



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

DEIZE DAIANE PINTO GUILHERME

**ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO E MECÂNICO EM ARGAMASSAS DE
REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO NATURAL PELA
VERMICULITA EXPANDIDA**

NATAL/RN

2019

DEIZE DAIANE PINTO GUILHERME

ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO E MECÂNICO EM ARGAMASSAS DE
REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO NATURAL PELA
VERMICULITA EXPANDIDA

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

Orientador: Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral

NATAL/RN

2019

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

Guilherme, Deize Daiane Pinto.

Estudo do desempenho térmico e mecânico em argamassas de revestimento com substituição do agregado natural pela vermiculita expandida / Deize Daiane Pinto Guilherme. - 2020.

85 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Natal, RN, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral.

1. Engenharia civil - Dissertação. 2. Argamassa térmica - Dissertação. 3. Isolamento térmico - Dissertação. I. Cabral, Kleber Cavalcanti. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624(043.3)

DEIZE DAIANE PINTO GUILHERME

ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO E MECÂNICO EM ARGAMASSAS DE
REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO NATURAL PELA
VERMICULITA EXPANDIDA

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

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral – Presidente

Prof^a. Dra. Luciana de Figueiredo Lopes Lucena – Examinador Interno

Prof. Dr. Wendell Rossine Medeiros de Souza – Examinador Externo

Natal/RN, 09 de dezembro de 2019.

Dedico à Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pela minha vida e por me proporcionar força e coragem para enfrentar cada obstáculo desta jornada.

A meus pais, Elizabete e Eloi, por todo amor, carinho, dedicação e incentivo na minha educação.

A minhas irmãs, Lays, Ana Tália e Ilana, por serem minhas inspirações e por todo apoio e carinho.

A minha sobrinha que tanto amo, Cecília, por todo carinho.

A meu marido, Pedro Arthur, por me ajudar em tudo que foi possível, por todo amor, compreensão e incentivo.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Kleber, pela disponibilidade de sempre, por acreditar em mim, pela paciência, pela compreensão, pelo patrocínio dos materiais e equipamentos, por me acalmar, me incentivar e ter sempre uma solução para os diversos problemas desta pesquisa. Obrigada, pela orientação e amizade!

A banca que se disponibilizou a avaliar e contribuir com este trabalho, Wendell e Luciana.

A minha amiga e técnica do laboratório de técnicas construtivas da UFERSA, Adna, e meu amigo e estagiário, Ayrton, que acompanharam todo o sofrimento e me ajudaram durante os ensaios, vocês foram essenciais nessa pesquisa! Obrigada também por tornar essa etapa mais divertida e prazerosa, junto com Suzy e Matheus.

A minha turma do mestrado, onde fiz amizades que pretendo levar para o resto da vida, em especial Jemima, Jennef e Rayanderson.

A minhas amigas e amigos, algumas que me acompanham desde a escola, alguns da faculdade, e que sempre me apoiaram.

A todos os professores que fazem parte do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC) por todo conhecimento.

Aos técnicos dos laboratórios da UFRN: Carol, do laboratório de Metais e Ensaio Mecânicos, Sandro, do laboratório de Construção Civil, os técnicos do laboratório de Peneiras Moleculares e os de Caracterização Estrutural de Materiais. Agradeço também ao professor George, do laboratório de transferência de calor.

A cerâmica Aliança, que forneceu os tijolos cerâmicos utilizados na pesquisa.

A todos que contribuíram de alguma forma para a concretização deste trabalho.

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

Arthur Schopenhauer

RESUMO

O interesse do desempenho térmico das edificações está cada vez mais frequente, devido às exigências dos usuários e melhorias na fiscalização das normas de desempenho, que estabelecem os critérios mínimos de eficiência de uma edificação. Destacam-se as cobranças relacionadas ao comportamento térmico, pois causam impactos na construção, no meio ambiente e afeta o conforto e os custos aos usuários. Uma alternativa para solucionar esta problemática é a alteração dos materiais constituintes dos sistemas construtivos, como por exemplo, a utilização de agregados leves e com potencial de isolamento térmico. Diante deste contexto, o objetivo do presente trabalho é analisar o desempenho térmico e mecânico de argamassas de revestimento com substituições do agregado natural pela vermiculita expandida. O procedimento experimental iniciou com a caracterização dos materiais e a produção das argamassas com o traço em volume 1:1:6 (cimento: cal: areia) com substituições de 25, 30, 35, 40, 45 e 50% da areia natural pela vermiculita expandida, e em seguida ensaios no estado fresco (consistência, densidade e retenção de água), no estado endurecido (densidade, resistência à tração e compressão, módulo de elasticidade, absorção por capilaridade e por imersão e resistência de aderência) e por fim, os ensaios térmicos, com o aparelho KD- 2Pro e o desempenho térmico, através de um protótipo simulando a incidência de calor em uma parede. Os resultados mostram que a trabalhabilidade foi melhorada de acordo com a incorporação da vermiculita expandida, a densidade no estado fresco e endurecido foi reduzida, a resistência à compressão apresentou redução pouco significativa, o índice de vazios e a resistência de aderência aumentaram. Todos os sistemas de vedação com tijolos cerâmicos revestidos pelas argamassas em análise atenderam aos requisitos estabelecidos pela NBR 15575 (ANBT, 2013). O desempenho térmico avaliado pelo protótipo mostrou melhoria no isolamento térmico de acordo com a incorporação da vermiculita expandida, obtendo resultados mais significativos para as argamassas com 45 e 50% de substituição, que chegaram a isolar 34°C e 40°C, respectivamente. Portanto, o incremento da vermiculita expandida em argamassas de cimento é capaz de beneficiar o isolamento térmico sem gerar grandes danos nas demais propriedades das argamassas, tornando um produto com bom desempenho térmico e mecânico.

Palavras-chave: engenharia civil, argamassa térmica, isolamento térmico.

ABSTRACT

Interest in the thermal performance of buildings is increasingly common due to user requirements and improvements in the enforcement of performance standards, which set the minimum efficiency criteria for a building. We highlight the charges related to thermal behavior, because they impact on the construction, the environment and affect the comfort and costs to users. An alternative to solve this problem is to change the constituent materials of building systems, such as the use of lightweight aggregates with potential for thermal insulation. In this context, the objective of the present work is to analyze the thermal and mechanical performance of coating mortars with substitution of natural aggregate for expanded vermiculite. The experimental procedure began with the characterization of the materials and the production of mortars with a 1: 1: 6 volume trace (cement: lime: sand) with substitutions of 25, 30, 35, 40, 45 and 50% of natural sand by expanded vermiculite, then fresh tests (consistency, density and water retention), hardened tests (density, tensile and compressive strength, modulus of elasticity, capillary and dip absorption and adhesion resistance) and finally, the thermal tests with the KD-2Pro appliance and the thermal performance, through a prototype simulating the incidence of heat in a wall. The results show that the workability was improved according to the incorporation of expanded vermiculite, the density in the fresh and hardened state was reduced, the compressive strength decreased slightly, the void index and the bond strength increased. All sealing systems with ceramic bricks coated by the mortars under analysis met the requirements established by NBR 15575 (ANBT, 2013). The thermal performance evaluated by the prototype showed an improvement in thermal insulation according to the incorporation of expanded vermiculite, obtaining more significant results for mortars with 45 and 50% substitution, which came to isolate 34 ° C and 40 ° C, respectively. Therefore, the expansion of expanded vermiculite in cement mortars is able to benefit from thermal insulation without causing major damage to other mortar properties, making it a product with good thermal and mechanical performance

Keywords: civil Engineering, thermal mortar, thermal insulation.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

- Figura 1.2 – Vermiculita expandida..... 22
- Figura 2.2 – Zoneamento bioclimático brasileiro..... 28

Capítulo 3

- Figura 3.1 – Espalhamento da argamassa na mesa de consistência 40
- Figura 3.2 – Densidade de massa no estado fresco..... 41
- Figura 3.3 – Equipamento para ensaio de retenção de água 41
- Figura 3.4 – Resistência à tração na flexão e à compressão..... 43
- Figura 3.5 – Ensaio para o cálculo do módulo de elasticidade..... 44
- Figura 3.6 – Absorção de água por capilaridade das argamassas..... 44
- Figura 3.7 – Ensaio de absorção de água por imersão..... 45
- Figura 3.8 – Ensaio de resistência à aderência..... 46
- Figura 3.9 – Determinação das propriedades térmicas com o aparelho KD- 2Pro..... 47
- Figura 3.10 - Parede de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces..48
- Figura 3.11 – Ensaio de determinação do desempenho térmico..... 51

Capítulo 4

- Figura 4.1 – Curvas granulométricas..... 52
- Figura 4.2 - Difração de raios X da vermiculita expandida..... 55
- Figura 4.3 – Imagens do MEV da vermiculita expandida..... 55
- Figura 4.4 – Densidade de massa no estado fresco..... 57
- Figura 4.5 - Retenção de água..... 59
- Figura 4.6 – Densidade de massa no estado endurecido..... 60
- Figura 4.7 – Resistência à compressão 61
- Figura 4.8 – Resistência à tração 61
- Figura 4.9 – Módulo de elasticidade dinâmico..... 63
- Figura 4.10 - Absorção por capilaridade..... 64
- Figura 4.11 - Coeficiente de capilaridade..... 64
- Figura 4.12 – Absorção por imersão..... 65
- Figura 4.13 – Índice de vazios..... 66
- Figura 4.14 – Resistência de aderência à tração..... 67

Figura 4.15 – Tipo de ruptura.....	67
Figura 4.16 – Módulo de elasticidade X Índice de vazios	68
Figura 4.17 – Índice de vazios X Densidade de massa fresca.....	69
Figura 4.18 – Resistência à tração X Resistência de aderência.....	69
Figura 4.19 - Condutividade térmica X Índice de vazios.....	71
Figura 4.20 – Condutividade térmica X Densidade de massa.....	72
Figura 4.21 – Condutividade térmica X Resistência à compressão.....	73
Figura 4.22 - Variação de temperatura em cada face.....	75
Figura 4.23 - Isolamento dos materiais.....	76
Figura 4.24 - Análise do desempenho térmico da argamassa externa.....	77
Figura 4.25 - Análise do desempenho térmico.....	78

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1 - Classificação Granulométrica da vermiculita expandida.....	24
Tabela 2.2 – Transmitância térmica de paredes externas.....	29
Tabela 2.3 – Capacidade térmica de paredes externas.....	29

Capítulo 3

Tabela 3.1 – Composição química do cimento Portland CP V ARI-RS.....	36
Tabela 3.2 – Composição física e mecânica do cimento Portland CP V ARI-RS....	36
Tabela 3.3 – Características químicas e físicas da cal.....	37
Tabela 3.4 – Ensaio físicos da areia natural.....	38
Tabela 3.5 – Ensaio para a caracterização da vermiculita expandida.....	38
Tabela 3.6 – Propriedades físicas dos materiais constituintes.....	39
Tabela 3.7 – Traços e relação água/aglomerantes.....	39
Tabela 3.8 – Ensaio realizados nas argamassas no estado fresco.....	40
Tabela 3.9 – Ensaio realizados para a caracterização das propriedades das argamassas no estado endurecido.....	43
Tabela 3.10 - Propriedades térmicas dos materiais do SVVE.....	49
Tabela 3.11 - Resistência térmica superficial interna e externa.....	49

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Análise granulométrica.....	52
Tabela 4.2 – Propriedades físicas dos agregados.....	53
Tabela 4.3 – Composição química da vermiculita expandida.....	54
Tabela 4.4 – Consumo de água para atingir o espalhamento requerido.....	56
Tabela 4.5 – Propriedades térmicas.....	70
Tabela 4.6 – Desempenho térmico.....	73

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/aglo - água/aglomerantes

AN - Areia natural

CBIC - Câmara Brasileira da Indústria Da Construção

CCA - Casca da cinza de arroz

CP - Corpo-de-prova

EPS - Poliestireno expandido

LABPEMOL - Laboratório de Peneiras Moleculares

NBR - Norma Brasileira

RN - Rio Grande do Norte

PVC - Policloreto de vinila

SVVE - Sistemas de Vedações Verticais Externas

UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido

UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

VE - Vermiculita expandida

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	17
1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa	18
1.2 Objetivos da Pesquisa	20
1.2.1 Objetivo geral	20
1.2.2 Objetivos específicos	20
CAPÍTULO 2	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Vermiculita	21
2.1.1 Propriedades da vermiculita	22
2.1.2 Aplicação da vermiculita na construção civil.....	23
2.1.2.1 <i>Vermiculita expandida como agregado leve</i>	23
2.2 Argamassas de revestimento	25
2.3 Argamassa térmica	26
2.3.1 Argamassas com incorporação de vermiculita	26
2.4 Desempenho térmico	27
2.4.1 Propriedades térmicas.....	30
2.4.2 Norma de desempenho	31
2.4.3 Isoladores térmicos	32
2.4.4 Argamassas com isoladores térmicos	32
2.5 Estado da arte	33
CAPÍTULO 3	36
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	36
3.1 Materiais	36
3.1.1 Cimento	36
3.1.2 Cal.....	36
3.1.3 Agregado miúdo	37
3.1.4 Água	37
3.2 Métodos	37
3.2.1 Caracterização dos agregados.....	38
3.2.2 Produção das argamassas.....	38
3.2.3 Propriedades das argamassas no estado fresco.....	39
3.2.3.1 <i>Índice de Consistência</i>	40
3.2.3.2 <i>Densidade de massa</i>	41

3.2.3.3	<i>Retenção de água</i>	41
3.2.4	Moldagem e cura dos corpos de prova	42
3.2.5	Propriedade das argamassas no estado endurecido	42
3.2.5.1	<i>Resistência à compressão e à tração na flexão</i>	43
3.2.5.2	<i>Densidade de massa</i>	43
3.2.5.3	<i>Módulo de elasticidade dinâmico</i>	44
3.2.5.4	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	44
3.2.5.5	<i>Absorção de água por imersão</i>	45
3.2.5.6	<i>Resistência de aderência</i>	46
3.2.6	Ensaio térmico	47
3.2.6.1	<i>Propriedades térmicas</i>	47
3.2.6.2	<i>Desempenho térmico</i>	48
CAPÍTULO 4	52
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1.	Caracterização física dos agregados	52
4.1.1	Composição granulométrica.....	52
4.1.2	Propriedades físicas	53
4.2	Caracterização química, mineralógica e microestrutural da vermiculita expandida	54
4.3	Caracterização das argamassas no estado fresco	56
4.3.1	Consistência.....	56
4.3.2	Densidade de massa.....	57
4.3.3	Retenção de água	58
4.4	Caracterização das argamassas no estado endurecido	59
4.4.1	Densidade de massa.....	59
4.4.2	Resistências à compressão e à tração na flexão.....	60
4.4.3	Módulo de elasticidade	62
4.4.4	Absorção por capilaridade	63
4.4.5	Absorção por imersão.....	65
4.4.6	Resistência de aderência à tração	66
4.4.7	Módulo de elasticidade X Índice de vazios	68
4.4.8	Índice de vazios X Densidade de massa fresca	68
4.4.9	Resistência à tração X Resistência de aderência	69
4.5	Ensaio Térmico	70
4.5.1	Propriedades térmicas.....	70
4.5.1.1	<i>Condutividade térmica X Índice de vazios</i>	71
4.5.1.2	<i>Condutividade térmica X Densidade de massa</i>	72

4.5.1.3 <i>Condutividade térmica X Resistência à compressão</i>	72
4.5.2 Desempenho térmico	73
CAPÍTULO 5	79
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
5.1 Conclusões	79
5.2 Sugestões para estudos futuros.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O cuidado com o desempenho e a qualidade das edificações está cada vez mais presente no âmbito da construção civil. Com a maior exigência dos usuários e melhorias na fiscalização das normas de desempenho, a busca por meios que tornem os sistemas construtivos mais eficientes termicamente, torna-se maior. Uma das maneiras de solucionar esses requisitos é a utilização de materiais de construção que possam proporcionar maiores benefícios.

Dentre as exigências técnicas, destaca-se a relacionada ao desempenho térmico das edificações, pois além do comprometimento da construção, afeta diretamente a qualidade de vida dos usuários e os gastos energéticos, além dos impactos ambientais derivados do uso intensivo de aparelhos condicionadores de ar. A alteração dos materiais constituintes dos sistemas construtivos pode atenuar problemas relacionados à eficiência térmica.

A definição de desempenho das edificações ganhou maior importância nos últimos anos com a publicação da Norma de Desempenho NBR 15575 (ABNT,2013), que estabelece algumas exigências no quesito de conforto e qualidade, em cada um dos sistemas que compõem uma edificação: estrutura, vedações, pisos, instalações e coberturas. A envoltória das edificações (revestimento das vedações externas) causa grande influência na eficiência energética da habitação; ou seja, o desempenho térmico do sistema de vedações verticais proporciona a habitabilidade da edificação por se relacionar com o conforto térmico proporcionado aos usuários (APOLÔNIO *et al.*, 2010).

As argamassas de revestimento podem modificar significativamente o desempenho térmico e acústico dos edifícios e reduzir o consumo de energia, atendendo aos requisitos da norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013), portanto, é importante estudar o desempenho de materiais alternativos que possam apresentar potencial quanto ao isolamento térmico, como os agregados leves artificiais ou reciclados de resíduos. Além disso, os materiais tradicionais de construção de origem natural são ocasionalmente expostos à escassez e até ao esgotamento (LATROCH *et al*, 2018).

A vermiculita expandida é considerada um agregado leve, devido ao seu baixo valor de massa específica aparente. É um mineral semelhante à mica, com flocos brilhantes, e é um membro do grupo filossilicato. Quando aquecido a 650 – 950° C, pode ser expandido até 30 vezes o seu volume original. A estrutura formada após o aquecimento possui alta porosidade e uma grande quantidade de vazios preenchidos por ar, como também a baixa densidade, favorece

as propriedades de condutividade térmica, acústica e resistência ao fogo do mineral (KOKSAL; GENCEL; KAYA, 2015).

As pesquisas relacionadas ao desempenho térmico e mecânico em argamassas de revestimento ainda são pouco exploradas, apesar de se tratar de um assunto relevante, principalmente em regiões de clima quente. Além dos benefícios do conforto térmico, as argamassas térmicas diminuem o peso próprio do revestimento e, conseqüentemente, da estrutura como um todo. Portanto, gera benefícios no isolamento térmico, na redução dos custos das obras e economia energética.

Diante destas problemáticas expostas, o presente trabalho visa analisar o comportamento térmico de argamassas de revestimento com um traço 1:1:6 (cimento: cal: areia), utilizando como isolador térmico a vermiculita expandida, em porcentagens de 25, 30, 35, 40, 45 e 50% como substituição ao agregado.

1.1 Justificativa

Devido às intensas mudanças de temperatura, o uso de condicionadores de ar e climatizadores têm crescido de forma brusca, principalmente em regiões com clima quente. Com isso, a preocupação com o conforto térmico e redução do consumo de energia elétrica no ambiente construído ganhou grande proporção.

A realização de pesquisas com inovações tecnológicas na indústria da construção civil pode facilitar na construção de edificações que atendam aos requisitos prescritos na norma de desempenho. Além disso, esses novos materiais contribuem para o conforto térmico dos usuários e reduzem os gastos e impactos ambientais.

Lamberts, Dutra e Pereira (2014) afirmam que os materiais de construção utilizados na edificação têm grande influência no conforto do ambiente interno. Portanto, estudar e entender as propriedades desses materiais é essencial para especificá-los e adequá-los às características de isolamento térmico ou proteção solar do projeto.

Rashad (2016) apresenta alguns autores que realizaram estudos com vermiculita expandida e conclui que a inclusão do minério na matriz cimentícia reduz a condutividade térmica e aumenta a capacidade de isolamento térmico. Essa redução está relacionada à baixa condutividade térmica da vermiculita em comparação com outros agregados naturais normais. O autor afirma também que o isolamento acústico com vermiculita expandida ainda necessita de mais investigações.

Alguns estudos investigaram as propriedades das argamassas com vermiculita e outro tipo de material. Silva *et al* (2009) e Xu *et al.* (2015) além da vermiculita expandida, utilizaram a perlita. Koksal, Gencel e Kaya (2015) utilizaram vermiculita e sílica ativa. Cintra; Paiva e Baldo (2014) adicionaram resíduo de borracha de pneus nas argamassas com vermiculita. Palomar, Barluenga e Puentes (2015) utilizaram perlita, argila expandida, vermiculita expandida e fibras de celulose e polipropileno. Passos, Carasek e Amaral (2016) analisaram argamassas com resíduos de EPS, lã de rocha, lã de vidro e vermiculita. Porém, para entender a influência da vermiculita nas argamassas de revestimento, são necessários estudos apenas com o uso deste mineral.

Mo *et al* (2018) e Barros (2018) investigaram as propriedades de argamassas somente com a incorporação da vermiculita expandida. Mo *et al* (2018) analisou as propriedades mecânicas em altas temperaturas e Barros (2018) estudou as propriedades mecânicas e térmicas. Porém, esta pesquisa irá colaborar com as demais, analisando as propriedades térmicas através de um protótipo composto por argamassa e tijolo cerâmico, simulando uma vedação externa. Além disto, nenhum dos estudos de argamassas com vermiculita expandida avaliaram a resistência de aderência ao substrato.

Portanto, esta pesquisa visa contribuir com estas lacunas do conhecimento, partindo do pressuposto que a incorporação de vermiculita expandida na produção de argamassas pode trazer benefícios quanto ao desempenho térmico das edificações, proporcionar um melhor conforto térmico aos usuários, reduzir os custos de energia e, conseqüentemente, favorecer a preservação do meio ambiente.

1.2 Objetivos da Pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar o desempenho térmico e mecânico de argamassas de revestimento com substituições parciais do agregado natural pela vermiculita expandida.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. Caracterizar os agregados quanto às propriedades físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais;
- ii. Avaliar as propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido;
- iii. Analisar as propriedades térmicas e o desempenho térmico das argamassas de acordo com o procedimento simplificado estabelecido pela NBR 15575 (ABNT, 2013) e por meio da avaliação em um protótipo.
- iv. Estabelecer o percentual ótimo de substituição a ser utilizado na produção das argamassas com vermiculita expandida.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Vermiculita

O termo "vermiculita" é derivado do latim *vermiculus*, que significa pequeno verme, devido ao fato de ser um material que ao se expandir sob aquecimento, suas partículas movimentam de forma similar aos vermes (UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2005). A vermiculita, $\{(Mg, Fe, Al)_3 [(Si, Al)_4 O_{10}] [OH]_2 4H_2O\}$, é um mineral semelhante à mica com flocos brilhantes que é um membro do grupo filossilicato, formada sob condições naturais, como alternância hidrotermal de biotita ou intemperismo da flogopita. O minério de vermiculita é constituído por silicatos hidratados de magnésio, alumínio e ferro, com uma estrutura micáceo-lamelar e clivagem basal. A variação na composição química da vermiculita pode causar uma variação em suas propriedades físicas (SUVOROV, SKURIKHIN, 2003).

A vermiculita se expande quando aquecida a 650 - 950° C, em um processo que é denominado de esfoliação. Quando a vermiculita é aquecida, ela se expande em aproximadamente 8 a 30 vezes seu tamanho original e se converte em fragmentos leves e soltos que se separam pela entrada de ar. A vermiculita esfoliada exibe de 10 a 11 vezes menos densidade do que seu volume original antes do aquecimento, baixa condutividade térmica e ponto de fusão relativamente alto (SUVOROV, SKURIKHIN, 2003).

Após o resfriamento a vermiculita expandida preserva seu novo volume com listras muito finas de ar entre as folhas. As partículas são vistas como placas delgadas, com uma estrutura porosa e brilho oleoso ou sedoso, separadas por uma fina abertura de ar. Sua forma, cor, brilho e composição de grãos estão intimamente relacionados à matéria-prima original. Normalmente a cor da partícula de vermiculita é amarelo-dourada ou marrom e ocasionalmente, esverdeada com um brilho rosado nacarado. (KOKSAL; GENCEL; KAYA, 2015; SUVOROV, SKURIKHIN, 2003). A Figura 2.1 apresenta a vermiculita expandida:

Figura 2.1 – Vermiculita expandida



Fonte: RASHAD (2016).

O mineral vermiculita apresenta semelhanças estruturais com a clorita e com a montmorilonita. É composto por unidades de silicato do tipo encontrado nas micas com uma deficiência de cargas negativas devido a substituições na camada tetraédrica. Os cátions interlamelares neutralizantes são geralmente magnésio, como na clorita, mas diferenciam desta por estarem cercados por água em vez de hidroxilas (SANTOS, 1989).

Os depósitos brasileiros e mundiais de vermiculita estão localizados nas zonas de complexos máficos-ultramáficos e carbonatitos. Os maiores produtores de vermiculita são: África do Sul, com 29,9% da produção, seguida pelos Estados Unidos da América, com 23,0%, e Brasil, com 15,6% (PAULA, 2014; REIS, 2002).

No Brasil as jazidas de vermiculita estão presentes nos estados da Bahia, Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Paraná, Piauí e Paraíba. Em 2013, a produção e beneficiamento da vermiculita no país foi de aproximadamente 68.014 toneladas, sendo usada em sua forma expandida em diversas aplicações (PAULA, 2014).

2.1.1 Propriedades da vermiculita

Os produtos com vermiculita expandida são incombustíveis, isolantes termoacústicos, têm resistência estável com o tempo, bio-estáveis à ação de ácidos e resistência à deformação, o que os torna aplicáveis nos mais diversos setores (KOKSAL; GENCEL; KAYA, 2015).

O mineral utilizado na forma expandida apresenta propriedades como baixos valores de massa específica aparente e de condutividade térmica. Essas qualidades, associadas à granulometria, tornam o produto de vermiculita muito atrativo para o uso em diversas áreas,

como na construção civil, na agricultura, nas indústrias químicas, de tintas, dentre outras (UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2005).

A vermiculita apresenta características particulares, é um material não abrasivo, inodoro, de pH essencialmente neutro, inerte, não se decompõe e possui propriedades isolantes térmicas devido a sua alta temperatura de sinterização. Uma vez expandida, a vermiculita apresenta baixa densidade, características de isolante acústico, alta absorção de líquidos e elevada área superficial; propriedades que permitem que seja utilizada em várias aplicações e principalmente na forma expandida (PERALTA, 2009).

2.1.2 Aplicação da vermiculita na construção civil

A vermiculita expandida possui baixa condutividade térmica, densidade de massa, pouca propagação sonora e alta resistência ao incêndio. Por possuir essas características, o mineral pode ser utilizado em diversas aplicações, como na fabricação de argamassa, isolante termo acústico para lajes, concreto e tijolos leves, câmara à prova de fogo e som, paredes e divisórias porta corta-fogo, entre outros (UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2005; REIS, 2002).

Muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas com a aplicação de vermiculita na construção civil. Rashad (2016) elaborou um artigo de revisão que resumia e reunia as publicações dispersas na literatura relacionadas ao emprego da vermiculita expandida como material de construção e indicou as vantagens e desvantagens. De acordo com o autor, as vantagens do uso de vermiculita expandida na matriz de cimento são o aumento da trabalhabilidade, a redução do peso da unidade, o aumento do isolamento acústico e térmico e o aumento da resistência ao fogo. As desvantagens são a diminuição da resistência mecânica, aumento da porosidade e da absorção de água.

2.1.2.1 Vermiculita expandida como agregado leve

Segundo Mehta e Monteiro (2008), são considerados agregados leves aqueles que possuem massa unitária menor do que 1120 kg/m^3 , isso ocorre, geralmente, devido a microestrutura celular e porosa. A massa específica desses agregados pode variar de acordo com a granulometria, diferentemente dos agregados tradicionais.

A NBR 12655 (ABNT, 2015) conceitua agregado leve como sendo aquele com massa específica menor ou igual a 2000 kg/m^3 . São exemplos de agregados leves: os agregados

expandidos de argila, vermiculita, resíduos de esgoto sintetizado, ardósia, escória siderúrgica, entre outros.

Os agregados leves não estruturais como vermiculita, perlita e agregados de poliestireno expandido de densidade muito baixa estão sendo incorporados como substituição parcial de areia em argamassas à base de cimento. A vantagem principal do uso destes materiais são as boas propriedades de isolamento devido à sua estrutura altamente porosa (MO *et al* 2018).

Após o aquecimento, a vermiculita sofre um processo de expansão, e sua massa específica aparente reduz de 640-960 kg/m³ para 56-192 kg/m³, e assim passa a apresentar característica de agregado leve. De acordo com o tamanho dos grãos, a vermiculita expandida pode receber uma classificação diferente. Os grãos mais finos são utilizados na produção de materiais para construção civil, na alimentação para animais e como carreadoras de fertilizantes; enquanto os mais grossos são usados para fins de horticultura, germinação de sementes, cultivo, entre outros (UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2005). A Tabela 2.1 apresenta a classificação granulométrica da vermiculita expandida.

Tabela 2.2 - Classificação Granulométrica da vermiculita expandida

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

Fonte: Reis (2002)

As pesquisas sobre a utilização de vermiculita em materiais cimentícios são bastante limitadas e ganharam maior atenção recentemente. Em argamassas, Mo *et al* (2018) analisaram a consistência, resistência à compressão e residual; e absorção de água incorporando agregado leve de vermiculita. Koksai; Gencel; Kaya (2015) estudaram as propriedades de argamassas com sílica ativa e vermiculita em temperaturas ambiente e elevadas. Cintra; Paiva e Baldo (2014) avaliaram as propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas com vermiculita e resíduos de borracha reciclada de pneus. Porém, o tema ainda carece de maiores informações e necessita de um aprofundamento nas pesquisas.

Em concretos, Schackow *et al.* (2014) analisaram as propriedades mecânicas e térmicas, comparando concretos com vermiculita e com EPS (Poliestireno expandido). Azad *et al* (2018) investigaram as propriedades mecânicas de concretos com uso de vermiculita e dolomita.

2.2 Argamassas de revestimento

A NBR 7200 (ABNT, 1998) define argamassa de revestimento como sendo uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes e água, podendo conter ou não aditivos/adições, com propriedades de aderência e endurecimento. A NBR 13281 (ABNT, 2005) informa também, que estas argamassas podem ser dosadas em obra ou em instalações próprias (argamassas industrializadas). Quanto ao tipo, as argamassas utilizadas para revestimento podem ser à base de cal, à base de cimento ou argamassas mistas de cal e cimento (ABCP, 2003).

Carasek (2010) cita que argamassas de revestimento podem ser utilizadas para revestir paredes, muros e tetos, os quais, usualmente, recebem acabamentos diversos, como pintura, revestimentos cerâmicos, laminados, etc. Os revestimentos de argamassa podem ser constituídos por várias camadas e funções específicas.

Portanto, é evidente que as argamassas exercem uma função importante em toda construção feita com blocos cerâmicos, pedras ou tijolos, pois exerce a função de unir as diversas unidades desses materiais entre si. Outra finalidade básica do revestimento é proporcionar uma maior proteção aos vários elementos construtivos. Portanto, uma argamassa de qualidade tem grande contribuição na durabilidade das edificações (SANTIAGO, 2007).

Uma demonstração prática da relevância do revestimento de argamassa é sua capacidade de isolamento térmico e acústico. Por exemplo, um revestimento de 30 a 40% de espessura da parede, pode ser responsável por 50% do isolamento acústico e 30% do isolamento térmico, além de contribuir em 100% de estanqueidade de uma vedação de alvenaria comum (ABCP, 2003).

Para obter uma argamassa de revestimento de bom desempenho, é necessário que elas apresentem uma série de propriedades específicas, relativas à argamassa tanto no estado plástico como no estado endurecido, como as condições de aderência, constância de volume, durabilidade, impermeabilidade e resistência mecânica adequada. O sistema de revestimento necessita também contribuir com funções de isolamento térmico, isolamento acústico, resistência ao desgaste e abalos superficiais, segurança ao fogo e servir também como base para acabamentos decorativos (SANTIAGO, 2007; CARASEK, 2010; BAÍA; SABBATINI, 2008).

2.3 Argamassa térmica

As argamassas convencionais não são capazes de proporcionar propriedades suficientes de isolamento térmico e acústico, logo, há necessidade de investigar e pesquisar materiais alternativos para confecção de argamassas térmicas de alvenaria (SOUSA, 2010). O autor relata que já ocorre um grande impacto nos sistemas de revestimentos argamassados com o uso de novos materiais, como os agregados leves, pois beneficiam o isolamento térmico mas apresentam resistência mecânica menor do que as tradicionais.

Lamberts, Dutra e Pereira (2014) alegam que o desempenho térmico das edificações está relacionado com as propriedades térmicas dos materiais que a constituem. Por exemplo, os materiais cimentícios, são normalmente isolantes à transferência de calor, devido as suas propriedades de condutividade térmica e capacidade calorífica. Os autores afirmam também que materiais com estrutura porosa e baixa densidade, como isopor, lã de vidro, cortiça, entre outros, são favorecidos pela baixa condutividade térmica do ar presente em sua composição.

2.3.1 Argamassas com incorporação de vermiculita

No estudo da arte realizado por Rashad (2016), a respeito do uso da vermiculita como material de construção, o autor explicita que a trabalhabilidade de misturas contendo vermiculita expandida ainda precisa de maiores investigações. Koksai; Gencel; Kaya (2015) e Mo *et al* (2018) afirmam que a trabalhabilidade aumentou com o incremento do resíduo. Essa melhora na trabalhabilidade pode estar relacionada ao aumento do conteúdo de ar com a inclusão da vermiculita e com a menor quantidade de finos em relação à areia natural.

Porém, Silva *et al* (2009); Palomar, Barluenga e Puentes (2015) e Barros (2018); relatam que para manter uma trabalhabilidade adequada é necessária uma quantidade maior de água. Tal fato pode ser justificado devido à alta porosidade da vermiculita expandida.

Os autores Mo *et al* (2018), confirmaram em seu estudo que a natureza porosa e leve da vermiculita expandida contribuiu para a redução do peso unitário e da resistência à compressão, além do aumento da absorção de água.

Koksai; Gencel; Kaya (2015) analisaram o efeito combinado da vermiculita e sílica ativa em argamassas e observaram um bom desempenho em relação a resistência e durabilidade a temperaturas elevadas, revelando que a vermiculita é um material resistente ao fogo. Mo *et al* (2018), confirmam também que o resíduo teve efeito positivo no aumento da resistência ao

calor e da estabilidade térmica, embora a perda de peso das argamassas de vermiculita expandida submetidas a temperaturas elevadas tenha aumentado.

Com base nas pesquisas de Xu *et al.* (2015), a resistência à compressão e à flexão das argamassas contendo 50% e 100% de parafina/vermiculita em substituição ao agregado natural, são reduzidas. Os resultados mostram uma redução de 47,35% e 56,49% para compressão e 22,58% e 20,97% para flexão, respectivamente. Mo *et al* (2018), também notou a redução de cerca de 50% e 63% quando a vermiculita expandida foi incorporada nas substituições de volume de 30% e 60%, respectivamente. Esses resultados são compatíveis aos de Schackow *et al* (2014). Os autores explicam que a tendência de diminuição da resistência à compressão nas argamassas de vermiculita expandida pode ser atribuída à estrutura mole e porosa do mineral. Além disso, o menor teor de finos presentes na vermiculita expandida poderia resultar em empacotamento de partículas menos favorável e afetar negativamente a resistência da argamassa.

Em relação as propriedades térmicas, Barros (2018) verificou que na mistura com 100% de vermiculita expandida, em relação a argamassa de referência, houve redução na condutividade térmica de aproximadamente 82%. Na composição com 25% de substituição, a condutividade reduz em 19,4%, e nos traços de 50% e 75% de substituição, a redução chega a 53,7% e 74,6%, respectivamente, comparada à referência. Koksall, Gencil e Kaya (2015); Xu *et al.* (2015); Mo *et al* (2018), também encontraram valores satisfatórios. Essa melhoria pode ser explicada devido a estrutura lamelar preenchida por ar da vermiculita expandida, e como o ar é um bom isolante térmico, a condutividade térmica sofre redução.

2.4 Desempenho térmico

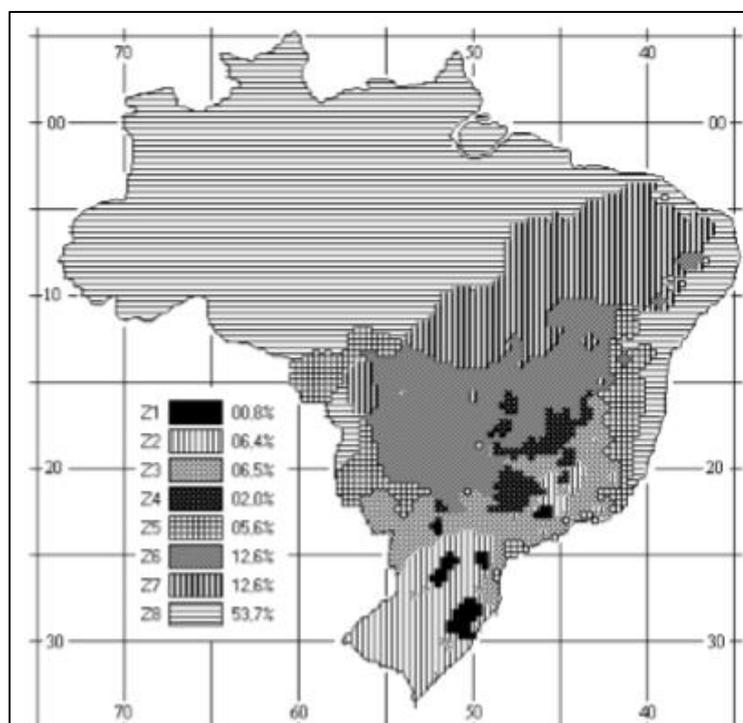
O desempenho térmico é uma característica essencial para toda edificação, pois além de refletir no conforto direto das pessoas no ambiente, como nas atividades diárias ou no sono, também é considerado nas questões energéticas uma vez que diminui a necessidade do uso de condicionadores de ar (CBIC, 2013).

Segundo Lamberts *et al* (2014) o desempenho térmico está intimamente ligado ao conforto térmico, que pode ser definido como uma sensação humana, subjetiva e dependente de fatores psicológicos, fisiológicos e físicos, como: o metabolismo, vestimentas, idade, peso, sexo, velocidade do vento, umidade relativa do ar, entre outros. As pesquisas em conforto térmico se fundamentam nos quesitos de satisfação humana, conservação de energia e

desempenho em atividades intelectuais, manuais e perspectivas. As diretrizes para esses estudos são métodos para uma avaliação térmica detalhada e análise das condições necessárias para concepção de um ambiente térmico adequado às atividades do homem.

Conforme a NBR 15575 (ABNT, 2013), as construções residenciais devem possuir atributos que atendam ao desempenho térmico de acordo com a região bioclimática em que está localizada, devido à grande extensão territorial brasileira e os diferentes climas em cada região. A Figura 2.2 apresenta o zoneamento definido pela norma NBR 15220 (ABNT, 2003), que mostra oito zonas distintas e suas porcentagens em relação à área total do território brasileiro.

Figura 2.2 – Zoneamento bioclimático brasileiro.



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

A NBR 15220 (ABNT, 2003) define também que cada zona deve possuir parâmetros construtivos diferentes, como tipos de vedação externas, tipos de coberturas, formas de condicionamento térmico passivo, tamanho e proteção das aberturas, entre outros. A norma faz orientações específicas de acordo com o zoneamento.

É possível analisar o desempenho térmico através de procedimentos descritos na norma NBR 15575 (ABNT, 2013). Essas metodologias são baseadas nas medidas térmicas definidas nos dias típicos de inverno e verão e nos valores de posicionamento geográfico de cada local.

- Procedimento 1 A – Simplificado: Averiguar o cumprimento das exigências, com base em valores máximos admissíveis para transmitância térmica e mínimos admissíveis para capacidade térmica;

i. Transmitância térmica de paredes externas:

Transmitância térmica é uma característica que está associada à condutividade e a capacidade de conduzir energia dos materiais constituintes e sua espessura. Esta propriedade representa a possibilidade de passagem de energia de materiais por unidade de área e de diferença de temperatura (LAMBERTS *et al.*, 2010). Os valores máximos admissíveis, determinados por norma, para a transmitância térmica estão apresentados na Tabela 2.2:

Tabela 2.2 – Limites máximos admissíveis de transmitância térmica

Transmitância Térmica (U) W/m ² .K		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
$U \leq 2,5$	$\alpha^a \leq 0,6$ $U \leq 3,7$	$\alpha^a > 0,6$ $U \leq 2,5$

α^a é a absorptância à radiação solar da superfície externa da parede.

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2003).

ii. Capacidade térmica de paredes externas:

A capacidade térmica é o produto da capacidade calorífica volumétrica (Cv) pela espessura (e) do material em análise ou o produto entre essa espessura (e), o calor específico (c) e densidade de massa aparente (ρ). Esta propriedade representa a quantidade de energia necessária para variar em 1 °C a temperatura de um ambiente. Os valores mínimos admissíveis estão apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Limites máximos admissíveis de capacidade térmica

Capacidade Térmica (CT) kJ/m ² .K	
Zona 8	Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7
Sem exigência	≥ 130

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2003).

- Procedimento 1 B – Simulação computacional: este procedimento deve ser realizado quando os resultados de transmitância térmica e capacidade térmica não são satisfatórios de acordo com as diretrizes prescritas na parte 4 e 5 da norma;

- Procedimento 2 – Medição in loco: procedimento de caráter somente informativo, sua realização não descarta a dos demais procedimentos. Resume-se em analisar se as exigências da norma estão sendo atendidas, através de medidas em edificações ou protótipos construídos, buscando reproduzir ao máximo as condições reais.

De acordo com os resultados obtidos nos procedimentos é possível analisar o nível de atendimento atingido pelos sistemas de fachadas e coberturas. O procedimento simplificado fornece apenas o nível de satisfação obrigatório, ou seja, nível mínimo (M). Portanto, quando deseja-se determinar níveis superiores, seja intermediário (I) ou superior (S), deve ser feito a simulação computacional ou a medição em protótipo (CBIC, 2013).

2.4.1 Propriedades térmicas

Os conceitos das propriedades térmicas são primordiais para compreender e analisar o desempenho térmico das edificações. A condutividade térmica, calor específico e a massa específica aparente são as mais essenciais na caracterização térmica dos elementos e sistemas construtivos (OLIVEIRA, 2009).

A condutividade térmica define a porção de fluxo de calor que percorre uma unidade de espessura do material, quando se estabelece uma diferença de temperatura entre duas faces planas (SANTOS; MATIAS, 2006). Senhadji *et al* (2019) analisaram argamassas confeccionadas com o uso de resíduos reciclados de policloreto de vinila (PVC), incorporando 0, 10, 30, 50 e 70% de PVC como substituto da areia natural e notaram que os agregados plásticos reduziram a densidade da argamassa e a condutividade térmica, tornando-a mais eficiente termicamente.

A Capacidade calorífica volumétrica é o produto da densidade de massa do material pelo seu calor específico (BORGES, 2009). A capacidade calorífica e calor específico representam a possibilidade de um material conservar calor, porém, o calor específico é representado por unidade de massa e a capacidade calorífica por unidade de volume (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A difusividade térmica é uma propriedade que determina a velocidade com que o calor atravessa em um material, sendo resultado da razão entre a condutividade e capacidade calorífica (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Saha, Sarker e Golovanevskiy (2018) estudaram as propriedades térmicas de argamassas utilizando agregado de escória de ferroníquel, e notaram que a condutividade térmica e a difusividade térmica da argamassa diminuíram com o aumento do conteúdo de resíduo, devido ao aumento da porosidade.

2.4.2 Norma de desempenho

A norma NBR 15575 (ABNT, 2013) - “Edificações habitacionais – Desempenho”, entrou em vigor no dia 19 de julho de 2013, depois de uma revisão realizada em 2008. Esta norma tornou-se um símbolo de grande importância na inovação tecnológica do âmbito da construção civil brasileira, trazendo o conceito de comportamento durante o uso das edificações, estabelecendo níveis de exigências dos usuários durante os anos, buscando estabelecer conforto, segurança estrutural e contra incêndio, estabilidade e vida útil da edificação.

De acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013), o desempenho dos sistemas construtivos é conceituado com base nas exigências (qualitativos), parâmetros (quantitativos ou premissas) e métodos de avaliação, os quais explanam os requisitos dos usuários e permitem determinar seu atendimento. A norma é composta por um grupo normativo dividido em seis partes, desenvolvidas de acordo com os elementos de construção e ordenados 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).

São estabelecidos três patamares de desempenho para os critérios encontrados na Norma. O desempenho Mínimo (M), que deve ser obrigatoriamente atingido, representando as necessidades básicas de saúde, higiene e economia, como também os níveis Intermediário (I) e o Superior (S), os quais elevam o nível da edificação além do mínimo exigido, sendo base de comparação entre sistemas ou elementos construtivos, além de ser um critério de valorização do imóvel. Alguns pontos ficaram de fora desta versão na Norma, como o uso de condicionadores de ar, gás combustível, telecomunicações, elevadores, segurança e automação predial (CARRACO, 2015).

No entanto, caracterizar o desempenho desejado é muito difícil pois as necessidades dos usuários são subjetivas e podem variar conforme suas condições fisiológicas e psicológicas (CBIC, 2013). Esses fatores podem mudar a satisfação ou insatisfação da pessoa no ambiente. Portanto, a abordagem de desempenho é aceita como a probabilidade de que o nível de desempenho satisfaça uma parte dos usuários em uma parte do tempo (BORGES, 2008).

2.4.3 Isoladores térmicos

O intuito da utilização de um sistema de isolamento térmico é inibir ou reduzir o fluxo de calor. Entre os isolantes térmicos tradicionais encontram-se as mantas e painéis constituídos de fibras minerais ou fibras orgânicas flexíveis, as espumas em grânulos e os flocos de lãs minerais. A resistência térmica desses materiais ocorre principalmente devido à grande quantidade de ar presente entre as fibras ou confinado nas pequenas células formadas no processo de expansão das espumas e dos isolantes granulares (OLIVEIRA, 2009).

Diversos materiais podem ser utilizados na forma de isoladores térmicos, desde que exerçam a função de minimizar 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).

2.4.4 Argamassas com isoladores térmicos

As argamassas de revestimento exercem grande importância no desempenho térmico das edificações, porém, os materiais convencionais usados nas composições das argamassas não são capazes de atender um conforto térmico desejado pelos usuários. Para melhorar o desempenho térmico, as argamassas de revestimento geralmente incorporam outros componentes, como agregados leves, resíduos e fibras curtas. Esses materiais são comumente usados para reduzir a condutividade térmica e melhorar o desempenho térmico (PALOMAR, BARLUENGA E PUENTES, 2015). Várias pesquisas estão sendo desenvolvidas com materiais que possam causar esses benefícios.

Brás; Leal; Faria (2013) compararam argamassas com resíduo de madeira com as argamassas com EPS, em relação as propriedades térmicas. Foram testadas diferentes dosagens de cortiça (de 0% a 80%) como substituição da areia. A condutividade térmica apresentou um decréscimo linear para uma dose crescente de cortiça nas argamassas. No que diz respeito ao efeito no atraso térmico, as argamassas de cortiça parecem comportar-se melhor do que as argamassas com EPS.

Baite *et al* (2016) usaram cinzas de carvão de uma usina termoelétrica, como um agregado fino em argamassa cimentícias, com substituições de (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 75% e 100%) e analisaram o comportamento térmico. A condutividade obtida para a amostra contendo 0% e 100% de cinzas de fundo de carvão foi, 2,04 e 0,73 W / mK em 28 dias de amostras curadas, respectivamente, 2,02 e 0,70 W / mK a 90 dias.

Corinaldesi; Mazzoli; Siddque (2016) substituíram o agregado da argamassa por pó de serra, nas proporções de 2,5%, 5% e 10% em volume da areia. Os resultados obtidos mostraram que uma dose máxima de 5% de resíduo de madeira deve ser usada para evitar uma perda excessiva de resistência mecânica da argamassa, devido à redução da condutividade térmica de cerca de 25%.

Ruiz-Herrero *et al* (2016) apresentam a melhoria do isolamento térmico de compostos plásticos em concreto e argamassa. Os materiais estudados foram obtidos adicionando à cinco diferentes porcentagens de dois tipos de resíduos plásticos (resíduos de polietileno e PVC saindo da bainha protetora do cabo elétrico). Os materiais resultantes, em ambos os casos, argamassas e concretos, apresentaram baixos valores de condutividade térmica, sendo assim, melhores isolantes térmicos.

Wongsa *et al* (2018) estudaram as propriedades mecânicas e térmicas de argamassas geopoliméricas leves incorporando 100% de borracha fragmentada de pneus reciclados como agregado. Os resultados indicaram a redução significativa da resistência à compressão. No entanto, a densidade e a condutividade térmica da argamassa contendo 100% de resíduo foram, em média, 42% e 79%, respectivamente, inferiores às da argamassa geopolimérica de controle. Portanto, a argamassa geopolimérica desenvolvida pode ser usada para fazer tijolos / blocos, que são ecologicamente corretos, mais leves e proporcionam melhor isolamento térmico do que tijolos / blocos convencionais.

Latroch *et al* (2018) analisaram as propriedades físico-mecânicas e térmicas de argamassas compostas leves baseadas em cloreto de polivinila expandido, em que a areia natural é substituída por agregados em (0, 15, 25, 50 e 75% em volume). Os autores observaram um decréscimo na condutividade térmica de cerca de 60% para o compósito com 75% de substituição, em relação ao da argamassa de controle, mostrando um bom comportamento como isolante térmico.

2.5 Estado da arte

Silva *et al* (2009) estudaram os efeitos da vermiculita expandida e perlita nas propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas, e observaram que tanto o tipo como a quantidade de substituição podem gerar materiais com finalidades diferentes. Os autores afirmam que com a vermiculita pode-se formular argamassas com menor quantidade de água, menor peso e resistência mecânica.

O estudo realizado por Cintra; Paiva e Baldo (2014) comparou argamassas produzidas com vermiculita expandida e argamassas com vermiculita e adição de resíduo de borracha de pneus. Os autores puderam concluir que as argamassas contendo vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus, apresentaram propriedades similares no estado fresco, enquanto que no estado endurecido apresentaram melhores resultados de resistência à compressão e aderência, do que aqueles apresentados pelas argamassas que não foram aditivadas com borracha (só com vermiculita). Mostrando-se assim que a combinação dos resíduos é uma alternativa viável.

Palomar, Barluenga e Puentes (2015) utilizaram perlita, argila expandida, vermiculita expandida e fibras de celulose e polipropileno em argamassas para avaliar a influência desses componentes no encolhimento e fissuras nas idades iniciais, e propriedades físicas e mecânicas, condutividade térmica e absorção sonora. O efeito combinado dos agregados e fibras melhorou o desempenho térmico e acústico.

Xu *et al.* (2015) realizaram uma pesquisa com substituição de 50% e 100% de areia natural por parafina/vermiculita. Analisaram a caracterização do composto desenvolvido, propriedades mecânicas e condutividade térmica das argamassas, e encontram bons resultados de desempenho térmico, com redução da condutividade térmica de 49,3% e 64%, respectivamente.

Koksal, Gencil e Kaya (2015), em sua pesquisa, produziram argamassas com proporções de 4, 6 e 8 de vermiculita/cimento e em cada composição foi utilizado 5, 10 e 15% de sílica ativa. Foram determinadas as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e microestrutura das argamassas produzidas. As argamassas apresentaram bom desempenho em termos de preservação da resistência mecânica a temperaturas elevadas.

Passos, Carasek e Amaral (2016) analisaram três traços de argamassa com resíduos de EPS e resíduos de lã de rocha, lã de vidro e vermiculita, em comparação com uma argamassa convencional de referência. A análise do desempenho adequado dos sistemas propostos (painel pré-moldado revestido com argamassa isolante) foi feita por meio de um programa experimental e de cálculos dos níveis mínimos de desempenho térmico pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013). A partir dos ensaios realizados foi possível concluir que as argamassas com resíduos de EPS e resíduos de lã de vidro, lã de rocha e vermiculita, apresentam grande potencial para utilização como revestimentos isolantes térmicos.

Mo *et al* (2018) investigaram as propriedades de argamassas com substituição de 30 e 60% da areia natural pela vermiculita expandida, analisando a consistência, absorção de água, densidade e resistência mecânica à temperatura ambiente e elevadas. Os resultados mostraram eficiência na resistência à altas temperaturas.

Barros (2018) avaliou o desempenho térmico de argamassas com 25, 50, 75 e 100% de substituição do agregado natural pela vermiculita. Além das propriedades no estado fresco e endurecido, a autora avaliou a eficiência energética destas argamassas de acordo com o procedimento simplificado da NBR 15575 (ABNT, 2013) e indicou o traço com 25% de substituição como sendo o mais eficiente.

Diante do estado da arte exposto, este trabalho visa contribuir com as pesquisas relacionadas ao tema, analisando o comportamento térmico de argamassas de cimento com incorporação de vermiculita expandida. Com base no estudo será possível indicar se o compósito terá uma boa atuação como isolante térmico.

CAPÍTULO 3

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

Para a concretização da pesquisa foram utilizados como materiais: cimento, cal, agregados miúdos e água.

3.1.1 Cimento

Foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos (CP V ARI-RS), fabricado pela empresa Mizu. O material foi armazenado em local seco, coberto e fechado, com o intuito de manter suas propriedades. As propriedades químicas, físicas e mecânicas desse material são apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 – Composição química do cimento Portland CP V ARI-RS

Ensaio	Unidade	Resultado
Perda ao fogo $\leq 6,5$	%	2,32
Trióxido de enxofre (SO_3) $\leq 4,5$	%	2,64
Resíduo insolúvel (RI) $\leq 3,5$	%	0,87
Óxido de magnésio (MgO) $\leq 6,5$	%	3,65
Óxido de cálcio (CaO) Livre	%	1,00

Fonte: Mizu¹

Tabela 3.2 – Composição física e mecânica do cimento Portland CP V ARI-RS

Ensaio	Unidade	Resultado
Área específica (Blaine)	cm^2/g	4.043,09
Resíduo #200 ≤ 6	%	0,16
Tempo de início de pega ≥ 60	min	160,91
Tempo de fim de pega ≤ 600	min	199,55
Expansibilidade a quente ≤ 5	mm	0,75
Resistência à compressão (3 dias)	MPa	29,81
Resistência à compressão (7 dias)	MPa	37,67
Massa específica	g/cm^3	3,14
Massa unitária	kg/dm^3	1,02

Fonte: Mizu²

3.1.2 Cal

Foi utilizada a cal hidratada do tipo CH-I, de acordo com a classificação da norma NBR 7175 (ABNT, 2003), fabricada pela empresa Cal Norte Nordeste. O material foi armazenado

^{1,2} Dados fornecidos pelo fabricante Mizu, referente ao certificado de qualidade do cimento, realizado em agosto/2019.

em local seco, coberto e fechado, com o intuito de manter suas propriedades. As propriedades químicas e físicas desse material são apresentadas na Tabelas 3.3.

Tabela 3.3 – Características químicas e físicas da cal

Parâmetros	Resultados	Características Químicas (%)		Método
		Inferior	Superior	
Ca(OH) ₂	93,69	93,00		NBR 6473:2003
MgO	0,78		1,50	WD-XRF
CaCO ₃	1,94		5,00	IRAS
CO ₂	0,85		3,00	IRAS
SiO ₂ + RI	0,42			WD-XRF
PPC	24,38	23,00		NBR 6473:2003
Cone de Inhoff	0,50			PO-CNNBA-3-LB-018
Umidade	0,8		2,00	PO-CNNBA-3-LB-012
Características físicas (%)				
Retido #200	0,08		2,00	PO-CNNBA-3-LB-017

Fonte: Cal Norte Nordeste³

3.1.3 Agregado miúdo

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados dois tipos de agregados miúdos, sendo: areia natural (AN) fina, coletada na condição lavada e extraída por dragagem em rio e a vermiculita expandida (VE), que foi provida pela Indústria e Comércio Paulista Ltda, de Santo Amaro/SP. Os agregados foram secos em estufa e, posteriormente, resfriados à temperatura ambiente.

3.1.4 Água

A água utilizada na produção das argamassas foi potável, proveniente da rede de distribuição local.

3.2 Métodos

Inicialmente foi realizada a caracterização dos materiais, em seguida, a definição dos traços e percentuais de substituição do agregado pela vermiculita expandida. Finalmente, os ensaios das propriedades no estado fresco e endurecido e as propriedades térmicas.

³ Dados fornecidos pelo fabricante Cal Norte Nordeste, referente ao certificado de qualidade da cal, realizado em agosto/2019.

3.2.1 Caracterização dos agregados

Os agregados foram previamente secos em estufa durante 24 horas e posteriormente resfriados à temperatura ambiente para a realização dos ensaios de caracterização.

A areia natural foi caracterizada quanto às suas propriedades físicas, conforme prescrito nas normas apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Ensaios físicos da areia natural

Ensaio	NBR
Distribuição granulométrica	NBR NM 248:2003
Massa unitária e índice de vazios	NBR NM 45:2006
Massa específica e aparente	NBR NM 52:2009

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A vermiculita expandida foi caracterizada quanto suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Ensaios para a caracterização da vermiculita expandida

Ensaio	Descrição/NBR
Físicos	Distribuição granulométrica NBR 11355:2015 Massa unitária NBR 45:2006 Massa específica
Químicos	Florescência de Raios X – FRX
Mineralógicos	Difração de Raios X – DRX
Microestruturais	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os ensaios foram realizados nos seguintes laboratórios: Laboratório de Técnicas Construtivas da Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA); Laboratório de Peneiras Moleculares (LABPEMOL), da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

3.2.2 Produção das argamassas

Para confecção das argamassas foi adotado o traço 1:1:6 (cimento, cal, areia) em volume, por ser um dos mais utilizados na região. O teor de substituição do agregado natural pela vermiculita expandida foi de 25, 30, 35, 40, 45 e 50% para um índice de consistência de 260 ± 5 mm, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2005), tendo como parâmetro uma argamassa de referência, sem substituição.

Essas porcentagens foram determinadas em função de uma lacuna deixada nos resultados dos ensaios realizados por Barros (2018), que analisou as propriedades mecânicas e

térmicas de argamassas de revestimento com substituição de 25%, 50%, 75% e 100% de vermiculita expandida pelo agregado natural. Em seus resultados, pode-se observar uma discrepância entre as argamassas com o traço de 25% e 50%. Sendo assim, a presente pesquisa busca obter informações nesse intervalo.

Os traços em massa e volume, apresentados na Tabela 3.7, foram calculados a partir da massa unitária dos materiais constituintes (Tabela 3.6)

Tabela 3.6 – Propriedades físicas dos materiais constituintes

Materiais	Massa específica (g/cm³)	Massa unitária (g/cm³)
Cimento	3,14	1,02
Cal	2,15	0,4
Areia Natural	1,28	1,41
Vermiculita Expandida	0,58	0,18

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 3.7 – Traços e relação água/aglomerantes

Nomenclatura	Teor de substituição	Traço em volume c:cal:na:ve	Traço em massa c:cal:na:ve	Relação água/aglomerantes
AR	0%	1:1:6	1:0,4:7,92	1,862
A25	25%	1:1:4,5:1,5	1:0,4:6,34:0,27	1,838
A30	30%	1:1:4,2:1,8	1:0,4:5,54:0,29	1,815
A35	35%	1:1:3,9:2,1	1:0,4:5,14:0,34	1,715
A40	40%	1:1:3,6:2,4	1:0,4:4,75:0,38	1,705
A45	45%	1:1:3,3:2,7	1:0,4:4,35:0,43	1,667
A50	50%	1:1:3,3:2,7	1:0,4:4,35:0,43	1,615

*c:cal:an:ve (cimento:cal:areia natural:vermiculita expandida)

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3.2.3 Propriedades das argamassas no estado fresco

Os ensaios para determinar as propriedades físicas das argamassas no estado fresco foram realizados conforme as prescrições estabelecidas nas normas vigentes, especificados na Tabela 3.8. O ensaio de consistência foi realizado no Laboratório de Técnicas Construtivas da Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA) e a densidade de massa e retenção de água no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Tabela 3.8 – Ensaio realizados nas argamassas no estado fresco

Propriedade	Método	NBR
Consumo de água	Mesa de consistência	13276:2005
Densidade de massa e teor de ar incorporado	Molde cilíndrico	13278:2005
Retenção de água	Funil Büchner modificado	13277:2005

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3.2.3.1 Índice de Consistência

Com as proporções dos materiais definidas, foi possível realizar o preparo da mistura e determinar a quantidade de água para a consistência de 260 ± 5 mm, de acordo com as diretrizes prescritas na NBR 13276 (ABNT, 2005) – “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência”. A Figura 3.1 apresenta o espalhamento da argamassa na mesa de consistência.

Figura 3.1 – Espalhamento da argamassa na mesa de consistência



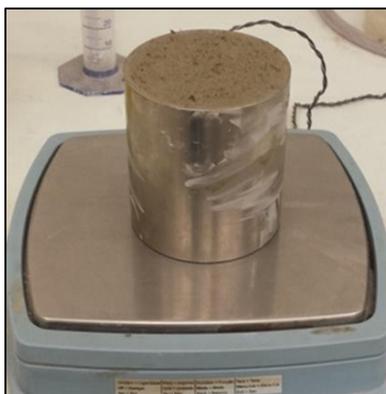
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O ensaio procedeu por meio de tentativas, com adições gradativas de água, de maneira que fornecesse quatro pontos em cada traço, iniciando com uma consistência seca (pequeno diâmetro na mesa de consistência), até o último ponto com diâmetro superior ao máximo especificado pela norma (265 ± 5 mm). A partir desses dados foi possível traçar o gráfico que relaciona o índice de consistência com a relação água/aglomerantes e, assim, determinar a quantidade ideal de água requerida para a argamassa atingir o espalhamento determinado por norma.

3.2.3.2 Densidade de massa

A densidade de massa da argamassa no estado fresco (Figura 3.2) foi determinada conforme as diretrizes da NBR 13278 (ABNT, 2005).

Figura 3.2 – Densidade de massa no estado fresco



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O ensaio relaciona a massa que uma argamassa fresca ocupa dentro de um recipiente cilíndrico de peso e volume conhecido.

3.2.3.3 Retenção de água

O ensaio de retenção de água (Figura 3.3) foi realizado conforme as diretrizes da norma NBR 13277 (ABNT, 1995).

Figura 3.3 – Equipamento para ensaio de retenção de água



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Para o cálculo da retenção, determinou-se, inicialmente, o peso do conjunto funil/papel filtro úmido (após sucção por 90s), o peso do prato do funil preenchido com argamassa adensada com 37 golpes de soquete e, por fim, o peso da argamassa após 15 minutos de sucção de 51mm de mercúrio.

3.2.4 Moldagem e cura dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios no estado endurecido foram confeccionados corpos de prova prismáticos nas dimensões 4x4x16 cm e painéis com substratos de tijolos cerâmicos com dimensões de 28,5x39 cm, revestidos com 2 cm de espessura pelas argamassas em estudo.

Para os ensaios térmicos, a moldagem foi executada em corpos de prova cilíndricos de 5x5 cm, moldando duas camadas de alturas aproximadamente iguais, adensadas com 20 golpes cada e finalizadas com a retirada do excesso de material da superfície. Para o ensaio térmico no protótipo, foram confeccionados painéis com dimensões de 37,5x19 cm, formados por dois tijolos cerâmicos e revestidos com 2cm de espessura pelas argamassas em análise.

Todos os corpos de prova foram desmoldados após 48h. A cura dos corpos de prova para os ensaios no estado endurecido foi imersa em água saturada com cal e para os ensaios térmicos, em temperatura ambiente.

3.2.5 Propriedade das argamassas no estado endurecido

Os ensaios para determinar as propriedades das argamassas e dos revestimentos no estado endurecido foram realizados de acordo as normas vigentes, como pode-se observar na Tabela 3.9. O ensaio de resistência à tração na flexão e compressão foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Técnicas Construtivas da Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA).

Tabela 3.9 – Ensaio realizados para a caracterização das propriedades das argamassas no estado endurecido

Propriedade	Método	NBR
Densidade de massa	Moldes prismáticos	13280/2005
Capacidade de absorver deformações	Módulo de elasticidade dinâmico	15630/2009
Resistência à tração na flexão	Prensa	13279/2005
Resistência à compressão	Prensa	13279/2005
Porosidade aberta	Absorção de água por imersão	9778/2009
Coefficiente de capilaridade	Absorção de água por capilaridade	15259/2005
Aderência à tração	Arrancamento	13528/2010

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3.2.5.1 Resistência à compressão e à tração na flexão

Os ensaios de resistência à compressão e a tração na flexão foram realizados de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005) com 28 dias de idade, conforme mostra a Figura 3.4.

Figura 3.4 – Resistência à tração na flexão e à compressão



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Primeiramente, os corpos de prova foram rompidos à tração na flexão com a aplicação de carga a uma velocidade de 50 ± 10 N/s e, posteriormente, as suas metades foram rompidas à compressão axial, com aplicação de carga a uma velocidade de 500 ± 50 N/s.

3.2.5.2 Densidade de massa

A determinação da densidade de massa no estado endurecido foi realizada aos 28 dias, conforme as prescrições da NBR 13280 (ABNT, 2005), através da relação da massa e o volume dos corpos-de-prova.

3.2.5.3 Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio para obter o módulo de elasticidade dinâmico foi executado conforme a norma NBR 15630 (ABNT, 2008), aos 28 dias de idade, utilizando equipamento TICO – Ultrasonic Testing Instrument, da Proceq. A Figura 3.5 apresenta a realização do ensaio.

Figura 3.5 – Ensaio para o cálculo do módulo de elasticidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O cálculo para determinar o módulo de elasticidade relaciona o coeficiente de Poisson da argamassa (adotado 0,2), a velocidade de propagação de onda ultrassônica em corpos-de-prova e a densidade de massa aparente.

3.2.5.4 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade (Figura 3.6) foi executado conforme a NBR 15259 (ABNT, 2005), aos 28 dias de idade.

Figura 3.6 – Absorção de água por capilaridade das argamassas



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Primeiramente, os corpos-de-prova foram lixados e limpos. Posteriormente, foi determinado as massas secas das amostras e, após serem imersas em uma lâmina de água de 5 mm, foram obtidas as massas aos 10 e 90 minutos de ensaio.

3.2.5.5 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009), com os corpos de prova aos 28 dias de idade. A Figura 3.7 apresenta a etapa do banho térmico e a balança hidrostática usada no ensaio.

Figura 3.7 – Ensaio de absorção de água por imersão



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Primeiramente, os corpos de prova foram colocados em estufa à (105 ± 5) °C, por 72 horas, após este período, registrou-se a massa seca (m_s) de cada corpo de prova e, em seguida, foram imersos em água por 72 horas à temperatura ambiente. Após a etapa de saturação, os corpos de prova foram colocados em um recipiente com água em ebulição durante 5 horas e depois resfriados para a determinação da massa imersa (m_i), com o auxílio de uma balança hidrostática. Por fim, os corpos de prova foram retirados da água para o registo da massa saturada (m_{sat}).

3.2.5.6 Resistência de aderência

Para a realização do ensaio de resistência de aderência foram executados painéis com dimensões de 28,5x 39 cm em substratos de alvenaria cerâmica, chapiscados com antecedência e revestidos com as argamassas em análise. O ensaio foi realizado aos 28 dias, conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 13528 (ABNT, 2010). A Figura 3.8 apresenta a execução do ensaio.

Figura 3.8 – Ensaio de resistência à aderência



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Primeiramente, foram realizados os cortes de 9 amostras nos revestimentos, com auxílio da serra copo. Em seguida, as superfícies foram limpas e coladas pastilhas metálicas (50x50mm e espessura de 10 mm) com cola a base de epóxi. Após 24 horas, aplicou-se um esforço de tração por meio de carregamento constante até a ruptura das amostras. O equipamento aplica carga através de alavanca. A cada 1kg de peso inserido corresponde a 5kg de carga de tração axial aplicada à pastilha.

3.2.6 Ensaio térmicos

Para a concretização dos ensaios térmicos, foi realizado um ensaio com o aparelho KD-2 Pro Thermal Properties, no Laboratório de Transferência de Calor da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e um ensaio de desempenho térmico com um protótipo, no Laboratório de Técnicas Construtivas da Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA).

3.2.6.1 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas das argamassas em análise foram definidas por meio do aparelho KD-2 Pro Thermal Properties. Foi utilizado a sonda SH-1 (própria para materiais sólidos ou granulares), composta por duas agulhas, uma que funciona como fonte de calor e outra como um termopar.

A sonda é inserida em corpos de prova cilíndricos de dimensão 5x5 cm, previamente furado com as medidas adequadas. As agulhas da sonda são cobertas com pasta térmica para melhorar contato e eliminar o ar interno. Os corpo-de-prova são acondicionados no interior de uma câmara de isolamento térmica, formada por material plástico e preenchida internamente com isopor granulado. Antes de iniciar o ensaio foi realizado uma averiguação com um corpo de prova padrão. A Figura 3.9 apresenta o corpo de prova padrão e o procedimento do ensaio.

Figura 3.9 – Determinação das propriedades térmicas com o aparelho KD- 2Pro



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Em cada corpo de prova foram realizadas três medidas com duração de 10min cada e para utilizar outro corpo de prova era necessário aguardar 15min para garantir que o calor

gerado no ensaio fosse liberado e não interferisse nas demais medidas. O aparelho, 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.

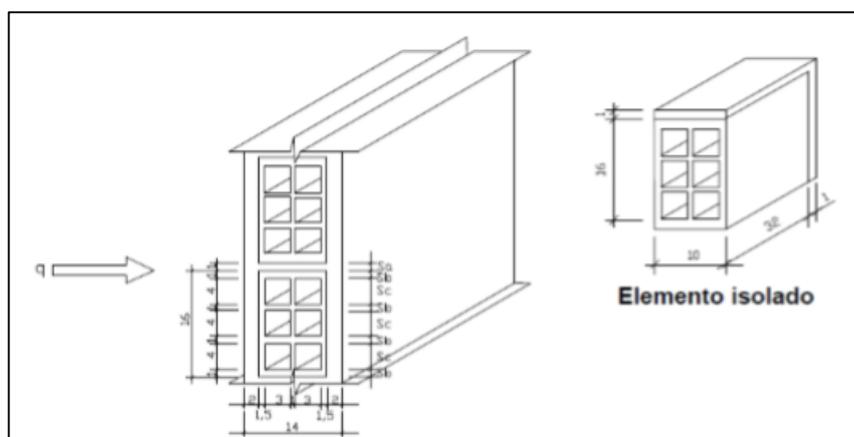
3.2.6.2 Desempenho térmico

O desempenho térmico foi determinado por meio de dois procedimentos, o simplificado e o procedimento com uso de um protótipo.

- Procedimento simplificado

Com os dados de condutividade térmica e capacidade calorífica volumétrica de cada composição das argamassas, fornecidas pelo aparelho KD-2Pro Thermal Properties, foi possível avaliar o desempenho térmico de acordo com o procedimento simplificado estabelecido pela NBR 15575 (ABNT, 2013), através da análise do sistema de vedação com alvenaria de blocos cerâmicos (Figura 3.10).

Figura 3.10 - Parede de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces.



Fonte: NBR 15220-2(ABNT, 2003)

Para a realização dos cálculos de transmitância térmica e capacidade térmica são necessários alguns dados fornecidos pela NBR 15220-2 (ABNT,2003), como as propriedades do tijolo cerâmico (Tabela 3.10).

Tabela 3.10 - Propriedades térmicas dos materiais do SVVE

Propriedades	Tijolo cerâmico
Densidade de massa (Kg/m ³)	1300-1600
Condutividade térmica (W/mK)	0,90
Calor específico (kJ/Kg.K)	0,92

Fonte: NBR 15220-2(ABNT, 2003)

Considerou-se o direcionamento da fonte de calor (q) horizontal e determinou-se as seções como: Sa (revestimento – argamassa de assentamento – revestimento); Sb (revestimento – tijolo – revestimento) e Sc (revestimento – tijolo – ar – tijolo – ar – tijolo – revestimento). A transmitância térmica do sistema foi determinada pelo inverso da resistência térmica total, que é encontrada pelo somatório da resistência térmica das seções do sistema (Equação (3.1)) com a resistência térmica superficial interna (R_{si}) e externa (R_{se}) (Tabela 3.11).

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} \quad (3.1)$$

Tabela 3.11 - Resistência térmica superficial interna e externa

R _{si} (m ² .K)/W			R _{se} (m ² .K)/W		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
					
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: NBR 15220-2(ABNT, 2003)

A resistência térmica de cada sessão é obtida através da Equação 3.2.

$$R_t = \frac{n_a \cdot A_a}{\frac{n_a \cdot A_a}{R_a}} + \frac{n_b \cdot A_b}{\frac{n_b \cdot A_b}{R_b}} + \frac{n_c \cdot A_c}{\frac{n_c \cdot A_c}{R_c}} \quad 3.2$$

No qual:

R_t = Resistência térmica de cada sessão ((m².K)/W);

n_a = Quantidade de sessão a;

A_a = Área da sessão a (m²);

R_a = Resistência térmica da sessão a ((m².K)/W);

n_b = Quantidade de sessão b;

A_b = Área da sessão b (m²);

R_b = Resistência térmica da sessão b ((m².K)/W);

n_c = Quantidade de sessão c;

A_c = Área da sessão c (m²);

R_c = Resistência térmica da sessão c ((m².K)/W);

A capacidade térmica foi determinada através do somatório das capacidades térmicas de cada seção, conforme exemplificado na Equação (3.3).

$$Ct_t = \frac{n_a \cdot A_a}{Ct_a} + \frac{n_b \cdot A_b}{Ct_b} + \frac{n_c \cdot A_c}{Ct_c} \quad 3.3$$

Onde:

Ct_t = capacidade térmica total (kJ/(m².K));

n_a = Quantidade de sessão a;

A_a = Área da sessão a (m²);

Ct_a = Capacidade térmica da seção a (kJ/(m².K));

n_b = Quantidade de sessão b;

A_b = Área da sessão b (m²);

Ct_b = Capacidade térmica da seção b (kJ/(m².K));

n_c = Quantidade de sessão c;

A_c = Área da sessão c (m²);

Ct_c = Capacidade térmica da seção c (kJ/(m².K)).

- Procedimento com protótipo

Para o ensaio de determinação do desempenho térmico foram confeccionados painéis com dimensões de 37,5x19 cm, com dois tijolos de alvenaria cerâmica revestidos por 2cm das argamassas em estudo, simulando a vedação vertical externa de uma edificação.

O equipamento para o desenvolvimento deste ensaio foi idealizado pelo professor Dr. Kleber Cavalcanti Cabral. Composto por uma caixa de madeira revestida por poliestireno expansivo, com dimensões de 80x 60x 50cm, uma fonte de calor composta por uma lâmpada infravermelha de 250watts cada (que simula a ação do sol sobre a edificação) e uma divisória interna de espuma, onde são colocados os painéis a serem ensaiados. A Figura 3.11 ilustra o equipamento e a execução do ensaio.

Figura 3.11 – Ensaio de determinação do desempenho térmico



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Ao painel de vedação ficam ligados sensores de temperatura, localizados na parte externa e interna de cada face dos revestimentos, conectados a um arduíno, que transmite para um software (Coolterm) as leituras das temperaturas coletadas a cada minuto. O ensaio ocorreu em um período de 3 horas, visto que, após aproximadamente 1h e meia a temperatura tornava-se constante.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização física dos agregados

4.1.1 Composição granulométrica

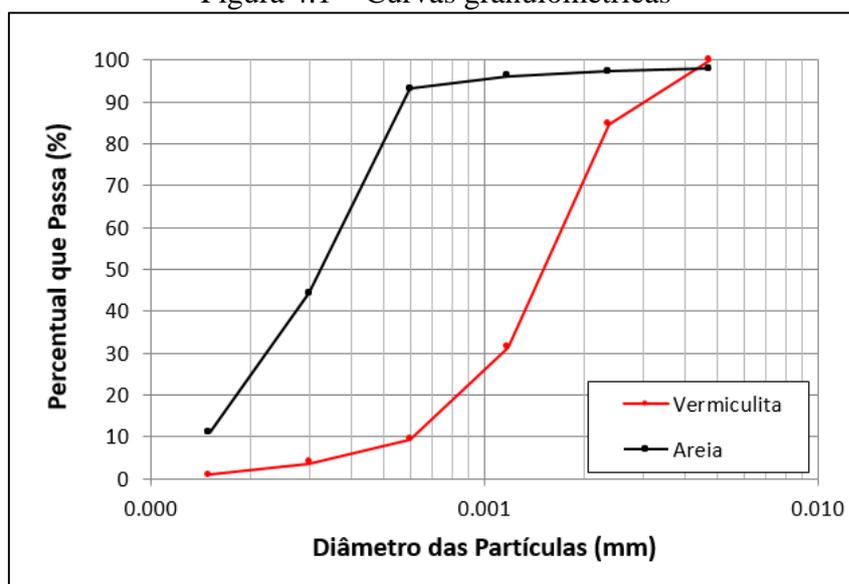
A distribuição granulométrica dos agregados utilizados na pesquisa, areia natural e vermiculita expandida, estão apresentados na Tabela 4.1, seguido das suas respectivas curvas granulométricas (Figura 4.1).

Tabela 4.1 – Análise granulométrica

Diâmetro da peneira (mm)	Areia natural		Vermiculita expandida	
	%retida	% retida acumulada	%retida	% retida acumulada
4,8	2,03	2,03	0,00	0,00
2,4	0,66	2,70	15,30	15,30
1,2	1,19	3,89	53,35	68,64
0,6	3,00	6,89	21,99	90,37
0,3	48,75	55,64	5,74	96,37
0,15	33,40	89,04	2,68	99,04
<0,15	10,96	100,00	0,96	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 4.1 – Curvas granulométricas



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Com os resultados apresentados na Tabela 4.1 pode-se perceber que a maior quantidade de grãos de vermiculita expandida encontram-se acima de 0,6mm de diâmetro, sendo classificada pelo padrão brasileiro como superfina (70-95% > 0,6 mm). É notório também que

a areia natural é mais fina que a vermiculita, pois a faixa dos menores diâmetros (0,3 a 0,15mm) possui maior quantidade de grãos.

Para caracterizar a uniformidade das curvas, utilizou o coeficiente de uniformidade (C_u), parâmetro proveniente da mecânica dos solos. Considera-se o agregado muito uniforme ($C_u < 5$), de uniformidade média ($5 < C_u < 15$), e menos uniforme ($C_u > 15$) (PINTO, 2006). A areia natural obteve C_u igual a 2,37 e a vermiculita expandida igual a 3, sendo classificadas como muito uniforme, ou seja, mal graduados, pois há uma distribuição constante maior em uma faixa e menor em outra.

A granulometria uniforme, com pouca variabilidade nas dimensões dos grãos, afeta diretamente as propriedades da argamassa, pois dificulta o empacotamento das partículas, aumenta o índice de vazios e conseqüentemente reduz a resistência mecânica. Porém, outros parâmetros, como composição mineralógica e microestrutural, são necessários para avaliar a influência do agregado na argamassa.

4.1.2 Propriedades físicas

A Tabela 4.2 apresenta algumas propriedades física dos agregados, informações necessárias para auxiliar no estudo do comportamento desses agregados na composição das argamassas.

Tabela 4.2 – Propriedades físicas dos agregados

Propriedades	Areia natural	Vermiculita expandida
Dimensão máxima (mm)	1,2	2,4
Módulo de finura	2,6	3,7
Massa específica (g/cm ³)	1,28	0,58
Massa unitária (g/cm ³)	0,58	0,18

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.2, pode-se observar que a dimensão máxima da vermiculita expandida é maior que a da areia natural, confirmando que a vermiculita apresenta maior quantidade de grãos com diâmetros maiores. Através do módulo de finura é possível verificar que a areia natural se encontra próxima a zona utilizável inferior e a vermiculita fora da zona utilizável superior.

A vermiculita expandida possui menor massa específica, o que já era esperado, por se tratar de um material com alta porosidade. A areia natural apresenta maior massa unitária,

provavelmente devido a forma dos grãos que são mais arredondados e confere um melhor preenchimento dos vazios em função do menor atrito.

4.2 Caracterização química, mineralógica e microestrutural da vermiculita expandida

Após o resultado da composição química, verifica-se um maior teor de sílica, óxido de magnésio, de ferro e de alumínio, isso ocorre pelo fato da vermiculita pertencer a um grupo de minerais micáceos com vários tipos de silicatos hidratados de magnésio, alumínio e ferro. Os resultados mostram-se semelhantes aos de outros pesquisadores, como Koksall, Gencil e Kaya (2015). A Tabela 4.3 apresenta a porcentagem de óxidos antes e depois da calcinação:

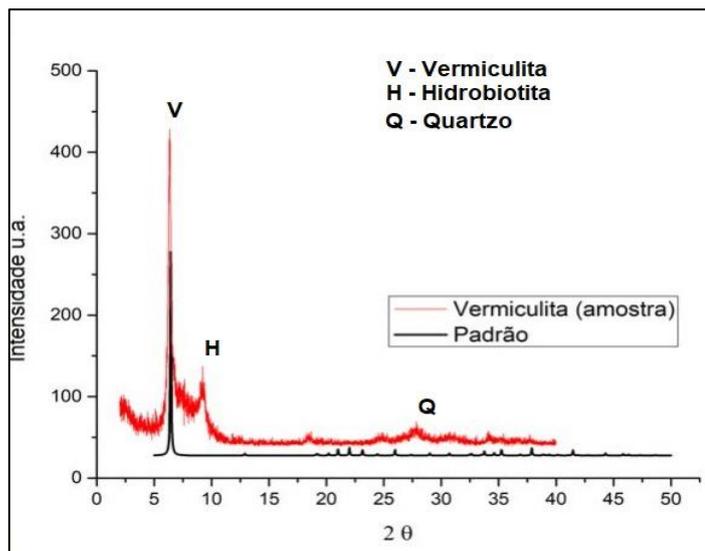
Tabela 4.3 – Composição química da vermiculita expandida

Óxidos	Porcentagem antes da calcinação (%)	Porcentagem após a calcinação (%)
SiO ₂	41,65 %	45,30 %
MgO	17,3 %	17,2 %
Fe ₂ O ₃	16,20 %	14,16 %
Al ₂ O ₃	12,90 %	12,44 %
K ₂ O	4,54 %	3,76 %
TiO ₂	2,06 %	2,33 %
CaO	2,05 %	1,87 %
Na ₂ O	2,0 %	1,6 %

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O resultado da análise mineralógica apresenta picos de vermiculita, quartzo e de hidrobiotita (mineral interestratificado associado à vermiculita). A Figura 4.2 apresenta a difração de raios X da vermiculita expandida.

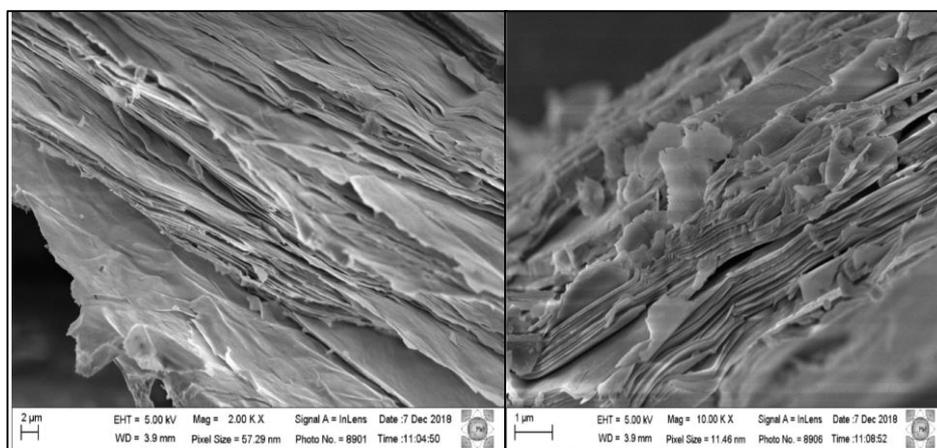
Figura 4.2 - Difração de raios X da vermiculita expandida



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

As imagens do microscópio eletrônico de varredura, apresentadas na Figura 4.3, comprovam o alto índice de vazios intralamelares do mineral.

Figura 4.3 – Imagens do MEV da vermiculita expandida



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Essas características também são relatadas nas demais pesquisas e favorecem o uso da vermiculita expandida como isolante térmico, devido à baixa condutividade térmica do ar que preenche as lamelas.

4.3 Caracterização das argamassas no estado fresco

4.3.1 Consistência

O ensaio de consistência NBR 13276 (ABNT, 2005) determinou a quantidade de água necessária para um espalhamento de 260 ± 5 mm, por meio de um gráfico que relaciona o espalhamento *versus* o consumo de água/aglomerantes.

Através das curvas geradas pelos gráficos, foram obtidas, por meio de regressão linear, as relações água/aglomerantes de cada traço estudado, mostrado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Consumo de água para atingir o espalhamento requerido

Argamassa	a/aglo
AR	1,862
A25	1,838
A30	1,815
A35	1,715
A40	1,705
A45	1,667
A50	1,615

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A partir dos resultados obtidos, nota-se uma pequena redução na quantidade de água necessária para que as argamassas atingissem a consistência de 260 ± 5 mm. A diferença entre os valores da relação água/aglomerantes entre os traços é pouco significativa, pois a diferença entre os percentuais também é pequena, apenas 5%. Portanto, a relação água/aglomerantes diminuiu com o aumento do percentual de substituição do agregado natural pela vermiculita expandida.

A argamassa de referência, sem substituição da vermiculita expandida, apresentou um maior consumo de água comparada as demais composições. A maior quantidade de finos presentes no traço de referência (que são materiais com maior área específica) pode ser a explicação para que esta argamassa apresentasse maior relação a/aglo. Sendo assim, com o aumento do percentual de substituição do agregado natural pela vermiculita, a quantidade de água requerida para garantir a trabalhabilidade prescrita na norma, diminui, pois a quantidade de finos reduz e, conseqüentemente, é necessário uma quantidade menor de água para proporcionar a coesão das partículas.

A melhoria da trabalhabilidade das argamassas estudadas, de acordo com o aumento da incorporação da vermiculita, também pode ser explicada devido a maior quantidade de ar presente na mistura, já que a estrutura da vermiculita após ser expandida torna-se fragmentos de lamelas separados por ar.

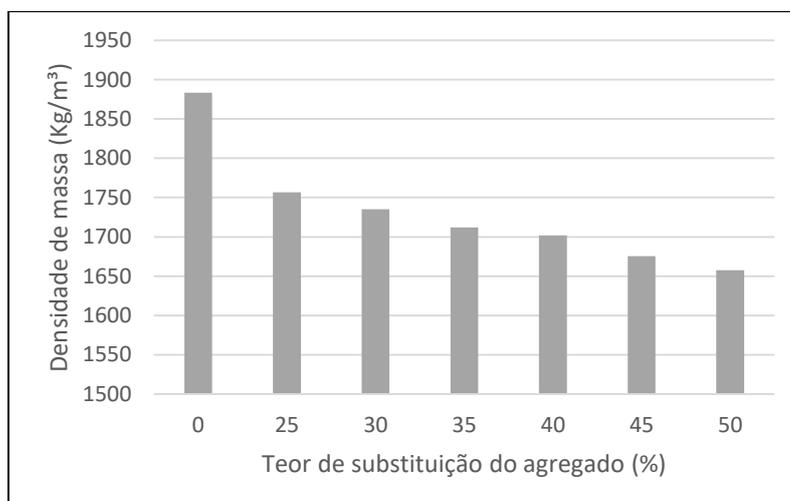
Os autores Koksai, Gencel e Kaya (2015) apresentam um aumento na trabalhabilidade de argamassas contendo vermiculita quando aumentaram a relação vermiculita/cimento. Mo *et al* 2018 afirmam que a incorporação da vermiculita expandida como substituição a areia natural melhorou a trabalhabilidade. Os autores atribuem esse aumento ao menor teor de finos da vermiculita em relação a areia natural. Após a realização do ensaio de consistência NBR 13276 (ABNT, 2005), a presente pesquisa também corrobora com estes resultados.

Rashad (2016), afirma que a trabalhabilidade de argamassas contendo vermiculita expandida precisa de mais investigações. No entanto, com base nos estudos disponíveis, pode-se concluir que a trabalhabilidade aumentou com o aumento do conteúdo de vermiculita expandida. Essa melhora na trabalhabilidade pode estar relacionada ao aumento do conteúdo de ar, com a inclusão do minério.

4.3.2 Densidade de massa

Os valores de densidade de massa aparente das argamassas no estado fresco estão dispostos nas Figuras 4.4.

Figura 4.4 – Densidade de massa no estado fresco



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Pela análise dos dados, percebe-se que as argamassas com vermiculita expandida apresentaram, em comparação a argamassas de referência, menor densidade de massa, o que era esperado devido a menor massa específica da vermiculita. Segundo a classificação de Carasek (2010), quanto à densidade de massa das argamassas no estado fresco, todas as argamassas analisadas são classificadas como normais, visto que suas densidades de massa foram maiores que 1400kg/m^3 e menores que 2300kg/m^3 e, assim, podem ser utilizadas em revestimento.

A redução da densidade da argamassa de referência para o teor de substituição de 25% do agregado natural pela vermiculita foi de quase 7%. Entre as demais substituições a diminuição não chegou a 2%. Essa pequena variação dos resultados ocorre, pois, o aumento do teor de substituição do agregado também é baixo. Quando comparada a argamassa com maior quantidade de vermiculita (50% de substituição à areia) a argamassa de referência, a redução chega a 12%.

Os pesquisadores Barros (2018); Koksall, Gencil e Kaya (2015); Cintra (2013) e Rashad (2016) afirmam que a densidade de massa no estado fresco é reduzida com o incremento da vermiculita expandida, e isso ocorre devido à natureza porosa e mais leve da vermiculita, que é causada pelo processo de esfoliação durante a produção do material. Os resultados encontrados por Mo *et al.* (2018) apresentam uma redução do peso unitário em 12% e 27% quando a vermiculita expandida é incorporada como 30% e 60% do volume de areia.

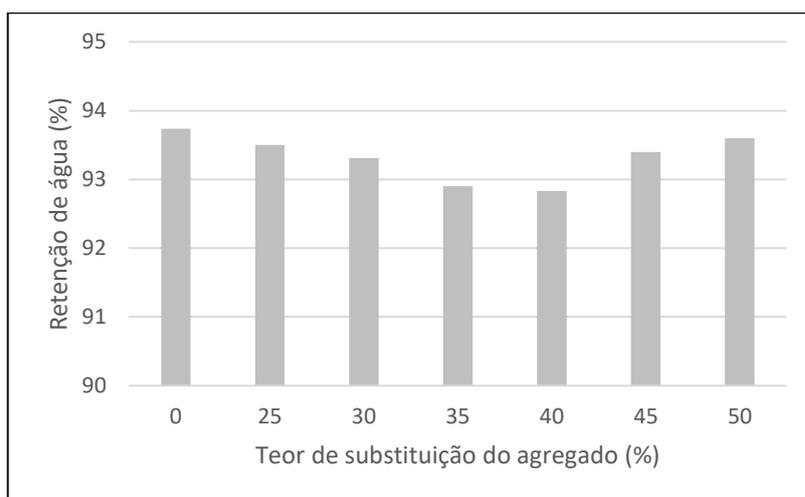
Uma das principais vantagens de uma argamassa mais leve é que, para o mesmo volume de argamassa, a quantidade de massa a ser transportada é menor (LEDESMA *et al.*, 2015) e, consequentemente, reduz o esforço do operário e aumenta a produtividade (CARASEK, 2010). Além disso, existe uma relação entre o peso unitário e a condutividade térmica, materiais com menor peso unitário apresentam um alto desempenho térmico (KOKSAL, GENCEL E KAYA, 2015).

4.3.3 Retenção de água

Os percentuais de retenção de água das argamassas estudadas estão apresentados na Figura 4.5. Como visto anteriormente, a vermiculita possui uma estrutura porosa, portanto, esperava-se que a retenção de água aumentasse de acordo com o aumento do teor de substituição do agregado. Porém, a argamassa de referência apresentou maior porcentagem de retenção de água, provavelmente por ser o traço com maior quantidade de finos e relação água/aglomerantes. As argamassas com até 40% de substituição da areia natural pela

vermiculita apresentaram redução na retenção de água, este fato pode ter ocorrido devido ao tempo de ensaio ser pouco em relação a capacidade de absorção do material. Os traços com 45% e 50% aumentaram a retenção de água, possivelmente pela quantidade maior do agregado poroso.

Figura 4.5- Retenção de água



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

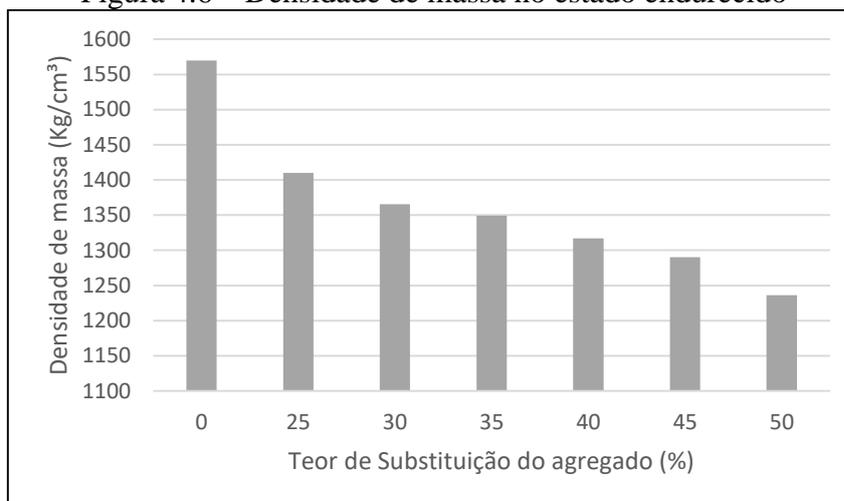
Todas as argamassas em análise apresentaram capacidade de retenção de água superior a 90%, ou seja, são capazes de reter mais de 90% da água utilizada na mistura, o que é favorável, pois permite a melhor hidratação do cimento, a manutenção de sua trabalhabilidade por um longo período de tempo e, conseqüentemente, resulta em ganhos de resistência mecânica e de aderência.

4.4 Caracterização das argamassas no estado endurecido

4.4.1 Densidade de massa

Os resultados da densidade de massa das argamassas no estado endurecido, aos 28 dias de idade, são apresentados na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Densidade de massa no estado endurecido



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A densidade de massa das argamassas no estado endurecido apresenta a mesma tendência da densidade no estado fresco, redução proporcional ao acréscimo do teor de substituição do agregado natural pela vermiculita, com os valores menores na fase endurecida, devido à remoção de parte da água.

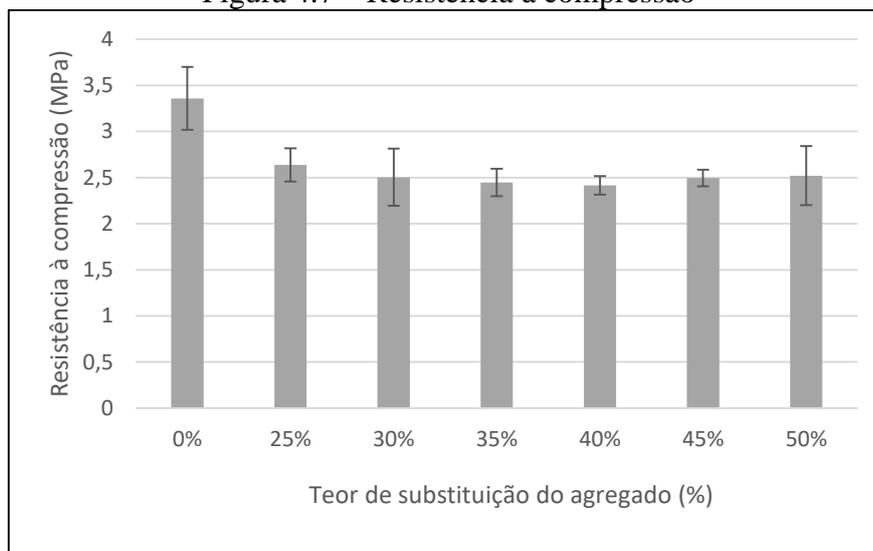
Xu *et al.* (2015) ao substituírem 100% da areia natural por parafina/vermiculita expandida obtiveram uma redução de 24,67% na densidade da argamassa aos 28 dias de idade quando comparada a referência. Nesta pesquisa, com a substituição de 50% do agregado pela vermiculita houve redução de 21% em relação a argamassa sem substituição. A diferença entre esses valores pode ser justificada pela adição da parafina.

Argamassas com densidade de massa menor reduzem o peso próprio de revestimentos, contribuindo, portanto, com a redução da carga total sobre a estrutura de uma edificação e, conseqüentemente, diminuição do preço total da obra.

4.4.2 Resistências à compressão e à tração na flexão

O resultado de resistência à compressão aos 28 dias de idade é apresentado na Figura 4.7. Nota-se que o valor diminui de acordo com o aumento do teor de substituição do agregado natural pela vermiculita, o que já era esperado, pois a microestrutura da vermiculita é porosa e sua densidade é menor em relação a areia.

Figura 4.7 – Resistência à compressão



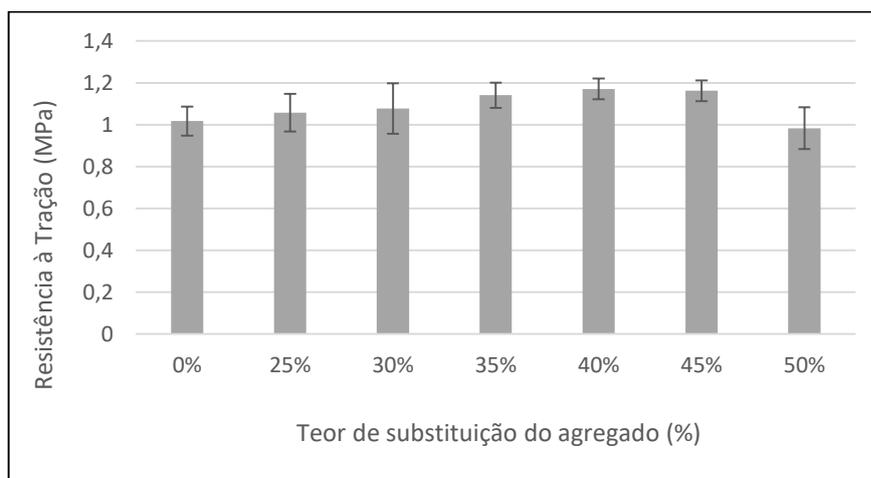
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Há uma redução de 21% da resistência à compressão no traço com 25% de substituição do agregado, quando comparado a argamassa de referência. As demais composições de argamassas apresentam resultados praticamente constantes, todos dentro do desvio padrão, mostrando assim que a vermiculita não tem grande influência na resistência à compressão nos traços com até 50% de substituição.

Mo *et al* (2016) encontraram uma redução da resistência à compressão de 50% e 63% quando a vermiculita expandida foi incorporada em substituições de volume de 30% e 60%, respectivamente. Os autores atribuem essa diminuição ao fato da vermiculita expandida possuir uma estrutura mole e porosa, além de afirmar que a pequena quantidade de finos pode dificultar o empacotamento das partículas e afetar negativamente na resistência. As pesquisas desenvolvidas por Cintra (3013); Koksall, Gencel e Kaya (2015); Xu *et al.* (2015) e Barros (2018) também relataram redução na resistência à compressão.

Os resultados de resistência à tração são apresentados na Figura 4.8. Apesar de serem duas propriedades intimamente relacionadas, a resistência à tração apresentou um comportamento diferente da compressão. Houve pouca variação nos resultados, mantendo-se basicamente constantes, com uma leve redução no traço com 50% de substituição do agregado natural pela vermiculita.

Figura 4.8 – Resistência à tração



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

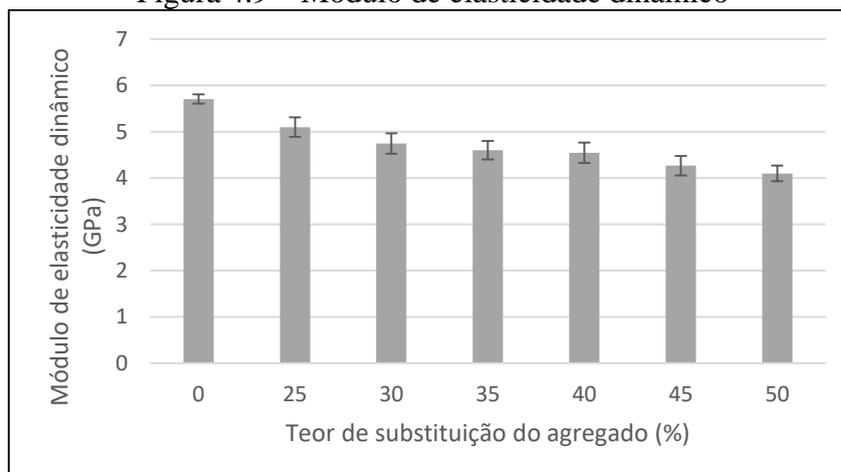
Este fato mostra que a incorporação de vermiculita expandida não gera efeitos negativos na resistência à tração, pois pouco influencia. Apenas o traço com 50% de substituição apresenta uma pequena redução, o que pode ser um indicativo que a partir dessa quantidade de incorporação de vermiculita a resistência possa ser comprometida, provavelmente devido à má distribuição dos poros.

Quando se trata de argamassa de revestimento, a resistência à compressão não tem a mesma importância como nos concretos, pois o aumento de resistência aumenta a rigidez e consequentemente gera fissuras que podem comprometer a durabilidade. No caso das argamassas com vermiculita o resultado foi favorável, pois houve redução. Porém, estas fissuras também podem ser oriundas das tensões internas do sistema (alvenaria e revestimento) que possam ultrapassar a resistência à tração das argamassas, tornando-a uma propriedade com maior influência no desempenho dos revestimentos. As argamassas com incorporação de vermiculita não apresentaram grandes mudanças na resistência quando comparadas a de referência.

4.4.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade dinâmico para cada composição de argamassa (Figura 4.9) apresentou redução proporcional ao acréscimo do teor de substituição do agregado natural pela vermiculita.

Figura 4.9 – Módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A argamassa com 25% de teor de substituição reduziu 10% em relação ao traço de referência. Os demais teores obtiveram uma redução pouco significativa, mantendo-se quase constantes. O traço de 50% de substituição reduziu 28% em relação à argamassa sem vermiculita. Essa redução pode ser explicada devido à estrutura porosa da vermiculita, que dificulta a passagem do pulso ultrassônico e reduz o módulo de elasticidade.

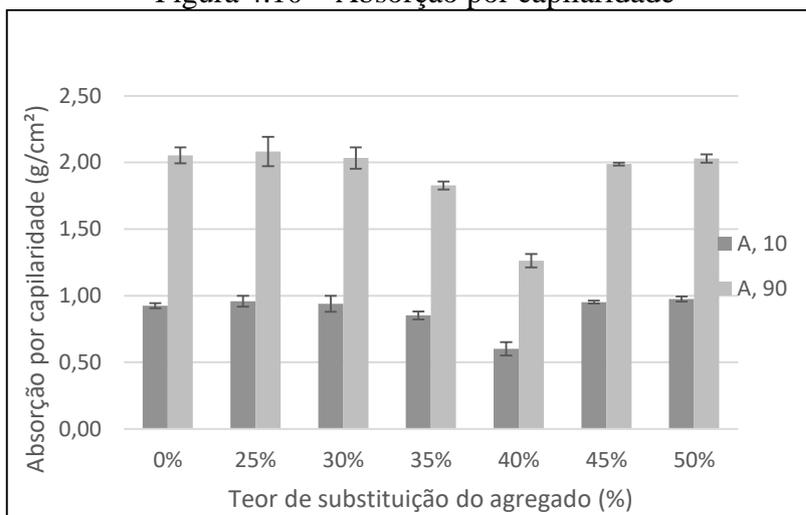
Palomar, Barluenga e Puentes (2014) apresentaram redução de 12,64% e 48,14% no módulo de elasticidade de argamassas com 25% e 50% de vermiculita expandida, quando comparada à argamassa de referência. Os autores atribuem essa redução à elevada porosidade das misturas.

As argamassas de revestimento devem ser capazes de absorver as deformações de contrações e expansões causadas pela perda de água para o substrato ou por evaporação e pelas variações térmicas. Argamassas com módulos de elasticidade mais baixos possuem maior capacidade de deformação (SILVA, 2011).

4.4.4 Absorção por capilaridade

A Figura 4.10 apresenta os valores de absorção por capilaridade aos 10 e 90 minutos de realização do ensaio e o valor médio das diferenças de massas nesses períodos é representado pelo coeficiente de capilaridade (Figura 4.11).

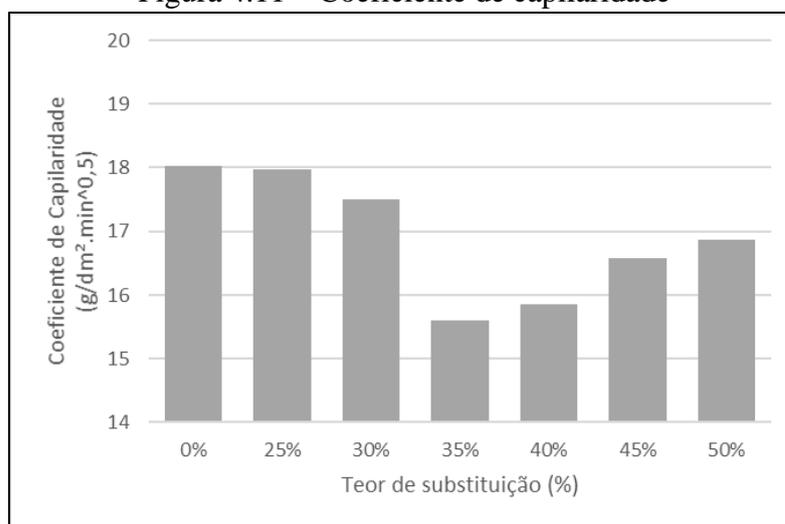
Figura 4.10 – Absorção por capilaridade



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os valores de coeficiente de capilaridade apresentam comportamento análogo a retenção de água, exibindo uma redução nos traços intermediários seguindo por um acréscimo nas argamassas com 45 e 50% do teor de substituição do agregado natural pela vermiculita. Isto pode ser explicado pelo fato de que as argamassas com maiores percentuais de substituição possuem uma maior concentração de vermiculita nas laterais dos corpos de prova, que por ser um material poroso, facilita a absorção por capilaridade.

Figura 4.11 – Coeficiente de capilaridade



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

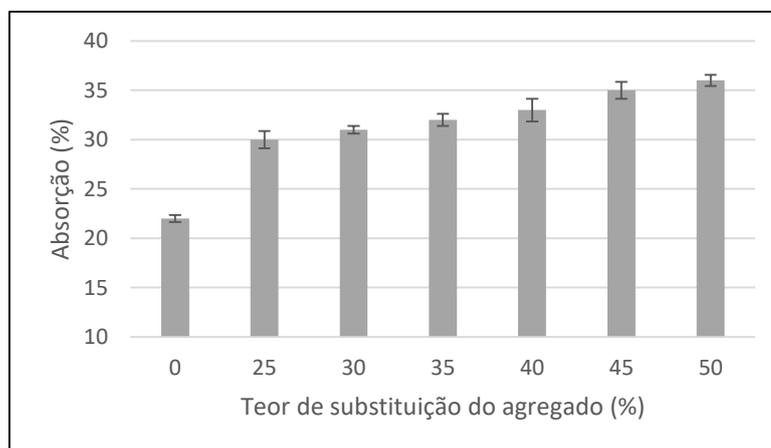
Barros (2018) obteve resultados semelhantes, com redução do coeficiente de capilaridade na substituição de 25% do agregado natural pela vermiculita expandida, e aumento nos teores de 50, 75 e 100%, atribuindo estes valores a possíveis traços com baixos percentuais de substituição que seriam capazes de preencher os vazios dos poros do agregado leve com

pasta de cimento e as com alto teor de substituição devido ao grande volume do agregado leve que contribui para o aumento da porosidade. Cintra (2013) também constatou aumento na absorção por capilaridade em argamassas com maior teor de vermiculita expandida, justificando o comportamento pela alta taxa de absorção do agregado leve.

4.4.5 Absorção por imersão

A absorção de água por imersão das argamassas em estudo é apresentada na Figura 4.12, reafirmando as características do material que já foram analisadas, como sua estrutura lamelar e porosa.

Figura 4.12 – Absorção por imersão



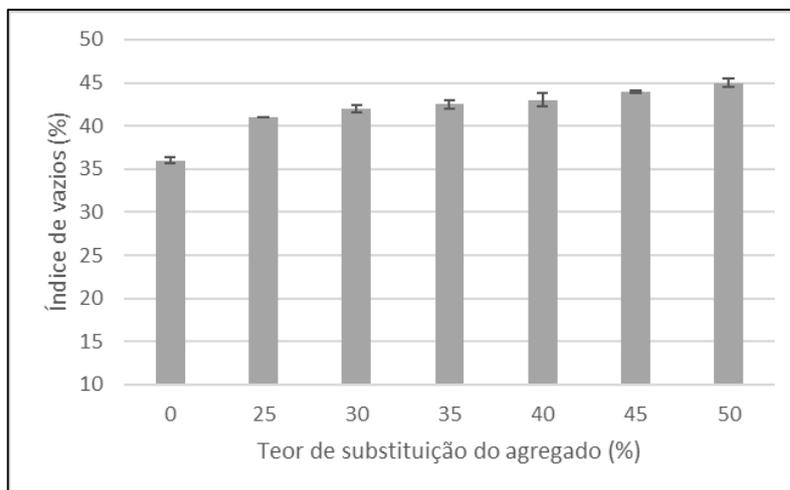
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Ao analisar os dados, nota-se o aumento da absorção por imersão de acordo com o incremento do teor de substituição do agregado natural pela vermiculita expandida, chegando a um aumento de quase 40% da argamassa com 50% de substituição quando comparada a referência. A variação da absorção entre as argamassas com presença de vermiculita é pouca, devido ao acréscimo no teor de substituição ser de apenas 5%. Os autores Barros (2018); Mo *et al* (2018); Koksall, Gencil e Kaya (2015) também relatam o aumento da absorção por imersão.

Além do fato da natureza da vermiculita expandida ser porosa, a sua granulometria apresenta grãos mais grossos do que o agregado natural, tornando o empacotamento das partículas menos efetivo, favorecendo a maior absorção de água. Khonsari *et al* (2010), que estudaram o uso de perlita expandida em concretos leves, sugerem que o aumento na absorção de água com o uso do agregado leve pode ser causado por poros presentes na fraca zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado.

O incremento do teor de substituição do agregado pela vermiculita expandida aumenta, consequentemente, o índice de vazios, pois são propriedades dependentes. A Figura 4.13 apresenta os valores de índices de vazios.

Figura 4.13 – Índice de vazios



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

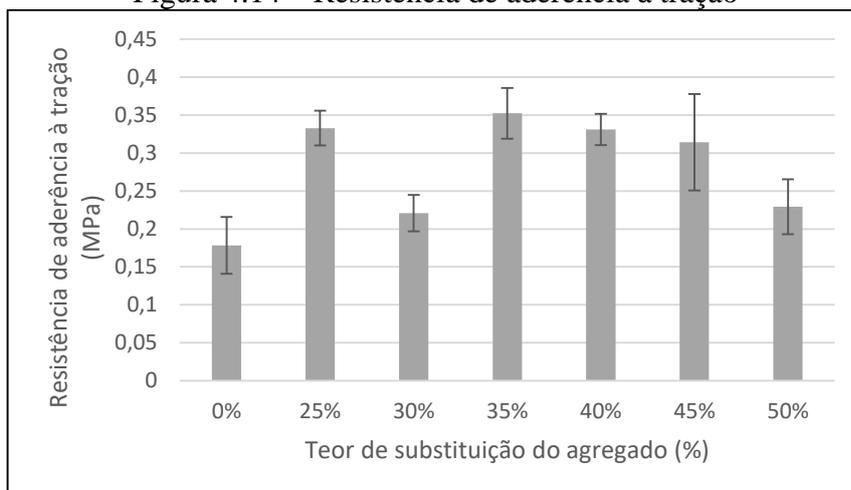
A argamassa com 50% de substituição do agregado natural pela vermiculita expandida apresenta aumento de 20% do valor do índice de vazios, quando comparado a de referência. Os restantes dos intervalos apresentam poucas variações.

Argamassas com índice de vazios mais elevados são favoráveis as propriedades térmicas. A condutividade térmica está fortemente relacionada com o índice de vazios, portanto, argamassas mais porosas possuem menor condutividade térmica, devido a presença de ar nos poros, que é um excelente isolante (RASHAD, 2016).

4.4.6 Resistência de aderência à tração

Os resultados do ensaio de resistência de aderência das argamassas são encontrados na Figura 4.14. Verifica-se que todos os valores nos traços com substituição são superiores ao de referência, o que é contrário às demais pesquisas e aos resultados dos ensaios mecânicos de compressão e tração.

Figura 4.14 – Resistência de aderência à tração



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Todas as argamassas com substituição do agregado natural pela vermiculita apresentaram resultados acima do valor mínimo (0,20 Mpa para parede interna e teto) determinado pela NBR 13749 (ABNT, 2013). A argamassa sem substituição não atingiu esse valor.

A argamassa com 25% de teor de substituição apresentou um aumento de 46% na resistência de aderência, quando comparada a argamassa de referência, porém o traço com 30% reduziu 33% deste valor. O teor de 35% aumenta 37% e as argamassas seguintes (40, 45 e 50%) apresentam redução de 6, 5 e 25%, respectivamente.

Além dos valores de resistência, é importante destacar também o tipo de ruptura dos corpos de prova resultantes do arrancamento. Nesta pesquisa, em praticamente todos os revestimentos a ruptura ocorreu na própria argamassa, conforme mostra a Figura 4.15.

Figura 4.15 – Tipo de ruptura



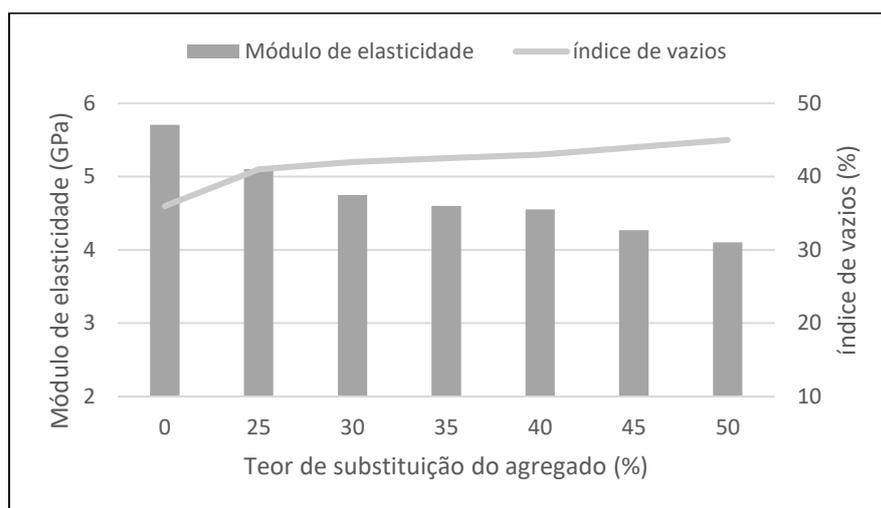
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

De acordo com a NBR 13528 (ABNT, 2010) quando a ruptura ocorre na argamassa, a resistência a aderência não foi determinada e é maior do que o valor obtido no ensaio. Carasek (2010) afirma que quando a ruptura acontece nas interfaces do sistema, os valores devem ser mais elevados, pois há uma maior probabilidade de ocorrência de futuras manifestações patológicas.

4.4.7 Módulo de elasticidade X Índice de vazios

Quanto maior a quantidade de vermiculita presente na argamassa, maior a porosidade, menor a velocidade do pulso ultrassônico e, conseqüentemente, menor o módulo de elasticidade. A Figura 4.16 apresenta a relação entre estas propriedades.

Figura 4.16 – Módulo de elasticidade X índice de vazios



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

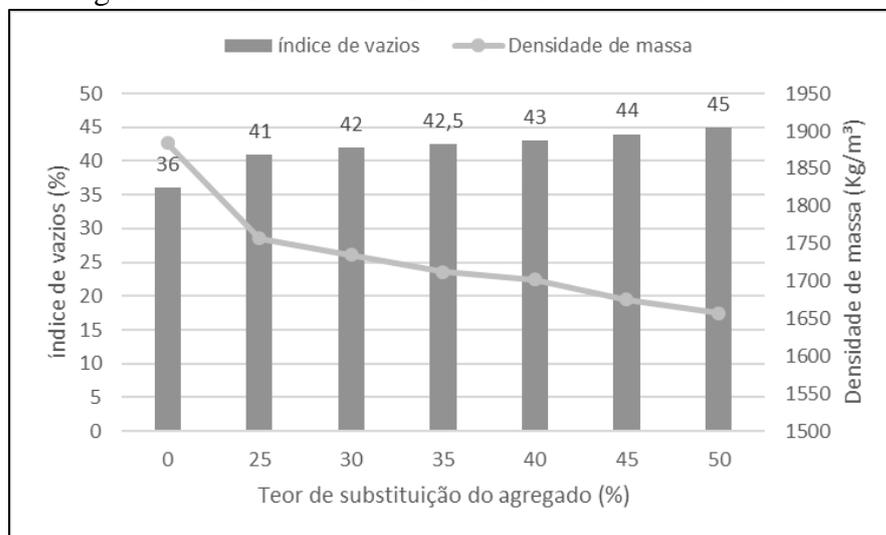
Palomar, Barluenga e Puentes (2015); Koksall, Gencil e Kaya (2015) e Barros (2018) também relataram redução do módulo de elasticidade de acordo com o aumento do teor de substituição do agregado natural pela vermiculita.

4.4.8 Índice de vazios X Densidade de massa fresca

O incremento da vermiculita expandida na mistura da argamassa reduz a densidade de massa fresca, pois sua massa específica é menor do que a do agregado natural e sua natureza é porosa e leve. A redução da densidade está ligada ao aumento do índice de vazios, pois quanto

maior a porosidade, a argamassa torna-se mais leve. A Figura 4.17 mostra o comportamento destas propriedades.

Figura 4.17 – Índice de vazios X Densidade de massa fresca



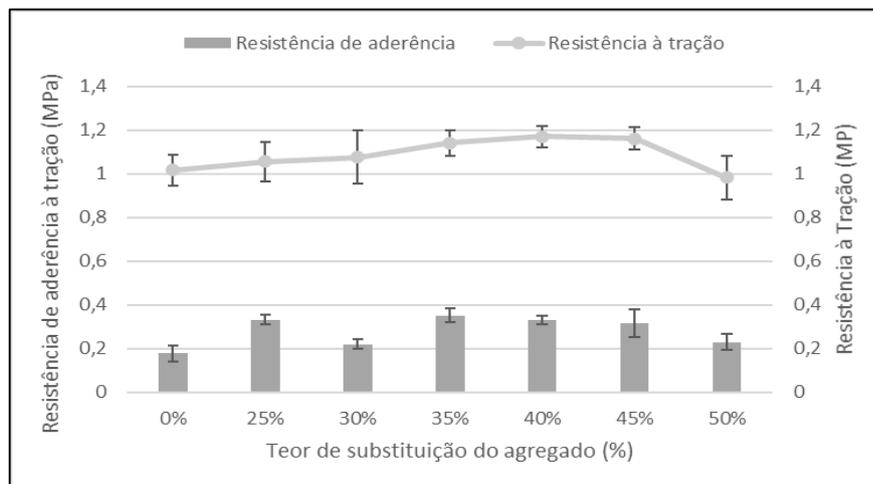
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Girardi (2016) também observou que argamassas com maior densidade no estado fresco apresentarão menor porosidade no estado endurecido.

4.4.9 Resistência à tração X Resistência de aderência

Os resultados do ensaio de resistência à tração apresentaram um desempenho semelhante ao de resistência de aderência à tração, exceto o traço com 30% de substituição. A Figura 4.18 apresenta a ligação entre estas propriedades.

Figura 4.18 - Resistência à tração X Resistência de aderência



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Este comportamento já era esperado, visto que estas propriedades estão intimamente interligadas. Barroca (2013) relatou a relação entre essas resistências em sua pesquisa.

4.5 Ensaios Térmicos

4.5.1 Propriedades térmicas

A Tabela 4.5 apresenta os resultados da condutividade térmica, capacidade calorífica volumétrica, difusividade e resistividade das argamassas em análise.

Tabela 4.5 – Propriedades térmicas

Propriedades	REF	25%	30%	35%	40%	45%	50%
Condutividade térmica (W/mk)	0,86	0,73	0,71	0,68	0,66	0,63	0,59
Capacidade de calor volumétrica específica (MJ/m ³ K)	2,39	2,04	1,95	1,92	1,87	1,85	1,78
Difusividade (mm ² /s)	0,364	0,362	0,355	0,353	0,350	0,340	0,332
Resistividade (Mk/w)	1,16	1,36	1,40	1,47	1,51	1,58	1,69

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os resultados obtidos estão relacionados com as características microestruturais da vermiculita expandida, como alta porosidade e estrutura lamelar. O aumento no teor de substituição do agregado natural pela vermiculita proporciona uma maior quantidade de vazios na mistura, além do ar presente no agregado, e como o ar possui baixa condutividade térmica, o ganho de desempenho térmico nas argamassas é favorecido.

A condutividade térmica é a principal propriedade na avaliação do desempenho térmico de materiais. Koksall, Gencel e Kaya (2015) obtiveram uma 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 encontraram resultados semelhantes, 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. Schackow *et al* (2014) observou a redução da condutividade térmica em concretos com pequenas quantidades de vermiculita expandida.

Na presente pesquisa, o traço com 50% de substituição do agregado natural pela vermiculita reduziu 31% da condutividade térmica em relação a argamassa de referência. As misturas com 25,30,35,40 e 45% reduziram, respectivamente, 15, 17 20, 23 e 26%. A redução na condutividade térmica é proporcional ao aumento do teor de vermiculita expandida. Essa diminuição está relacionada à baixa condutividade térmica do mineral bruto, em comparação com outros agregados naturais comuns, como a areia natural (RASHAD, 2016).

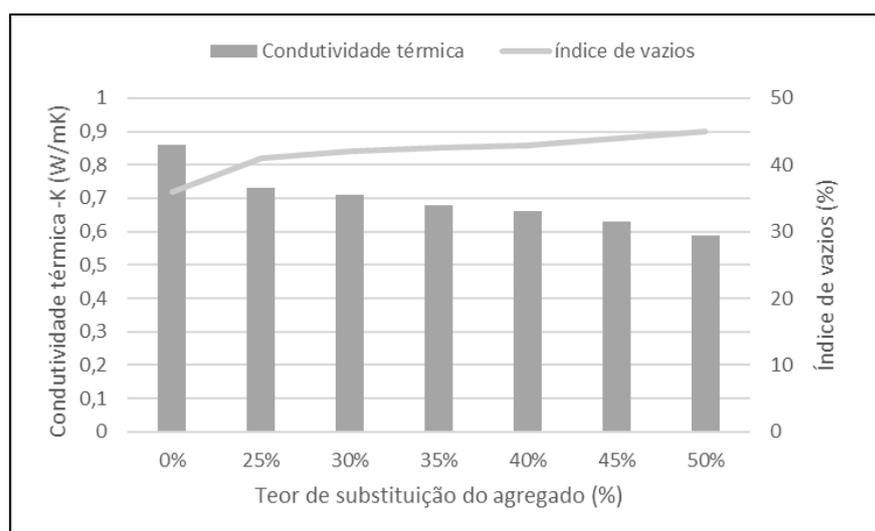
A capacidade de calor específica volumétrica, que representa a capacidade de um material armazenar calor, foi reduzida com o aumento do teor de substituição, chegando a 25% de redução na argamassa com 50% de substituição em relação a referência. Nos teores de 25, 30,35, 40 e 45% a redução foi de, respectivamente, 14, 18, 19, 21 e 22%. A difusividade térmica apresentou-se praticamente constante em relação a argamassa de referência, tendo uma redução de quase 9% na substituição de 50%.

A resistividade térmica é uma propriedade inversa à condutividade térmica, ou seja, à medida que o teor de substituição de vermiculita expandida aumenta e a condutividade reduz, consequentemente, a dificuldade da argamassa em conduzir calor aumentará.

4.5.1.1 Condutividade térmica X Índice de vazios

Como observado anteriormente, o incremento de vermiculita expandida nas argamassas gerou um acréscimo na porosidade. O aumento na porosidade causou redução na condutividade térmica, pois à medida que a porosidade aumenta, diminui a condutividade térmica, devido ao ar nos poros que é um excelente isolante, além dos poros entre os flocos da vermiculita expandida (RASHAD, 2016). A Figura 4.19 apresenta o gráfico da relação da condutividade térmica com o índice de vazios das argamassas em estudo.

Figura 4.19 – Condutividade térmica X Índice de vazios



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

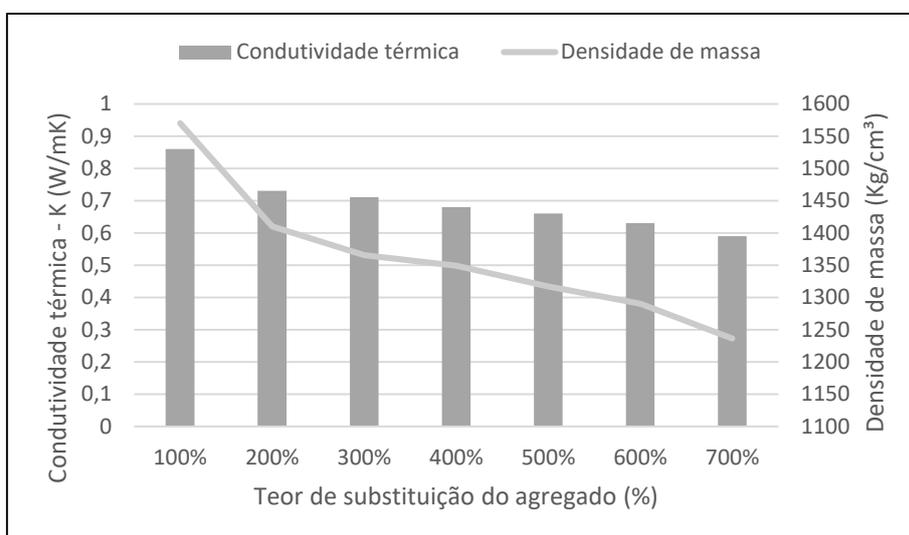
O traço com 50% de teor de substituição do agregado aumenta 25% no índice de vazios, enquanto reduz 31% da condutividade térmica, em relação à argamassa de referência. Palomar,

Barluenga e Puentes (2015), ao substituírem 25% e 50% da areia pela vermiculita expandida, observou um aumento de até 29,16% na porosidade aberta das argamassas e uma redução de 0,267 W/mK e 0,204 W/mK na condutividade térmica, respectivamente.

4.5.1.2 Condutividade térmica X Densidade de massa

A inserção de vermiculita expandida nas argamassas também provocou a redução da densidade de massa. Rashad (2016) afirma que a condutividade térmica está fortemente relacionada com a densidade, da qual a densidade diminuiu à medida que a condutividade térmica diminuiu. A Figura 4.20 apresenta a relação entre estas propriedades.

Figura 4.20 – Condutividade térmica X Densidade de massa



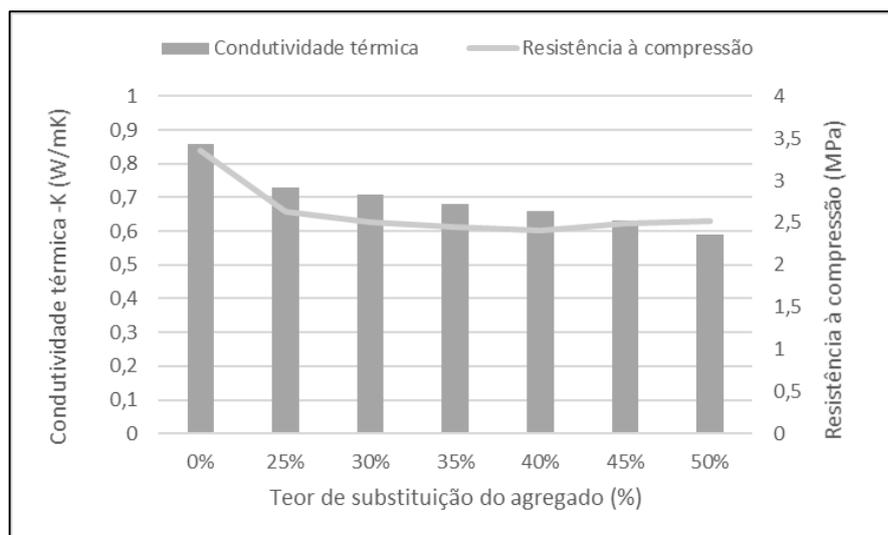
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os traços com 25, 30, 35, 40, 45 e 50 % reduzem 15, 17, 20, 23, 26 e 31% da condutividade térmica e 10, 13, 14, 16, 15 e 21% da densidade de massa, respectivamente. Xu *et al.* (2015); Schackow *et al.* (2014) e Palomar, Barluenga e Puentes (2015) também observaram essa relação.

4.5.1.3 Condutividade térmica X Resistência à compressão

Como o aumento no teor de substituição do agregado natural pela vermiculita expandida aumenta o índice de vazios e reduz a densidade de massa, conseqüentemente, reduz a resistência à compressão e a condutividade térmica. A Figura 4.21.

Figura 4.21 - Condutividade térmica X Resistência à compressão



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A redução da condutividade térmica foi proporcional a da resistência à compressão, sendo de 24% nas composições com 50% de substituição. Palomar, Barluenga e Puentes (2015) observaram essa relação em sua pesquisa. Schackow *et al* (2014) e Karatas, Benlin e Toprak (2019) encontraram resultados semelhantes com o uso de vermiculita em concretos leves.

4.5.2 Desempenho térmico

- Procedimento simplificado

O desempenho térmico será analisado inicialmente pelo procedimento simplificado estabelecido pela NBR 15575 (ABNT, 2013), através das propriedades de transmitância térmica e capacidade térmica de um sistema de vedação vertical externo composto por blocos de tijolos cerâmicos revestidos pelas argamassas em estudo. A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos, calculados conforme as diretrizes da NBR 15220 (ABNT, 2003).

Tabela 4.6 – Desempenho térmico

Propriedades	0%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
Transmitância térmica (W/m ² K)	2,31	2,25	2,23	2,21	2,20	2,18	2,15
Capacidade Térmica (KJ/m ² K)	237,5	199,1	189,6	186,4	180,8	177,4	169,1

* Valores máximos admissíveis para Transmitância térmica – U (W/m²K): U ≤ 2,5 (zonas 1 e 2); U ≤ 3,7 para a^a ≤ 0,6 ou U ≤ 2,5 para a^a > 0,6 (zonas de 3 a 8) e Capacidade térmica – CT (kJ/m²K): CT sem exigência (zona 8); CT ≥ 130 (zona de 1 a 7), segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013).

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A partir dos resultados de transmitância térmica e capacidade térmica apresentados na Tabela 4.6, pode-se concluir que o sistema de vedação vertical compostos por tijolos cerâmicos revestidos com qualquer uma das argamassas estudadas atende os limites estabelecidos pela norma de desempenho, para todas as oito zonas bioclimáticas brasileiras.

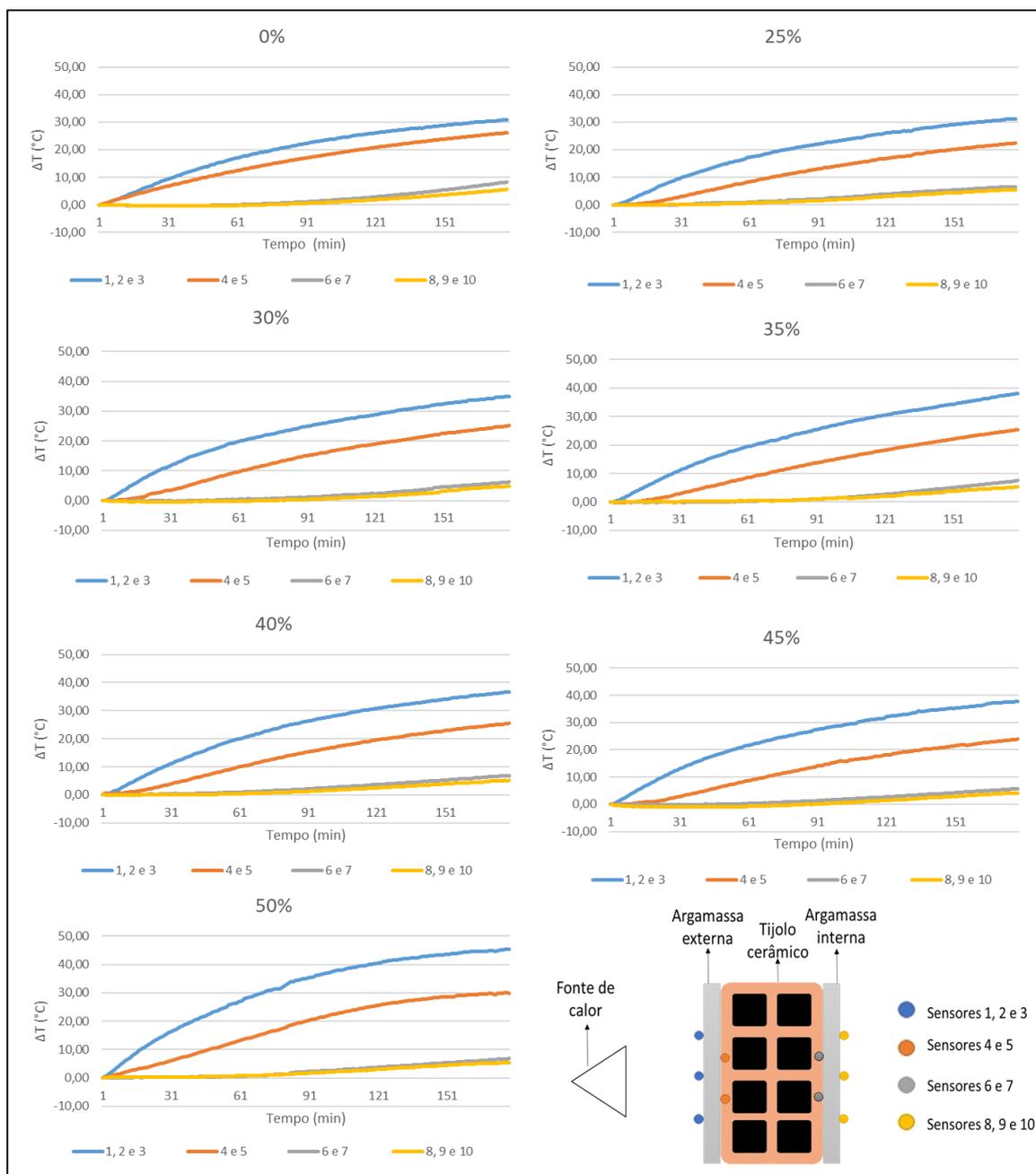
- Procedimento com protótipo

O procedimento por medição com protótipo não sobrepõe os resultados do procedimento simplificado, mas são informações adicionais de reproduções próximas ao máximo das condições reais. A NBR 15575 (ABNT, 2013) sugere a realização do procedimento com 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.

Inicialmente foi feita a análise do desempenho térmico de cada traço isoladamente e em seguida, a comparação entre todas as composições. Para cada argamassa foi gerado um gráfico que apresenta a variação de temperatura aplicada em cada face, onde estavam inseridos os sensores de temperatura (Figura 4.22) e um gráfico que mostra o isolamento de cada material (argamassa externa, tijolo e argamassa interna) como mostra a Figura 4.23.

Os gráficos da Figura 4.22 mostram curvas com a variação da temperatura em cada face ao longo do tempo de duração do ensaio (3 horas). Os sensores 1, 2 e 3 estão localizados na face superficial da argamassa externa, em contato direto com a fonte de calor, os sensores 4 e 5 na face entre a argamassa externa e o tijolo cerâmico, os sensores 6 e 7 entre o tijolo cerâmico e a argamassa interna e os sensores 8, 9 e 10 na face superficial da argamassa interna.

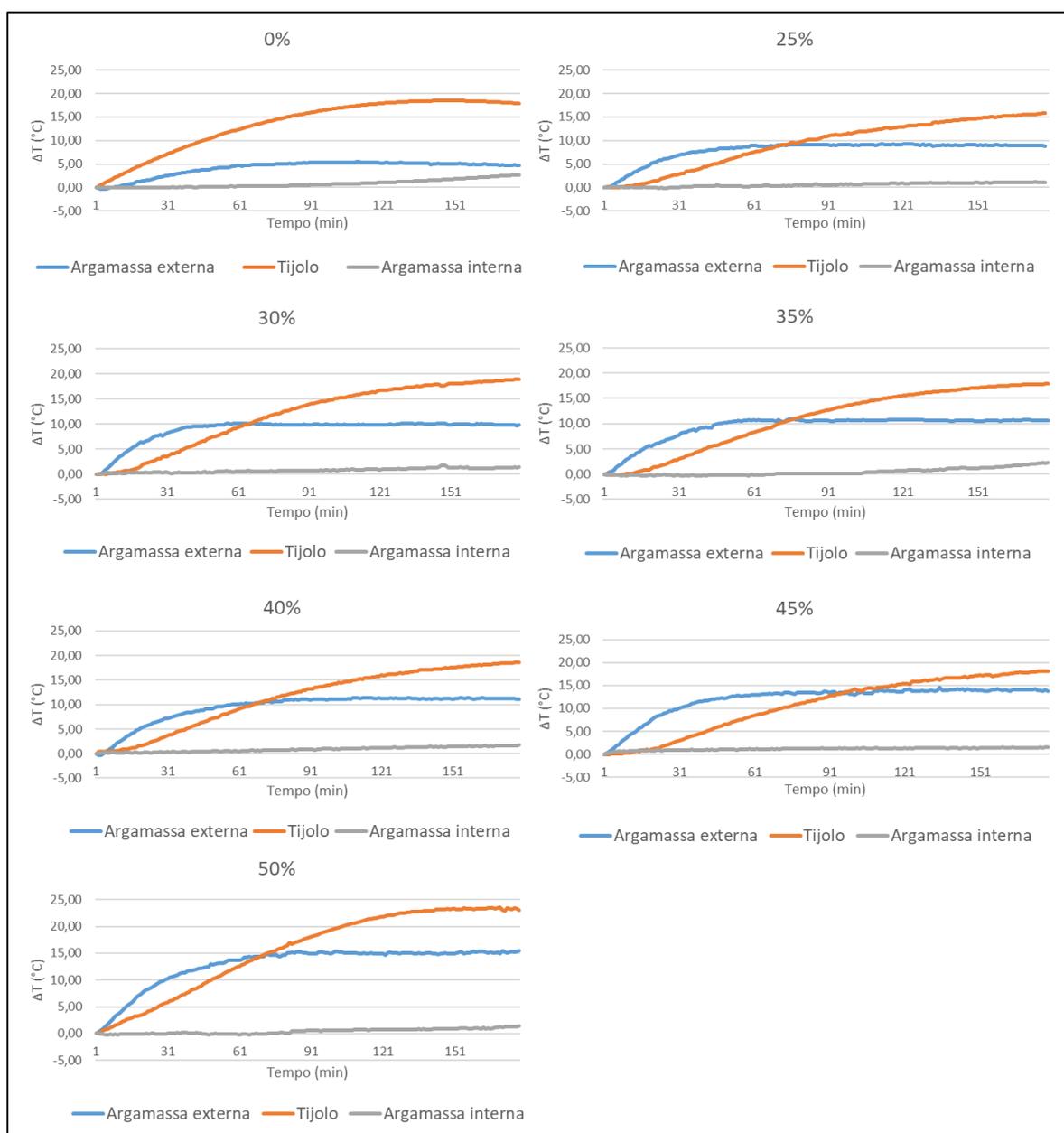
Figura 4.22 - Variação de temperatura em cada face



A argamassa com 0% de substituição (referência) apresenta pouca variação entre as temperaturas dos sensores 1, 2 e 3 aos sensores 4 e 5, mostrando que a argamassa externa pouco contribui para o isolamento, mas para atingir os sensores 6 e 7 essa variação é maior, devido ao isolamento do tijolo cerâmico. As misturas com substituições da areia natural pela vermiculita expandida passam a apresentar maiores variações de temperatura entre os sensores 1, 2 e 3 aos sensores 4 e 5, ou seja, a argamassa externa exerce função de isolamento, que aumenta de acordo com o aumento do teor de substituição. O traço com 25% de substituição tem a

capacidade de isolamento igual ao de referência, porém, a argamassa externa tem maior contribuição para isto. As substituições com 30, 35, 40 e 45% apresentam resultados semelhantes, com isolamento máximo em torno de 40°C. A argamassa com 50% de substituição é capaz de isolar aproximadamente 45°, possuindo maior variação de temperatura.

Figura 4.23 – Isolamento dos materiais



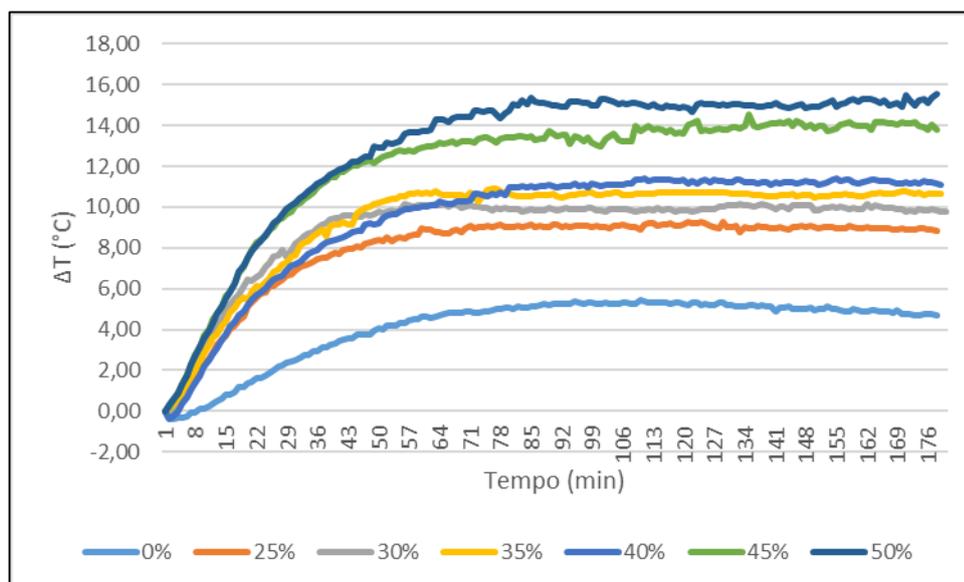
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Ao analisar os gráficos da Figura 4.23, nota-se que na argamassa com 0% de substituição (referência) o isolamento térmico ocorre praticamente apenas no tijolo cerâmico. Com a incorporação da vermiculita expandida as argamassas passam a registrar um isolamento na

argamassa externa também. O traço com 25% de substituição, consegue isolar aproximadamente 9°C durante cerca de 1h e 15min de duração do ensaio, em seguida o tijolo cerâmico chega a isolar quase 16°C. As misturas com 30, 35 e 40% de substituição apresentam um comportamento semelhante à de 25%, com isolamento da argamassa externa por volta de 10°C. A argamassa com 45% de substituição isola em torno de 14°C em um período mais longo de tempo (aproximadamente 1h e 40min) e a de 50% quase 15°C, porém, após quase 1h e 20min o isolamento passa a ser no tijolo cerâmico.

A avaliação do desempenho térmico de todos os traços em conjunto foi feita na argamassa externa (Figura 4.24) e na composição inteira (argamassa externa, tijolo e argamassa interna), como mostra a Figura 4.25.

Figura 4.24 – Análise do desempenho térmico da argamassa externa

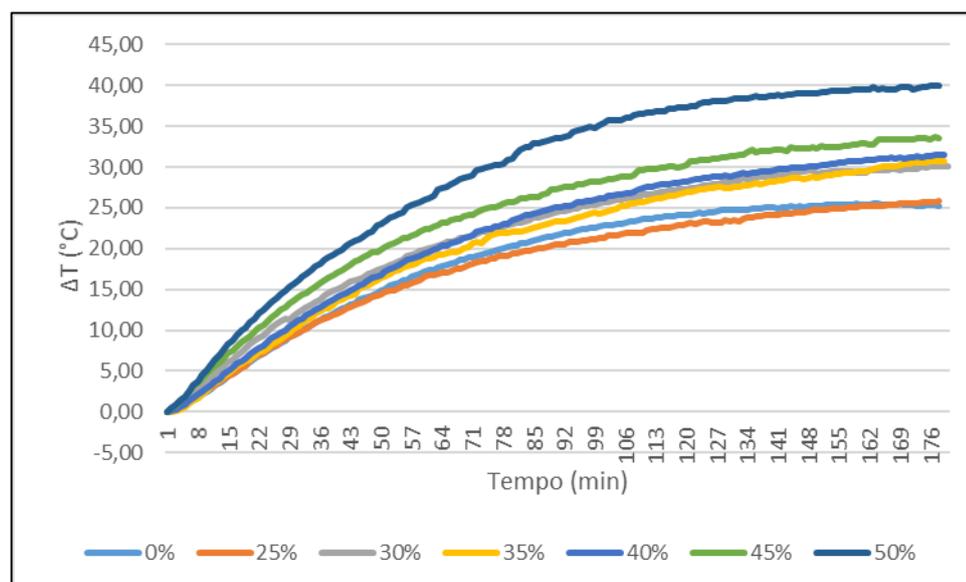


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Nota-se que a argamassa de referência (0%) possui um desempenho térmico inferior as demais argamassas, isolando aproximadamente 6°C, como já visto anteriormente, o tijolo cerâmico que exerce a função de isolamento para esta composição. Os traços com 25, 30, 35 e 40% apresentam resultados próximos, entre 9 e 11°C. A argamassa com 45% de substituição chega a isolar 14°C e a de 50% até 15°C apenas no revestimento em contato com a fonte de calor, sendo maior 141% e 158%, respectivamente, quando comparado a referência. A partir da análise do gráfico, podem-se observar duas fases distintas. A primeira entre o tempo de 0 e 70 min, no qual a argamassa apresenta uma rampa de isolamento crescente. A partir de 70 min de ensaio, as argamassas passaram a apresentar um isolamento constante até o final do ensaio.

Nota-se, também, que a taxa de isolamento (inclinação da curva entre 0 e 70 min) varia com o aumento da substituição da areia natural pela vermiculita expandida. O traço de referência apresenta uma taxa de isolamento inicial de $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, enquanto os traços com 25, 30, 35, 40, 45 e 50% apresentam uma taxa de isolamento inicial de $0,28\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $0,32\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $0,30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $0,29\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $0,40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e $0,40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, respectivamente.

Figura 4.25 – Análise do desempenho térmico



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Com base no gráfico da Figura 4.25, os painéis com as argamassas de referência (0%) e de 25% de substituição apresentam comportamentos semelhantes, com isolamento térmico máximo de 25°C . Os com 30, 35 e 40% de substituição também possuem desempenho parecidos, registrando valores em torno de 30°C . O painel com a mistura de 45% consegue isolar até 34°C e a de 50% até 40°C , ou seja, com grande potencial de isolamento térmico.

É notório que o incremento da vermiculita expandida nas argamassas de cimento melhoram o desempenho térmico, o que já era esperado, devido a sua composição com grande presença de ar, que reduz a condutividade térmica. As argamassas com maiores teores de substituição (45 e 50%) obtiveram resultados mais significativos.

CAPÍTULO 5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Com base nos resultados experimentais realizados neste estudo, as seguintes conclusões relativas ao efeito da incorporação de vermiculita expandida em argamassas de revestimento podem ser tiradas:

- **Caracterização dos agregados**

- i. A distribuição granulométrica mostrou que a areia natural possui maior quantidade de finos do que a vermiculita, o que justifica a redução da relação água/aglomerantes para as misturas com vermiculita expandida
- ii. Na composição química da vermiculita expandida verifica-se um maior teor de sílica, óxido de magnésio, de ferro e de alumínio; A análise mineralógica apresenta picos de vermiculita, quartzo e de hidrobiotita;
- iii. A caracterização microestrutural da vermiculita expandida mostra o alto índice de vazios intralamelares, razão pelo qual o mineral tem grande potencial ao desempenho térmico.

- **Caracterização das argamassas no estado fresco**

- i. A trabalhabilidade das argamassas com incorporação de vermiculita expandida foi melhorada, provavelmente devido a menor quantidade de finos presentes na granulometria da vermiculita expandida;
- ii. As argamassas com substituição do agregado natural pela vermiculita expandida apresentaram, em comparação a argamassas de referência, menor densidade de massa, devido a menor massa específica da vermiculita;
- iii. A retenção de água foi maior para a argamassa de referência, provavelmente por ser o traço com maior quantidade de finos e maior relação água/aglomerantes. Os traços com 25, 30, 35 e 40% de substituição apresentaram redução, este fato pode ter ocorrido devido ao tempo de ensaio ser pouco em relação a capacidade de absorção do material. As argamassas com 45 e 50% aumentaram a retenção de água, possivelmente pela quantidade maior do agregado poroso.

- **Caracterização das argamassas no estado endurecido**

- i. A densidade de massa no estado endurecido reduziu de acordo com o acréscimo de substituição do agregado natural pela vermiculita, devido a massa específica da vermiculita expandida ser menor do que a da areia.
- ii. Com a redução da densidade, conseqüentemente, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade reduziram com o aumento da incorporação da vermiculita expandida nas argamassas. A resistência à tração não sofreu grandes variações, mantendo-se praticamente um valor constante;
- iii. A absorção por capilaridade obteve resultados semelhantes aos de retenção de água, com redução nos traços intermediários e acréscimo nas argamassas com maiores teores de substituição. Provavelmente este fato ocorreu pela maior quantidade de vermiculita nas laterais dos corpos de prova nos traços de 45 e 50%;
- iv. A absorção por imersão e o índice de vazios aumentaram conforme o aumento do teor de substituição do agregado pela vermiculita. Isto ocorre devido a estrutura porosa do mineral;
- v. As argamassas com substituição do agregado natural pela vermiculita obtiveram resultados de resistência de aderência superiores à argamassa sem substituição. Todas as argamassas apresentaram valores acima do valor mínimo estabelecido por norma, exceto a de referência. As rupturas ocorreram na própria argamassa.

- **Ensaio térmico**

- i. As propriedades térmicas foram beneficiadas com a incorporação da vermiculita expandida. O traço com 50% de substituição do agregado natural pela vermiculita reduziu 31% da condutividade térmica em relação a argamassa de referência;
- ii. O sistema de vedação vertical compostos por tijolos cerâmicos revestidos com qualquer uma das argamassas estudadas atende os limites de transmitância térmica e capacidade térmica estabelecidos pela norma de desempenho, para todas as oito zonas bioclimáticas brasileiras;
- iii. O desempenho térmico avaliado com o protótipo mostrou que na argamassa de referência o isolamento ocorre praticamente apenas no tijolo cerâmico. As argamassas com teores de substituição da areia pela vermiculita apresentam maiores

variações de temperatura na argamassa externa. Os traços com 45 e 50% chegam a isolar 14°C e 15°C, respectivamente.

- iv. A argamassa com 25% de substituição possui comportamento parecido com a de referência, isolando 25°C. Os traços com 30, 35 e 40% favorecem a capacidade de isolar das argamassas e apresentam resultados semelhantes, em torno de 30°C. As misturas com 45% e 50% exibem valores significativos para o desempenho térmico, chegando a isolar 34°C e 40°C, respectivamente.

Portanto, o estudo indica que as argamassas com 45% e 50% de substituição do agregado natural pela vermiculita expandida apresentam melhor viabilidade térmica entre as demais argamassas estudadas na pesquisa.

5.2 Sugestões para estudos futuros

Devido ao vasto campo de exploração da temática desta pesquisa e a necessidade de maiores informações, sugere-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Estudar o comportamento das mesmas propriedades para uma argamassa sem cal na composição;
- Avaliar as propriedades de retração; durabilidade e desempenho acústico com as argamassas formuladas;
- Avaliar a possibilidade da adição de materiais de natureza fibrosa, de modo a minimizar os efeitos negativos de resistência mecânica.

Referências bibliográficas

ABCP. Manual de revestimentos de argamassa. 1.ed. São Paulo, 2003. 104p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **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 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

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

_____.**NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

APOLÔNIO, R. M.; OMAR, L. G.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; CARVALHO, B. C. **Avaliação do desempenho térmico da envoltória de edificação comercial na cidade de Cuiabá**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Canela, 2010.

AZAD, A. ;MOUSAVI,S.F.;KARAMI,H.; FARZIN,S. **Using waste vermiculite and dolomite as eco-friendly additives for improving the performance of porous concrete.** Engineering Journal, Volume 22, 2018.

BAÍA, L.L.M; SABBATINI, F.H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa.** Coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras. 4 ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2008.

BAITE, E.; MESSAN, A.; HANNAWI,K.; TSOBNANG,F.; PRINCE,W. **Physical and transfer properties of mortar containing coal bottom ash aggregates from Tefereyre (Niger).** Construction and Building Materials. Volume 125, 2016.

BARROS, I. M. S. **Análise térmica e mecânica de argamassas de revestimento com adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Dissertação), Natal, 2018.

BARROCA, P. A. G. **Comportamento reológico e mecânico de argamassas com agregados leves.** Universidade da Beira Interior (Dissertação), Covilhã, 2013.

BASTOS, P.K.X.; DÉTRICHÉ, C.; BALAYSAAC, J.; CINCOTTO, M.A. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas em argamassa de revestimento.** Associação Brasileira de Tecnologia no ambiente Construído – ANTAC. 2001.

BASTOS, P. K. X.; NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. **Ensaio de retração de argamassas nos estados fresco e endurecido: contribuição para a normalização brasileira.** Anais.. Lisboa: APFAC, 2005.

BORGES, C. A. de. M. **O conceito de desempenho de edificações e sua importância para o setor da construção civil no Brasil.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Dissertação), São Paulo, 2008.

BRÁS, A; LEAL, M.; FARIA, P. **Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance.** Construction and Building Materials. Volume 49, 2013.

CARRACO, T. F. **Análise do desempenho térmico de argamassas com propriedades térmicas.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Monografia), Porto Alegre, 2015.

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.

CBIC - CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013**. 2 ed. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

CINTRA, C.L.D.; PAIVA, A.E.M.; BALDO, J.B. **Masonry mortars containing expanded vermiculite and rubber aggregates from recycled tires - Relevant properties**. Cerâmica, Volume 60, 2014.

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

CORINALDESI, V.; MAZZOLI, A.; SIDDQUE, R. **Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste**. Construction and Building Materials. Volume 123, 2016.

GIRARDI, A. C. C. **Avaliação da substituição total de areia natural por RCD em revestimentos de argamassa**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

KARATAS, M., BENLIN, A., TOPRAK, H.A. **Effect of incorporation of raw vermiculite as partial sand replacement on the properties of self-compacting mortars at elevated temperature**. Construction and Building Materials, Volume 221, 2019.

KHONSARI, V., ESLAMI, E., ANVARI, A. **Effects of expanded perlite aggregate (EPA) on the mechanical behavior of lightweight concrete**. Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - High Performance, Fiber Reinforced Concrete, Special Loadings and Structural Applications, 2010.

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.

LATROCH, N.; BENOSMAN, A.S.; BOUHAMOU, N.; SENHADJI, Y.; MOULI, M. **Physico-mechanical and thermal properties of composite mortars containing lightweight aggregates of expanded polyvinyl chloride**. Construction and Building Materials. Volume 175, 2018.

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

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

LEDESMA, E. F.; JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; FERNÁNDEZ, J. M.; BRITO, J. **Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production–Part-I: ceramic masonry waste**. Journal of Cleaner Production, v. 87, p. 692-706, 2015.

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

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.

MO, K.H.; LEE, H.J.; LIU, M.Y.J.; LING, T. **Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar**. Construction and Building Materials, Volume 179, 2018.

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

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

PALOMAR, I., BARLUENGA, G., PUENTES, J. **Lime-cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance**. Construction and Building Materials, 2015.

PASSOS, P. M.; CARASEK, H.; AMARAL, G.M. **Avaliação da capacidade isolante térmica de revestimentos de argamassa**. XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo, 2016.

PERALTA, M.M.C. **Tratamento químico de uma vermiculita visando seu uso em compósitos de polipropileno**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Dissertação), São Paulo, 2009.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 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, Volume 125,2016.

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

RUIZ-HERRERO, J.L.; NIETO, D.V.; LÓPEZ-GIL, A.; ARRANZ, A.; FERNANDEZ, A.; LORENZANA, A. MERINO, S.; SAJA, J.A.; RODRÍGUEZ-PEREZ, M. A. **Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste**. Construction and BuildingMaterials,2016.

SAHA, A.K.; SARKER, P.K.; GOLOVANEVSKIY, V. **Thermal properties and residual resistance after exposure to high temperature of cement mortar using aggregate of ferronickel slag** Construction and BuildingMaterials,2018.

SANTIAGO, CC. **Argamassas tradicionais de cal**. Salvador: EDUFBA, 2007.

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

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia das argilas**. 2º Edição revisada e ampliada, Editora Edgard Blucher, Volume 1, 1989.

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.

SENHADJI, Y.; SIAD, H.; ESCADEILAS, G.; BENOSMAN, A. S.; CHIHAOUI, R.; MOULI, M.; LACHEMI, M. **Physical, mechanical and thermal properties of lightweight composite mortars containing recycled polyvinyl chloride**. Construction and Building Materials. Volume 195, 2019.

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. **Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes**. Construction and Building Materials, v. 105, 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**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

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

SUVOROV, S.A., SKURIKHIN, V.V. **Vermiculite — a Promising Material for High-Temperature Heat Insulators**. Refractories and Industrial Ceramics, Volume 4, 2003.

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.

WONGSA, A.; SATA, V.; NEMATOLLAHI, B.; SANJAYAN, J.; CHINDAPRASIRT, P. **Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber**. Construction and Building Materials, 2018.

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