);

$\lambda_{\text{revest}}$  – condutividade térmica da argamassa de revestimento (W/(m.K));

$e_{\text{concreto}}$  – espessura do septo do tijolo de concreto (m);

$\lambda_{\text{concreto}}$  – condutividade térmica do tijolo de concreto (W/(m.K));

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

$$R_t = \frac{n_a A_a}{R_a} + \frac{n_b A_b}{R_b} \quad (3.2)$$

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se}$$

Onde:

$R_t$  – resistência térmica das seções ((m<sup>2</sup>.K)/W);

$R_a$  – corresponde a resistência térmica da seção a ((m<sup>2</sup>.K)/W);

$A_a$  – área da seção a (m<sup>2</sup>);

$n_a$  – quantidade de seção a;

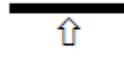
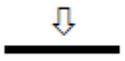
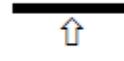
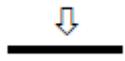
$R_b$  – corresponde a resistência térmica da seção b ((m<sup>2</sup>.K)/W);

$A_b$  – área da seção b (m<sup>2</sup>);

$n_b$  – quantidade de seção a;

$R_T$  – resistência térmica total do sistema ((m<sup>2</sup>.K)/W).

Tabela 3.7 – Resistência térmica superficial interna e externa.

$R_{si}$ (m <sup>2</sup> .K)/W			$R_{se}$ (m <sup>2</sup> .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: ABNT NBR 15220-2 (2003).

Em seguida, a transmitância térmica do sistema foi definida pelo inverso da resistência térmica total já calculada, e a capacidade térmica determinada, através do somatório das capacidades térmicas de cada seção, conforme exemplificado na Equação (3.3) e na Equação (3.4).

$$CT_b = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{revest}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{concreto}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{ar}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{concreto}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{revest}} \quad (3.3)$$

$$Cv = c \cdot \rho$$

Onde:

$CT_b$  – corresponde a capacidade térmica da seção b ( $S_b$ ) do sistema de blocos de concreto (kJ/(m<sup>2</sup>.K));

$e$  – espessura da camada (m);

$c$  – calor específico do material que compõe a camada (J/(kg.K));

$\rho$  – densidade de massa do material que compõe a camada (kg/m<sup>3</sup>);

$Cv$  – capacidade calorífica volumétrica do material (kJ/m<sup>3</sup>.K).

$$CT_T = \frac{n_a A_a}{CT_a} + \frac{n_b A_b}{CT_b} \quad (3.4)$$

Onde:

$CT_T$  – capacidade térmica total (kJ/(m<sup>2</sup>.K));

$CT_a$  – corresponde a capacidade térmica da seção a (kJ/(m<sup>2</sup>.K));

$A_a$  – área da seção a (m<sup>2</sup>);

$n_a$  – quantidade de seção a;

$CT_b$  – corresponde a capacidade térmica da seção b (kJ/(m<sup>2</sup>.K));

$A_b$  – área da seção b (m<sup>2</sup>);

$n_b$  – quantidade de seção a.

### 3.2.5.8.2 Ensaio de desempenho térmico com utilização de protótipo

O protótipo (Figura 3.9), formado basicamente por uma caixa de isopor de dimensões internas de 87,5 cm de comprimento, 49 cm de largura, 41 cm de altura e paredes de 6 cm de espessura, uma placa de argamassa, duas lâmpadas incandescentes de potência de 250 W cada e quatro termopares ligados a um computador, fornecia os resultados das análises térmicas através de um programa de computador denominado Coolterm. Esse dispositivo foi elaborado com o propósito de aproximar-se a um ambiente fechado de uma edificação com revestimento exposto a uma fonte de calor, simulando a incidência do sol.

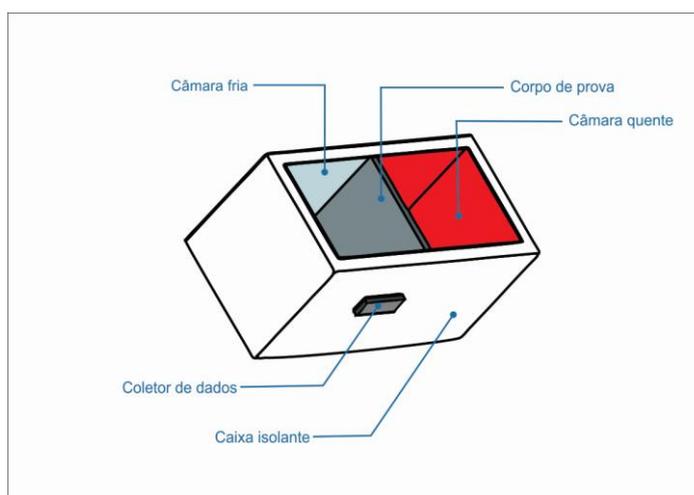


Figura 3.9 – Protótipo de análise térmica: Modelo esquematizado.

A placa moldada para cada mistura de argamassa era posicionada a uma distância aproximada de 37 cm das lâmpadas, que funcionavam como uma fonte de calor aplicada ao revestimento de argamassa. Os termopares, que serviam como portas para registro das mudanças de temperatura do material durante todo o

período do experimento, foram instalados diretamente na superfície da placa (dois de um lado que recebia diretamente o calor e o restante no lado oposto).

Como pode ser visualizado na Figura 3.10 (a), para contribuir com um maior isolamento e conseqüentemente menores perdas, foi aplicado papel alumínio na parte interna da caixa de isopor, bem como realizado o isolamento da placa de argamassa com folhas de isopor presas por madeira e parafuso. O ensaio teve duração aproximada de 2h30min e forneceu os dados de temperatura em cada termopar durante o tempo estabelecido.



Figura 3.10 – Protótipo de análise térmica: (a) preparação e (b) experimento em andamento.

Após coleta das informações, a variação de temperatura foi analisada durante o intervalo de tempo de 90 minutos. E por fim, com os dados, foi analisada também a taxa de transferência de calor ( $Q'$ ), conforme Equação 3.5.

$$Q' = K \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (3.5)$$

Onde:

K– condutividade térmica (W/(m.K));

A – área da placa (m<sup>2</sup>);

$\Delta T$ – variação da temperatura (°C);

L – espessura da placa (m).

## CAPÍTULO 4

**Resultados e discussões****4.1 Caracterização química, mineralógica e microestrutural da vermiculita expandida.**

Verifica-se na composição química maior teor de sílica, óxidos de ferro, de magnésio e de alumínio, justificado pelo fato da vermiculita pertencer a um grupo de minerais micáceos com vários tipos de silicatos hidratados de magnésio, alumínio e ferro. Devido a essa variedade, é inviável encontrar teores de óxidos iguais aos encontrados na pesquisa de outros estudiosos. Koksal, Gencel e Kaya (2015) e Shoukry *et al.* (2016), por exemplo, encontraram maior teor de sílica na composição da vermiculita expandida, quando o maior teor encontrado para a vermiculita dessa pesquisa é o de óxido de ferro, como pode ser verificado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química da vermiculita expandida.

<b>Porcentagem de óxidos presentes (%)</b>	
$Fe_2O_3$	49,05
$SiO_2$	18,48
$MgO$	15,49
$Al_2O_3$	8,50
$TiO_2$	3,11
Cr	2,24
Ni	1,36
$K_2O$	1,06
$CaO$	0,38
$MnO$	0,33

O óxido de ferro é o principal componente que contribui com a cor prata e/ou vermelho dourado da vermiculita, porém, segundo Rashad (2016), o teor desse óxido no mineral está entre 5 a 17%, bem abaixo do encontrado nessa pesquisa. Essa diferença pode ser justificada pela presença de teores significativos de impurezas no mineral estudado ou erro na determinação da composição química, já que, geralmente, os minérios de vermiculita possuem maior teor de sílica.

Na difração de raios x (Figura 4.1), a composição mineralógica é composta basicamente por picos de vermiculita e de hidrobiotita, um mineral interestratificado associado à vermiculita, também encontrado nas pesquisas de Ugarte, Sampaio e

França (2005) e Koksai, Gencil e Kaya (2015). É válido destacar ainda que não foram detectados asbestos na composição mineralógica da vermiculita expandida, confirmando a declaração de França e Luz (2002) e Oliveira e Ugarte (2004), os quais afirmam não existir amianto nos minérios brasileiros de vermiculita.

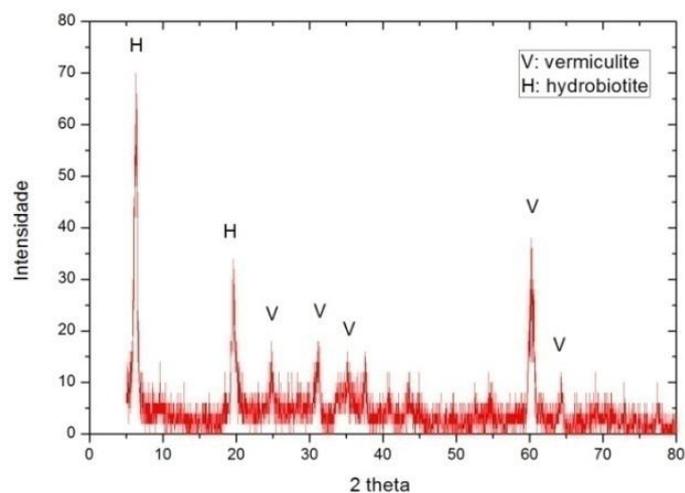


Figura 4.1 – Gráfico do DRX da vermiculita expandida.

Na curva TG da Figura 4.2, e conforme os resultados obtidos por Koksai, Gencil e Kaya (2015), é possível verificar a redução de aproximadamente 9% do peso total do mineral quando a temperatura chega aos 900°C (fim do experimento).

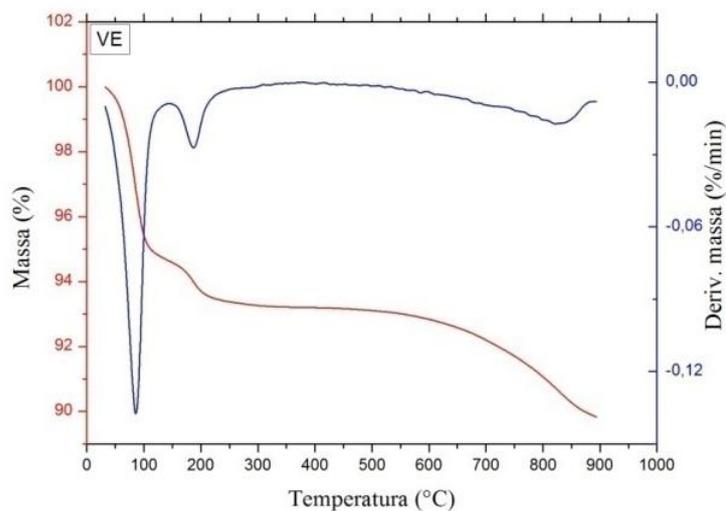


Figura 4.2 – Curva TG da vermiculita expandida.

Entende-se que as perdas iniciais, até aproximadamente 110 °C, correspondem à remoção de moléculas de água livre, e que nas temperaturas acima

dos 110 °C a redução passa a ser devido à perda de água adsorvida e interlamelar, estando acima de 500 °C, a perda de moléculas químicas de água do mineral.

As imagens do microscópio eletrônico de varredura, expostas na Figura 4.3, evidenciam a alta porosidade e a estrutura lamelar do mineral, características também relatadas em pesquisas anteriores e que favorecem a utilização da vermiculita expandida como isolante térmico, devido à baixa condutividade térmica do ar presente.

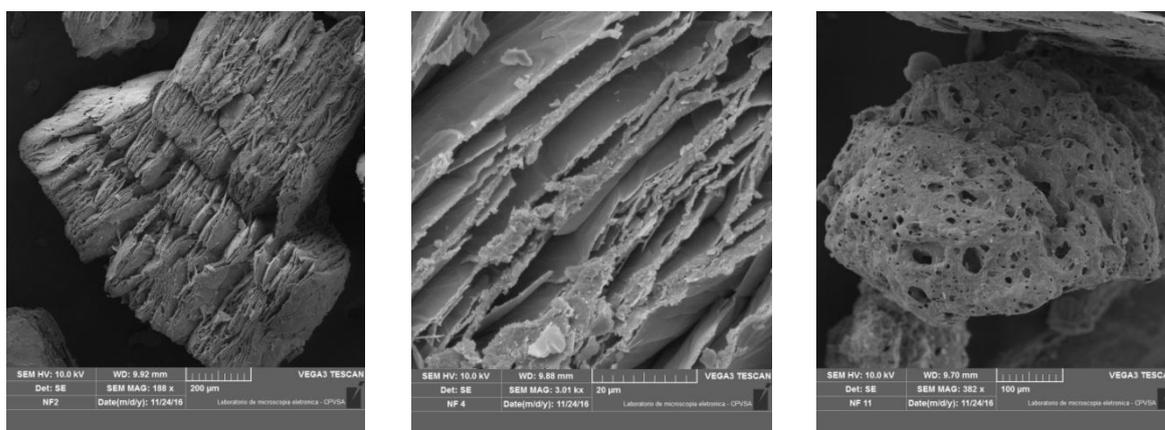


Figura 4.3 – Imagens do MEV da vermiculita expandida.

## 4.2 Caracterização física dos agregados

### 4.2.1 Composição granulométrica

A distribuição granulométrica da areia natural, bem como da vermiculita expandida, agregados miúdos utilizados nessa pesquisa, estão apresentados na Tabela 4.2, seguido das suas respectivas curvas granulométricas expostas na Figura 4.4.

Tabela 4.2 – Análise granulométrica dos agregados utilizados.

Diâmetro da peneira (mm)	Areia natural		Vermiculita expandida	
	% retida	% retida acumulado	% retida	% retida acumulado
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00
2,4	0,00	0,00	7,49	7,49
1,2	15,86	15,86	35,76	43,25
0,6	25,87	41,73	37,26	80,51
0,3	34,96	76,69	10,71	91,22
0,15	21,33	98,02	3,85	95,07
< 0,15	1,98	100,00	4,93	100,00

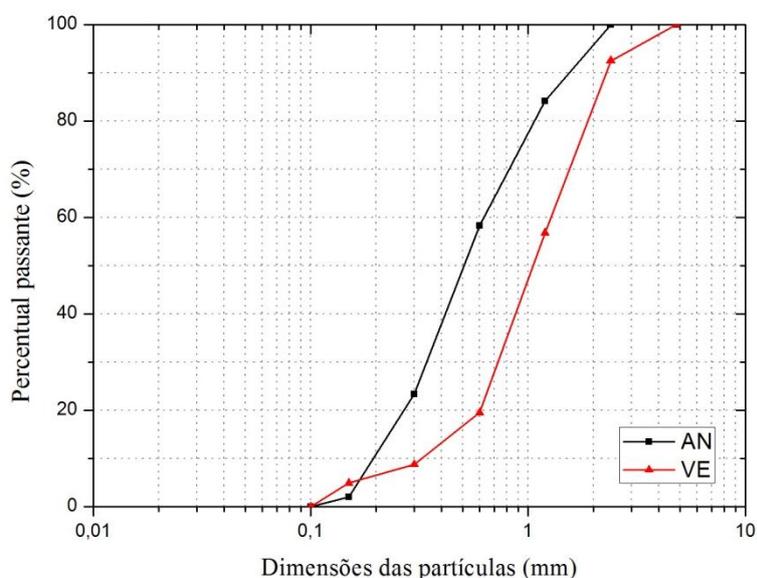


Figura 4.4 – Curvas granulométricas da areia natural (AN) e da vermiculita expandida (VE).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.2, observa-se que a vermiculita expandida possui maior quantidade de grãos acima de 0,6 mm de diâmetro (mais de 80%), confirmando a classificação como superfina (70-95% > 0,6 mm, segundo o padrão brasileiro), e sendo quase o dobro de percentual acumulado, quando comparado ao da areia natural. Percebe-se também, que grãos menores, de 0,3 a 0,15 mm, estão mais presentes na composição da areia natural, indicando, portanto, que esse agregado é mais fino que a vermiculita.

Para avaliação da uniformidade e classificação dos agregados, propriedades calculadas a partir da análise das curvas granulométricas (Figura 4.4) estão indicadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Propriedades físicas dos agregados.

Propriedades	Areia natural	Vermiculita expandida
Dimensão máxima (mm)	2,4	4,8
Módulo de finura	2,32	3,18
Coefficiente de uniformidade	3,10	4,37
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,59	0,58
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,51	0,122

Como pode ser aferido na Tabela 4.3, a dimensão máxima da vermiculita expandida é maior que a da areia natural, o que a caracteriza a possuir maior quantidade grãos com diâmetros maiores, como já relatado anteriormente pela análise do percentual retido nas peneiras. É possível verificar também, através do

módulo de finura, que ambos agregados se encontram na zona aceitável de utilização, sendo que a areia natural está na zona ótima e a vermiculita expandida na zona utilizável superior, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009).

A partir do coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ), parâmetro oriundo da mecânica dos solos, é possível classificar os agregados como muito uniforme ( $C_u < 5$ ), de uniformidade média ( $5 < C_u < 15$ ), e menos uniforme ( $C_u > 15$ ) (PINTO, 2006). Desse modo, conforme Tabela 4.3, os dois agregados dessa pesquisa podem ser considerados como muito uniformes, ou seja, mal graduados, já que a granulometria uniforme significa pouca variabilidade nas dimensões dos grãos, com uma distribuição constante maior em uma faixa, e menor em outra.

A má graduação do agregado interfere diretamente em propriedades da argamassa, aumentando o índice de vazios e reduzindo a resistência mecânica, devido aos vazios que surgem de uma granulometria uniforme. 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.

Verifica-se também que, de acordo com as demais propriedades físicas listadas na Tabela 4.3, a massa específica e unitária da vermiculita expandida terão grande influência nas características da argamassa, tanto no cálculo do traço em volume já demonstrado, quanto no desempenho no estado fresco e endurecido, assim como relatado em outras pesquisas (RASHAD, 2016; KOKSAL; GENCEL; KAYA, 2015; XU *et al.*, 2015).

### **4.3 Caracterização das argamassas no estado fresco**

#### **4.3.1 Índice de consistência**

A consistência é uma propriedade influenciada diretamente pela quantidade de água incluída na mistura. Desse modo, a fim de se obter uma trabalhabilidade adequada às argamassas, a relação água/cimento de cada traço (Figura 4.5) foi definida por tentativas, até a obtenção de um espalhamento na mesa de

consistência dentro da faixa de  $260 \pm 5$  mm, assim como recomendado pela NBR 13276 (ABNT, 2005).

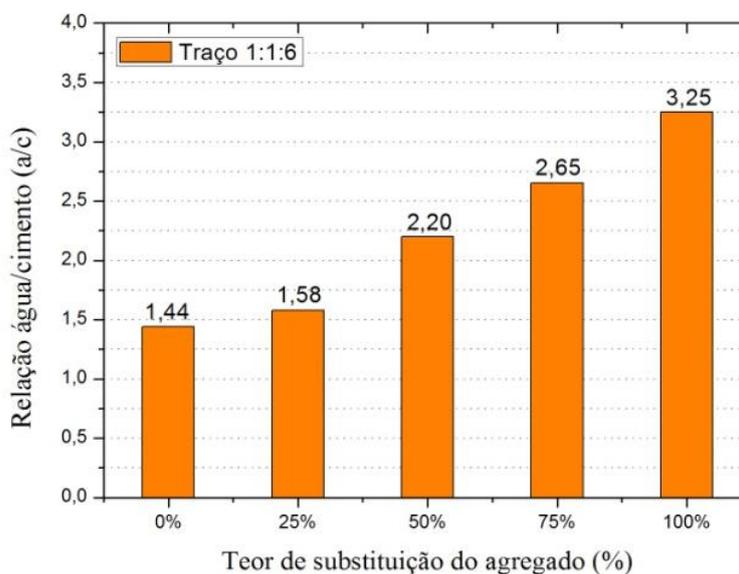


Figura 4.5 – Relação água/cimento em função dos teores de substituição do agregado.

Devido às inúmeras variáveis na realização do ensaio e aos pontos de água/cimento e espalhamento determinados em cada tentativa, optou-se por definir o índice de consistência por meio de regressão linear (Figura 4.6) e conferir se este índice, para a relação água/cimento encontrada, estava de fato dentro do limite requerido pela norma, conforme havia sido obtido inicialmente no ensaio.

A Figura 4.6 traz os gráficos de cada substituição, exceto o de referência (0%), o qual teve o índice dentro do limite da norma (261,2 mm) obtido em uma única tentativa, sendo desnecessária a elaboração do respectivo gráfico.

A partir dos gráficos elaborados, percebe-se que, para todas as misturas, a incorporação de vermiculita expandida resulta em um aumento linear da quantidade de água necessária para obtenção do espalhamento dentro do limite requerido por norma. Este, por sua vez, depende da facilidade de movimentação e da lubrificação interna das partículas, os quais são influenciados pela quantidade de água, cal e tipo de agregado presente na argamassa.

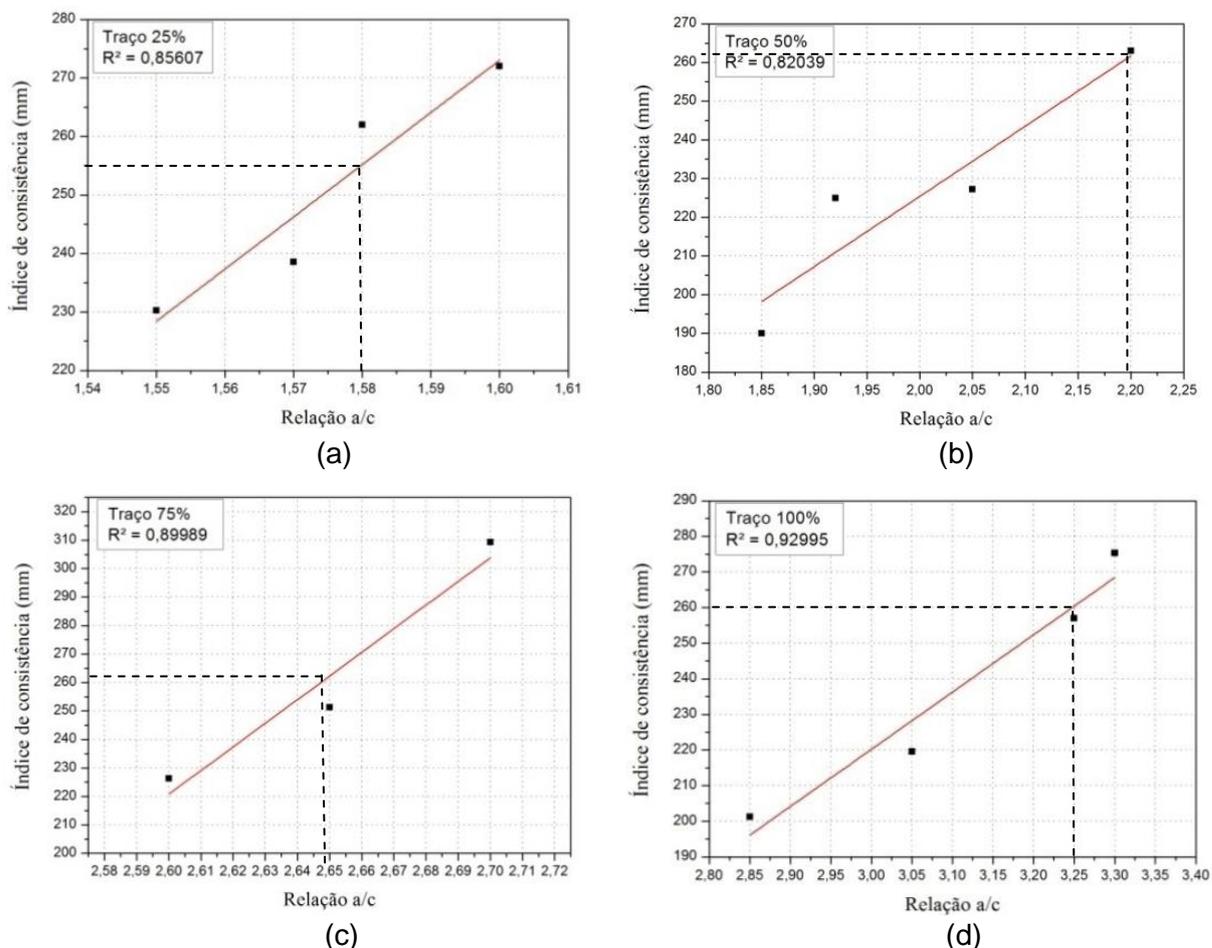


Figura 4.6 – Gráficos do espalhamento versus relação água/cimento: (a) A25, (b) A50, (c) A75 e (d) A100.

A vermiculita expandida, devido a sua estrutura porosa, absorve e retém muita água, aumentando, desse modo, a relação água/cimento, conforme seu acréscimo na mistura.

Apesar da água adicionada na proporção de 25% de substituição de areia natural por vermiculita expandida não ter sido suficiente para manter o mesmo índice de consistência da argamassa de referência, é possível perceber na Figura 4.6 (a), que com um pequeno aumento, menos de 1%, na relação água/cimento da mistura de 25%, passando de 1,58 para 1,59, o espalhamento ultrapassa o de referência, ficando no limite máximo do estabelecido pela norma, o que significa que o teor de 25% não tem grande influência na consistência da mistura.

Esse comportamento se repete nos demais traços, porém, as relações de água/cimento definidas no ensaio já trazem os valores de índice de consistência próximos ao de referência. A pequena diferença entre os índices de consistência,

até 6,5 mm quando o percentual do agregado leve passa de 25% para 75%, encontra-se dentro de uma faixa esperada, justificado pelas condições do experimento.

Alguns autores, Koksai, Gencil e Kaya (2015), reportaram um aumento na trabalhabilidade de argamassas contendo vermiculita quando aumentaram a relação vermiculita/cimento e o consumo de água da mistura. Cintra (2013), em sua pesquisa, relatou que as argamassas com percentual maior de vermiculita expandida, além de consumirem mais água, também apresentam aumento no espalhamento, estando este mais similar ao da argamassa tradicional quando comparado à composição com menor percentual do mineral.

Palomar, Barluenga e Puentes (2014) e Silva *et al.* (2009) concluíram que para manter a consistência plástica necessária em argamassas contendo vermiculita, deve-se aumentar o consumo de água de amassamento da mistura. Xu *et al.* (2015) destacaram que devido à alta absorção de água da vermiculita expandida, a argamassa com 100% de parafina/vermiculita em substituição à areia apresenta uma péssima trabalhabilidade em relação à de referência.

Logo, percebe-se que, independente da justificativa, há um consenso entre as pesquisas quanto ao aumento de consumo de água nas misturas contendo vermiculita, pois, assim como ocorre nas argamassas estudadas, para que se possa atingir uma trabalhabilidade adequada, é imprescindível que o teor de água aumente conforme aumenta-se o teor de vermiculita expandida na composição.

#### **4.3.2 Densidade de massa**

Os resultados de densidade de massa no estado fresco são apresentados na Figura 4.7. Como era esperado, devido à baixa massa específica da vermiculita expandida, houve redução da densidade de massa da argamassa com o acréscimo do agregado leve na mistura.

A redução chega a quase 37% quando se compara o traço de referência com a composição de 100% de substituição, e de apenas 5%, quando comparado com a de 25%. Percebe-se ainda que, entre as composições que contém areia natural e vermiculita expandida (25%, 50% e 75%), a redução é de aproximadamente 10 a 11% a cada aumento de 25% de substituição na mistura.

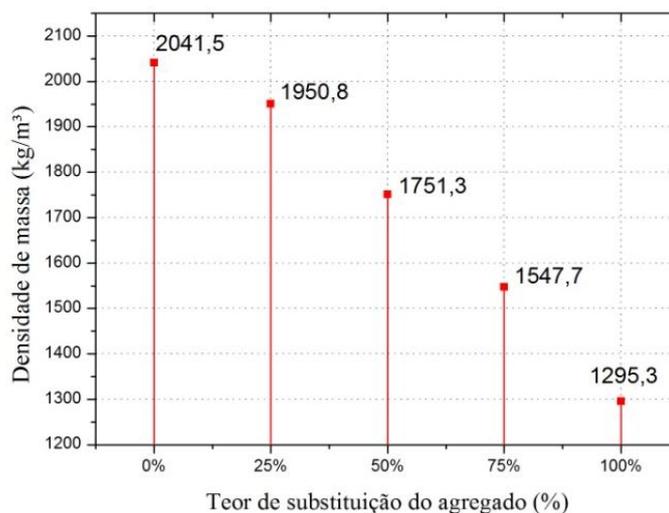


Figura 4.7 – Densidade de massa no estado fresco.

Na pesquisa de Koksai, Gencil e Kaya (2015) a densidade de massa no estado fresco das argamassas (constituídas apenas de cimento, vermiculita e água) reduziu 5,3%, quando a relação de vermiculita/cimento (em volume) passou de 4 para 6. Já nesta pesquisa, verifica-se que o aumento da relação vermiculita/cimento de 4,5 (substituição de 75%) para 6 (substituição de 100%) reduz a densidade de massa 16,3%, mais que o triplo obtido pelos pesquisadores citados, diferença que pode ser justificada pela presença de areia natural na substituição de 75% (relação vermiculita/cimento de 4,5), que contribui diretamente com a densidade da mistura.

Carasek (2010) classifica como leve, uma argamassa com densidade de massa no estado fresco abaixo de  $1400 \text{ kg/m}^3$ , sendo classificadas como normais, aquelas com densidade maior que  $1400 \text{ kg/m}^3$  e menor que  $2300 \text{ kg/m}^3$ , e podendo, portanto, serem usadas em revestimentos. Sendo assim, conforme resultados apresentados na Figura 4.7, todas as composições desta pesquisa são classificadas como argamassas normais, com exceção apenas da argamassa com 100% de vermiculita expandida, que é considerada, de acordo com Carasek (2010), como argamassa leve.

A redução de densidade de massa corrobora com os resultados apresentados por Cintra (2013), que também analisou essa propriedade em argamassas contendo vermiculita expandida, classificando as respectivas composições como leves. Essa característica é importante, pois argamassas mais leves facilitam o manuseio, melhoram a trabalhabilidade, e conseqüentemente, aumentam a produção do serviço, além de contribuir com a redução da condutividade térmica.

### 4.3.3 Retenção de água

Diante dos resultados demonstrados na Figura 4.8, percebe-se que o aumento do teor de vermiculita expandida na argamassa proporciona maior retenção de água, a qual chega a um acréscimo de quase 7%, quando se compara a argamassa de referência com a de 100% de vermiculita. Já em relação às demais composições, o aumento é de apenas 1%, seguido de quase 4% e de 4,3% nas argamassas de 25%, 50% e 75% de substituição, respectivamente.

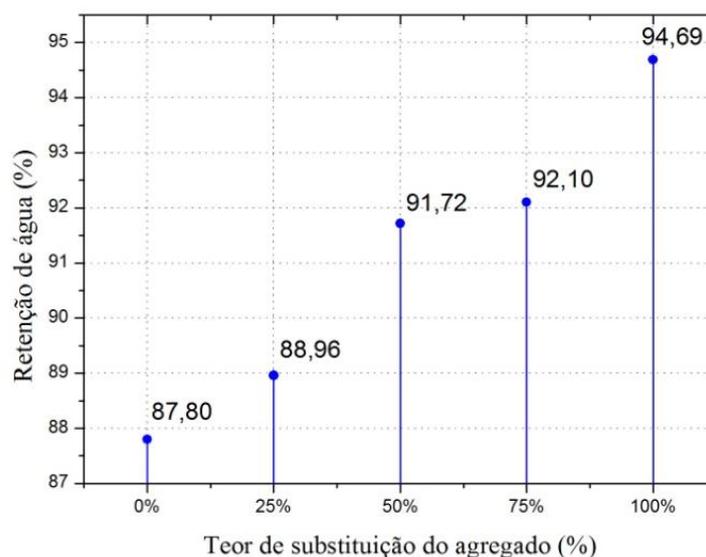


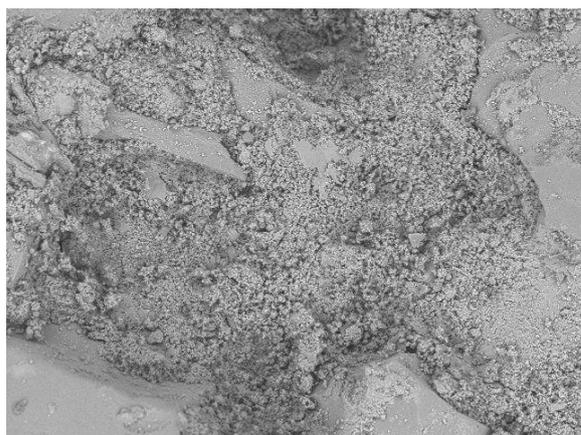
Figura 4.8 – Retenção de água.

O comportamento favorável de reter água, propriedade está associada à capacidade da argamassa fresca manter sua trabalhabilidade por tempo suficiente, é justificado pela alta porosidade da vermiculita expandida, que ao absorver parte da água, impede que esta seja perdida para o substrato. Cintra (2013) também observou alta capacidade de retenção de água (acima de 90%) em argamassas com vermiculita expandida, sendo, inclusive, similar ao resultado encontrado na argamassa industrial e maior que o apresentado na argamassa tradicional.

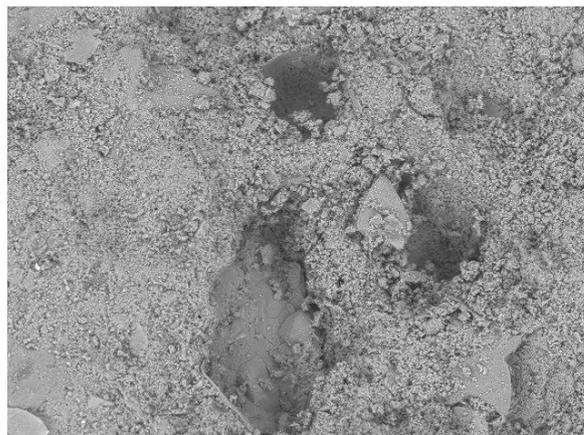
## 4.4 Caracterização das argamassas no estado endurecido

### 4.4.1 Microestrutura das argamassas

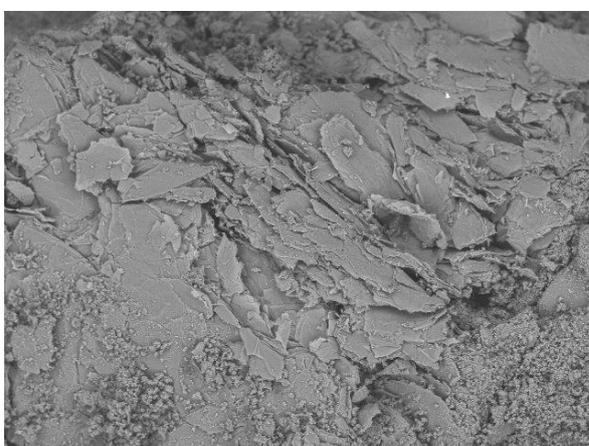
A Figura 4.9 traz as imagens com a microestrutura de cada argamassa formulada nessa pesquisa.



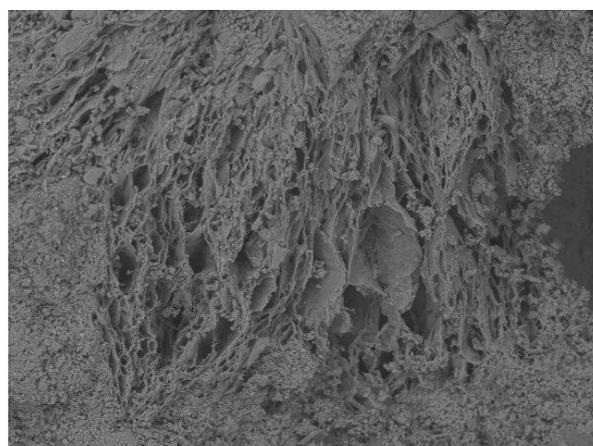
(a)



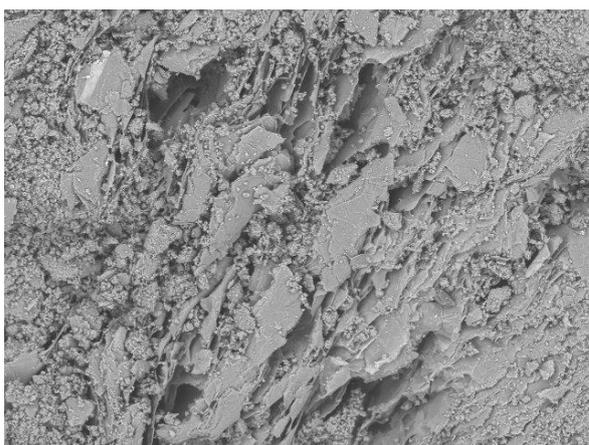
(b)



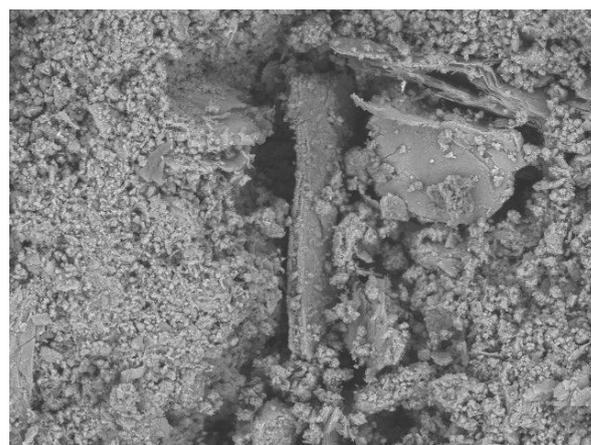
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.9 – MEV das argamassas: (a) 0%, (b) 25%, (c) 50%, (d) 75%, (e) e (f) 100% de substituição do agregado.

Percebe-se, a princípio pouca diferença entre os traços de 0% (referência), Figura 4.9 (a), e 25% (Figura 4.9 (b)), tendo em vista o pouco teor presente de vermiculita expandida, que fica mais discreta na mistura. A partir do teor de 50% (Figura 4.9 (c)), na mesma ampliação de imagem que nas primeiras argamassas, é possível visualizar as vermiculitas, com destaque ao seu aspecto lamelar e muito poroso. É possível visualizar com mais nitidez, principalmente, nas três últimas imagens, referentes aos teores de 75% (Figura 4.9 (d)) e 100% (Figura 4.9 (e), (f)), vazios entre as lamelas das partículas de vermiculita e a alta porosidade de toda a mistura, que são favorecidos pela estrutura do mineral e pelos vazios que surgem após evaporação de parte da água inicialmente retida pela mistura no estado fresco.

#### 4.4.1 Densidade de massa

Os resultados de densidade de massa no estado endurecido, determinados aos 28 dias de idade de cada composição, são apresentados na Figura 4.10.

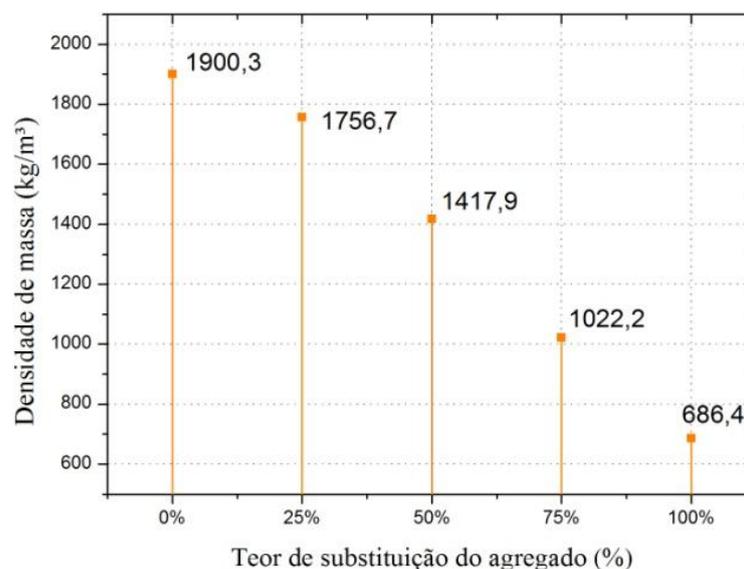


Figura 4.10 – Densidade de massa no estado endurecido.

Assim como apresentado nos resultados de densidade de massa no estado fresco, a densidade do material endurecido foi reduzida significativamente com o aumento do teor de vermiculita expandida na mistura, justificado também pela baixa massa específica do mineral. Além disso, durante o processo de endurecimento, parte da água de amassamento é evaporada, o que contribui com a redução da

densidade no estado fresco para o estado endurecido, independente do teor de substituição.

Xu *et al.* (2015) ao substituírem 100% da areia natural por parafina/vermiculita expandida obtiveram uma redução de 24,67% na densidade da argamassa aos 28 dias, menos que a metade obtida nessa pesquisa (justificado pela adição da parafina), que foi de aproximadamente 63,5% quando comparado o traço de 100% de substituição com o de referência. Já para as composições com 25, 50 e 75% de substituição, a redução em relação à mistura sem vermiculita foi de quase 7,6%, 25% e 46%, respectivamente.

A contribuição da água na densidade de massa passa a ficar mais significativa conforme o aumento do teor de substituição e a cura do material, uma vez que no traço de referência, a redução da densidade do estado fresco para o endurecido é de menos 7%, e no traço com 100% de substituição a redução é de 47%, chegando a 10%, 19% e 34% de redução nos traços de 25%, 50% e 75%, respectivamente. Desse modo, percebe-se que parte da água absorvida pela vermiculita expandida, antes necessária para obter o espalhamento requerido por norma, passa a ser evaporada no processo de cura ao ar da argamassa.

Na pesquisa de Palomar, Barluenga e Puentes (2014), é possível verificar reduções próximas às obtidas nessa pesquisa, principalmente na substituição de 50%, quando a densidade de massa no estado fresco para o endurecido reduziu em 10,84%, 18,72% e 19,32% nos teores de 0%, 25% e 50% de vermiculita.

Esses resultados são interessantes, pois refletem na redução do peso próprio de revestimentos, contribuindo, portanto, com a redução da carga total sobre a estrutura de uma edificação.

#### **4.4.2 Resistência à compressão e à tração na flexão**

Os resultados de resistência à compressão e à tração na flexão aos 7 e 28 dias estão indicados na Figura 4.11 e Figura 4.12, respectivamente. Verifica-se que em ambas as idades, as resistências mecânicas são reduzidas com o acréscimo de vermiculita expandida na mistura, tendo como exceção apenas, a resistência à tração aos 7 dias da composição de 25%, que resultou em um pequeno acréscimo, menos de 20%, em relação ao traço de referência.

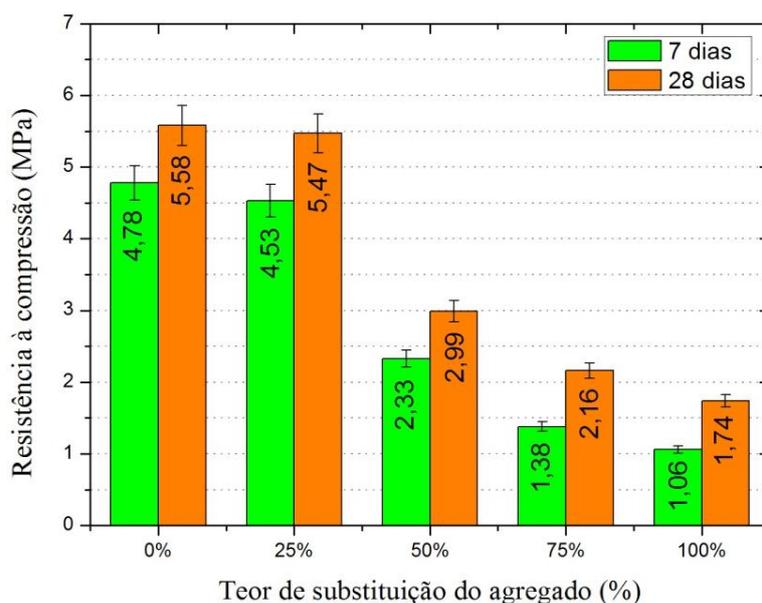


Figura 4.11 – Resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

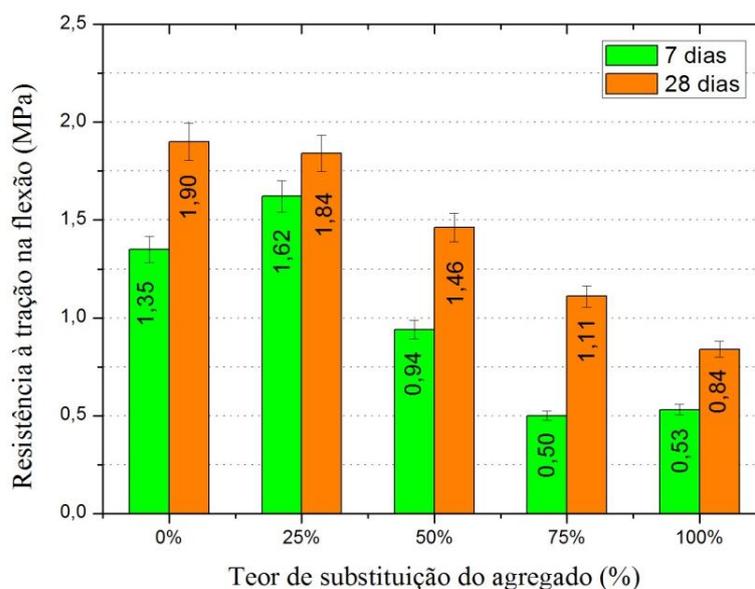


Figura 4.12 – Resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias.

Pelo fato desse comportamento não ter se repetido na resistência à tração aos 28 dias de idade, entende-se que fatores relacionados à pequena diferença na operação do ensaio ou na produção dos corpos-de-prova podem ter influenciado no resultado não previsto do traço de referência ou do traço de 25% aos 7 dias. Além disso, percebe-se que, tanto na resistência à compressão, quanto à tração, a redução da resistência mecânica é mínima quando é avaliado o traço de 25%, sugerindo, dessa forma, que o aumento do consumo de cimento e a possível melhora na distribuição dos grãos dos agregados na composição de 25%

compensam o aumento da porosidade provocada pela vermiculita expandida, não interferindo, portanto, na resistência mecânica da argamassa.

A partir da substituição de 50% da areia natural pela vermiculita expandida, ambas as resistências avaliadas decrescem, resultados que podem ser atribuídos ao consumo de cimento que já não mais aumenta, mas diminui, quando comparado ao de referência. Além disso, o consumo de água chega a aumentar o dobro do estabelecido para a argamassa de referência, o que também contribui para o aumento da porosidade e conseqüentemente para a redução da resistência mecânica dessas argamassas.

A resistência à compressão aos 28 dias, como pode ser avaliado na Figura 4.11, passa a ser reduzida 46,5% em comparação ao traço de referência, chegando a 61% e 69% de redução quando a areia é substituída, respectivamente, por 75% e 100% de vermiculita.

Já nos resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias, expostos na Figura 4.12, o valor reduz, em relação ao traço de referência, apenas 2,8% na mistura de 25%, enquanto que nas proporções de 50%, 75% e 100%, há um decréscimo na resistência de aproximadamente 23%, 41,6% e 56%, respectivamente.

Ainda que a redução tenha sido confirmada também nos resultados de resistência à tração na flexão, é válido ressaltar que, as porcentagens de decréscimo na resistência a cada aumento de teor de vermiculita em relação ao traço de 0%, foram menores que aquelas apresentadas nos resultados de resistência à compressão. Isso implica dizer que, a adição de vermiculita expandida na argamassa não interfere na resistência à tração na mesma proporção que prejudica a resistência à compressão, confirmando os resultados da pesquisa de Xu *et al.* (2015), os quais apresentaram menor perda na resistência à tração na flexão quando comparada à compressão, ao substituírem areia natural em 50% e 100% por parafina/vermiculita expandida na argamassa, atribuindo os resultados à menor rigidez do compósito parafina/vermiculita e à microestrutura mais compacta deste quando usado com cimento.

Essa característica pode ser interessante, sobretudo no desempenho da argamassa como revestimento, já que está, ao apresentar menor resistência à

compressão, adquire diretamente menor rigidez, o que favorece a redução de fissuras ao longo da superfície. Não obstante a isso, o surgimento dessa patologia pode ser resultado de tensões internas dos demais elementos do sistema de vedação e revestimento que venham a ultrapassar a resistência à tração das argamassas, sendo necessária, portanto, uma atenção maior a essa última propriedade.

A redução na resistência com a adição de vermiculita expandida, em diversas proporções, também foram reportadas por outros pesquisadores, como Koksal, Gencel e Kaya (2015) e Cintra (2013), os quais alegaram o aumento da porosidade e redução da densidade, proporcionados pela vermiculita, os principais fatores que levam à redução da resistência mecânica da argamassa.

#### 4.4.3 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico de cada composição, aos 28 dias de idade, teve significativa redução com o aumento do teor de vermiculita expandida na mistura (Figura 4.13).

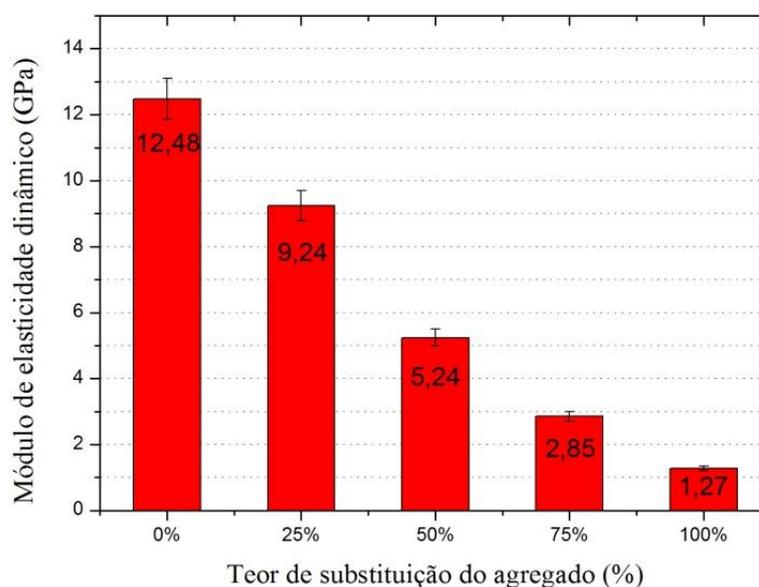


Figura 4.13 – Módulo de elasticidade dinâmico.

O comportamento confirma os resultados anteriores, já que a porosidade do agregado miúdo e o alto consumo de água reduzem a densidade e a resistência

mecânica das composições, influenciando diretamente na redução do módulo de elasticidade (SILVA; CAMPITELI, 2008).

De acordo com o que pode ser aferido na Figura 4.13, a redução do módulo de elasticidade chega a quase 90% quando ocorre a substituição de 100% da areia natural pela vermiculita expandida. Para as proporções de 25, 50 e 75% há um decréscimo de 26%, 58% e 77%, respectivamente, em relação ao traço de referência. Palomar, Barluenga e Puentes (2014) apresentaram redução aproximada, em relação à argamassa referência, de 12,64% e 48,14% no módulo de elasticidade de argamassas com 25% e 50% de vermiculita expandida, que foi igualmente atribuído à elevada porosidade das misturas. Bellucio (2010), em sua pesquisa, também verificou uma redução no módulo de elasticidade de argamassas contendo vermiculita e fibras, promovendo, dessa forma, aumento na capacidade de deformação no estado endurecido.

Os revestimentos de argamassa devem possuir a capacidade de deformar-se a fim de absorver as contrações e expansões oriundas da perda de água para o substrato ou por evaporação, bem como por alterações térmicas. Essa capacidade de deformação está associada ao módulo de elasticidade, que quanto menor o for, mais deformável será o material (SILVA, 2011).

Além disso, a partir de uma avaliação segundo a CSTB (1982), os traços de 75% e 100% de substituição poderiam ser classificados em nível baixo de suscetibilidade à fissuração, devido ao módulo de elasticidade estar abaixo de 7 GPa e pela relação entre este e a resistência à tração estar próximo ou abaixo de 2500 MPa, desde que fossem avaliados e atendidos também os critérios de retração por secagem, que não faz parte do escopo dessa pesquisa.

#### **4.4.4 Absorção de água por capilaridade**

Verifica-se na Figura 4.14 que, ao longo do período de realização do ensaio, estabelecido através da absorção por capilaridade em dois tempos (10 e 90 min), a tendência, em sua maioria, é que ocorra o aumento da absorção com o aumento do teor de substituição da areia natural pela vermiculita expandida.

Para uma melhor avaliação, a Figura 4.15 traz os resultados do coeficiente de capilaridade, parâmetro, que segundo a NBR 15259 (ABNT, 2005), é

aproximadamente igual ao valor médio das diferenças de massa aos 10 e aos 90 minutos do ensaio.

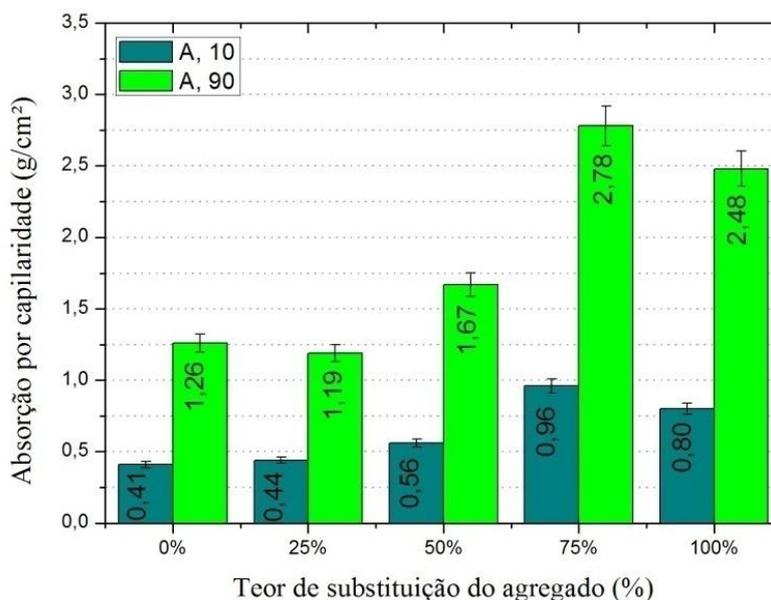


Figura 4.14 – Absorção por capilaridade.

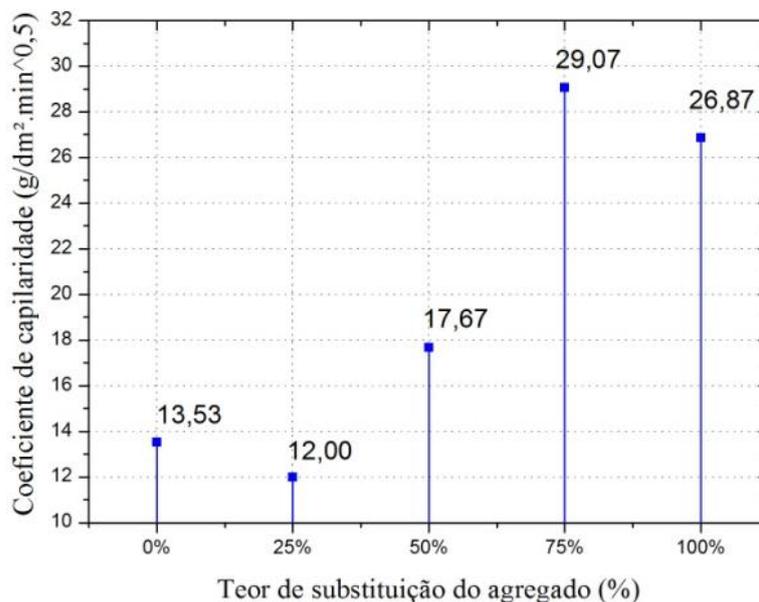


Figura 4.15 – Coeficiente de capilaridade.

Através da análise das figuras acima, percebe-se que, em relação ao traço de referência, apenas a absorção da composição de 25% diminuiu, resultando na redução do coeficiente de capilaridade em quase 12%. O comportamento pode ser atribuído à suposição de que exista uma porcentagem de substituição ideal ou próxima ao ideal, no caso a de 25%, que minimiza o surgimento de poros capilares

na argamassa, por meio do preenchimento dos poros do agregado leve com parte da pasta de cimento, aliado a uma melhor curva granulométrica dos agregados e um maior consumo de cimento, que favorecem, portanto, uma melhor homogeneização e aderência entre eles. Além disso, pelo fato de parte da água ser absorvida pela vermiculita expandida, está poderia, com o passar do tempo, liberar essa água no processo de endurecimento da mistura, não a perdendo por evaporação e desse modo, contribuindo para melhor hidratação do cimento.

Porém, para porcentagens de substituição acima de 50%, a absorção por capilaridade aumenta, já que o volume de vermiculita na mistura é maior, o que contribui para o aumento da porosidade e da quantidade de água que é perdida por evaporação, originando os vazios capilares. Cintra (2013) também observou aumento na absorção por capilaridade em argamassas com teor maior de vermiculita expandida, justificando o comportamento pela alta taxa de absorção do agregado leve.

O coeficiente de capilaridade aumenta um pouco mais que o dobro da referência, quando a substituição chega a 75%. No entanto, ao substituir 100% da areia natural por vermiculita expandida, há um pequeno decréscimo, menos de 8%, em relação ao coeficiente de capilaridade da argamassa de 75%, resultado que pode ser atribuído a condições do experimento (diferença na homogeneização da mistura, no adensamento, na posição dos corpos-de-prova etc.) que podem ter dado interferência no resultado real, já que era esperado aumento da absorção do traço de 75% para 100%, mesmo que não fosse significativo.

#### **4.4.5 Absorção de água por imersão e índice de vazios**

Os resultados de absorção de água estão indicados na Figura 4.16 confirmando as características já discutidas anteriormente sobre o material empregado nessa pesquisa.

Diante desses resultados, verifica-se o quanto de água pode ser absorvido pela vermiculita expandida na mistura, que chega a mais de 100% de absorção na argamassa com apenas vermiculita como agregado. Por ser um material muito poroso, a vermiculita expandida absorve grande parte da água adicionada, perdendo-a quando a mistura é submetida à secagem.

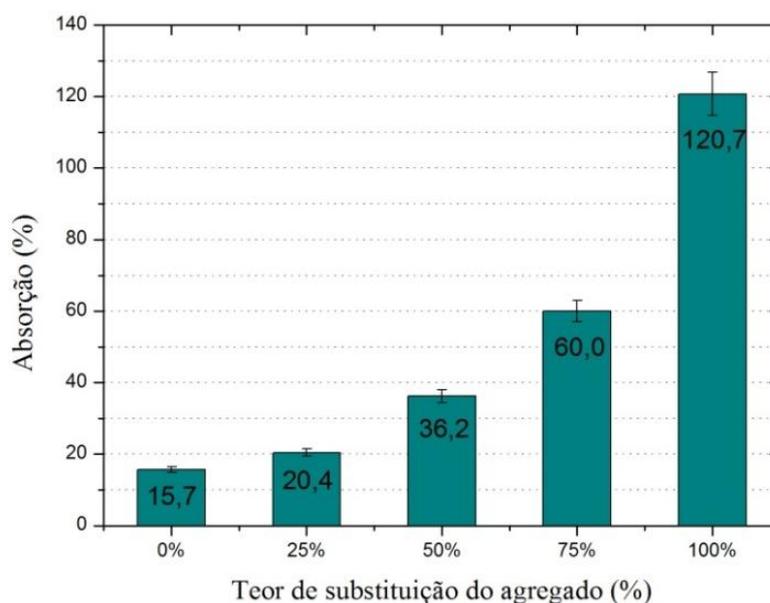


Figura 4.16 – Absorção de água por imersão.

É importante destacar ainda que a absorção não é influenciada somente pela porosidade do agregado leve, que atua como uma esponja, 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.

Koksal, Gencil e Kaya (2015) relataram aumento de 12,9% e 19,4% na absorção de água em argamassas aos 28 dias de idade, quando a relação de vermiculita/cimento aumentou em 6 e 8, respectivamente. Schackow *et al.* (2014) também observaram aumento na absorção, chegando a 41,12% em concreto contendo apenas 1% de aditivo incorporador de ar e 1% de vermiculita em relação ao volume de concreto.

O aumento do teor de substituição da areia natural pela vermiculita expandida também aumenta o índice de vazios (Figura 4.17) da argamassa, como previsto anteriormente nos resultados de absorção de água, já que são propriedades dependentes. Como pode ser avaliado na Figura 4.17, o aumento para mistura de 100% é de aproximadamente 2,5 vezes o índice de vazios do traço de referência, e a partir deste, a cada aumento de 25% de substituição há um acréscimo de 5,4%, 13,4%, 11,9% e 14,2% no índice de vazios da argamassa.

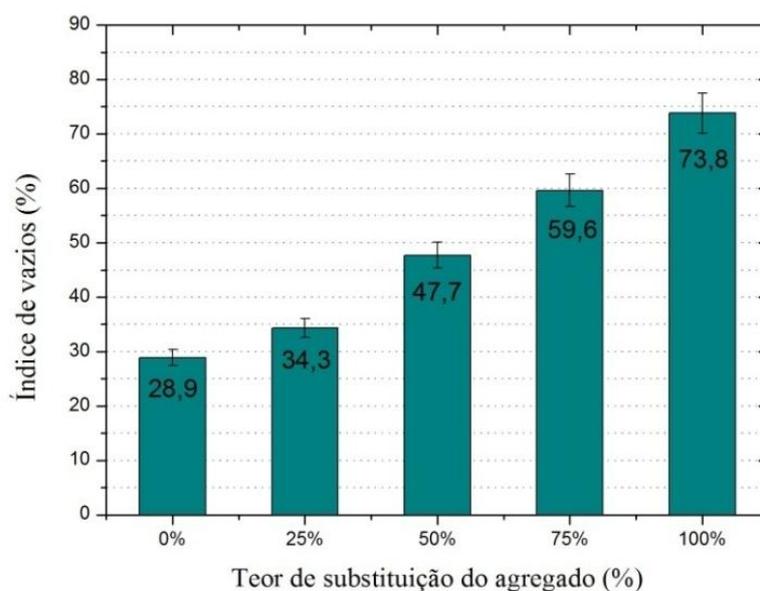


Figura 4.17 – Índice de vazios.

Alguns pesquisadores também identificaram aumento dos vazios em argamassas contendo vermiculita. Koksai, Gencil e Kaya (2015), por exemplo, observaram aumento de 5% e 15% quando a relação vermiculita/cimento passou de 4 para 6 e 8, respectivamente.

Devido à baixa densidade, à má graduação dos agregados utilizados e, sobretudo ao aumento na quantidade de vermiculita, que não favorecem a compacidade da argamassa; a absorção de água, bem como o índice de vazios aumentam, o que reduz, conseqüentemente, as resistências mecânicas do material, como já discutidas anteriormente. Porém, essas mesmas características favorecem o desempenho de outras propriedades importantes, como as térmicas.

## 4.5 Análise térmica das argamassas

### 4.5.1 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas das argamassas analisadas nessa pesquisa foram a condutividade térmica, resistividade térmica, capacidade calorífica volumétrica e difusividade térmica (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Propriedades térmicas das argamassas.

Propriedades	Traços				
	0%	25%	50%	75%	100%
Condutividade térmica (W/mK)	1,34	1,08	0,62	0,34	0,24
Resistividade térmica (mK/W)	0,746	0,927	1,605	2,981	4,256
Capacidade calorífica volumétrica (MJ/m <sup>3</sup> K)	2,42	2,18	1,50	1,32	1,23
Difusividade térmica (mm <sup>2</sup> /s)	0,57	0,50	0,42	0,26	0,19

Os resultados estão condizentes com as características do material avaliado, que já vem sendo discutidas através da análise de outras propriedades. 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.

A NBR 15220 (ABNT, 2003) apresenta de forma não restritiva a condutividade térmica para diversos materiais de construção em função de sua densidade aparente. A argamassa comum, de acordo com a respectiva norma, está indicada com densidade entre 1800 kg/m<sup>3</sup> a 2100 kg/m<sup>3</sup> e condutividade térmica de 1,15 W/mK, valores dentro e bem próximos aos resultados encontrados para a argamassa de referência (0% de substituição) da pesquisa.

A condutividade térmica é a principal propriedade avaliada em pesquisas voltadas à análise térmica de materiais de construção. Koksai, Gencil e Kaya (2015) observaram redução de 27,6% e 58,1% na condutividade térmica de argamassas com o aumento da relação vermiculita/cimento em 6 e 8, respectivamente. Xu *et al.* (2015) também obtiveram resultados parecidos, relatando a redução de 49,3% e 64% na condutividade térmica de argamassas com 50% e 100% de parafina/vermiculita expandida em substituição à areia natural.

Nos resultados da Tabela 4.4, melhor exposto na Figura 4.18, verifica-se na mistura com 100% de vermiculita expandida, quando comparado ao traço de referência, redução na condutividade térmica de aproximadamente 82%. No traço com 25% de substituição, a condutividade reduz em 19,4%, e nos traços de 50% e 75%, a redução chega a 53,7% e 74,6% em relação à referência, respectivamente.

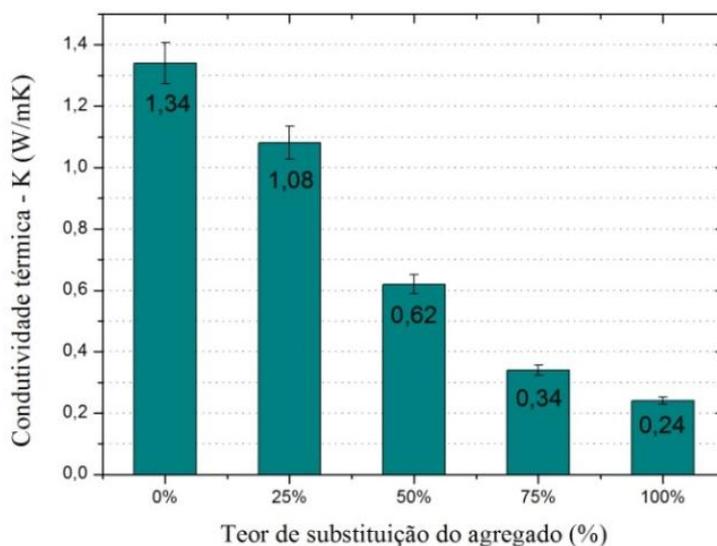


Figura 4.18 – Condutividade térmica das argamassas.

A condutividade e resistividade térmica são grandezas inversas e, portanto, à medida que a porcentagem de substituição de vermiculita expandida aumenta, conseqüentemente, a dificuldade da argamassa em conduzir calor também aumentará, já que a condutividade reduziu.

Na Figura 4.19 é possível verificar também a significativa relação entre as propriedades inversas de índice de vazios e de condutividade térmica, pois à medida que um aumenta, o outro diminui. Os vazios, que estão presentes nas argamassas, são provocados principalmente pela vermiculita expandida adicionada, e influenciam na redução da condutividade térmica, já que o ar presente dentro desses poros é o principal agente que reduz a condução de calor no material.

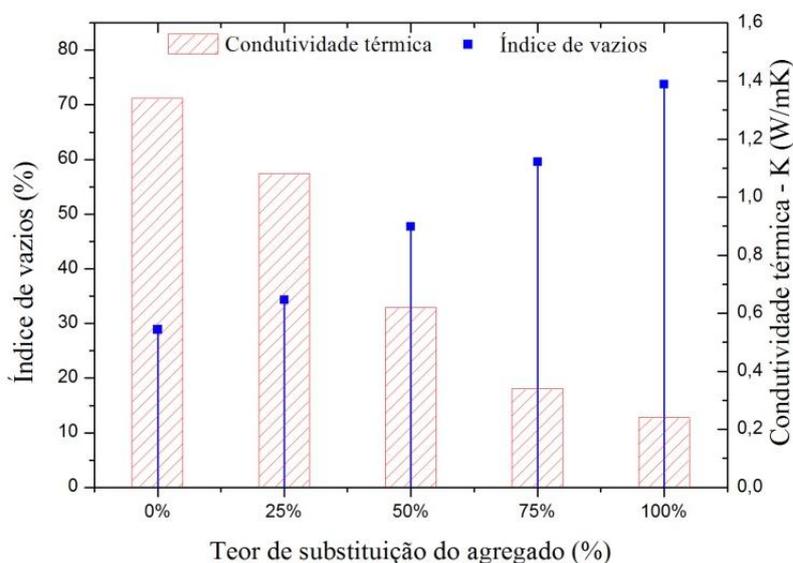


Figura 4.19 – Índice de vazios versus condutividade térmica.

Palomar, Barluenga e Puentes (2014) também verificaram aumento de até 29,16% na porosidade aberta de argamassas com 25% e 50% de vermiculita em substituição à areia, que resultaram na redução da condutividade térmica em 0,267 W/mK e 0,204 W/mK, respectivamente.

Os resultados de capacidade calorífica volumétrica também foram reduzidos com o aumento do teor de substituição. No entanto, como verificado na Figura 4.20, diferente dos resultados de condutividade térmica, a redução da capacidade calorífica, em relação ao traço de referência, manteve-se praticamente constante nos teores de 75% e 100%, já que a redução foi de 45,5% e 49,2%, respectivamente, havendo também pouca diferença entre essas porcentagens de redução e a do teor de 50% de substituição, que foi de 38%.

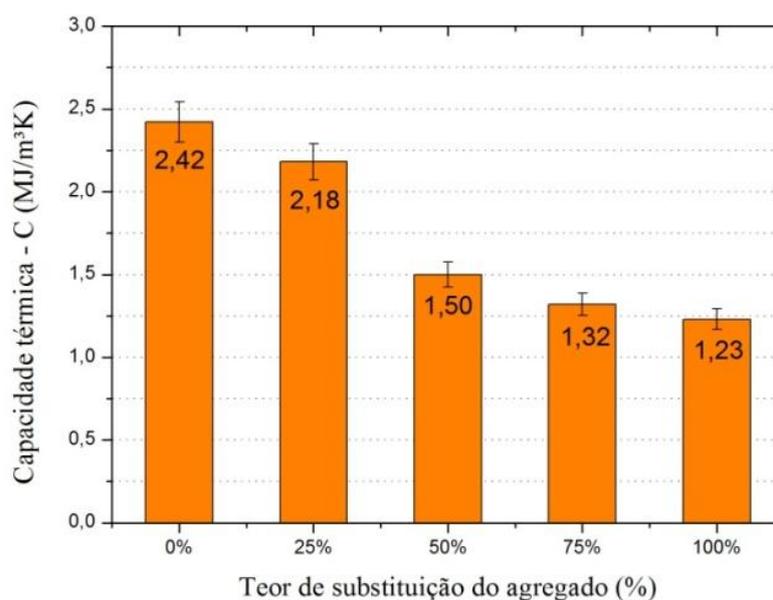


Figura 4.20 – Capacidade calorífica das argamassas.

A difusividade térmica, conforme verificado na Tabela 4.4, reduziu com o acréscimo do teor de vermiculita expandida, principalmente nos teores de 75% e 100%, que tiveram mais de 50% de redução na propagação do calor em relação à registrada no traço de referência. Já os traços de 25% e 50% tiveram redução de difusividade térmica em 12,3% e 26,3%, respectivamente.

#### 4.5.2 Análise do desempenho térmico

- **Procedimento simplificado**

Para primeira análise do desempenho térmico, de acordo com o que concerne à NBR 15575 (ABNT, 2013), são avaliadas as propriedades de transmitância térmica (inverso da resistência térmica total) e a capacidade térmica de um sistema de vedação vertical externo, através do chamado procedimento simplificado.

A Tabela 4.5 apresenta os resultados de transmitância térmica (inverso da resistência térmica total), bem como a capacidade térmica total dos dois sistemas de vedação propostos para cada argamassa de revestimento formulada, calculados conforme estabelece a NBR 15220 (ABNT, 2003).

Tabela 4.5 – Desempenho térmico de argamassas em SVVE.

Sistemas de vedação vertical externo (SVVE)	Propriedades	Traços				
		0%	25%	50%	75%	100%
Tijolos cerâmicos rebocados em ambas as faces	Transmitância térmica (W/m <sup>2</sup> K)	2,42	2,36	2,18	1,92	1,73
	Capacidade térmica (kJ/m <sup>2</sup> K)	177,7	167,7	139,0	131,3	127,5
Blocos de concreto rebocados em ambas as faces	Transmitância térmica (W/m <sup>2</sup> K)	2,94	2,87	2,63	2,28	2,04
	Capacidade térmica (kJ/m <sup>2</sup> K)	204,9	195,1	167,2	159,8	156,1

\* Valores máximos admissíveis para Transmitância térmica – U (W/m<sup>2</sup>K):  $U \leq 2,5$  (zonas 1 e 2);  $U \leq 3,7$  para  $\alpha^a \leq 0,6$  ou  $U \leq 2,5$  para  $\alpha^a > 0,6$  (zonas de 3 a 8) e Capacidade térmica – CT (kJ/m<sup>2</sup>K): CT sem exigência (zona 8);  $CT \geq 130$  (zona de 1 a 7), segundo a NBR 15575 (ABNT,2013).

De acordo com os limites estabelecidos pela norma de desempenho, verifica-se na Tabela 4.5 que o sistema de vedação composto por tijolos cerâmicos, quaisquer que sejam as argamassas utilizadas no revestimento, atendem aos valores mínimos estabelecidos de transmitância térmica para todas as oito zonas bioclimáticas brasileiras. No entanto, apesar da capacidade térmica não ter limite exigido para a zona 8, na qual a cidade de Natal/RN está inserida, as demais zonas, que incluem todos os estados brasileiros, exceto o litoral do Nordeste e a maior parte da região Norte, têm como limite mínimo admissível de capacidade térmica 130 kJ/m<sup>2</sup>K, o que impede dessa forma, que a argamassa contendo 100% de

vermiculita expandida no sistema de vedação em questão atenda ao desempenho térmico exigido para essas localidades.

No sistema de vedação com bloco de concreto, algumas argamassas formuladas não atenderam a alguns requisitos estabelecidos de desempenho térmico. Os resultados de transmitância térmica dos traços de 0% (referência), 25% e 50% estão acima do limite máximo admissível para as zonas bioclimáticas<sup>1</sup> e 2, bem como para as demais, quando a absorvância ( $\alpha^a$ ), que varia conforme a cor do revestimento, está acima de 0,6. As respectivas argamassas somente atenderão ao requisito estabelecido para as zonas de 3 a 8, quando a absorvância for menor ou igual a 0,6. Já as misturas com 75% e 100% de substituição, junto ao sistema de vedação com blocos de concreto, atenderam a todos os requisitos de transmitância térmica, independente da zona bioclimática escolhida. Quanto aos resultados de capacidade térmica, não há nenhuma argamassa que possa ser rejeitada, uma vez que todos os resultados estão acima do limite mínimo estabelecido pela norma de desempenho.

- **Procedimento por medição em protótipo**

A NBR 15575 (ABNT, 2013) indica o procedimento por medição em protótipo, quando se pretende avaliar o desempenho térmico do material em níveis superiores, já que o procedimento simplificado fornece apenas o nível obrigatório de avaliação, ou seja, o nível mínimo. Desse modo, para acrescentar aos resultados obtidos no procedimento simplificado, já que os da medição em protótipo não se sobrepõem ao primeiro, a Figura 4.21 apresenta o resultado com o comportamento das cinco placas de argamassas formuladas frente a uma fonte de calor constante, durante um intervalo de tempo de 90 minutos.

Ao analisar os resultados expostos na Figura 4.21, percebe-se, inicialmente, que a partir de um determinado tempo, a variação de temperatura torna-se aproximadamente constante para cada argamassa. Nas misturas de 0% (traço de referência) e de 25% de substituição, a curva formada é menos acentuada que nas demais, devido à pequena diferença entre os resultados de variação térmica a partir dos 10min de ensaio, que chegam a quase 6 °C e 6,5 °C, respectivamente. Já os maiores resultados de variação de temperatura nos traços de 50%, 75% e 100% são

de aproximadamente 9,5 °C, 14,5 °C e 15,2 °C, registrados durante 10 a 15min de realização do experimento.

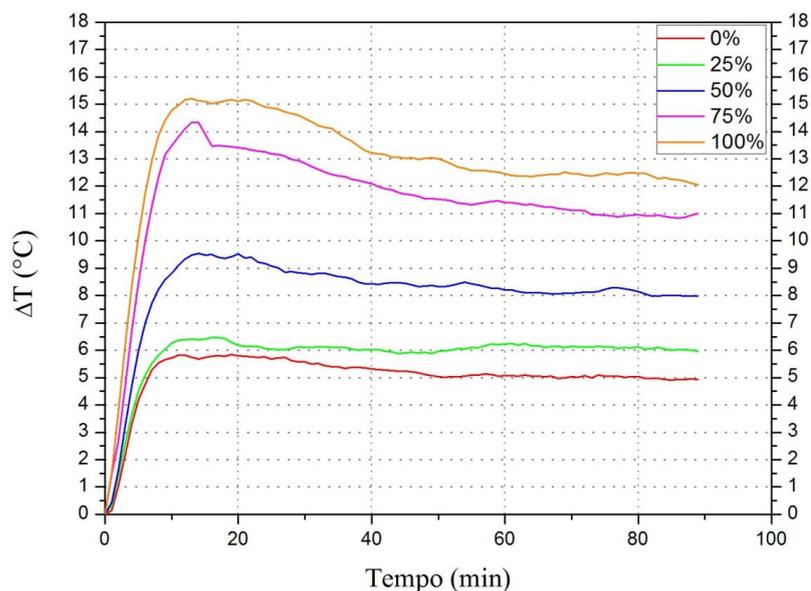


Figura 4.21 – Variação da temperatura versus tempo.

A pequena diferença de variação de temperatura dos traços de 0% e 25% de substituição demonstra a rapidez com que o calor é propagado de uma superfície para a outra da placa, já que as temperaturas de ambos os lados estão quase se igualando, confirmando, portanto, os resultados de difusividade térmica, que para essas misturas é maior que nas demais. Apesar dos resultados de 0% e 25% estarem bem próximos, é certo que a vermiculita expandida, mesmo com baixo teor na argamassa, contribui com a melhora no desempenho térmico do revestimento, chegando a mais de 50% de aumento na variação de temperatura, quando a mistura é com 100% de vermiculita expandida.

É importante destacar que a partir dos 60 min de ensaio, a variação de temperatura passa a se manter aproximadamente constante e o desempenho térmico passa a ser reduzido para todas as argamassas, já que a variação de temperatura entre as superfícies é reduzida. Percebe-se que a variação térmica da argamassa de referência e a de 25% de substituição cai para 5 °C e 6 °C, respectivamente, o que ocorre também para as argamassas com 50%, 75% e 100% que passam a ter 8 °C, 11 °C e 12,2 °C.

Apesar de ocorrer a redução, é notória ainda a contribuição da vermiculita expandida no desempenho térmico, visto que a substituição da areia pelo mineral leva ao aumento da variação da temperatura entre as superfícies da placa, ou seja, leva à redução de propagação de calor de um meio para o outro da placa, justificando dessa forma, os bons resultados de isolamento térmico, devido à baixa condutividade térmica relatada anteriormente. Além disso, é comprovado mais uma vez que o acréscimo de vermiculita expandida interfere na velocidade de propagação de calor (difusividade térmica), tendo em vista que nas porcentagens de 75% e 100%, principalmente, a variação de temperatura somente teve uma redução mais expressiva após mais de 40 minutos de ensaio.

Além das análises já apresentadas, é possível medir, a partir dos resultados expostos, a taxa de transferência de calor da placa. Desse modo, para melhor visualizar o desempenho térmico do material do experimento, a Figura 4.22 apresenta os resultados da taxa de condução de calor, que dependem da geometria, espessura e condutividade térmica do material, bem como da diferença de temperatura entre as superfícies, que deve estar aproximadamente constante.

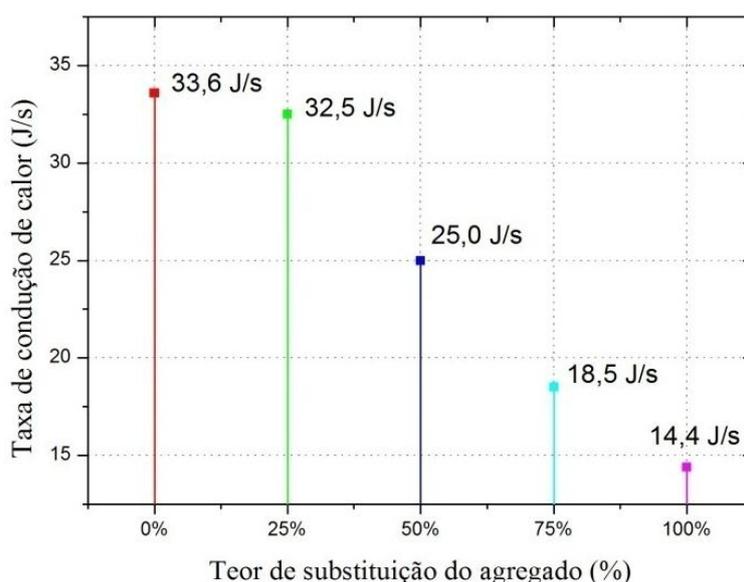


Figura 4.22 – Taxa de transferência de calor.

Os resultados da Figura 4.22 corroboram com os que já vêm sendo apresentados na pesquisa. No teor de 100%, a taxa de transferência de calor é reduzida em mais da metade quando comparada à taxa da argamassa de referência. Para que fosse possível que a taxa de transferência de calor da

argamassa de referência fosse igualada à de 100% de vermiculita, por exemplo, seria necessário que a espessura da placa exposta ao calor fosse mais que o dobro da espessura da placa com 100% de vermiculita, mantendo-se os mesmos parâmetros de condutividade térmica, área e variação de temperatura das placas.

## CAPÍTULO 5

# Conclusões

A partir da análise dos resultados experimentais realizados em argamassas com diferentes proporções de substituição da areia natural por vermiculita expandida, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- Propriedades físicas, químicas e microestruturais da vermiculita expandida e propriedades físicas da areia natural:
  - I. A vermiculita possui maior teor de sílica, óxidos de magnésio, de alumínio e de ferro, sendo este o maior teor de óxido encontrado, devido, provavelmente, a impurezas;
  - II. A composição mineralógica da vermiculita expandida é composta basicamente por picos de vermiculita e de hidrobiotita;
  - III. A vermiculita reduz 9% do peso total quando a temperatura chega aos 900°C. As perdas são referentes à remoção de moléculas, adsorvida e interlamelar e moléculas químicas de água do mineral;
  - IV. Os agregados, vermiculita e areia natural, são considerados muito uniformes, ou seja, mal graduados;
  - V. Abaixa massa específica e unitária da vermiculita expandida é a principal característica que influencia nas propriedades da argamassa, tanto no cálculo do traço em volume, quanto no desempenho no estado fresco e endurecido.
- Caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido:
  - I. A vermiculita, devido a sua estrutura porosa e lamelar, absorve e retém muita água, o que aumenta a relação água/cimento da argamassa, conforme seu acréscimo na mistura;
  - II. A substituição de 25% de areia por vermiculita não tem grande influência na consistência da mistura, diferente dos demais teores;
  - III. Para manter uma trabalhabilidade adequada, é imprescindível que o teor de água aumente conforme aumenta-se o teor de vermiculita expandida na composição;

- IV. A vermiculita reduz quase 37% da densidade de massa no estado fresco da argamassa. De acordo com as densidades, todas as argamassas, exceto a de 100%, podem ser consideradas normais, podendo, portanto, serem usadas como revestimento;
  - V. O aumento do teor de vermiculita expandida na argamassa proporciona maior retenção de água, a qual chega a um acréscimo de quase 7% na mistura com 100% de vermiculita;
  - VI. A redução da densidade do estado fresco para o endurecido chega a 47%, devido parte da água ser evaporada no processo de cura ao ar;
  - VII. A adição de vermiculita expandida na argamassa não interfere na resistência à tração na mesma proporção que a resistência à compressão;
  - VIII. A resistência à compressão aos 28 dias chega a 61% e 69% de redução quando a areia é substituída, respectivamente, por 75% e 100% de vermiculita;
  - IX. A resistência à tração na flexão aos 28 dias reduz, em relação ao traço de referência, apenas 2,8% na mistura de 25%, enquanto que na proporção de 100%, há um decréscimo de 56%;
  - X. As argamassas contendo vermiculita apresentaram menor módulo de elasticidade, chegando a quase 90% de redução quando ocorre a substituição de 100% da areia natural pela vermiculita expandida;
  - XI. A absorção por capilaridade em relação ao traço de referência apenas reduziu na mistura com 25% de substituição, devido, possivelmente, a granulometria dos agregados e o maior consumo de cimento;
  - XII. O índice de vazios e a absorção de água por imersão também aumentaram com o aumento do teor de vermiculita na mistura, devido à baixa densidade e as características do agregado utilizado, que não favorecem a compacidade da argamassa.
- Análise térmica das argamassas:
    - I. O aumento do teor de vermiculita expandida contribuiu com a redução da condutividade térmica das argamassas em até 82% quando comparado ao traço com o traço de referência;
    - II. A capacidade calorífica volumétrica reduziu com o aumento do teor de vermiculita, mas até 49,2% em relação ao traço de referência;

- III. A difusividade térmica reduziu em mais de 50% nos traços de 75% e 100% quando comparado à mistura com 0% de vermiculita expandida;
- IV. Os sistemas de vedação com blocos cerâmicos revestidos com as argamassas formuladas atendem aos limites estabelecidos de transmitância térmica para todas as zonas bioclimáticas. No entanto, apenas a argamassa com 100% de vermiculita não atende ao limite mínimo admissível de capacidade térmica para as zonas de 1 a 7;
- V. Os sistemas de vedação com blocos de concreto revestidos com argamassas de 0% a 50% de vermiculita expandida ultrapassam o valor máximo admissível para transmitância térmica nas zonas bioclimáticas 1 e 2 e para as demais zonas, quando a absorvância está acima de 6. Porém, com 75% e 100% de substituição, os sistemas atendem a todos os limites. Quanto aos limites de capacidade térmica, todas as argamassas aplicadas nesse sistema atendem ao limite mínimo estabelecido pela norma de desempenho;
- VI. No protótipo, a variação da temperatura entre as superfícies da placa, chega a mais de 50% de aumento, quando a mistura é com 100% de vermiculita expandida;
- VII. O acréscimo de vermiculita expandida interfere na velocidade de propagação de calor (difusividade térmica), tendo em vista que nas porcentagens de 75% e 100%, principalmente, a variação de temperatura somente teve uma redução mais expressiva após mais de 40 minutos de ensaio;
- VIII. No teor de 100%, a taxa de transferência de calor é reduzida em mais da metade quando comparada à referência. A taxa da argamassa de referência só igualaria à de 100% caso a espessura da placa fosse maior que o dobro da de 100% de vermiculita.

Diante do exposto, conclui-se ainda que a argamassa com 25% de substituição de areia natural por vermiculita expandida apresenta os melhores resultados termomecânicos entre todas as argamassas avaliadas nessa pesquisa.

## Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11355**: Vermiculita expandida – Análise granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimentos de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimentos de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 1995.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 6467**: Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NM 27**: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Norma Mercosur. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NM 45**: Agregados – Determinação de massa unitária e do volume de vazios. Norma Mercosur. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NM 52**: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Norma Mercosur. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7175**: Cal hidrata para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ARENDR, K.; KRZACZEK, M., FLORCZUK, J. **Numerical analysis by FEM and analytical study of the dynamic thermal behavior of hollow bricks with different cavity concentration**. Int. J. Therm. Sci. Vol 50. 2011.

BELLUCIO, E. K. **Influência da rugosidade superficial e o uso de novos tipos de fibras e almofadas para ligações de concreto pré-moldado**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2010.

BEN FRAJ, A., KISMI, M., MOUNANGA, P. **Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete**. Construction and Building Materials, 2010.

BORGES, J. C. S. **Compósito de poliuretano de mamona e vermiculita para isolamento térmica**. Natal/RN, 2009. Dissertação (Mestrado) –Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013**. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação. Brasília, 2013

CARASEK, H. **Argamassas**. Capítulo 26. In: ISAIA, Geraldo (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2 ed. IBRACON, 2010. v.1 & v.2. p. 863-891 ISBN 978-85-98576-14-5 e 978-85-98576-15-2

CARNEIRO, Arnaldo Manoel Pereira. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. 1999. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT (CSTB). **Note d'information sur les caractéristiques et le comportement des enduit extérieurs d'imperméabilisation de mur à base de liants hydrauliques.** Cahiers du CSTB, Paris, Livraison 230, n. 1778, juin, 1982.

CINTRA, C. L. D. **Argamassa para revestimento com propriedades termoacústicas, produzida a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus.** 2013. 182f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) –Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, 2013.

ÇENGEL, Y. A., GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa - Uma abordagem prática.** 4ed – AMGH Editora Ltda, 2012.

ELSHARIEF, A., COHEN, M. D., OLEK, J. **Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar.** Cement and Concrete Research, 2005.

FRANÇA, S. C. A., LUZ, A. B. **Utilização da vermiculita como adsorvente de compostos orgânicos poluentes da indústria do petróleo.** XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Recife/PE, 2002.

GHOSH, S. N. **Advances in cement technology.** Pergamon Press, 1983.

GONÇALVES, O. M., JOHN, V. M., PICCHI, F. A., SATO, N. M. N. Normas técnicas para avaliação de sistemas construtivos inovadores para habitações. In: ROMAN, H., BONIN, L. C. (Ed.). **Normalização e certificação na construção habitacional.** Porto Alegre: ANTAC, 2003. Coletânea HABITARE, v.3. p. 45-53.

KIM, H., JEON, J., LEE, H. **Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air.** Construction and Building Materials, 2012.

KOKSAL, F., GENÇEL, 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, 2015.

KLYUSOV, A. A, FATTAKHOV, Z. M., KLYUSOV, V. A. **Compressible cement compositions improve isolation.** Gulf, World oil A., 2005.

LAMBERTS, R., DUTRA, L., PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na Arquitetura.** 3ed – Eletrobras/Procel, 2014.

LAMBERTS, R., GHISI, E., PEREIRA, C. D., BATISTA, J. O. **Casa Eficiente: Bioclimatologia e Desempenho Térmico.** 3 ed – Eletrobras/Procel, 2010.

LAMBERTS, R., XAVIER, A. A., GOULART, S., VECCHI, R. de. **Conforto e stress térmico.** Vol 1 - Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

MARTINS, J. G., ASSUNÇÃO, J. **Argamassas e rebocos.** 3 ed.–Portugal: Universidade Fernando Pessoa, 2010.

MEDEIROS, D., NOME, C., ELALI, G. **Construindo no clima quente e seco do Brasil: conforto térmico e eficiência energética para a zona bioclimática 7.** 9º Seminário Internacional NUTAU USP, São Paulo, 2012.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** IBRACON. São Paulo, 2008.

MENDES, J. U. L. **Desenvolvimento de um compósito biodegradável para isolamento térmico.** Tese (Doutorado) –Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2002.

MENDES, J. U. L., SILVEIRA F. F., CAVALCANTI, S. L. L., OLIVEIRA, L. K. R., RIBEIRO, F. A., SOUSA, R. F. **Determinação da difusividade térmica de um compósito natural visando classifica-lo como isolante térmico.** Anais do 20º CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Joinville/SC, 2012.

MOURA, C. B. **Aplicação de isolamento térmico pelo exterior tipo ETICS associado a revestimento cerâmico.** 2012. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012.

OLIVEIRA, L. S. M., UGARTE, J. F. O. **Utilização da vermiculita como adsorvente de óleo da indústria petrolífera.** XII Jornada de Iniciação Científica - CETEM, 2004.

OLIVEIRA, M. C. A., LABAKI, L.C. **Os primeiros estudos sobre conforto térmico no Brasil: A contribuição de Paulo Sá.** ENCAC, São Pedro/SP, 2001.

OLIVEIRA, M. P. **Materiais compósitos à base de gesso contendo EVA (Etileno Acetato de Vinila) e vermiculita: otimização de misturas e propriedades termomecânicas.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

PALOMAR, I., BARLUENGA, G., PUENTES, J. **Lime-cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance.** Construction and Building Materials, 2014.

PAULA, R. F. **Vermiculita.** Coordenadores: LIMA, T. M., NEVES, C. A. R. Sumário Mineral 2014. Vol. 34. Brasília: DNPM, 2014. ISSN 0101 2053. p. 123-125

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

RASHAD, A. M. **Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer.** Construction and Building Materials, 2016.

REIS, E. **Vermiculita no Brasil – Situação Atual.** Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT)/ Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE): 2002. p.1-19

SANTIAGO, C. C. **Argamassas**. Salvador: EDUFBA, 2007. 202p

SANTOS, C. A. P., MATIAS, L. **Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios**. 1 ed. – Portugal, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006.

SCHACKOW, A., EFFTING, C., FOLGUERAS, M. V., GUTHS, S., MENDES, G. A. **Mechanical and thermal properties of lightweight concrete with vermiculite and EPS using air-entraining agent**. Construction and Building Materials, 2014.

SHANNAG, M. **Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures**. Construction and Building Materials, 2011.

SHOUKRY, H., KOTKATA, M. F., ABO-EL-ENEIN, S. A., MORSY, M.S., SHEBL, S. S. **Enhanced physical, mechanical and microstructural properties of lightweight vermiculite cement composites modified with nanometakaolin**. Construction and Building Materials, 2016.

SILVA, L. M., RIBEIRO, R. A., LABRINCHA, J. A., FERREIRA, V. M. **Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar**. Cement & Concrete Composites, 2009.

SILVA, N. G. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SILVA, N. G., CAMPITELI, V. C. **Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia**. Revista Ambiente Construído, 2008.

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

SUNDHAKUMAR, J. **Studies on thermal performance of ferrocement roofs**. 26 th Conference on Our World in Concrete and Structures. Singapura: 2001.

SUTCU, M. **Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks**. Ceram. Int., 2015.

TURATSINZE, A., BONNET, S., GRANJU, J. L. **Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance**. Construction and Building Materials, 2007.

TVA - The Vermiculite Association. **Vermiculite Health, Safety and Environmental Aspects**. Nova Iorque (EUA), 2017.

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

XU, B., MA, H., LU, Z., LI, Z. **Paraffin/expanded vermiculite composite phase change material as aggregate for develop lightweight thermal energy storage cement-based composites.** Appl. Energy, 2015.