



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITORIO (ILATIT)**

**ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA**

**EFEITO DA VERMICULITA NA CONDUTIVIDADE TÉRMICA PARA  
MELHORAR A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES**

**SERGIO ANDRÉS DELGADO PABÓN**

Foz do Iguaçu  
2025

**EFEITO DA VERMICULITA NA CONDUTIVIDADE TÉRMICA PARA  
MELHORAR A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES**

**SERGIO ANDRÉS DELGADO PABÓN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Cesar Winter de Mello  
Coorientador: Prof. Dr. Luís Evelio Garcia Acevedo

Foz do Iguaçu  
2025

SERGIO ANDRÉS DELGADO PABÓN

**EFEITO DA VERMICULITA NA CONDUTIVIDADE TÉRMICA PARA  
MELHORAR A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Cesar Winter de Mello  
UNILA

---

Prof. Dr. Aref Kalilo Lima Kzam  
UNILA

---

Prof. Dr. Luís Evelio Garcia Acevedo  
UNILA

Foz do Iguaçu, 06 de agosto de 2025.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela sabedoria, força e oportunidade para chegar até aqui.

A meu pai, Edgar Fabián Delgado, e minha mãe, Luz Alejandra Pabón, pelo apoio incondicional, pelo incentivo constante, pela paciência e pelo amor que foram a base para que eu persistisse.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. César Winter de Mello e Prof. Dr. Luís Evelio García Acevedo, pela paciência, pela orientação atenta, pelos ensinamentos, pelas críticas construtivas e por compartilharem conhecimento e visão, que foram fundamentais para o amadurecimento e execução deste trabalho.

Aos membros da banca avaliadora, agradeço pelas contribuições, pelos questionamentos relevantes e por elevarem a qualidade da pesquisa com suas observações.

Aos amigos, agradeço pelo ânimo diário, pelas conversas que renovavam a motivação e pelo apoio emocional nos momentos mais desafiadores dessa trajetória acadêmica. Em especial, agradeço à Sofia, à Natalia e Gustavo, pelo apoio constante, pela escuta, pela compreensão nos momentos de maior pressão e por estarem presentes ao longo de todo o processo, contribuindo de forma essencial para que este trabalho fosse concluído.

Aos técnicos e colaboradores do laboratório, deixo meu sincero agradecimento pelo suporte técnico, pela disponibilidade, pela orientação durante a realização dos ensaios e pelo cuidado no uso dos equipamentos, que foram fundamentais para o desenvolvimento experimental desta pesquisa.

Também agradeço a mim mesmo, pela perseverança, pela capacidade de reorganizar o tempo e superar os obstáculos até a conclusão deste projeto.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho, seja com apoio técnico, logístico, revisão ou companhia.

*“Conforto térmico é a condição da mente que expressa  
satisfação com o ambiente térmico.”  
- P. O. Fanger.*

## RESUMO

Este trabalho representa uma contribuição concreta para o desenvolvimento de soluções construtivas sustentáveis, com foco na eficiência energética, no conforto térmico e sustentabilidade, alinhadas com os desafios atuais do setor da construção civil. A aplicação de argamassas com vermiculita pode ser especialmente útil em regiões de clima extremo como Foz do Iguaçu, oferecendo uma alternativa sustentável e de impacto ambiental positivo. Este trabalho avalia a viabilidade técnica da incorporação de vermiculita expandida como agregado parcial em argamassas de revestimento para fachadas oeste, com foco na melhoria da eficiência energética e do conforto térmico. A dosagem das argamassas foi realizada com base no Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), conforme fundamentações da UNILA e da literatura sobre empacotamento granular (Gilardoni, 2023), utilizando cimento CII Z, cal, vermiculita e areia natural. As misturas foram caracterizadas por meio de ensaios normatizados, incluindo granulometria, massa específica, consistência e desempenho mecânico em estado endurecido. A avaliação térmica inicialmente prevista pelo método da placa quente protegida (ASTM C177, 2019) foi adaptada para um ensaio comparativo prático. Foram construídos protótipos de parede revestidos com argamassas contendo 15%, 20% e 25% de vermiculita, além de uma argamassa convencional de referência, expostos à radiação térmica simulada. As temperaturas superficiais e internas foram monitoradas simultaneamente por termopares, termografia e medições diretas ao longo do tempo, permitindo comparar a transferência de calor entre as diferentes formulações. Os resultados indicam que a adição de vermiculita reduz a condutividade térmica aparente das argamassas, com melhor desempenho observado na formulação com 25% de vermiculita, em consonância com os efeitos isolantes esperados devido à maior porosidade (Balek et al., 2007; Incropera; DeWitt, 2003; Dos Santos et al., 2023; Smith et al., 2019; García & López, 2020). A compatibilidade granulométrica entre vermiculita e areia contribui para a otimização da mistura. Este estudo contribui para o desenvolvimento de soluções construtivas mais eficientes em termos energéticos e de conforto térmico.

**Palavras-chave:** Vermiculita; Eficiência energética; Desempenho térmico; Conforto térmico.

## RESUMEN

Este trabajo representa una contribución concreta al desarrollo de soluciones constructivas sostenibles, con foco en la eficiencia energética, el confort térmico y la sostenibilidad, alineadas con los desafíos actuales del sector de la construcción. La aplicación de morteros con vermiculita puede ser especialmente útil en regiones de clima extremo como Foz do Iguaçu, ofreciendo una alternativa sostenible y de impacto ambiental positivo. Este trabajo evalúa la viabilidad técnica de la incorporación de vermiculita expandida como agregado parcial en morteros de revestimiento para fachadas oeste, con énfasis en la mejora de la eficiencia energética y del confort térmico. La dosificación de los morteros se realizó con base en el Modelo de Empacado Compresible (MEC), conforme a los fundamentos de la UNILA y la literatura sobre empacado granular (Gilardoni, 2023), utilizando cemento CPII Z, cal, vermiculita y arena natural. Las mezclas se caracterizaron mediante ensayos normalizados, incluyendo granulometría, masa específica, consistencia y comportamiento mecánico en estado endurecido. La evaluación térmica, inicialmente prevista por el método de placa caliente protegida (ASTM C177, 2019), se adaptó a un ensayo comparativo práctico. Se construyeron prototipos de pared revestidos con morteros que contenían 15%, 20% y 25% de vermiculita, además de un mortero convencional de referencia, expuestos a radiación térmica simulada. Las temperaturas superficiales e internas se monitorearon simultáneamente mediante termopares, termografía y mediciones directas a lo largo del tiempo, permitiendo comparar la transferencia de calor entre las diferentes formulaciones. Los resultados indican que la adición de vermiculita reduce la conductividad térmica aparente de los morteros, con mejor desempeño observado en la formulación con 25% de vermiculita, en consonancia con los efectos aislantes esperados debido a la mayor porosidad (Balek et al., 2007; Incropera y DeWitt, 2003; Dos Santos et al., 2023; Smith et al., 2019; García y López, 2020). La compatibilidad granulométrica entre vermiculita y arena contribuye a la optimización de la mezcla. Este estudio aporta al desarrollo de soluciones constructivas más eficientes en términos energéticos y de confort térmico.

**Palabras clave:** Vermiculita; Eficiencia energética; Desempeño térmico; Confort térmico.

## ABSTRACT

This work represents a concrete contribution to the development of sustainable construction solutions, focusing on energy efficiency, thermal comfort, and sustainability, aligned with the current challenges of the civil construction sector. The application of mortars with vermiculite can be especially useful in extreme climates such as Foz do Iguaçu, offering a sustainable alternative with a positive environmental impact. This study evaluates the technical feasibility of incorporating expanded vermiculite as a partial aggregate in rendering mortars for west-facing façades, with emphasis on improving energy efficiency and thermal comfort. The mortar mix design was performed based on the Compressible Packing Model (CPM), according to the foundations of UNILA and the literature on granular packing (Gilardoni, 2023), using CII Z cement, lime, vermiculite, and natural sand. The mixtures were characterized through standardized tests, including particle size distribution, specific gravity, consistency, and mechanical performance in the hardened state. The thermal evaluation originally planned via the guarded hot plate method (ASTM C177, 2019) was adapted to a practical comparative test. Wall prototypes coated with mortars containing 15%, 20%, and 25% vermiculite, in addition to a conventional reference mortar, were constructed and exposed to simulated thermal radiation. Surface and internal temperatures were monitored simultaneously using thermocouples, thermography, and direct measurements over time, enabling comparison of heat transfer among the different formulations. Results indicate that the addition of vermiculite reduces the apparent thermal conductivity of the mortars, with the best performance observed in the formulation with 25% vermiculite, consistent with the expected insulating effects due to increased porosity (Balek et al., 2007; Incropera & DeWitt, 2003; Dos Santos et al., 2023; Smith et al., 2019; García & López, 2020). The particle size compatibility between vermiculite and sand contributes to the optimization of the mixture. This study contributes to the development of building solutions that are more efficient in terms of energy use and thermal comfort.

**Keywords:** Vermiculite; Energy efficiency; Thermal performance; Thermal comfort.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Transferência de calor 1D por condução (Difusão de energia).....	19
<b>Figura 2</b> - Montagem do conjunto da bancada de teste .....	21
<b>Figura 3</b> - Diagrama de fluxo, etapa I, Caracterização dos materiais .....	23
<b>Figura 4</b> - Diagrama de fluxo, etapa II, Análise Térmica .....	25
<b>Figura 5</b> - Curva granulométrica da Vermiculita e da Areia .....	36
<b>Figura 6</b> - Óxido do cimento .....	38
<b>Figura 7</b> - Óxido de areia .....	38
<b>Figura 8</b> - Curvas comparativas (fase externa e interna, 15% de vermiculita) .....	42
<b>Figura 9</b> - Curvas comparativas (fase externa e interna, 20% de vermiculita) .....	43
<b>Figura 10</b> - Curvas comparativas (fase externa e interna, 25% de vermiculita) .....	44
<b>Figura 11</b> - Curvas comparativas (fase externa e interna, argamassa convencional) .....	45
<b>Figura 12</b> - evolução da diferença de temperatura entre a fase externa vs a interna .....	46

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Normas para a caracterização física dos materiais .....	24
<b>Tabela 2</b> - Normas para ensaios em estado fresco .....	24
<b>Tabela 3</b> – Normas para ensaios em estado endurecido .....	24
<b>Tabela 4</b> – Comparativo entre projeção e execução dos protótipos de parede.....	30
<b>Tabela 5</b> – Densidade específica do cimento CII Z.....	34
<b>Tabela 6</b> – Densidade específica da cal .....	34
<b>Tabela 7</b> – Granulometria da vermiculita .....	35
<b>Tabela 8</b> – Granulometria da areia .....	35
<b>Tabela 9</b> – % de absorção de água.....	37
<b>Tabela 10</b> – traços das argamassas com adição de vermiculita. (MEC) .....	39
<b>Tabela 11</b> – resistência a compressão e tração nos diferentes tempos de cura .....	40
<b>Tabela 12</b> – Imagens do ensaio experimental comparativo .....	47
<b>Tabela 13</b> - Evolução temporal da temperatura na face externa e interna das paredes.....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
UFPR	Universidade Federal do Paraná
MEC	Modelo de Empacotamento Compressível
ILATT	Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e
MECFOR	Software de simulação do Modelo de Empacotamento Compressível
CPM	Compressible Packing Model
ASTM	ASTM International (American Society for Testing and Materials)
NBR	Norma Brasileira
ACI	American Concrete Institute
ISO	International Organization for Standardization
EN	Norma Europeia
fck	Resistência característica à compressão
CP	Corpo de prova
a/c	Relação água/cimento
a/agl	Relação água/aglomerante
a/s	Relação água/sólidos

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	13
1.2 OBJETIVO .....	14
1.2.1 Objetivo Geral .....	14
1.2.2 Objetivos específicos .....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E CONFORTO TÉRMICO EM FACHADAS .....	15
2.2 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO E DESEMPENHO TÉRMICO .....	16
2.3 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	18
2.3.1 Condução .....	18
2.3.2 Convecção .....	19
2.3.3 Radiação .....	19
2.4 MÉTODO DA PLACA QUENTE PROTEGIDA .....	20
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>23</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	25
3.2 ENSAIOS EM ESTADO FRESCO .....	26
3.3 ENSAIOS EM ESTADO ENDURECIDO .....	27
3.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL (MEC) .....	27
3.5 MONTAGEM DOS PROTÓTIPOS DE PAREDE PARA ENSAIO TÉRMICO .....	29
3.6 ENSAIO TÉRMICO .....	31
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>34</b>
4.1 DENSIDADE DE MASSA ESPECÍFICA .....	34
4.2 GRANULOMETRIA DA VERMICULITA .....	34
4.3 GRANULOMETRIA DA AREIA .....	35
4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	37
4.5 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA AREIA E DO CIMENTO .....	37
4.6 TRAÇOS DE ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE VERMICULITA .....	39
4.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA .....	40
<b>5. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO</b> .....	<b>41</b>
5.1 ENSAIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DE DESEMPENHO TÉRMICO .....	41
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>51</b>
<b>APÊNDICE</b> .....	<b>53</b>
<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na engenharia civil, A eficiência energética, a sustentabilidade e o conforto térmico são desafios cada vez mais cruciais na construção civil, especialmente em fachadas expostas à radiação solar direta, como as voltadas para o oeste, que recebem alta carga térmica nas horas de maior incidência. Esse acréscimo da carga térmica eleva a demanda por climatização dos ambientes internos, impactando o consumo de energia e agravando problemas relacionados ao aquecimento em contextos urbanos de clima quente (GARCÍA; LÓPEZ, 2020; DOS SANTOS et al., 2023). Neste contexto, revestimentos capazes de reduzir a transmissão de calor para o interior das edificações são estratégicos para mitigar perdas energéticas e melhorar o desempenho térmico global.

Entre as alternativas para aumentar a capacidade de isolamento térmico, destacam-se materiais leves e de baixa condutividade térmica. A vermiculita expandida, um filosilicato natural, rico em alumínio, ferro e magnésio, de estrutura lamelar e alta porosidade, aprisiona bolsões de ar que atuam como barreiras térmicas internas, reduzindo a condutividade efetiva da mistura cimentícia (BALEK et al., 2007).

Estudos indicam que, quando bem dosada, a vermiculita pode diminuir significativamente a transferência de calor sem comprometer irremediavelmente a trabalhabilidade da argamassa (SMITH et al., 2019; DOS SANTOS et al., 2023). Além disso, seu uso favorece o retardo térmico, permitindo maior conforto interno ao desacelerar o aquecimento das superfícies.

A otimização da composição granular é outro aspecto essencial para conciliar desempenho térmico e mecânico. Segundo Gilardoni (2023), a aplicação do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) em argamassas de projeção ajusta racionalmente as proporções de partículas de diferentes tamanhos, reduzindo vazios e minimizando o excesso de pasta necessário para garantir a coesão e a trabalhabilidade. Essa redução do volume de pasta influencia positivamente a condutividade térmica, pois misturas menos densas apresentam menor transferência de calor por condução (SILVA, 2020).

Assim, a combinação do MEC com a adição controlada de vermiculita constitui uma abordagem integrada para formular argamassas que busquem equilíbrio entre isolamento térmico e integridade estrutural.

A compreensão dos mecanismos físicos de transferência de calor

condução, convecção e radiação, é fundamental para avaliação do desempenho térmico do material proposto. A transferência de calor, ou simplesmente calor, é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário, sólido ou fluido, o mecanismo se denomina de condução e depende de propriedade do meio, em especial da condutividade térmica. Quando a transferência de calor se dá entre uma superfície e um fluido em movimento, se denomina convecção e finalmente um terceiro meio de transferência de calor, que não precisa meio e se dá por ondas eletromagnéticas é a radiação. Estes três mecanismos estão presentes em diferentes proporções no fenômeno de conforto térmico em qualquer edificação. Neste trabalho ser avalia o efeito da condução do calor através de amostras de reboco com vermiculita vinda de uma condição de contorno de calor por radiação. Compreender como a vermiculita e a estrutura granulométrica alteram esses fluxos permite formular hipóteses sobre eficácia do isolamento e guiar a avaliação comparativa entre traços.

Diante desse cenário, o presente trabalho investiga a viabilidade técnica de argamassas de revestimento contendo vermiculita expandida, dosadas por meio do MEC, com ênfase na redução da transmissão de calor em fachadas oeste, sem negligenciar o desempenho mecânico. Busca-se, assim, desenvolver uma solução construtiva sustentável que contribua para a eficiência energética e o conforto térmico em edificações de regiões quentes, como Foz do Iguaçu.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A vermiculita expandida configura -se como uma solução eficaz para argamassas de revestimento, pois combina elevado poder isolante devido à sua alta porosidade com a vantagem de ser um material de origem natural. Sua incorporação visa reduzir a transferência de calor pelas fachadas, diminuindo a demanda por sistemas de climatização e, assim, o consumo de energia e as emissões de carbono. Ao mesmo tempo, é essencial verificar se essa adição não compromete a resistência e a durabilidade do revestimento.

Portanto, o presente trabalho propõe-se a desenvolver uma argamassa que combine desempenho térmico aprimorado e propriedades mecânicas adequadas, respondendo aos atuais desafios de eficiência e sustentabilidade na construção civil.

## 1.2 OBJETIVO

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito da incorporação de vermiculita expandida na condutividade térmica e na resistência de argamassas de revestimento, visando determinar sua viabilidade para aprimorar a eficiência energética de edificações em climas quentes e úmidos, como o de Foz do Iguaçu.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Dosar argamassas de revestimento com 15%, 20% e 25% de vermiculita expandida, empregando o Modelo de Empacotamento Compressível.
- Avaliar a resistência mecânica dessas argamassas em comparação à mistura convencional.
- Avaliar o efeito térmico da presença da vermiculita nas argamassas de revestimento visando à melhoria da eficiência energética em fachadas de alta incidência solar.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E CONFORTO TÉRMICO EM FACHADAS

A busca por eficiência energética nas edificações tornou-se uma prioridade nas últimas décadas, impulsionada tanto por exigências ambientais quanto pelo aumento do custo energético e da preocupação com o conforto térmico dos usuários. A envoltória da edificação composta por paredes, coberturas, janelas e pisos representa a principal interface de troca de calor com o meio externo, sendo determinante no desempenho térmico global do edifício (GARCÍA; LÓPEZ, 2020).

Diversos estudos demonstram que a escolha adequada dos materiais da envoltória pode reduzir significativamente a demanda por climatização artificial, contribuindo para a sustentabilidade e a redução das emissões de carbono associadas ao setor da construção civil. García e López (2020), ao avaliarem soluções de “retrofit” em coberturas e fachadas de habitações de interesse social no México, observaram reduções de até 30% no consumo de energia para resfriamento, apenas com melhorias no isolamento térmico externo.

No contexto brasileiro, a NBR 15575-1:2013 estabelece requisitos mínimos de desempenho térmico para edificações habitacionais, evidenciando a crescente preocupação normativa com a eficiência energética dos edifícios. Materiais inovadores, capazes de atuar como barreiras ao fluxo de calor, vêm sendo amplamente pesquisados como alternativa a soluções convencionais, sobretudo em regiões de clima quente, como Foz do Iguaçu (DOS SANTOS et al., 2023; SMITH et al., 2019).

A utilização de argamassas de revestimento modificadas, incorporando agregados leves e isolantes, insere-se nesse cenário como uma solução passiva promissora, permitindo ganhos de desempenho térmico sem a necessidade de mudanças estruturais profundas. entre essas alternativas, a aplicação de argamassa com vermiculita expandida se destaca pela facilidade de incorporação ao processo construtivo convencional e pelo potencial de atuar como barreira térmica diretamente sobre superfícies expostas à radiação solar intensa (DOS SANTOS et al., 2023; SMITH et al., 2019).

Além das estratégias arquitetônicas tradicionais, a literatura recente

destaca a importância do uso de materiais de revestimento com propriedades térmicas aprimoradas como elemento fundamental para a eficiência energética das edificações. Segundo Incropera e DeWitt (2003), a envoltória do edifício exerce papel decisivo no controle das trocas de calor entre o meio externo e o ambiente interno, especialmente em fachadas submetidas à radiação solar direta.

Estudos experimentais e numéricos indicam que fachadas com revestimentos de menor condutividade térmica são capazes de reduzir significativamente os ganhos térmicos durante os períodos de maior insolação, contribuindo para a manutenção de temperaturas internas mais estáveis e para a diminuição da demanda por sistemas ativos de climatização (GARCÍA; LÓPEZ, 2020). Esse efeito é particularmente relevante em fachadas com orientação oeste, onde a incidência solar ocorre em horários de maior carga térmica acumulada.

De acordo com Dos Santos et al. (2023), a utilização de materiais leves e porosos em argamassas de revestimento pode atuar como uma estratégia passiva complementar, promovendo maior inércia térmica superficial e retardando a propagação do calor para o interior da edificação. Dessa forma, o desempenho térmico das fachadas passa a depender não apenas da espessura do sistema construtivo, mas também das propriedades físicas e térmicas dos materiais empregados.

## 2.2 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO E DESEMPENHO TÉRMICO

As argamassas de revestimento desempenham papel central na proteção e no acabamento das edificações, contribuindo não apenas para o desempenho estético e mecânico das fachadas, mas também para o desempenho térmico dos ambientes internos (BRAUHARDT, 2016; DOS SANTOS et al., 2023). O uso de revestimentos adequados pode minimizar a transferência de calor entre o meio externo e interno, reduzindo as oscilações térmicas e o consumo energético para climatização (GARCÍA; LÓPEZ, 2020).

Tradicionalmente, as argamassas são compostas por cimento, cal, areia e água, podendo receber aditivos ou agregados especiais com o objetivo de otimizar determinadas propriedades. O desempenho térmico das argamassas convencionais, contudo, é limitado devido à sua alta densidade e condutividade térmica relativamente elevada quando comparada a materiais isolantes (SMITH et al.,

2019). Por isso, há crescente interesse na incorporação de agregados leves como perlita, vermiculita e resíduos industriais para melhorar o isolamento térmico das argamassas sem comprometer sua função estrutural (DOS SANTOS et al., 2023; BALEK et al., 2007).

A literatura aponta que a adição de agregados leves pode proporcionar significativa redução na condutividade térmica das argamassas, tornando-as mais adequadas para aplicação em fachadas expostas à radiação solar direta (SMITH et al., 2019; DOS SANTOS et al., 2023). Segundo Balek et al. (2007), a estrutura lamelar e porosa da vermiculita contribui para a formação de bolsões de ar aprisionado, dificultando o fluxo de calor por condução. Isso é particularmente relevante em regiões de clima quente, onde a demanda por soluções passivas de resfriamento é elevada.

As argamassas de revestimento modificadas com agregados leves têm sido objeto de diversas pesquisas por sua capacidade de alterar significativamente as propriedades térmicas dos compósitos cimentícios. A vermiculita expandida, em particular, tem sido estudada em combinação com diferentes tipos de agregados e adições minerais, demonstrando redução da condutividade térmica sem prejuízo completo das propriedades em estado fresco e endurecido (SANTOS; FIGUEIRÊDO; PAIVA; et al., 2023). Essas misturas experimentais, nas quais a areia foi parcialmente substituída por vermiculita, confirmam a viabilidade técnica das argamassas térmicas em contextos construtivos.

De acordo com Stella Bruna Ananias Affonso (2024), a vermiculita expandida, apesar de ainda pouco empregada em larga escala nas argamassas, apresenta benefícios claros quanto à diminuição da massa estrutural das argamassas e à redução da condutividade térmica, além de possibilitar maior leveza no revestimento aplicado. Este trabalho corrobora a tendência observada em múltiplos estudos de que o agregado leve pode atuar como elemento isolante que favorece o controle térmico passivo nos sistemas de cobertura e fachada.

O desempenho térmico de argamassas pode ser avaliado por meio de ensaios laboratoriais padronizados, como o da placa quente protegida (ASTM C177-19), e por métodos experimentais alternativos que simulam a exposição das paredes à radiação solar (INCROPERA; DEWITT, 2003). Os resultados dessas avaliações embasam o desenvolvimento de traços otimizados, que busquem conciliar isolamento térmico, resistência mecânica e trabalhabilidade adequada para aplicação

em campo.

Diante desse cenário, o presente trabalho se propõe a investigar a viabilidade de argamassas de revestimento com vermiculita expandida como alternativa para elevar o desempenho térmico das fachadas, buscando fornecer base experimental para sua adoção em projetos que visem maior eficiência energética e conforto ambiental.

Para a dosagem racional de argamassas contendo agregados leves, o Método de Empacotamento Compressível (MEC) tem sido amplamente utilizado na literatura. Segundo Uribe (2019), o MEC baseia-se na otimização da distribuição granulométrica dos materiais constituintes, considerando a interação entre partículas, a porosidade resultante e as propriedades físicas dos agregados.

De acordo com Uribe (2019), esse método permite ajustar a composição das argamassas de forma a maximizar o empacotamento granular, reduzindo vazios excessivos e promovendo melhor controle da trabalhabilidade, da densidade e do desempenho mecânico, mesmo em misturas com materiais de baixa massa específica. Tal abordagem é especialmente relevante para argamassas modificadas com vermiculita, cujas características granulométricas e alta porosidade podem comprometer o desempenho caso não sejam adequadamente consideradas na dosagem.

Dessa forma, a adoção do Método de Empacotamento Compressível neste trabalho fundamenta-se na necessidade de obter argamassas tecnicamente equilibradas, capazes de aliar desempenho térmico aprimorado à viabilidade construtiva e à consistência adequada para aplicação em revestimentos de fachadas.

## 2.3 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor ou simplesmente calor, é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura (INCROPERA, 2003). Os mecanismos de transferência de calor são a condução, a convecção e a radiação.

### 2.3.1 Condução

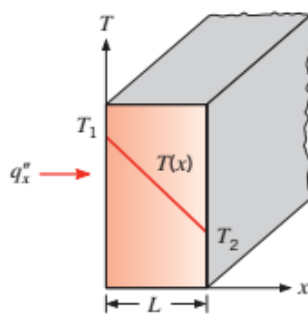
Na condução, o calor flui de regiões de maior para menor temperatura através de um meio sólido (ou estacionário) regido pela lei de Fourier; A Equação 1 apresenta a lei de Fourier e a Figura 1 apresenta a relação das propriedades:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx}$$

Equação 1

- $qx''$  é o fluxo de calor unidimensional [ $W/m^2$ ];
- $k$  é a condutividade térmica do material [ $W/(m \cdot K)$ ];
- $dT/dx$  é o gradiente de temperatura ao longo da direção  $x$  [ $K/m$ ].

**Figura 1** - Transferência de calor 1D por condução (Difusão de energia)



$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Fonte: INCROPERA, 2003

### 2.3.2 Convecção

A convecção descreve a troca de calor entre uma superfície e um fluido em movimento (o ar ambiente). É modelada pela Equação 2:

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

Equação 2

onde

- $h$  é o coeficiente de transferência convectiva [ $W/(m^2 \cdot K)$ ];
- $T_s$  é a temperatura da superfície [ $K$ ];
- $T_\infty$  é a temperatura do fluido distante da superfície [ $K$ ].

### 2.3.3 Radiação

Toda superfície emite radiação térmica segundo a lei de Stefan–Boltzmann, a Equação 3 refere-se ao fluxo de calor por convecção na superfície do revestimento:

$$q''_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{amb}^4)$$

Equação 3
-----------

Onde:

- $\varepsilon$  é a emissividade da superfície (adimensional);
- $\sigma$  é a constante de Stefan–Boltzmann ( $\frac{5.67 \times 10^{-8} W}{m^2 * K^4}$ );
- $T_s$  e  $T_{amb}$  são as temperaturas da superfície e do ambiente em Kelvin.

Em fachadas expostas, a radiação incidente do sol (ou de lâmpadas halógenas, no experimento) estabelece o calor inicial que, depois, se propaga por condução e é parcialmente dissipado por convecção.

O método teórico de referência para medição de condutividade térmica em regime permanente é o ensaio de placa quente protegida (ASTM C177-19), no qual a amostra é posicionada entre placas quentes e frias, envolvidas por isolamento térmico, garantindo fluxo unidimensional de calor. A partir da estabilidade térmica e da diferença de temperatura medida entre as superfícies, calcula-se a condutividade pelo princípio de Fourier. Neste estudo, a descrição desse procedimento foi mantida para fins de revisão metodológica, mas sua aplicação prática foi substituída por um ensaio comparativo devido a limitações técnicas.

## 2.4 MÉTODO DA PLACA QUENTE PROTEGIDA.

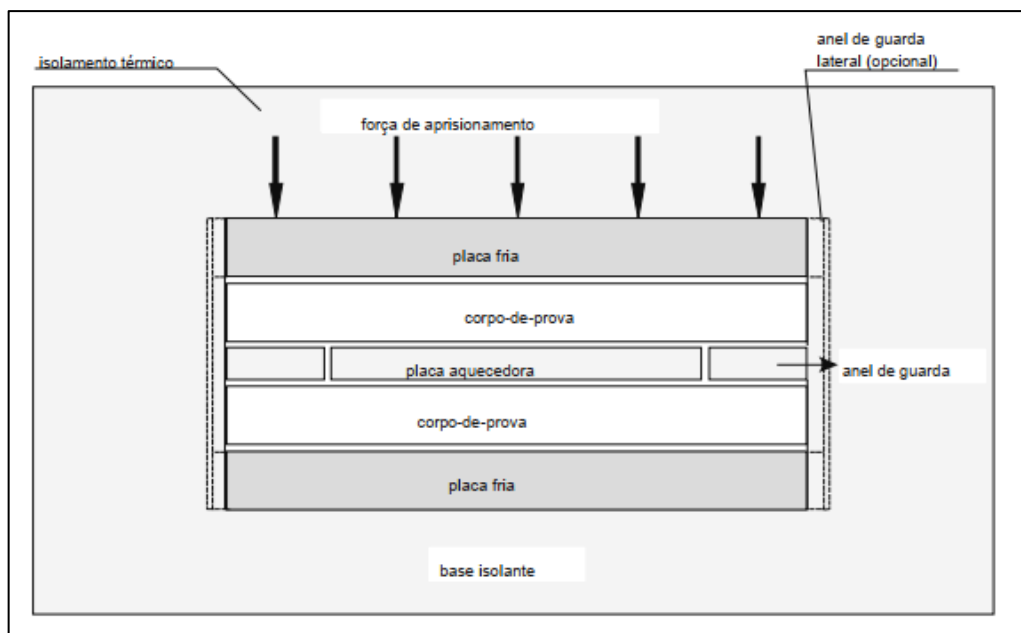
O método da placa quente protegida utiliza teoria de transferência de calor aplicada a um sistema padronizado que permite avaliar propriedades térmicas como a condutividade térmica e capacidade térmica do material. A norma ABNT NBR 15220-4:2005 descreve o procedimento técnico de obtenção da condutividade térmica do material delimitando sua aplicação para regime permanente e materiais sólidos ou granulares compactados ou não (ABNT NBR 15220-4).

A determinação das propriedades térmicas do material utiliza como princípio o estabelecimento de condições controladas de operação em bancada, na qual se devem facilitar condições de operação tais como o regime permanente, a

condição de fluxo unidimensional, propriedades constantes e uniformes, sem geração de calor, e isotropia no material.

A bancada então deve ter condições de isolamento térmico e medida de temperaturas e dimensões, assim com a potência consumida que deve ser transformada em calor, geralmente de origem elétrica. A Figura 2 apresenta um modelo da disposição do experimento relatado, segundo a norma. A bancada consiste em um dispositivo termicamente isolado e instrumentado de tal forma a poder medir as temperaturas entre as interfaces do corpo de prova. A placa quente é colocada entre dois corpos de prova idênticos e estes por sua vez são colocados no meio de duas placas frias, e todo o conjunto completamente isolado prensado.

**Figura 2** - Montagem do conjunto da bancada de teste



Fonte: ABNT NBR 15220-4, 2005

A realização do teste exige o estabelecimento das condições inicialmente citadas em especial o regime permanente através do fornecimento de energia térmica da placa quente e a manutenção da baixa temperatura nas placas frias, o que garante um gradiente uniforme e constante nos corpos de prova.

Com os dados coletados durante o teste, a condutividade térmica dos corpos de prova pode ser calculada a partir da manipulação da lei de Fourier como apresentado na Equação 4.

$$k_x \equiv -\frac{q_x''}{\partial T/\partial x}$$

Equação 4
-----------

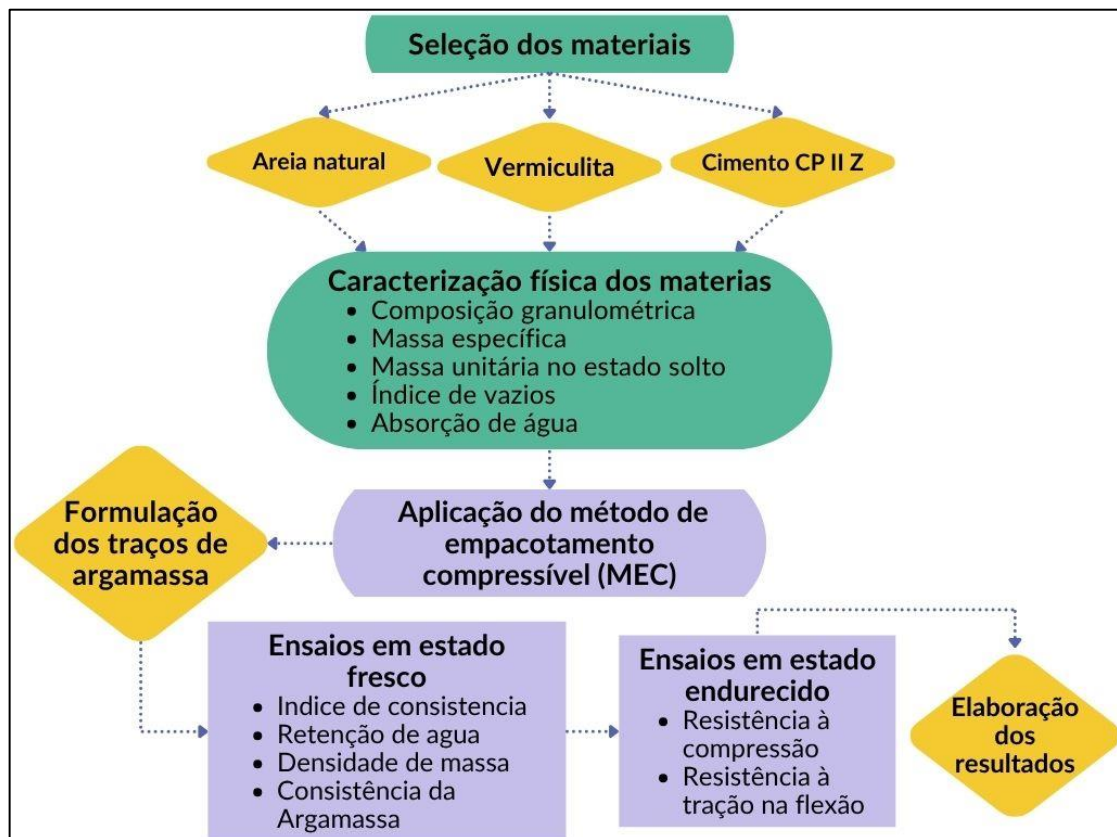
A construção da bancada e realização de testes experimentais fazem parte da segunda etapa do projeto. Com o desenvolvimento da metodologia conforme a norma ABNT NBR 15220-4 é possível construir uma bancada capaz de medir propriedade térmicas de materiais homogêneos e isotrópicos com incertezas de medição de uma unidade percentual e repetibilidade maior do que 1%.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para corroborar que o uso da vermiculita em argamassas de revestimento traz melhorias na eficiência energética, procedeu-se à seleção de materiais e caracterização dos mesmos em laboratório. Os materiais selecionados foram: areia natural, cimento CP II Z, vermiculita e cal.

O trabalho desenvolvido contará com duas etapas: a primeira relacionada à caracterização dos materiais e produção de argamassas; e a Etapa II relacionada ao estudo do desempenho térmico, como mostra a Figura 3:

**Figura 3** - Diagrama de fluxo, etapa I, Caracterização dos materiais



Fonte: autor, 2025.

Na primeira etapa, realizou-se a caracterização física dos materiais selecionados, e a elaboração dos traços das argamassas com adição de vermiculita.

A tabela 1 apresenta as normas usadas para a caracterização física dos materiais que compõem a argamassa.

**Tabela 1**– Normas para a caracterização física dos materiais

<b>Caracterização física dos materiais</b>	
Massa específica	NBR 16605
Massa unitária em estado solto	NBR 16972
Composição granulométrica	NBR 7211
Absorção de água	NBR 16916

Fonte: autor, 2025.

Após a caracterização dos materiais, realizaram-se ensaios em estado fresco e estado endurecido. A Tabela 2 mostra as normas usadas para execução dos ensaios em estado fresco.

**Tabela 2** - Normas para ensaios em estado fresco

<b>Ensaio em estado fresco</b>	
Determinação do índice de consistência	NBR 13276
Determinação da retenção de água	NBR 13277
Determinação da densidade e da absorção de água	NBR 13278
Ensaio de Consistência da Argamassa	NBR 13276

Fonte: autor, 2025.

A tabela 3 apresenta as normas usadas para desenvolver os ensaios de estado endurecido das argamassas.

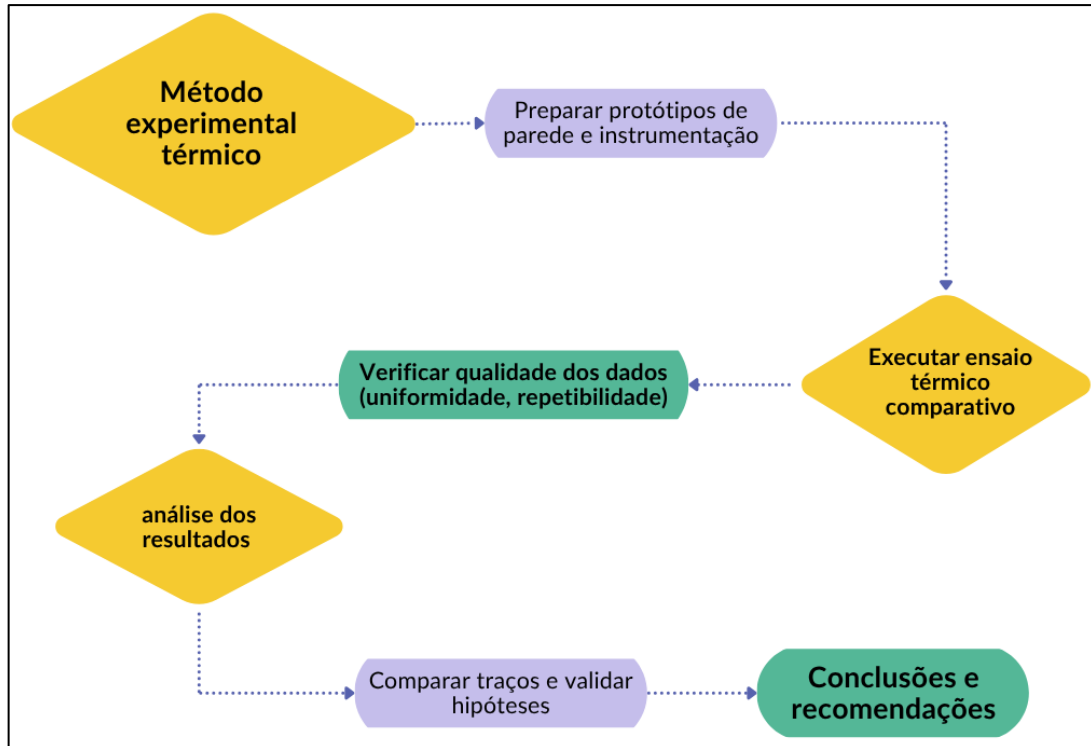
**Tabela 3** – Normas para ensaios em estado endurecido

<b>Ensaio em estado fresco</b>	
Resistência à compressão	NBR 13279
Resistência à tração na flexão	NBR 13279

Fonte: autor, 2025.

Na Etapa II, pretende-se avaliar o desempenho térmico da vermiculita nas fachadas, por meio de testes experimentais comparativos, como mostrado na figura 4.

**Figura 4** - Diagrama de fluxo, etapa II, Análise Térmica



Fonte: autor, 2025.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização adequada dos materiais constituintes da argamassa é fundamental para garantir o desempenho previsto em projeto. Para isso, foram realizados, no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA), localizado no PTI, diversos ensaios seguindo normas técnicas da ABNT, visando avaliar propriedades essenciais de cada componente.

O ensaio de granulometria foi realizado para determinar a distribuição do tamanho dos grãos de areia e de vermiculita, etapa fundamental para o empacotamento granular, influenciando diretamente a trabalhabilidade, o consumo de água e a resistência final da argamassa (NBR 16541, 2016).

A massa específica dos materiais, determinada conforme a NBR 16605:2016, fornece subsídios para o cálculo do volume de argamassa, controle de qualidade e ajuste preciso do traço.

Para a densidade de massa e o teor de ar incorporado, seguiu-se a NBR 13278:2005, permitindo avaliar características em estado fresco que afetam diretamente o desempenho térmico e mecânico da argamassa.

A absorção de água, realizada conforme a NBR 15259:2005, permitiu aferir a capacidade dos agregados de absorver e reter água, fator determinante para a durabilidade e o comportamento da argamassa frente à umidade.

A composição química dos materiais foi investigada com base nas recomendações da NBR 13278:2005, contribuindo para o entendimento das propriedades físicas e químicas dos componentes e identificando eventuais riscos de reações deletérias.

Esses ensaios permitiram conhecer o comportamento individual dos agregados, cimento, cal e vermiculita, sendo essenciais para prever e controlar a trabalhabilidade, a densidade, o desempenho térmico e mecânico das argamassas desenvolvidas neste trabalho.

### 3.2 ENSAIOS EM ESTADO FRESCO

Os ensaios realizados em estado fresco têm o objetivo de avaliar propriedades fundamentais da argamassa imediatamente após o preparo, antes do início da pega e endurecimento. Essas propriedades são determinantes para o manuseio, transporte, aplicação e desempenho inicial do revestimento.

- Índice de consistência: Mede a fluidez ou plasticidade da argamassa, sendo um parâmetro fundamental para garantir a trabalhabilidade durante a aplicação. Uma argamassa muito seca ou muito fluida pode comprometer a aderência e o acabamento (NBR 13276, 2005);
- Teor de ar incorporado: Quantifica a quantidade de ar retida na mistura, influenciando a massa específica, a resistência mecânica e a durabilidade. Ensaio de ar incorporado são importantes para argamassas de revestimento, pois excesso de ar pode gerar porosidade e redução da resistência (NBR 13278, 2005);
- Densidade de massa em estado fresco: Indica a massa da argamassa por unidade de volume, refletindo a eficiência do empacotamento dos agregados, o teor de ar e a relação água/cimento, com impacto direto nas propriedades mecânicas e térmicas futuras;
- Tempo de trabalhabilidade: Pode ser monitorado para garantir que a argamassa mantenha suas características durante o período necessário para aplicação.

Esses ensaios em estado fresco permitem ajustes imediatos na dosagem, assegurando maior homogeneidade e desempenho da argamassa, além de atender às exigências normativas de qualidade.

### 3.3 ENSAIOS EM ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios em estado endurecido são realizados após o período de cura, com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico e físico das argamassas em serviço. Tais ensaios possibilitam verificar se as propriedades atingem os requisitos mínimos para aplicação em fachadas e ambientes sujeitos a esforços e exposição ambiental. Entre os ensaios, pode-se citar:

- Resistência à compressão: Principal parâmetro mecânico, avalia a capacidade da argamassa de suportar esforços de compressão sem falha. Ensaio são realizados em corpos de prova prismáticos moldados e curados, conforme a NBR 13279, aos 7 e 28 dias.
- Resistência à tração na flexão: Complementar à compressão, mede a resistência da argamassa à abertura de fissuras sob esforços de flexão.

Esses ensaios permitem comparar o desempenho entre argamassas convencionais e aquelas com vermiculita, possibilitando analisar vantagens e eventuais limitações do uso do agregado leve em relação aos requisitos normativos e à prática da construção civil.

### 3.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL (MEC)

Para a definição dos traços das argamassas com vermiculita expandida utilizadas neste trabalho, optou-se pela aplicação do método de empacotamento compressível (MEC), o qual se baseia na modelagem da composição granular dos materiais com o objetivo de maximizar o empacotamento das partículas sólidas e otimizar a compacidade da mistura.

Segundo Silva (2020), o MEC considera que "o volume ocupado por uma mistura de partículas é maior que a soma dos volumes das partículas separadamente, devido à compressibilidade das partículas e ao rearranjo que ocorre durante a mistura", permitindo assim maior previsibilidade no comportamento

reológico da argamassa.

Esse método permite simular numericamente o comportamento granular da mistura, determinando a proporção ideal entre sólidos, ar e pasta ligante, com o objetivo de maximizar a compacidade e melhorar propriedades reológicas, térmicas e mecânicas da argamassa.

De acordo com estudos realizados na Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), a dosagem via MEC baseia-se na definição de diferentes teores de excesso de pasta em relação aos vazios do agregado, além de parâmetros como índice de consistência, massa específica e teor de ar incorporado em estado fresco. Esses dados alimentam o software MECFOR, que simula o empacotamento ideal e propõe traços otimizados conforme os requisitos do projeto, os quais são fundamentais para ajustar a dosagem da mistura de forma racional e tecnicamente fundamentada. Esses dados experimentais alimentam o programa computacional utilizado no MEC, permitindo simulações mais próximas do comportamento real das argamassas (GILARDONI, 2023).

O uso do MEC também contribui para a redução do consumo de ligantes e melhora da trabalhabilidade, além de possibilitar maior controle sobre a densidade da mistura e sua eficiência térmica e mecânica.

“A aplicação do método permite simular a curva de empacotamento ideal para a composição estudada, e a partir disso propor traços mais otimizados, com menor teor de vazios, o que melhora diretamente as propriedades mecânicas e térmicas das argamassas” (SILVA, 2020, p. 75).

A escolha por esse modelo de dosagem justifica-se pelos seguintes motivos:

1. Oferece um método racional e preditivo na formulação das argamassas com vermiculita;
2. Permite a integração direta de dados de ensaios em estado fresco, assegurando trabalhabilidade e desempenho;
3. Reduz o consumo de ligantes (cimento e cal), contribuindo para a sustentabilidade econômica e melhor eficiência térmica e mecânica da argamassa.

### 3.5 MONTAGEM DOS PROTÓTIPOS DE PAREDE PARA ENSAIO TÉRMICO

Foram construídos quatro protótipos de parede independentes, cada um com dimensões aproximadas de 54 cm de altura, 54 cm de largura e 13 cm de espessura. Essa espessura foi determinada pela utilização de tijolos cerâmicos de seis furos (de 9 cm de espessura) e pelo acréscimo de 2 cm de revestimento de argamassa na face frontal e 2 cm na face posterior, conforme previsto no projeto experimental.

Para garantir a estabilidade e facilitar o reacomodo dos protótipos, todas as paredes foram enquadradas com tábuas de madeira, formando um caixilho perimetral. Isso permitiu movimentar e acomodar as paredes no laboratório de forma segura durante o arranjo dos ensaios térmicos.

A montagem dos protótipos seguiu as seguintes etapas principais:

1. Preparação da base: Confeção do caixilho de madeira, servindo como molde para assentar os tijolos.
2. Alvenaria: Os tijolos foram assentados utilizando argamassa convencional, formando as quatro paredes separadamente. Após a montagem, as paredes foram deixadas em repouso para garantir a secagem adequada da alvenaria.
3. Chapisco: foi realizada a aplicação de chapisco convencional na face frontal dos tijolos, aumentando a aderência do revestimento.
4. Aplicação das argamassas de revestimento: Na face frontal de cada parede, aplicou-se um traço distinto de argamassa, sendo:
  - Uma parede com argamassa convencional (referência);
  - Uma parede com 15% de vermiculita expandida;
  - Uma parede com 20% de vermiculita expandida;
  - Uma parede com 25% de vermiculita expandida.

Os traços das argamassas modificadas foram determinados por meio do Método de Empacotamento Compressível (MEC), utilizando os dados obtidos na caracterização dos materiais para otimizar a dosagem dos componentes conforme a proporção de vermiculita definida.

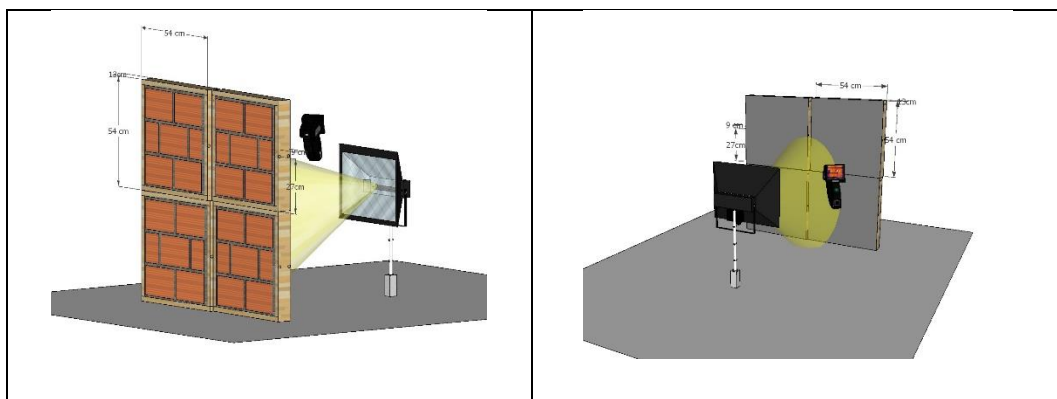
5. Revestimento posterior: A face posterior de todas as paredes recebeu argamassa convencional, padronizando as condições de análise.
6. Instrumentação: Termopares do tipo K foram embutidos horizontalmente nas paredes, posicionados em dois pontos estratégicos: na face frontal (próximo à superfície exposta à radiação) e na face posterior (não irradiada), ambos no plano médio da parede. Essa configuração permitiu o monitoramento da evolução térmica interna durante todo o ensaio.

Após a conclusão da montagem, as quatro paredes foram posicionadas lado a lado, compondo um módulo quadrado para exposição à radiação térmica controlada por lâmpadas halógenas, simulando condições de incidência solar direta sobre fachadas.

Essa metodologia de montagem visou garantir condições padronizadas entre os protótipos, reprodutibilidade dos resultados e confiabilidade na comparação entre as diferentes formulações de argamassa quanto ao seu desempenho térmico.

A Tabela 4 apresenta, na parte superior, as ilustrações desenvolvidas digitalmente para planejamento dos protótipos de parede (esquerda e direita), enquanto a parte inferior mostra as fotografias correspondentes dos protótipos efetivamente construídos no laboratório.

**Tabela 4 – Comparativo entre projeção e execução dos protótipos de parede**





Fonte: autor, 2025

### 3.6 ENSAIO TÉRMICO

Os três mecanismos que governam o fluxo térmico em sistemas estão presentes no processo de aquecimento e resfriamento de edificações:

a) **Condução:** é o principal mecanismo através da espessura da parede revestida, onde o calor se propaga dentro dos materiais sólidos e da pasta. A condutividade térmica efetiva da argamassa influencia diretamente a taxa de fluxo de calor. A adição de vermiculita reduz essa condutividade ao introduzir bolsões de ar e aumentar a resistência térmica interna, retardando a passagem do calor.

b) **Convecção:** pode ocorrer superficialmente na face exposta (entre o revestimento e o ar ambiente) ou dentro de pequenos espaços de contato. No ensaio, a configuração visa minimizar convecção interna indesejada (por exemplo, isolando o conjunto), mas a convecção na superfície externa pode afetar as medições superficiais; por isso, é importante considerar sua influência ao interpretar as imagens termográficas.

c) **Radiação:** a fonte de calor simulando o sol (lâmpadas halógenas) entrega energia via radiação para a face frontal. A absorção e emissão radiativa do revestimento influenciam a temperatura superficial e, por conseguinte, o gradiente de temperatura que impulsiona a condução interna. A interação combinada desses mecanismos define o comportamento térmico observado nos protótipos. A metodologia experimental adaptada permite separar, de forma prática, os efeitos (por exemplo, comparar temperatura frontal irradiada vs. posterior e interna) para inferir a eficiência do isolamento proporcionado pelos diferentes traços com vermiculita

Inicialmente previa-se a utilização do método da Placa Quente Protegida, conforme a norma ABNT NBR 15220-4, porém esta norma encontra-se atualmente revogada. Como alternativa, considerou-se a metodologia conforme a

norma americana ASTM C177-19 "*Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*". Contudo, devido a limitações técnicas e de tempo, este método não foi implementado nesta etapa do estudo. Em vista disso, optou-se por desenvolver um ensaio experimental comparativo, com base em simulações práticas de radiação térmica em laboratório, para investigar o comportamento térmico das argamassas formuladas com diferentes percentuais de vermiculita. Este procedimento visa comparar, de forma quantitativa, a capacidade de isolamento térmico proporcionado por cada traço, reproduzindo condições semelhantes às da exposição solar real.

Para validar o ensaio térmico, utilizou-se como referência a parede revestida com argamassa convencional, de modo que os traços com 15 %, 20 % e 25 % de vermiculita pudessem ser comparados à resposta térmica dessa amostra-padrão.

A literatura técnica mostra que os mecanismos de condução, convecção e radiação governam a transferência de calor em sistemas de envoltória, e que a microestrutura granular afeta diretamente a condutividade efetiva das argamassas (INCROPERA; DEWITT, 2003; GILARDONI, 2023).

Os fenômenos considerados foram:

- Condução interna: propagação do calor da face exposta para o interior e posterior;
- Radiação incidente: simulada por lâmpadas halógenas apontadas à superfície frontal;
- Convecção superficial: troca de calor entre a argamassa e o ar ambiente.

Com base nisso, levantaram-se as seguintes hipóteses:

1. As argamassas com vermiculita apresentariam condutividade térmica aparente inferior à convencional, devido à porosidade e aos bolsões de ar;
2. O aumento do teor de vermiculita reduziria progressivamente o aquecimento interno sob a mesma carga térmica;
3. O gradiente de temperatura entre superfície e núcleo seria menor nas misturas com vermiculita, indicando maior atraso na propagação de calor;

A face posterior exibiria variação térmica menos acentuada nas paredes com vermiculita, evidenciando menor transferência para o ambiente interno.

O ensaio comparativo utilizou quatro protótipos de parede (54 cm de altura × 54 cm de largura × 11 cm de espessura), construídos com cinco tijolos de seis

furos e dois medianos, recebendo chapisco para melhorar a aderência. Cada um foi revestido na face frontal com argamassa convencional (referência), 15 %, 20 % ou 25 % de vermiculita; todas as faces posteriores receberam argamassa convencional.

As paredes formaram um módulo quadrado e foram submetidas, frontalmente, a radiação térmica uniforme e constante de lâmpadas halógenas, enquanto a face oposta permaneceu sem incidência direta. A instrumentação incluiu termopares embutidos horizontalmente em dois pontos de cada parede (frontal e posterior), para registrar a temperatura interna no plano médio, e termômetros laser para aferir a temperatura superficial.

As medições ocorreram a cada 5 min, durante 3 h, permitindo a comparação direta do comportamento térmico entre os diferentes traços.

Os resultados foram interpretados à luz dos mecanismos de condução, convecção e radiação e comparados ao traço de referência para validar as hipóteses propostas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DENSIDADE DE MASSA ESPECIFICA

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos de densidade de massa específica do cimento CII Z por indicação volumétrica. Observa-se que os valores dos recipientes 2 e 3 estão coerentes com os limites esperados na literatura, resultando em uma média de 2,98 cm<sup>3</sup>.

**Tabela 5** – Densidade específica do cimento CII Z

# de recipientes	Densidade de massa específica (cm <sup>3</sup> )
1	3.22
2	2.98
3	2.96

Fonte: autor, 2025.

A Tabela 6, apresenta os valores de densidade específica da cal, com indicação volumétrica. Os valores dos recipientes 2 e 3 estão dentro dos limites apresentados pela literatura, com uma leitura da média de 2.41 cm<sup>3</sup>.

**Tabela 6** – Densidade específica da cal

# de recipientes	Densidade de massa específica (cm <sup>3</sup> )
1	3.37
2	2.41
3	2.41

Fonte: autor, 2025.

### 4.2 GRANULOMETRIA DA VERMICULITA

A Tabela 7, mostra a massa dos grãos que ficaram retidos nas peneiras, tendo uma massa total inicial de 317.08 g e uma massa final de 317.08 g; atendendo a diferença de 0.01 g, de modo que satisfaz a literatura levantada.

**Tabela 7 – Granulometria da vermiculita**

	Abertura (mm)	Massa (g)
Peneiras	4.8	-
	2.4	0.12
	1.2	263.95
	0.6	25.69
	0.3	9.89
	0.15	12.04
	fundo	5.38

Fonte: autor, 2025.

#### 4.3 GRANULOMETRIA DA AREIA

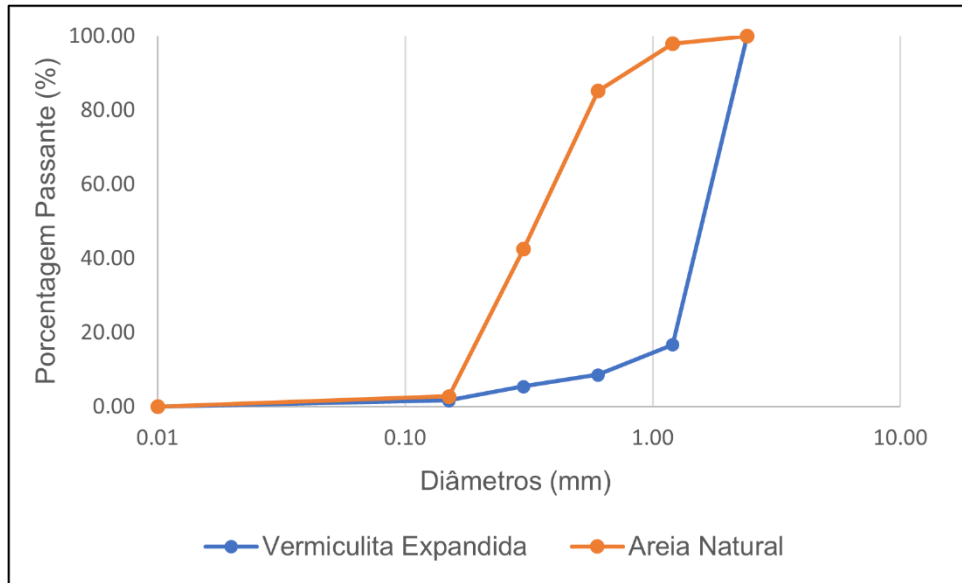
A Tabela 8, exibe a massa dos grãos de areia que ficaram retidos nos diâmetros das respectivas peneiras, com uma massa inicial de 349.81 g e massa final de 349.78 g; deixando uma diferença de 0.03 g, esta diferença está dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211:2022.

**Tabela 8 – Granulometria da areia**

	Abertura (mm)	Massa (g)
Peneiras	4.8	-
	2.4	0.05
	1.2	7.42
	0.6	44.61
	0.3	148.91
	0.15	139.12
Fundo	-	9.67

Fonte: autor, 2025.

A Figura 5, apresenta as curvas granulométricas da areia natural e da vermiculita expandida utilizadas na composição das argamassas, relacionando a porcentagem passante em função do diâmetro das partículas, em escala logarítmica.

**Figura 5 - Curva granulométrica da Vermiculita e da Areia**

Fonte: autor, 2025.

Observa-se que a areia natural apresenta uma distribuição granulométrica mais contínua e concentrada em faixas intermediárias de diâmetro, característica típica de agregados miúdos empregados em argamassas convencionais. Em contraste, a vermiculita expandida apresenta uma curva mais inclinada e deslocada para maiores diâmetros, evidenciando a predominância de partículas grossas, leves e altamente porosas, resultantes do seu processo de expansão térmica.

A comparação entre as curvas evidencia diferenças significativas no comportamento granulométrico dos materiais, as quais influenciam diretamente o desempenho das argamassas. Enquanto a areia natural favorece um empacotamento mais eficiente dos grãos, contribuindo para maior densidade e resistência mecânica, a vermiculita expandida tende a aumentar o volume de vazios da matriz cimentícia, reduzindo a massa específica e a condutividade térmica do material. Esse comportamento explica a melhoria no desempenho térmico observada nas argamassas com vermiculita, bem como a redução das propriedades mecânicas, reforçando a necessidade do uso do Método de Empacotamento Compressível para equilibrar as proporções dos constituintes e otimizar o desempenho global das misturas.

#### 4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A Tabela 9 mostra a porcentagem de absorção de água, a porcentagem é um parâmetro que a argamassa tem para avaliar sua durabilidade, desempenho e resistência, podendo medir a capacidade da argamassa para absorver e reter água ao longo do tempo, este fator influencia nas propriedades mecânicas da argamassa. Neste caso obteve-se um parâmetro de 16%.

**Tabela 9** – % de absorção de água.

mB	mA	Abs
(g)	(g)	(%)
1276.4	1094.95	16.57

Fonte: autor, 2025.

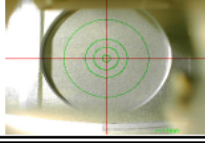
Onde:

- a) Abs: é a absorção de água expressa em porcentagem
- b) mA: é a massa da amostra seca em estufa a  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ , expressa em gramas (g);
- c) mB: é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, expressa em gramas (g).

#### 4.5 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA AREIA E DO CIMENTO

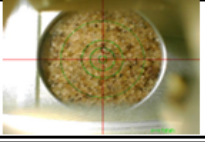
A análise da composição química do cimento e da areia, ilustrada nas Figuras 6 e 7, foi realizada com o objetivo de garantir controle de qualidade e compreender as influências dos principais óxidos sobre o comportamento físico, mecânico e de durabilidade das argamassas. Observou-se que a areia é predominantemente composta por óxido de silício e matéria carbonácea, enquanto o cimento apresenta alto teor de óxido de cálcio, compatível com sua função aglutinante e reatividade hidráulica. Essas características fundamentam a compatibilidade e o desempenho esperado das misturas.

Figura 6 - Óxido do cimento

Sample Information								
Sample Name	óxido_cimento							
Meas. Date	2024/09/03 11:25:40							
Comment	Blanço de carbono							
Group	Easy_Ar_C							
Operator	Gabriel Nardi F.							
								
Measurement Condition					Collimator	10mm	Atmos.	Air
Channel	kV	uA	Filter	Acq.	Analysis	Time	DT%	
Al-U	50	88-Auto	----	0 - 40	0.00-40.00	Live- 100		30
Na-Sc	15	430-Auto	----	0 - 20	0.00- 4.40	Live- 100		31
Quantitative Result								
Analyte	Result			Std.Dev.	Calc.Proc	Line	Intensity	
CaO	15.789	%		[ 0.012]	Quan-FP	CaKa	335.0566	
SiO2	4.377	%		[ 0.035]	Quan-FP	SiKa	2.9870	
SO3	1.137	%		[ 0.006]	Quan-FP	S Ka	5.3370	
Al2O3	0.870	%		[ 0.055]	Quan-FP	AlKa	0.1225	
Fe2O3	0.832	%		[ 0.002]	Quan-FP	FeKa	215.8757	
K2O	0.386	%		[ 0.002]	Quan-FP	K Ka	7.1659	
TiO2	0.110	%		[ 0.001]	Quan-FP	TiKa	6.3474	
SrO	0.029	%		[ 0.000]	Quan-FP	SrKa	42.6488	
MnO	0.018	%		[ 0.000]	Quan-FP	MnKa	3.8026	
V2O5	0.009	%		[ 0.001]	Quan-FP	V Ka	0.6688	
ZnO	0.006	%		[ 0.000]	Quan-FP	ZnKa	3.6563	
ZrO2	0.005	%		[ 0.000]	Quan-FP	ZrKa	6.3511	
Cr2O3	0.004	%		[ 0.000]	Quan-FP	CrKa	0.5844	
CuO	0.002	%		[ 0.000]	Quan-FP	CuKa	1.1794	
Rb2O	0.002	%		[ 0.000]	Quan-FP	RbKa	2.6541	
PbO	0.001	%		[ 0.000]	Quan-FP	PbLb1	0.6786	
Y2O3	0.001	%		[ 0.000]	Quan-FP	Y Ka	1.1418	
C	76.422	%		[-----]	Balance	-----	-----	

Fonte: autor, 2025.

Figura 7 - Óxido de areia

Sample Information								
Sample Name	óxido_areia							
Meas. Date	2024/09/03 11:30:59							
Comment	Blanço de carbono							
Group	Easy_Ar_C							
Operator	Gabriel Nardi F.							
								
Measurement Condition					Collimator	10mm	Atmos.	Air
Channel	kV	uA	Filter	Acq.	Analysis	Time	DT%	
Al-U	50	113-Auto	----	0 - 40	0.00-40.00	Live- 100		30
Na-Sc	15	1000-Auto	----	0 - 20	0.00- 4.40	Live- 100		17
Quantitative Result								
Analyte	Result			Std.Dev.	Calc.Proc	Line	Intensity	
SiO2	11.616	%		[ 0.036]	Quan-FP	SiKa	9.3800	
Al2O3	0.126	%		[ 0.014]	Quan-FP	AlKa	0.0208	
Fe2O3	0.088	%		[ 0.000]	Quan-FP	FeKa	70.6294	
CaO	0.049	%		[ 0.000]	Quan-FP	CaKa	1.4815	
K2O	0.044	%		[ 0.000]	Quan-FP	K Ka	0.9303	
TiO2	0.020	%		[ 0.000]	Quan-FP	TiKa	3.3375	
MnO	0.003	%		[ 0.000]	Quan-FP	MnKa	1.8166	
V2O5	0.003	%		[ 0.000]	Quan-FP	V Ka	0.6386	
Cr2O3	0.001	%		[ 0.000]	Quan-FP	CrKa	0.5932	
OsO4	0.001	%		[ 0.000]	Quan-FP	OsLa	0.6585	
HgO	0.001	%		[ 0.000]	Quan-FP	HgLa	1.0556	
ZnO	0.001	%		[ 0.000]	Quan-FP	ZnKa	1.5748	
SrO	0.001	%		[ 0.000]	Quan-FP	SrKa	2.9599	
CuO	0.000	%		[ 0.000]	Quan-FP	CuKa	0.7088	
GeO2	0.000	%		[ 0.000]	Quan-FP	GeKa	0.7946	
Rb2O	0.000	%		[ 0.000]	Quan-FP	RbKa	1.2405	
Y2O3	0.000	%		[ 0.000]	Quan-FP	Y Ka	0.7002	
Ag2O	0.000	%		[ 0.000]	Quan-FP	AgKa	0.1794	
C	88.047	%		[-----]	Balance	-----	-----	

Fonte: autor, 2025.

A areia na sua maior composição química possui óxido de silício, matéria carbonada e o cimento possui óxido de cálcio na sua composição química.

#### 4.6 TRAÇOS DE ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE VERMICULITA.

A Tabela 10 apresenta os traços das argamassas com adição de vermiculita (15%, 20% e 25%) definidos a partir da aplicação do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC). Estão indicadas as proporções de cimento, cal, areia e vermiculita utilizadas em cada formulação, baseadas na otimização granular para equilíbrio entre trabalhabilidade e desempenho térmico/mecânico.

**Tabela 10** – traços das argamassas com adição de vermiculita. (MEC)

Porcentual (%)	Cimento (kg)	Cal (kg)	Areia (kg)	Vermiculita (kg)
15	1	0.56	5.54	1.19
20	1	0.56	5.01	1.14
25	1	0.56	4.50	1.97

Fonte: autor, 2025.

Cabe esclarecer que as denominações dos traços com 15%, 20% e 25% de vermiculita referem-se a valores nominais de substituição parcial da areia, utilizados para fins de identificação e comparação entre as misturas, não representando percentuais absolutos exatos na composição final das argamassas. Isso ocorre porque o Método de Empacotamento Compressível (MEC) considera o sistema granular como um conjunto multicomponente, no qual cimento, cal, areia natural e vermiculita expandida possuem distribuições granulométricas, massas específicas e volumes aparentes distintos, influenciando diretamente o empacotamento global da mistura.

Nesse contexto, a proporção efetiva de vermiculita na matriz cimentícia pode apresentar pequenas variações em relação aos valores nominais adotados, uma vez que o MEC busca otimizar o empacotamento dos grãos e a compactação da mistura, e não a substituição volumétrica ou mássica exata de um único material. Assim, os teores de 15%, 20% e 25% devem ser compreendidos como faixas representativas de adição de vermiculita, definidas a partir do equilíbrio entre desempenho em estado fresco, viabilidade de aplicação e comportamento térmico,

garantindo coerência metodológica e comparabilidade entre os traços analisados.

#### 4.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA

Com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico das argamassas desenvolvidas, especialmente em relação à resistência à compressão, realizou-se o ensaio laboratorial conforme os procedimentos da norma NBR 13279. Foram moldados corpos de prova prismáticos (4 × 4 × 16 cm) de cada um dos traços formulados. Os corpos de prova foram rompidos após cura de 7 e 28 dias, utilizando prensa hidráulica, e foram registrados os valores médios de ruptura de cada traço para comparação entre a argamassa convencional e as argamassas com 15%, 20% e 25% de vermiculita expandida. Observou-se uma incongruência nos resultados do traço com 20% de vermiculita, que exigirá investigação adicional para entender sua origem (possível heterogeneidade na mistura ou erro experimental).

A Tabela 11 apresenta as resistências à compressão e tração nos diferentes tempos de cura, com as médias e respectivos desvios, permitindo analisar o compromisso entre desempenho mecânico e incorporação de vermiculita.

**Tabela 11** – resistência a compressão e tração nos diferentes tempos de cura

Argamassas	Resistencia a compressão e tração (Mpa)					
	7 días		14 días		28 días	
	fck	desvío	fck	desvío	fck	desvío
A0	21.29	3.09	21.8	2.58	27.55	3.17
A15	5.56	3	7.28	1.28	8.56	0.89
A20	13.02	7.01	17.03	3.03	20.01	3.15
A25	6.29	3.39	8.23	1.45	9.68	0.37

Fonte: autor, 2025.

Como esperado, as formulações com vermiculita exibiram redução nas resistências em comparação à referência convencional, o que pode ser atribuído à maior porosidade e menor densidade da matriz. No entanto, o comportamento atípico do traço com 20% sugere que fatores experimentais adicionais influenciaram os resultados, devendo ser reavaliados em ensaios subsequentes.

## 5. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO

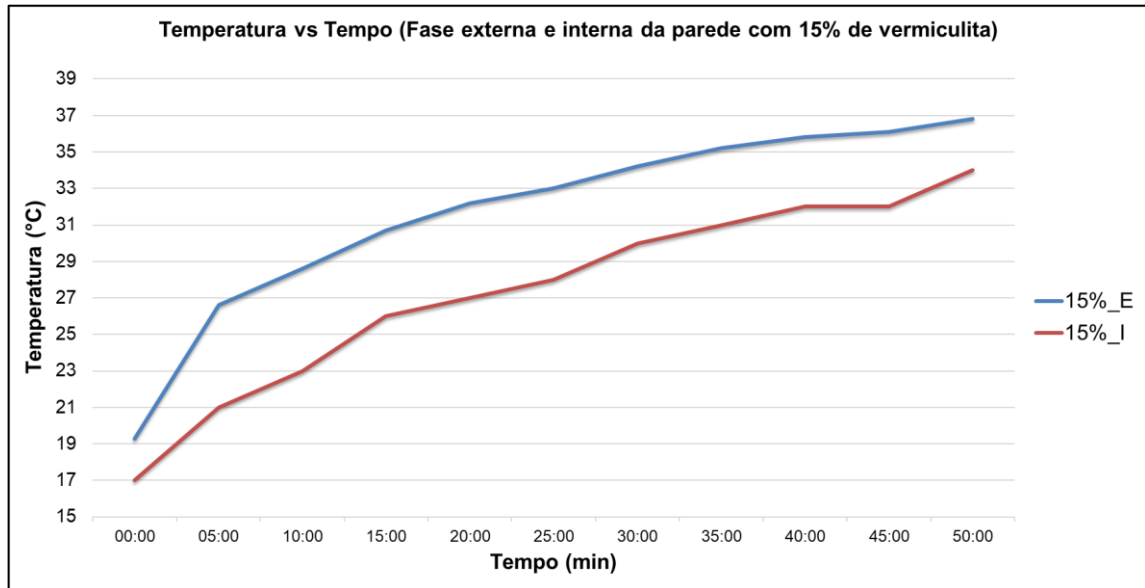
### 5.1 ENSAIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DE DESEMPENHO TÉRMICO

O ensaio comparativo com as quatro paredes revestidas permitiu observar diretamente o comportamento térmico das argamassas com diferentes teores de vermiculita frente à radiação simulada. As paredes foram montadas na estrutura descrita na metodologia, expostas durante três horas a lâmpadas halógenas direcionadas à face frontal, enquanto se registravam simultaneamente as temperaturas internas (por termopares embutidos) e superficiais externas (por termômetro laser) em intervalos de cinco minutos. Ao final do ensaio, também se utilizaram câmeras termográficas para mapear a distribuição térmica superficial das faces exposta e posterior.

No entanto, para garantir maior precisão e confiabilidade nas análises, a discussão dos resultados será concentrada nos primeiros 50 minutos do experimento. Isso se deve ao fato de que, após esse intervalo, os dados passaram a apresentar discrepâncias experimentais, como elevações anômalas da temperatura interna em relação à externa, especialmente em algumas paredes, o que não condiz com o comportamento físico esperado. Assim, a análise comparativa entre os traços será realizada com base no período inicial do ensaio, no qual os resultados mostram maior fidedignidade e aderência aos mecanismos de transferência de calor descritos na literatura.

Figura 8, apresenta a evolução da temperatura nas faces externa (15%\_E) e interna (15%\_I) da parede revestida com argamassa contendo 15% de vermiculita ao longo dos primeiros 50 minutos de exposição à radiação térmica constante. Os valores foram registrados a cada 5 minutos, permitindo acompanhar em detalhes a resposta térmica do sistema durante o período em que os resultados mantiveram maior consistência experimental.

**Figura 8 - Curvas comparativas (fase externa e interna, 15% de vermiculita)**



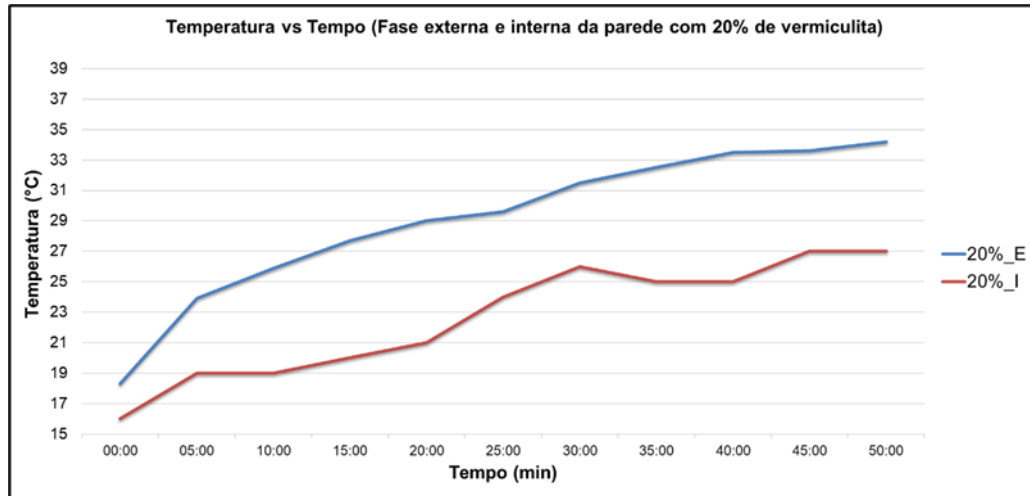
Fonte: autor, 2025.

A análise dos dados até o minuto 50 evidencia que a incorporação de 15% de vermiculita ao revestimento foi capaz de criar um gradiente térmico estável entre as faces externa e interna da parede. Essa diferença demonstra que a argamassa com vermiculita atua como obstáculo à transferência de calor, retardando o aquecimento do interior em relação à face exposta.

Além disso, a tendência de crescimento contínuo, porém mais lento, da temperatura interna, reflete o comportamento esperado de materiais com maior porosidade e capacidade de isolamento, características atribuídas à vermiculita.

A Figura 9, apresenta a evolução das temperaturas externa e interna na parede revestida com argamassa contendo 20% de vermiculita, durante os primeiros 50 minutos de exposição à radiação térmica simulada. A curva azul (20%\_E) representa os valores registrados na superfície externa do revestimento, enquanto a curva vermelha (20%\_I) indica as temperaturas captadas no plano interno, próximas ao núcleo da parede.

**Figura 9-** Curvas comparativas (fase externa e interna, 20% de vermiculita)



Fonte: autor, 2025.

Logo nos minutos iniciais, observa-se uma elevação significativa da temperatura na face externa, que atinge aproximadamente 33 °C ao final do período analisado, partindo de cerca de 18 °C. A superfície interna, por sua vez, apresenta um aumento mais moderado, partindo de aproximadamente 16 °C e alcançando cerca de 27 °C aos 50 minutos. A diferença entre as temperaturas externa e interna tende a aumentar nos primeiros 25 minutos, evidenciando o retardo térmico proporcionado pela argamassa modificada. Após esse intervalo, ambas as curvas continuam ascendentes, porém a taxa de crescimento da temperatura interna permanece inferior à da externa, indicando que o material atua como uma barreira parcial à transferência de calor.

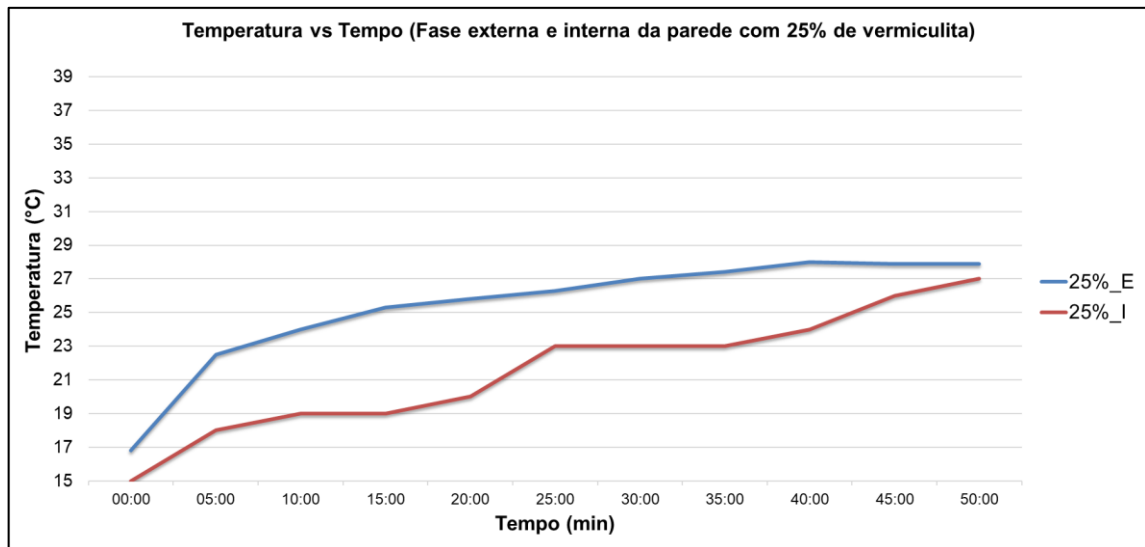
Os dados demonstram que a argamassa com 20% de vermiculita contribui para atenuar o fluxo de calor da superfície externa para o interior da parede, proporcionando um gradiente térmico estável e consistente ao longo dos 50 minutos analisados. Esse comportamento reflete o efeito isolante da vermiculita, cujas propriedades de baixa condutividade e alta porosidade dificultam a propagação rápida do calor.

No entanto, observa-se que a diferença entre as temperaturas externa e interna, apesar de significativa, é ligeiramente menor do que aquela registrada para a parede com 15% de vermiculita no mesmo intervalo de tempo, sugerindo que o teor de 20% também oferece desempenho relevante, mas com características distintas de difusão térmica.

A Figura 10, ilustra a evolução das temperaturas externa e interna na

parede revestida com argamassa contendo 25% de vermiculita durante os 50 primeiros minutos de exposição à radiação térmica. A linha azul (25%\_E) representa os valores na superfície exposta, enquanto a linha vermelha (25%\_I) corresponde às medições internas próximas ao núcleo da parede.

**Figura 10-** Curvas comparativas (fase externa e interna, 25% de vermiculita)



Fonte: autor, 2025.

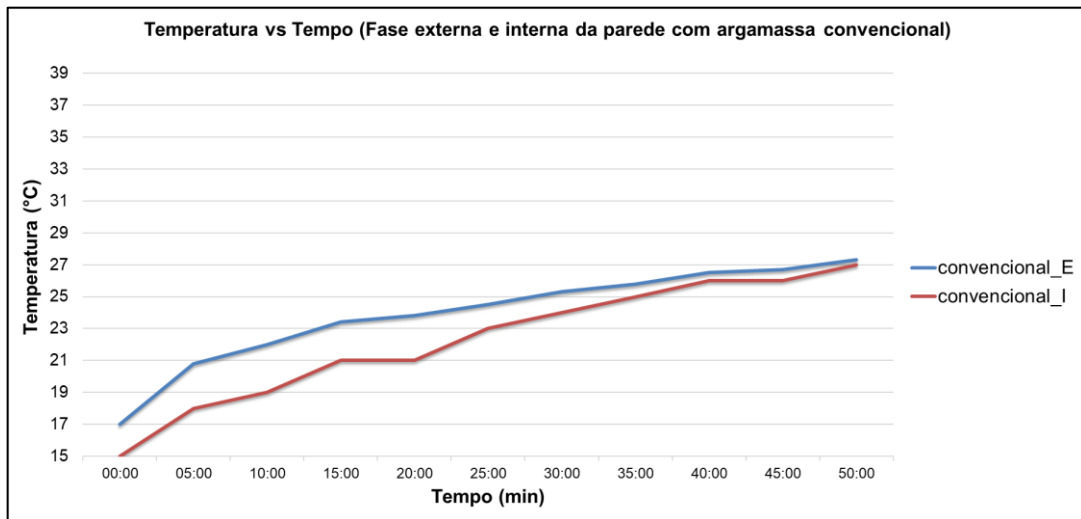
Nos minutos iniciais, observa-se um aumento significativo na temperatura externa, partindo de aproximadamente 17 °C e chegando a cerca de 28 °C ao final do período analisado. A temperatura interna, por sua vez, começa próxima de 15 °C e atinge em torno de 26 °C após 50 minutos. O gradiente entre as temperaturas externa e interna é bem definido ao longo de todo o experimento, com a diferença mais acentuada nos primeiros 25 minutos e uma aproximação gradual das curvas conforme o tempo avança.

O comportamento observado no gráfico indica que a parede com 25% de vermiculita apresenta o menor aumento de temperatura tanto na superfície externa quanto, especialmente, na face interna, se comparada aos traços com menor teor de vermiculita. Isso sugere que o maior conteúdo de vermiculita potencializa o efeito isolante do revestimento, dificultando a passagem do calor para o interior da parede. A diferença mantida entre as temperaturas demonstra um bom desempenho em retardar o aquecimento do núcleo do elemento construtivo, o que é desejável para a eficiência térmica. Ressalta-se que, embora ambas as temperaturas aumentem com

o tempo, o traço de 25% de vermiculita é o que mais limita a transferência térmica para o ambiente interno, consolidando-se como uma solução promissora para aplicações em fachadas expostas à radiação intensa.

A Figura 11 apresenta a evolução das temperaturas externa e interna da parede revestida com argamassa convencional nos primeiros 50 minutos de exposição à radiação térmica. A linha azul (convencional\_E) indica as leituras da superfície exposta, enquanto a linha vermelha (convencional\_I) corresponde às medições internas realizadas no plano médio da parede.

**Figura 11-** Curvas comparativas (fase externa e interna, argamassa convencional)



Fonte: autor, 2025.

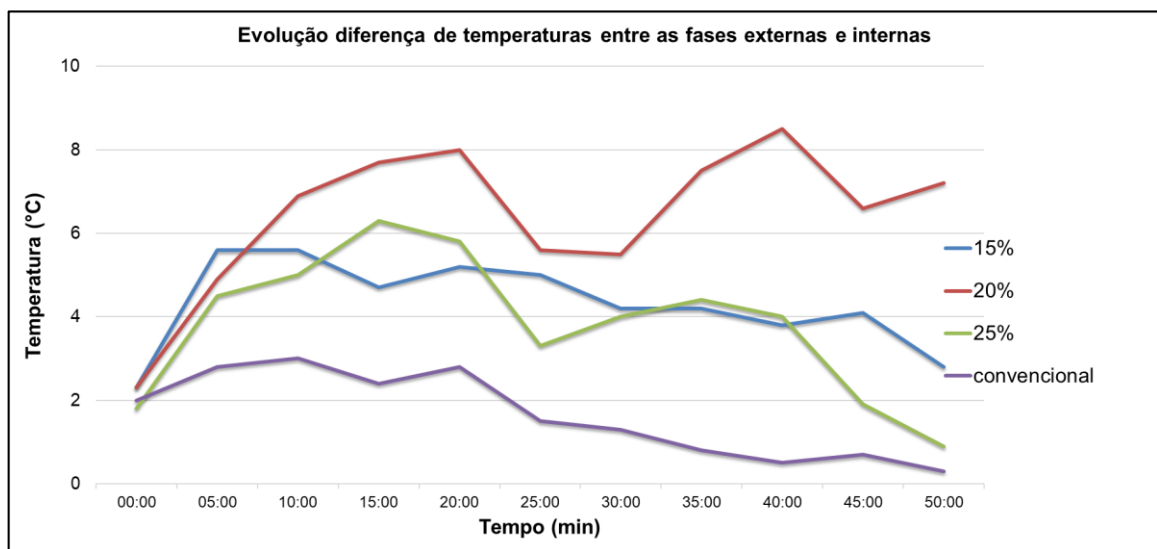
Logo nos minutos iniciais, observa-se uma elevação progressiva em ambas as temperaturas, partindo de valores próximos a 17 °C (superfície) e 15 °C (interna). Ao final do período analisado, as temperaturas atingem cerca de 27 °C (externa) e 26 °C (interna), com as duas curvas mantendo-se bastante próximas durante todo o intervalo.

O comportamento do gráfico revela que, para a argamassa convencional, o gradiente térmico entre a face externa e interna é relativamente pequeno e permanece quase constante ao longo do ensaio. Isso indica que a transferência de calor através do revestimento convencional ocorre de forma mais rápida, resultando em um aquecimento praticamente simultâneo das duas faces. A diferença reduzida entre as temperaturas evidencia uma menor resistência térmica em comparação com os traços modificados com vermiculita, o que implica em menor

capacidade de isolamento térmico para fachadas submetidas à radiação solar direta.

A Figura 12 apresenta a evolução, ao longo dos primeiros 50 minutos de exposição térmica, da diferença entre as temperaturas da face externa e da face interna dos protótipos de parede, para cada traço de argamassa: 15 %, 20 %, 25 % de vermiculita e convencional. O valor plotado em cada instante de tempo corresponde à subtração entre a temperatura externa e a interna, refletindo o gradiente térmico instantâneo em cada sistema.

**Figura 12-** evolução da diferença de temperatura entre a fase externa vs a interna



Fonte: autor, 2025.

Observa-se que a argamassa convencional (linha roxa) mantém a menor diferença de temperatura ao longo de todo o ensaio, com valores próximos a 2 °C, indicando que o calor é rapidamente transmitido do exterior para o interior da parede. Já os traços com vermiculita apresentam diferenças maiores, especialmente para 20 % (linha vermelha), que atinge picos acima de 8 °C. Os traços de 15 % (azul) e 25 % (verde) apresentam gradientes intermediários, com comportamento flutuante ao longo do tempo.

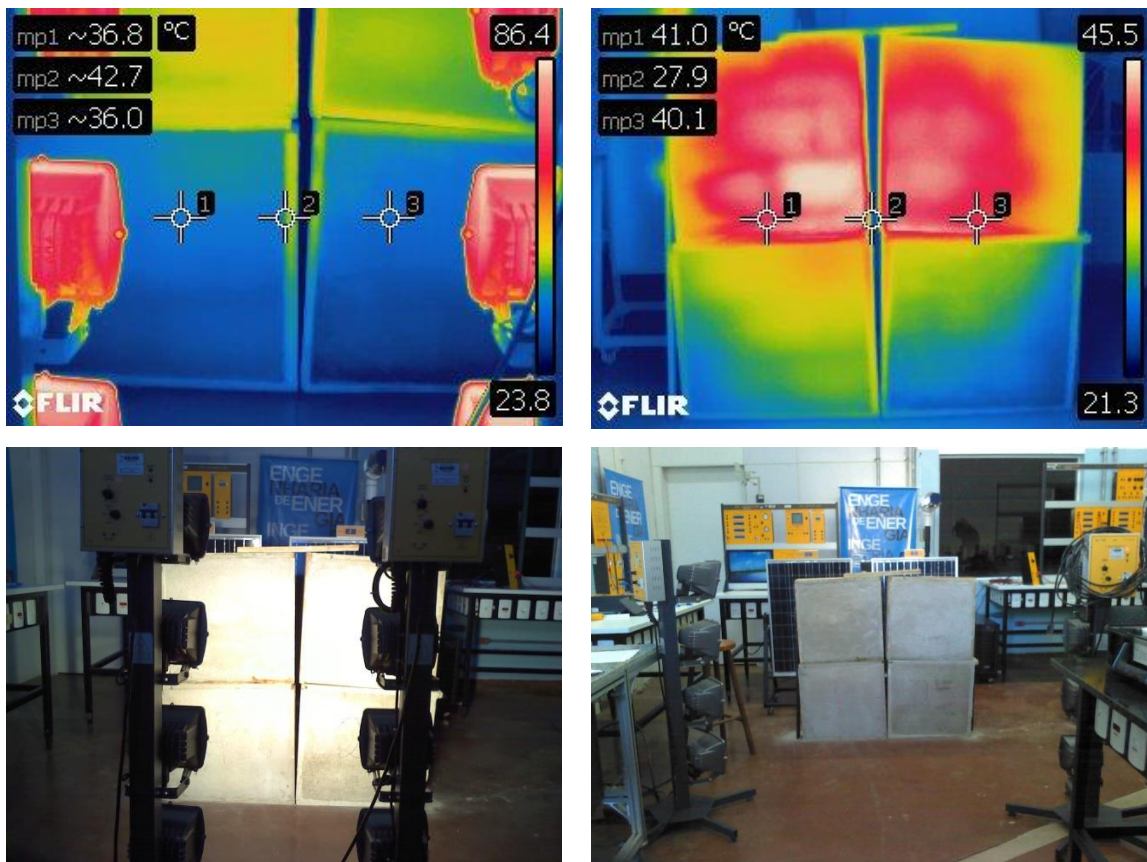
Essa análise revela que a presença da vermiculita aumenta o retardamento à transferência de calor entre as faces da parede, criando uma barreira térmica mais eficiente do que a argamassa convencional. No entanto, a flutuação dos gradientes nos traços com vermiculita pode estar associada à variação das propriedades do material ou à influência de pequenas diferenças experimentais (como

heterogeneidade no revestimento ou pequenas variações de irradiação). Mesmo assim, fica evidente que, quanto maior o gradiente, mais tempo o calor leva para atingir o interior da parede, indicando maior isolamento térmico.

No geral, o traço com 20 % de vermiculita destacou-se pelo maior gradiente térmico na maior parte do ensaio, sugerindo bom desempenho isolante, enquanto a argamassa convencional demonstrou o menor potencial de isolamento, por transmitir rapidamente o calor recebido na superfície externa para o ambiente interno.

A Tabela 12 apresenta imagens capturadas durante o ensaio comparativo de desempenho térmico em laboratório, evidenciando a distribuição não uniforme da radiação sobre as faces externas das paredes. As fotografias termográficas (linha superior) mostram pontos de medição (mp1, mp2, mp3) com temperaturas discrepantes. Nas imagens visuais (linha inferior), observa-se o arranjo das lâmpadas halógenas e o posicionamento dos quatro protótipos, destacando diferenças na incidência luminosa sobre cada traço de argamassa.

**Tabela 12** – Imagens do ensaio experimental comparativo



Fonte: autor, 2025.

O ensaio experimental comparativo, realizado com os quatro protótipos de parede, permitiu avaliar de forma sistemática o comportamento térmico das diferentes argamassas de revestimento diante da exposição à radiação simulada. A análise conjunta dos gráficos revela que a presença de vermiculita expandida nos traços de argamassa proporcionou, de modo geral, uma redução do fluxo de calor para o interior das paredes, especialmente para o traço com 25% de adição, o qual apresentou o menor gradiente térmico entre as faces externa e interna ao longo do tempo.

Ao comparar o desempenho dos diferentes traços, verifica-se que a diferença de temperatura entre a face exposta e a face interna foi sempre menor nas paredes com maiores teores de vermiculita, evidenciando o efeito isolante deste material. Tal comportamento é atribuído à maior porosidade e ao aprisionamento de ar proporcionado pela vermiculita, o que dificulta a condução do calor. Os resultados corroboram a hipótese inicial de que o aumento da quantidade de agregado leve reduz a transferência térmica, ainda que as diferenças entre os traços de 15% e 20% tenham sido menos acentuadas do que o esperado, possivelmente em função das condições experimentais, como a não uniformidade da radiação e pequenas variações no posicionamento dos termopares.

Além disso, ficou evidente que o traço convencional apresentou maior proximidade entre as curvas de temperatura externa e interna, chegando em alguns momentos a registrar valores internos semelhantes ou superiores aos externos, um fenômeno provavelmente relacionado ao acúmulo térmico e à menor resistência ao fluxo de calor pela ausência de material isolante. Essa observação justifica o descarte de alguns dados atípicos e reforça a necessidade de replicação do ensaio para garantir maior robustez aos resultados.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A incorporação de vermiculita expandida como agregado parcial em argamassas de revestimento mostrou-se eficaz do ponto de vista térmico, ao reduzir a condutividade aparente das misturas. Embora a formulação com 25 % de vermiculita tenha registrado o melhor desempenho como barreira térmica em conformidade com sua maior porosidade e efeito isolante, esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois irregularidades na distribuição da irradiação sobre os protótipos podem ter comprometido as medições das argamassas de 15 % e 20 %. Confirma-se, contudo, a tendência de aprimoramento térmico com a adição de vermiculita, recomendando-se a repetição dos ensaios com controle mais rigoroso da fonte de calor para validar a superioridade do traço de 25 %.

O Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) se mostrou adequado para dosar as argamassas de modo racional, integrando parâmetros de estado fresco trabalhabilidade, massa específica e teor de ar incorporado e otimizando a composição granulométrica. A compatibilidade entre vermiculita e areia natural possibilitou uma mistura com consistência apropriada para aplicação.

No aspecto mecânico, as argamassas contendo vermiculita apresentaram resistência à compressão inferior à referência convencional, reflexo de sua porosidade elevada, menor rigidez e densidade reduzida. O traço com 20 % de vermiculita obteve valores próximos à argamassa padrão, mas tais resultados revelaram incongruências em relação ao desempenho dos traços de 15 % e 25 %, sugerindo possíveis falhas experimentais ou variações na cura. Assim, recomenda-se repetir os ensaios de compressão sob condições padronizadas para assegurar conclusões robustas.

A aderência ao substrato, avaliada sobre chapisco convencional, mostrou-se satisfatória em todas as formulações, reforçando a viabilidade prática do uso das argamassas modificadas.

A metodologia alternativa de avaliação térmica, baseada em protótipos de parede submetidos à radiação simulada, provou-se eficaz para comparar diretamente as formulações. Apesar dos limites relativos à uniformidade da irradiação, conseguiu-se quantificar o efeito isolante e caracterizar os gradientes de temperatura entre superfícies e interior.

Para investigações futuras, sugere-se:

1. Desenvolver e validar uma bancada de placa quente protegida (ASTM C177-19) para mensurar com precisão a condutividade térmica;
2. Otimizar a distribuição radiativa e reduzir as incertezas no ensaio de protótipos;
3. Aperfeiçoar o desempenho mecânico por meio de ajustes de traço, uso de aditivos ou inclusão de fibras;
4. Avaliar a durabilidade em condições reais ciclos térmicos, umidade e envelhecimento;
5. Realizar estudos numéricos e microestruturais sobre a interação vermiculita–matriz cimentícia.

Este trabalho avança soluções construtivas mais eficientes em termos energéticos e de conforto térmico para fachadas expostas, oferecendo uma base experimental e metodológica para a aplicação de argamassas com vermiculita em climas quentes.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho — Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro, 2013.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C177-19: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
- BALEK, V.; PÉREZ-RODRÍGUEZ, J. L.; PÉREZ-MAQUEDA, L. A.; ŠUBRT, J.; POYATO, J. **Thermal behaviour of ground vermiculite.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 88, p. 819–823, 2007. DOI: 10.1007/s10973-005-7462-5.
- Dos Santos, K., Figueirêdo, A., de Paiva, D., Maia, F., da Silva, J., da Silva, I., & Costa, I. (2023). **Fresh, hardened and thermal properties of coating mortars containing mineral additions and vermiculite.** *Materiales De Construcción*, 73(351), e318. <https://doi.org/10.3989/mc.2023.309622>
- AFFONSO, Stella Bruna Ananias; AZAMBUJA, Maximiliano dos Anjo. Avaliação tecnológica de morteros de revestimento produzidos com vermiculita expandida. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, [S. l.], v. 12, n. 87, 2024. DOI: 10.17271/23188472128720244841. Disponível em: [https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/gerenciamento\\_de\\_cidades/article/view/4841](https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/4841).
- AFFONSO, Stella Bruna Ananias. **O uso da vermiculita expandida em argamassas de revestimento.** 2024. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Faculdade de Arquitetura, Artes, Comunicação e Design, Universidade Estadual

Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Bauru, 2024. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/257432>.

BRAUHARDT, Bárbara. **Sistema construtivo em Wood Frame: Desempenho Térmico das Vedações Verticais e Potencial de Aplicação para Habitação Social. Foz do Iguaçu, PR:** Universidade Federal da Integração Latino-Americana – UNILA, 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/5471>.

GARCÍA-SOLÓRZANO, Luis A.; ESPARZA-LÓPEZ, Carlos J.; AL-OBAIDI, Karam M. **Environmental design solutions for existing concrete flat roofs in low-cost housing to improve passive cooling in western Mexico.** *Journal of Cleaner Production*, v. 277, art. 123992, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123992.

GILARDONI, Tamara Daiana Uribe. **Argamassas de projeção para reparo superficial de estruturas hidráulicas de concreto: avaliação de propriedades físico-mecânicas. Foz do Iguaçu, PR:** Universidade Federal da Integração Latino-Americana, 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/7570>. Acesso em: 4 ago. 2025.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

ROJAS-RAMÍREZ, Roberto Antonio et al. **The impact of vermiculite residual fines in the rheological properties of cement pastes formulated with different waste contents.** *Applied Clay Science*, v. 170, p. 97–105, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.01.017>

SILVA, Henrique Brito. **Controlador de transferências de calor (CTC) para ensaio de condutividade térmica pelo método da placa quente protegida.** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica). Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/30927>.

## APÊNDICE

### ÂNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO EXPERIMENTAL

**Tabela 13** - Evolução temporal da temperatura na face externa e interna das paredes

<b>Evolução temporal da temperatura parede com adição de 15% de vermiculita</b>		
<b>Tempo de exposição à radiação</b>	<b>Parede externa com incorporação de 15% de vermiculita</b>	<b>Parede interna com incorporação de 15% de vermiculita</b>
<b>(min)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>
00:00	19.3	17
05:00	26.6	21
10:00	28.6	23
15:00	30.7	26
20:00	32.2	27
25:00	33.0	28
30:00	34.2	30
35:00	35.2	31
40:00	35.8	32
45:00	36.1	32
50:00	36.8	34

<b>Evolução temporal da temperatura parede com adição de 20% de vermiculita</b>		
<b>Tempo de exposição à radiação</b>	<b>Parede externa com incorporação de 20% de vermiculita</b>	<b>Parede interna com incorporação de 20% de vermiculita</b>
<b>(min)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>
00:00	18.3	16
05:00	23.9	19
10:00	25.9	19
15:00	27.7	20
20:00	29.0	21
25:00	29.6	24
30:00	31.5	26
35:00	32.5	25
40:00	33.5	25
45:00	33.6	27
50:00	34.2	27

<b>Evolução temporal da temperatura parede com adição de 25% de vermiculita</b>		
<b>Tempo de exposição à radiação</b>	<b>Parede externa com incorporação de 25% de vermiculita</b>	<b>Parede interna com incorporação de 25% de vermiculita</b>
<b>(min)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>
00:00	16.8	15
05:00	22.5	18
10:00	24.0	19
15:00	25.3	19
20:00	25.8	20
25:00	26.3	23
30:00	27.0	23
35:00	27.4	23
40:00	28.0	24
45:00	27.9	26
50:00	27.9	27

<b>Evolução temporal da temperatura da parede com argamassa convencional</b>		
<b>Tempo de exposição à radiação</b>	<b>Parede de cimento convencional na face externa</b>	<b>Parede de cimento convencional na face interna</b>
<b>(min)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(°C)</b>
00:00	17.0	15
05:00	20.8	18
10:00	22.0	19
15:00	23.4	21
20:00	23.8	21
25:00	24.5	23
30:00	25.3	24
35:00	25.8	25
40:00	26.5	26
45:00	26.7	26
50:00	27.3	27