

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Faculdade de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**DESENVOLVIMENTO DE APARATO TÉRMICO ALTERNATIVO DE  
BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE  
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO ISOLANTES**

**Danielle Rios Garcia**

Área de concentração: Estruturas e Materiais

Linha de Pesquisa: Materiais e Componentes de Construção

Orientador: Prof. Dr. Pedro Kopschitz Xavier Bastos - UFJF

Juiz de Fora

2021

**Danielle Rios Garcia**

**DESENVOLVIMENTO DE APARATO TÉRMICO ALTERNATIVO DE  
BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE  
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO ISOLANTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Materiais e Componentes da Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Kopschitz Xavier Bastos

Juiz de Fora

2021

Garcia, Danielle Rios.

Desenvolvimento de Aparato Térmico Alternativo de baixo custo para medição da condutividade térmico de materiais de construção isolantes / Danielle Rios Garcia. -- 2021.

54 p.

Orientador: Pedro Kopschitz Xavier Bastos

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

1. edificações. 2. desempenho térmico. 3. materiais de construção. 4. condutividade. I. Bastos, Pedro Kopschitz Xavier , orient. II. Título.

**Danielle Rios Garcia**

Desenvolvimento de aparato térmico alternativo de baixo custo para medição da condutividade térmica de materiais de construção isolantes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em 06 de dezembro de 2021.

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dr. Pedro Kopschitz Xavier Bastos** - Orientador(a)

Universidade Federal de Juiz de Fora

**Prof.ª Dr.ª Thaís Mayra de Oliveira**

Universidade Federal de Juiz de Fora

**Prof.ª Dr.ª Júlia Castro Mendes**

Universidade Federal de Ouro Preto

Juiz de Fora, 23/11/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Kopschitz Xavier Bastos, Professor(a)**, em 10/12/2021, às 10:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thais Mayra de Oliveira, Professor(a)**, em 14/12/2021, às 13:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **Julia Castro Mendes, Usuário Externo**, em 14/12/2021, às



15:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf ([www2.ufjf.br/SEI](http://www2.ufjf.br/SEI)) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **0589626** e o código CRC **DOBE2736**.

---

Dedico este trabalho à minha família, que me inspirou e incentivou para sua realização.

## AGRADECIMENTOS

À minha família que me proporcionou e sempre incentivou imensamente os estudos na minha vida. Em especial, ao meu pai, Carlos Augusto, que além do apoio, auxiliou muito no trabalho com seus conhecimentos práticos e ideias fundamentais para sua execução. À minha mãe, Valéria, que sempre acreditou em mim e é uma inspiração na docência. Ao meu irmão Pedro, Laís e Bernardo que estavam sempre presentes e proporcionaram momentos leves e felizes. Ao meu amor, Lukas, que esteve ao meu lado durante toda essa jornada me auxiliando em tudo.

A todos os professores que cruzaram o meu caminho e contribuíram com o seu conhecimento e que, sem dúvidas, agregaram muito na minha formação. Em especial meu orientador, Pedro Kopschitz, que me acompanha e orienta desde a graduação, me apresentou o tema sustentabilidade em edificações e não mediu esforços para que esta pesquisa fosse concluída. Muito obrigada pela compreensão, apoio, inspiração e pela parceria ao longo desses anos. À professora Júlia Castro Mendes, da UFOP, pelas preciosas ideias e contribuições ao longo do trabalho. Ao professor e, na época, coordenador do PEC/UFJF, Alexandre Cury, pelo apoio prestado em meu percurso como mestranda.

À Universidade Federal de Juiz de Fora pela bolsa em parte do trabalho e por ter me proporcionado momentos incríveis tanto na graduação, quanto agora, na pós-graduação e permitido conhecer pessoas fantásticas. Aos laboratórios, técnicos e colaboradores que auxiliaram no desenvolvimento desta pesquisa. Destacando o Laboratório de Materiais de Construção no qual toda a pesquisa foi desenvolvida e o Laboratório de Processos de Fabricação onde foi realizado pelo técnico Elias Ramos Vilas Boas a usinagem das placas.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMC<sup>2</sup> da Universidade Federal de Ouro Preto, pelo compartilhamento de ideais, fornecimento de amostras de placas de argamassa para ensaios e realização das medições de referência.

Agradeço também aos meus amigos, os mais antigos e aqueles que encontrei ao longo dessa jornada na UFJF, que tornaram esse caminho mais prazeroso e feliz.

“A resposta certa não importa nada: o essencial é que as perguntas estejam certas.”

(Mario Quintana)

## Resumo

A construção civil é um dos setores das atividades humanas mais poluidores em quase todo o planeta. É também um setor responsável por alto consumo de energia - um dos que mais cresce é aquele destinado ao conforto dos ambientes. O envelope das edificações é concebido, entre outras funções, para controlar a transferência de calor entre os ambientes externo e interno e, portanto, regular as características térmicas internas. A aplicação de materiais isolantes como constituintes das camadas do envelope tem papel fundamental no desempenho térmico das edificações, permitindo reduzir o uso de energia com equipamentos condicionadores de ar. A condutividade térmica ( $\lambda$ ) é uma das principais propriedades envolvidas nos estudos realizados em busca do conforto térmico. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um aparato térmico alternativo (ATA) de baixo custo para determinação de  $\lambda$  em laboratório. O ATA seguiu os princípios dos métodos estacionários, os quais devem atingir um regime permanente de transferência de calor para a medição da propriedade térmica. O equipamento foi confeccionado a partir do sistema placa quente/amostra/placa fria e foi construído com cerca de R\$ 900,00. O trabalho mostra que bons resultados foram alcançados para  $\lambda \leq 0,80 \text{ W/(m.K)}$ . O aparelho proposto oferece vantagens significativas, principalmente tempo de ensaio reduzido, baixo custo, facilidade de montagem e leitura dos resultados, em comparação com sistemas semelhantes baseados em métodos estacionários.

Palavras-chaves: edificações; desempenho térmico; materiais de construção; condutividade.

## Abstract

Civil construction is one of the most polluting sectors of human activities in almost the entire planet. It is also a sector responsible for high energy consumption. The fastest growing use of energy in the world is aimed at the comfort of environments. The building envelope is designed mainly to restrict heat transfer between the external and internal environments, and one of its purposes is to regulate the internal thermal characteristics of buildings. The application of insulating materials without envelopes helps to improve the thermal performance of buildings, eliminating the reduction in energy use with air conditioning equipment. Thermal conductivity is one of the main thermal properties to analyze this performance. Given this scenario, this work aims to develop a low-cost alternative thermal apparatus (ATA) to disseminate the thermal characterization of construction materials. The ATA followed the principles of stationary methods, which must achieve a steady state of heat transfer for a property of thermal property. The equipment was made from the hot plate / sample / cold plate system and spent less than a thousand reais to assemble it. The study shows that good results were achieved for  $\lambda \leq 0.800$  W / (m.K). The proposed device offers advantages, mainly in terms of reduced test time, low cost, ease of assembly and reading of results, over systems based on stationary methods.

Keywords: buildings; thermal performance; construction material; conductivity.

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Zoneamento bioclimático brasileiro (porcentagens se referem à área de cada zona em relação ao total do território nacional). .....                                                                                                          | 11 |
| Figura 2 – Montagem do ensaio da placa quente protegida para determinação da condutividade térmica.....                                                                                                                                                | 14 |
| Figura 3 – Configurações esquemáticas para a montagem do método fluximétrico: a) assimétrica com um fluxímetro e um corpo de prova; b) simétrica com dois fluxímetros e um corpo de prova; c) simétrica com um fluxímetro e dois corpos de prova. .... | 14 |
| Figura 4 – Aparato <i>Rapid K</i> . .....                                                                                                                                                                                                              | 15 |
| Figura 5 – Aparelho desenvolvido por Pinto (2015) em sua dissertação, baseado na norma ABNT NBR 15220-5.....                                                                                                                                           | 15 |
| Figura 6 – Fases do ensaio pelo Disco de Lee: a) primeira fase; b) segunda fase. Desenho esquemático. ....                                                                                                                                             | 16 |
| Figura 7 – Montagem experimental da modificação no desenho do equipamento seguindo os princípios do Disco de Lee. ....                                                                                                                                 | 17 |
| Figura 8 – Método do balanço de energia para medição da condutividade térmica de argamassas.....                                                                                                                                                       | 18 |
| Figura 9 – Método padrão de fio quente: desenho esquemático. ....                                                                                                                                                                                      | 19 |
| Figura 10 – Aparato para medição de condutividade térmica em materiais não metálicos de baixa condutividade.....                                                                                                                                       | 20 |
| Figura 11 – Métodos transientes de fontes linear e plana: a) fonte plana; b) fonte plana modificada; c) fonte linear.....                                                                                                                              | 20 |
| Figura 12 – Número de documentos publicados por ano relacionados ao desempenho térmico de argamassas na base de dados Scopus no dia 06/06/21. Palavras-chave da busca: argamassa e (“condutividade térmica” ou “desempenho térmico”). .....            | 21 |
| Figura 13 – Princípio de funcionamento do Aparato Térmico Alternativo. ....                                                                                                                                                                            | 26 |
| Figura 14 – Ligação do sistema de aquecimento com controle de temperatura do ATA - desenho esquemático. ....                                                                                                                                           | 27 |

|                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 15 – Amostras ensaiadas: a) amostras de placas de argamassas com diferentes composições; b) amostras de placas de argamassa, compensado, pinus e EPS (respectivamente, da esquerda para a direita) .....                                             | 29 |
| Figura 16 – Configuração de parede de alvenaria para verificação da influência dos resultados do ATA no cálculo da transmitância térmica (U). .....                                                                                                         | 31 |
| Figura 17 – Posição da amostra na caixa de madeira do ATA.....                                                                                                                                                                                              | 33 |
| Figura 18 – Projeto do ATA.....                                                                                                                                                                                                                             | 34 |
| Figura 19 – Componentes externos da instalação da geração do calor e controle da temperatura relativo à placa quente: disjuntor, controlador digital de temperatura, relé de estado sólido. ....                                                            | 35 |
| Figura 20 – Placa fria de alumínio com usinagem para escoamento da água e mangueira acoplada, posicionadas sobre a caixa; b) Perfil de alumínio (foto) e desenho ilustrativo do posicionamento para favorecer a acoplagem do termopar na placa quente. .... | 36 |
| Figura 21 – Detalhe interno do ATA.....                                                                                                                                                                                                                     | 36 |
| Figura 22 – ATA em funcionamento. ....                                                                                                                                                                                                                      | 37 |
| Figura 23 – Estágios de montagem do ensaio no ATA.....                                                                                                                                                                                                      | 39 |
| Figura 24 – Análise do tempo de ensaio para atingir o regime estacionário com o ATA.                                                                                                                                                                        | 40 |
| Figura 25 – Comportamento do ATA com EPS e madeiras - $\lambda$ menor que 0,075 W/(m.K).<br>.....                                                                                                                                                           | 41 |
| Figura 26 – Correlação entre resultados de ensaios ATA e HFM: a) todos os resultados; b) resultados menores que 1,0 W/(m·K); c) resultados menores que 0,8 W/(m·K). ....                                                                                    | 43 |
| Figura 27 – Condutividade e transmitância calculada de acordo com a NBR 15220-4....                                                                                                                                                                         | 46 |
| Figura 28 – Verificação dos valores de transmitância térmica calculados em função dos limites prescritos pela NBR 15575 para as ZBs brasileiras .....                                                                                                       | 47 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Exemplos de valores de condutividade térmica de materiais de construção. ....                                                                                                                                                     | 8  |
| Tabela 2 – Exemplos de valores de transmitância térmica de paredes. ....                                                                                                                                                                     | 10 |
| Tabela 3 – Limites de U de paredes segundo a norma ABNT NBR 15575-4 .....                                                                                                                                                                    | 11 |
| Tabela 4 – Resultados de revisão da literatura sobre condutividade térmica de argamassas com resíduos. ....                                                                                                                                  | 24 |
| Tabela 5 – Procedimentos de secagem das amostras .....                                                                                                                                                                                       | 30 |
| Tabela 6 – Lista de materiais utilizados para a montagem e execução de ensaios no ATA. ....                                                                                                                                                  | 32 |
| Tabela 7 – Resultados de condutividade térmica - HFM e ATA. ....                                                                                                                                                                             | 42 |
| Tabela 8 – Variação percentual dos resultados de $\lambda \leq 0,80 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ medidos no ATA, em relação aos valores de referência do HFM. ....                                                                     | 44 |
| Tabela 9 – Valores de $\lambda$ determinados no ATA e no HFM e os respectivos valores de U calculados de acordo com a NBR 15220-4 para parede de alvenaria de bloco cerâmico vazado e emboço de argamassa cimentícia externo e interno. .... | 45 |

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|      |                                                                     |
|------|---------------------------------------------------------------------|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas                            |
| ATA  | Aparato Térmico Alternativo                                         |
| CBIC | Câmara Brasileira da Indústria da Construção                        |
| CP   | Corpo de Prova                                                      |
| EPE  | Empresa de Pesquisa Energética                                      |
| EPS  | Poliestireno Expandido – isopor                                     |
| GEE  | Gases de Efeito Estufa                                              |
| HFM  | “ <i>Heat Flow Meter</i> ” – método fluxímetro ou do fluxo de calor |
| NBR  | Norma Brasileira                                                    |
| UFJF | Universidade Federal de Juiz de Fora                                |
| UFOP | Universidade Federal de Ouro Preto                                  |
| ZB   | Zona Bioclimática                                                   |

**LISTA DE SÍMBOLOS**

|             |                                                   |
|-------------|---------------------------------------------------|
| $\lambda/k$ | Condutividade térmica [W/(m.K)]                   |
| RT          | Resistência térmica total [(m <sup>2</sup> .K)/W] |
| U           | Transmitância térmica [W/(m <sup>2</sup> .K)]     |
| $\alpha$    | Difusividade térmica (m <sup>2</sup> /s)          |
| c           | Calor específico [J/(kg.K)]                       |
| $\rho$      | Densidade (kg/m <sup>3</sup> )                    |
| Q           | Quantidade de calor (J)                           |

## Sumário

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introdução .....                                                       | 1  |
| 1.1. Contextualização .....                                               | 1  |
| 1.2. Objetivo .....                                                       | 4  |
| 1.2.1. Objetivos específicos.....                                         | 4  |
| 1.3. Relevância do estudo .....                                           | 4  |
| 2. Revisão bibliográfica .....                                            | 6  |
| 2.1. Transferência de calor e propriedades térmicas .....                 | 6  |
| 2.1.1. Condutividade térmica .....                                        | 6  |
| 2.1.2. Difusividade térmica .....                                         | 8  |
| 2.1.3. Calor específico.....                                              | 8  |
| 2.1.4. Resistência térmica e transmitância térmica .....                  | 9  |
| 2.2. Medição da condutividade térmica.....                                | 12 |
| 2.2.1. Métodos estacionários .....                                        | 12 |
| 2.2.2. Métodos transientes.....                                           | 18 |
| 2.3. Argamassas de desempenho térmico melhorado.....                      | 21 |
| 3. Metodologia e planejamento experimental.....                           | 25 |
| 3.1. Princípio de funcionamento do Aparato Térmico Alternativo - ATA..... | 25 |
| 3.2. Critério para término do ensaio .....                                | 28 |
| 3.3. Escolha e preparação das amostras de calibração .....                | 28 |
| 3.4. Veracidade e precisão do equipamento .....                           | 30 |
| 3.5. Impacto dos resultados encontrados na transmitância térmica.....     | 30 |
| 4. Resultados e discussão .....                                           | 32 |
| 4.1. Montagem do ATA.....                                                 | 32 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.1. Materiais utilizados .....                                     | 32 |
| 4.2. Procedimento de ensaio .....                                     | 38 |
| 4.3. Confirmação do critério de término do ensaio adotado.....        | 40 |
| 4.4. Veracidade do ATA - dispersão dos resultados de calibração ..... | 41 |
| 4.5. Aplicação e limitações do equipamento .....                      | 44 |
| 4.6. Impacto dos resultados de transmitância térmica de paredes ..... | 45 |
| 5. Conclusão.....                                                     | 48 |
| REFERÊNCIAS .....                                                     | 50 |

# 1. Introdução

## 1.1. Contextualização

A indústria da construção civil é um dos setores de atividades humanas que mais emitem gás carbônico e consomem energia e recursos naturais no mundo. A construção e operação de edifícios representaram 36% do uso de energia final global e quase 40% das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) relacionadas à energia em 2017 (IEA, 2018). Em relação ao ano de 2015, estima-se um aumento de 50% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) globais vinculadas ao setor até 2050, de acordo com o aumento da área construída esperado visto o ritmo atual (CBIC, 2017). A redução do consumo de energia é prioritária para se alcançarem metas do Acordo de Paris<sup>1</sup>, que visam limitar o aquecimento global - nas edificações, a redução deveria ser de 80%, pelo menos (PBMC, 2014). Para esse fim, é fundamental a adoção de melhorias em seu sistema de vedação (paredes, aberturas, janelas, portas e coberturas), o principal regulador do desempenho térmico das edificações (CBIC, 2017).

As edificações representam cerca de 50% do consumo de eletricidade do Brasil (EPE, 2020), relacionado ao uso de equipamentos, iluminação artificial e condicionamento de ar. Este consumo relaciona-se com diversos fatores que interferem no desempenho energético de uma construção, como a envoltória da edificação (sombreamento, área envidraçada, tipo de vidro, materiais das paredes), parâmetros urbanos (códigos de obras e leis do uso do solo), clima (zonas bioclimáticas) e comportamento dos usuários (EPE, 2018). Sozer (2010) ressalta a importância de se projetar os edifícios já visando reduzir o consumo de energia ao longo de sua vida útil, tendência contemporânea irreversível.

O consumo de energia para a finalidade de conforto ambiental é o que mais cresce em edificações no mundo (EPE, 2018). Nas residências brasileiras, o uso de energia elétrica para condicionamento de ar mais que triplicou nos últimos doze anos (EPE, 2018). Essa crescente demanda é impulsionada por fatores como o crescimento econômico e populacional, além da permanente urbanização, principalmente nas regiões mais quentes e suscetíveis aos efeitos das

---

<sup>1</sup> O Acordo de Paris foi celebrado entre 196 países em 2015 (vigência a partir de 2016) e teve como principal objetivo manter o aumento da temperatura do planeta abaixo de 2 °C, promovendo ações para mitigação de emissões de gases de efeito estufa (UNFCCC, 2020).

mudanças climáticas, onde o resfriamento dos ambientes se torna uma questão de saúde (EPE, 2018). Sendo assim, o aquecimento global passa a ser, ele mesmo, um fator responsável pela demanda de energia.

Nos últimos anos tem sido possível acompanhar, no Brasil, a publicação de diversas normas e programas de certificação relacionados ao desempenho das edificações, que estimulam a conscientização, práticas e estudos sobre esta temática. A norma ABNT NBR 15575 – Desempenho de edificações habitacionais, publicada em 2013, é voltada a atender requisitos dos usuários e contém referências aos sistemas que compõem as edificações habitacionais, com critérios de desempenho ligados, entre outros, à sustentabilidade e à habitabilidade (ABNT, 2021). No requisito habitabilidade insere-se o desempenho térmico que a edificação habitacional deve atingir, considerando-se a zona bioclimática (ZB) e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (ABNT, 2005). A ABNT NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações apresenta conceitos e métodos de cálculo de diversas propriedades térmicas de materiais e componentes de construção, além de recomendações e diretrizes construtivas para adequação da edificação ao clima local. Como diretrizes, a norma considera os seguintes parâmetros: tamanho das aberturas para ventilação, proteção das aberturas, vedações externas (tipos de parede externa e cobertura) e estratégias de condicionamento térmico passivo (ABNT, 2005).

Segundo Sadineni, Madala e Boehm (2011), o interesse por estratégias passivas de eficiência energética em edifícios vem sendo renovado, uma vez que são consideradas como solução para minimizar problemas ambientais e energéticos nesta área. As estratégias passivas consistem em melhorias nos elementos do envelope da edificação, enquanto as estratégias ativas são baseadas no funcionamento de aparelhos para, por exemplo, aquecimento, resfriamento e ventilação dos ambientes (SADINENI, MADALA e BOEHM, 2011). Portanto, as estratégias ativas, diferentemente das passivas, envolvem gasto com energia ao longo da vida útil da edificação.

O sistema de vedação externa (SVE) ou “envelope” separa o ambiente interior do exterior do edifício, influenciando a troca de energia entre eles, e constitui, assim, parte determinante de seu desempenho térmico e energético (SOZER, 2010) (AZARI, 2014). Ainda segundo Azari (2014), o SVE da construção é concebido, principalmente, para restringir a transferência de calor, com a finalidade de regular as características térmicas do ambiente interno e a demanda

por condicionadores de ar. Neste contexto inserem-se os revestimentos de diversas naturezas, dentre os quais as argamassas cimentícias, principalmente aquelas com características especiais, como as leves e com baixa condutividade térmica, que ao serem empregadas no envelope da construção permite-se alcançar melhor conforto térmico. Diversos autores já estudaram, nesse sentido, os benefícios do isolamento térmico em paredes como solução construtiva (QUIÑONES-BOLAÑOS, GÓMEZ-OVIEDO, *et al.*, 2021) (CAVALLINE, GALLEGOS, *et al.*, 2021) (PAIVA, CALDAS, *et al.*, 2021), incluindo simulações computacionais. Bastos, Castro e Zambrano (2017) fizeram simulações computacionais com argamassas isolantes e obtiveram resultados que apontam para uma redução no consumo de energia entre 15% a 25%, de acordo com a zona bioclimática brasileira. Mendes, Barreto, *et al.* (2020) concluíram que argamassas isolantes podem reduzir em até 1°C as temperaturas de pico nos dias mais quentes do ano.

De forma geral, os agregados e outros materiais leves mais utilizados para substituir os agregados convencionais em argamassas de revestimento são: lã de rocha, lã de vidro, poliestireno expandido (EPS), espuma de poliuretano, argila expandida, vermiculita, perlita, pedra pome, cinza volante e escória de alto forno. As raspas de pneu, cortiça, madeira, plástico, sisal, cascas de arroz, aditivos incorporadores de ar e nanomateriais são materiais alternativos que também podem ser utilizados (CARDOSO, CALLEJAS e DURANTE, 2016).

A análise da transferência de calor através de elementos construtivos é muito relevante para a solução de problemas de engenharia e arquitetura que envolvem eficiência energética e conforto térmico. Dentro desse aspecto, a determinação da condutividade térmica dos materiais é especialmente importante para a avaliação do desempenho térmico da edificação, assim como para a obtenção de outros parâmetros fundamentais nessa análise, como a transmitância térmica. Além do estudo das propriedades propriamente ditas e da comparação com referências de normas, a obtenção desses valores é fundamental para a realização de simulações de gastos de energia nos edifícios com o auxílio de programas computacionais, garantindo não só maior precisão nos resultados como possibilidades de estudos de outros materiais não convencionais que, na maioria das vezes, não possui valores tabelados.

Existe uma ampla gama de métodos para a medição da condutividade térmica de materiais com o uso de equipamentos cujo valor está bem fora alcance da maioria dos laboratórios de pesquisa brasileiros. Um equipamento baseado no método do medidor de fluxo de calor foi

orçado pela autora da presente dissertação em 52.900 euros em abril de 2019. Essa realidade, portanto, estimula trabalhos de criação e montagem de equipamentos mais acessíveis ou o desenvolvimento de novos métodos baseados nos já existentes.

## **1.2. Objetivo**

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um aparato térmico alternativo (ATA) de baixo custo para a medição da condutividade térmica ( $\lambda$ ) de materiais de construção, especialmente argamassas de revestimento isolantes.

### **1.2.1. Objetivos específicos**

- Montar, avaliar e validar o aparato térmico alternativo;
- Estabelecer metodologia para os ensaios;
- Estudar o funcionamento do ATA com diferentes tipos de material cimentício e isolantes;
- Estabelecer curva de correlação em função de ensaios de referência;
- Analisar resultados obtidos.

## **1.3. Relevância do estudo**

De acordo com o relatório “Estado do Clima 2018”<sup>2</sup>, as emissões de gases de efeito estufa chegaram a seu maior valor na atmosfera no ano de 2018 (G1, 2019). Nesse contexto, o Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas<sup>3</sup>, produzido em 2014, já identificava onde estão as maiores oportunidades para reduzir a emissão desses gases nas edificações nacionais: princípios de eficiência energética, desempenho energético de envoltórias e sistemas construtivos e o reaproveitamento de resíduos na construção civil (CBIC, 2017).

---

<sup>2</sup> Publicado anualmente e elaborado pelos centros de informação sobre o clima da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (NOAA, na sigla em inglês), com o apoio de centenas de especialistas no assunto pelo mundo.

<sup>3</sup> Produzido pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) - <http://www.pbmc.coppe.ufjf.br/>. O Painel, estabelecido pelo governo federal nos moldes do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, em inglês), tem como objetivo fornecer avaliações científicas sobre as mudanças climáticas.

O investimento em sistemas de revestimento adequados no contexto do desempenho energético de edifícios, induz estudos de propriedades e materiais capazes de atender a níveis mais elevados de eficiência. Assim, a medição da condutividade térmica vem a compor, obrigatoriamente, pesquisas que envolvam trabalhos experimentais nesta área e, de preferência, de modo prático de baixo custo. Neste contexto, o presente estudo pode ser considerado inovador, por propor a montagem de um equipamento para medição de condutividade térmica de baixo custo com uma configuração e nível de detalhamento não encontrados na literatura.

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1. Transferência de calor e propriedades térmicas

Calor é energia em trânsito, ou seja, só existe calor quando há uma diferença de temperatura entre dois corpos ou entre um corpo e o meio que o envolve. Essa diferença gera um fluxo que sempre fluirá do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura, tendendo ao equilíbrio térmico. Condução, convecção e radiação térmica são os modos como a transferência de calor pode ocorrer, de forma isolada ou combinada. Segundo Souza (2016), a condução ocorre quando a transferência de calor se dá em um sólido ou fluido; a convecção, quando acontece entre a superfície de um corpo e o fluido que o envolve; por fim, a radiação é a troca de calor entre dois corpos em temperaturas diferentes por meio de ondas eletromagnéticas.

De acordo com Asadi, Shafiqh, *et al.* (2018), uma das formas de perda de calor dos edifícios ocorre através do seu envelope, ou seja, há perda condutora através de paredes, teto, janelas e pisos. No caso dos fechamentos opacos, a transmissão de calor ocorre quando há diferença de temperatura entre as superfícies internas e externas (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014). A Lei de Fourier descreve a transferência de calor por condução, mostrando que o fluxo de calor depende da variação de temperatura em um meio, conforme a equação 1, aplicada ao caso unidimensional (SOUZA, 2016).

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

Onde: q = fluxo de calor (W); k = condutividade térmica [W/(m·K)]; A = área da superfície (m<sup>2</sup>);  $\partial T/\partial x$  = gradiente de temperatura (K/m).

Os materiais e os elementos construtivos influenciam as trocas de calor, pois, segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), comportam-se em função de suas propriedades térmicas. Gomes, Flores-Colen, *et al.* (2017) ressaltam a importância de se conhecer os valores das principais propriedades térmicas dos materiais de construção em um projeto. De acordo com Santos (2005), as mais importantes são a condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico.

#### 2.1.1. Condutividade térmica

A condutividade térmica ( $\lambda$ ) representa a capacidade de um material de conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo, como resultado da diferença de temperatura

sob condição limite do estado estacionário, e está relacionada à transferência de calor por condução (ASADI, SHAFIGH, *et al.*, 2018) (PHILIP e FAGBENLE, 2014) (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014). Para aplicar a Lei de Fourier, que descreve a transferência de calor por condução, é necessário conhecer a condutividade térmica do material (SOUZA, 2016).

Segundo a NBR 15220-1 - Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005, p. 2), a condutividade térmica é definida como “propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de  $1 \text{ W/m}^2$ , quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro”. A expressão da condutividade se dá na unidade  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Elementos que possuem alta condutividade térmica são chamados de condutores térmicos e são utilizados quando se deseja dissipar calor de um sistema, enquanto aqueles que possuem baixa condutividade, chamados de isolantes térmicos, são utilizados para evitar a perda de energia por condução ou proteção térmica de algum componente do sistema (SOUZA, 2016).

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), a condutividade depende da densidade do material. Asadi, Shafigh, *et al.* (2018) qualificam a densidade como a propriedade com melhor relação com a condutividade térmica do concreto e citam, também teor de umidade, temperatura, tipo de agregado e tipo de material cimentício como fatores influentes. Ao realizar uma revisão sobre condutividade térmica do concreto, Asadi, Shafigh, *et al.* (2018) observaram que existe uma tendência decrescente do valor de condutividade com o aumento da temperatura e, também, que materiais saturados apresentam valores 1,4 a 3,0 vezes maiores do que em condições secas - em geral, o valor desta propriedade aumenta cerca de 6% com o aumento de 1% de umidade.

Na Tabela 1 podem ser observados valores de condutividade térmica para alguns materiais utilizados em construções. Argamassas convencionais possuem condutividade térmica em torno de  $1,15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , enquanto argamassas isolantes podem chegar a valores 40 vezes menores, dependendo da composição, como foi observado na pesquisa de Silva (2017). Benmansour, Agoudjil, *et al.* (2014), ao estudarem argamassas com a incorporação de fibras de tamareira, encontraram condutividade térmica de  $0,14 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  para adições de até 15%, com manutenção de propriedades mecânicas em valores razoáveis. Silva (2017) estudou a incorporação de poliestireno expandido e aerogel de sílica em argamassas e encontrou valores de  $\lambda$  em torno de  $0,03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

Tabela 1 – Exemplos de valores de condutividade térmica de materiais de construção.

| Material                                        | $\lambda$ [W/(m·K)] |
|-------------------------------------------------|---------------------|
| Argamassa comum                                 | 1,15                |
| Argamassa celular                               | 0,40                |
| Cerâmica ( $\rho = 1300-1600 \text{ kg/m}^3$ )  | 0,90                |
| Concreto normal                                 | 1,75                |
| Concreto celular autoclavado                    | 0,17                |
| Poliestireno expandido moldado                  | 0,04                |
| Madeira com densidade de massa aparente elevada | 0,29                |
| Madeira - compensado                            | 0,15-0,20           |

Fonte: Autora, adaptado de ABNT (2005).

### 2.1.2. Difusividade térmica

A norma ABNT NBR 15220 (ABNT, 2005) define difusividade térmica como o quociente da condutividade térmica de um material pela sua capacidade de armazenar energia térmica (equação 2). Segundo Souza (2016), a propriedade expressa a rapidez com que o calor se difunde no material, ou seja, representa sua capacidade de transmitir rapidamente uma variação de temperatura (COURGEY e OLIVA, 2010). Ainda segundo o autor, ela cresce com a condutividade e diminui com a capacidade térmica. Quanto menor a difusividade, mais tempo a frente de calor levará para atravessar a espessura do material, ou seja, maior o tempo entre o momento em que o calor chega à superfície de uma parede e o momento em que ele atinge a superfície do outro lado (defasagem ou atraso térmico) (COURGEY e OLIVA, 2010).

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (2)$$

Onde:  $\alpha$  = difusividade térmica ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $k$  = condutividade térmica [W/(m·K)];  $\rho$  = densidade ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $c$  = calor específico [J/(kg·K)].

### 2.1.3. Calor específico

Calor específico é uma grandeza física que define a variação térmica de uma substância ao receber determinada quantidade de calor. Ele determina a quantidade de calor necessária para a elevar em  $1^\circ\text{C}$  a temperatura de um componente. A norma ABNT NBR 15220 (ABNT, 2005) descreve o calor específico como o quociente da quantidade de calor pela variação de temperatura e a massa do material, conforme expresso na equação 3 a seguir.

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (3)$$

Onde:  $c$  = calor específico [J/(kg·K)];  $Q$  = quantidade de calor (J);  $m$  = massa do material (kg);  $\Delta T$  = variação de temperatura (K).

#### 2.1.4. Resistência térmica e transmitância térmica

A resistência térmica ( $R$ ) corresponde à capacidade do material de resistir à passagem do calor e é calculada a partir da relação entre a espessura e a condutividade térmica para cada camada de um elemento construtivo. A resistência térmica total de uma parede é o resultado da soma da resistência térmica de cada camada constituinte - revestimento externo, bloco de alvenaria e revestimento interno, por exemplo - mais as resistências superficiais interna e externa, que variam de acordo com diversos fatores como emissividade, velocidade do ar e temperatura de elementos próximos (equações 4 e 5).

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (4)$$

Onde:  $R$  = resistência térmica [(m<sup>2</sup>·K)/W];  $e$  = espessura da camada (m);  $\lambda$  = condutividade térmica [W/(m·K)].

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (5)$$

Onde:  $R_T$  = resistência térmica total [(m<sup>2</sup>·K)/W];  $R_{se}$  e  $R_{si}$  = resistência superficiais externa e interna, respectivamente [(m<sup>2</sup>·K)/W];  $R_t$  = resistência de superfície a superfície [(m<sup>2</sup>·K)/W].

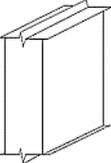
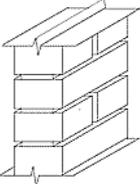
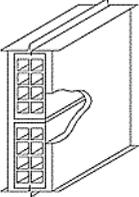
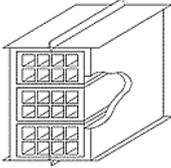
A transmitância térmica ( $U$ ) é o inverso de  $R$  (ABNT, 2005), conforme equação 6 a seguir. Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), é a propriedade mais importante para avaliação do desempenho de fechamentos opacos, pois permite sua avaliação em relação à transmissão de calor e fornece subsídios para a comparação entre diversas soluções construtivas

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (6)$$

Onde:  $U$  = transmitância térmica [W/(m<sup>2</sup>·K)];  $R_T$  = resistência térmica total [(m<sup>2</sup>·K)/W].

A Tabela 2 mostra valores de transmitância térmica calculados para algumas configurações de paredes usuais (ABNT,2005).

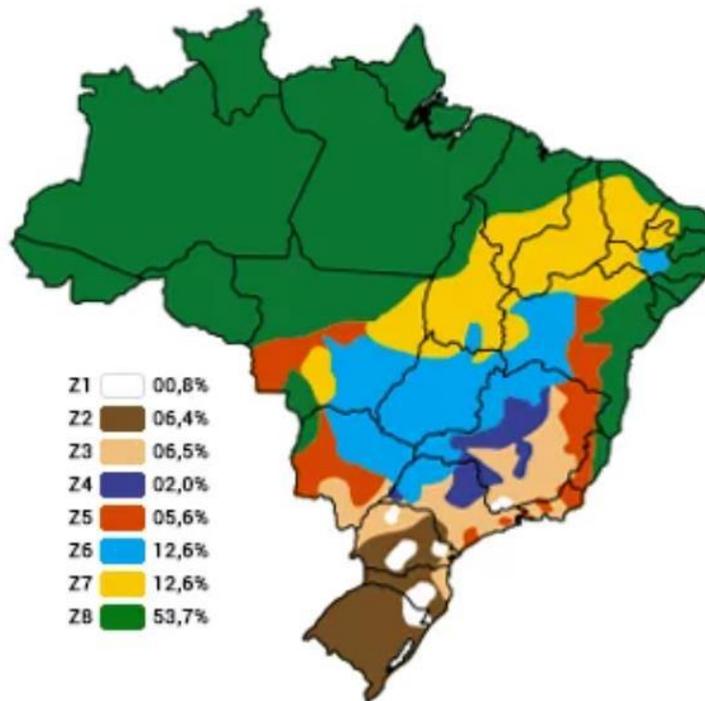
Tabela 2 – Exemplos de valores de transmitância térmica de paredes.

| Parede                                                                              | Descrição                                                                                                                                                                                                                                            | U<br>[W/(<br>m <sup>2</sup> ·K<br>)] |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
|    | Parede de concreto maciço<br>Espessura total da parede: 5,0 cm                                                                                                                                                                                       | 4,40                                 |
|    | Parede de tijolos maciços aparentes<br>Dimensão do tijolo: 10,0 x 6,0 x 22,0 cm<br>Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm<br>Espessura total da parede: 10,0 cm                                                                              | 3,70                                 |
|   | Parede de tijolos 8 furos quadrados, assentados na menor dimensão<br>Dimensão do tijolo: 9,0 x 19,0 x 19,0 cm<br>Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm<br>Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm<br>Espessura total da parede: 14,0 cm    | 2,49                                 |
|  | Parede de tijolos de 8 furos quadrados, assentados na maior dimensão<br>Dimensão do tijolo: 9,0 x 19,0 x 19,0 cm<br>Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm<br>Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm<br>Espessura total da parede: 24,0 cm | 1,80                                 |

Fonte: Autora, adaptado de ABNT 15220 (2005).

De acordo com a norma brasileira NBR 15220-3 - Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, “o território brasileiro foi dividido em oito zonas relativamente homogêneas quanto ao clima. Para cada uma destas zonas, formulou-se um conjunto de recomendações técnico-construtivas, objetivando otimizar o desempenho térmico das edificações, através de sua melhor adequação climática” (ABNT, 2005). A (Figura 1) mostra a distribuição territorial das zonas bioclimáticas (ZB). A norma prescreve, também, diretrizes construtivas para paredes e suas propriedades térmicas em cada ZB e, dessa maneira, são indicadas paredes “leves”, “leves refletoras” e “pesadas”, classificadas segundo seus valores de U, menores que 3,00, 3,60 e 2,20 W/(m<sup>2</sup>·K), respectivamente (ABNT, 2005).

Figura 1 – Zoneamento bioclimático brasileiro (porcentagens se referem à área de cada zona em relação ao total do território nacional).



Fonte: UGREEN (2022).

A norma de desempenho de edificações ABNT NBR 15575-4 (ABNT, 2021) também aborda o desempenho térmico das edificações e estabelece limites de U para as zonas bioclimáticas mencionadas, estabelecendo, portanto, referências para projetos e escolhas de materiais que serão determinantes para o alcance de melhor desempenho térmico das edificações - Tabela 3.

Tabela 3 – Limites de U de paredes segundo a norma ABNT NBR 15575-4.

| Zonas | Transmitância térmica (U)<br>W/(m <sup>2</sup> ·K)                          |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1 e 2 | $U \leq 2,70$                                                               |
| 3 a 8 | $U \leq 3,70$ se $\alpha^1 \leq 0,60$<br>$U \leq 2,50$ se $\alpha^1 > 0,60$ |

<sup>1</sup>  $\alpha$  é a absorvância à radiação solar da superfície externa da parede.

Fonte: Autora, adaptada de ABNT NBR 15575 (2021).

## 2.2. Medição da condutividade térmica

A determinação da condutividade térmica dos materiais é importante para a avaliação do desempenho térmico da edificação de maneira geral, assim como para a obtenção de outros parâmetros fundamentais nessa análise, como a transmitância térmica, especialmente para as partes que mais trocam energia com o meio externo. Existe uma ampla gama de métodos para a medição da condutividade térmica, que podem ser classificados como métodos estacionários e métodos transientes. Cada método é indicado para determinado tipo de material. Segundo Stancato (2000), existem métodos específicos para a medição em materiais de baixa condutividade, com sensibilidade e tecnologia específicas. Cabe ressaltar, de acordo com Gomes, Flores-Colen, *et al.* (2018), que métodos diferentes podem resultar em diferentes valores de condutividade térmica.

### 2.2.1. Métodos estacionários

O estado estacionário corresponde a uma transferência de calor constante, em que a variação de temperatura ou o fluxo de calor independem do tempo (ASADI, SHAFIGH, *et al.*, 2018). Segundo Silva (2017), os métodos estacionários de determinação da condutividade térmica consistem na medição do fluxo de calor ( $\Phi$ ) em uma amostra de material de espessura conhecida, a partir da fixação de um gradiente de temperatura. Para obtenção da condutividade térmica, o cálculo é feito através da Lei de Fourier unidirecional (equação 7). De acordo com Franco (2007), esses métodos são reconhecidos como os mais precisos para a medição da condutividade térmica e, por serem mencionados nas normas, segundo Gomes, Flores-Colen, *et al.* (2018) podem ser relevantes para comparação com outros resultados publicados.

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t} = k \cdot \frac{A \cdot \Delta T}{L} \quad (7)$$

Onde: Q = quantidade de calor (J);  $\Delta t$  = variação do tempo (s); k = condutividade térmica [W/(m·K)]; A = área da superfície (m<sup>2</sup>);  $\Delta T$  = variação de temperatura (K) e L = espessura/comprimento do material (m).

As principais desvantagens dos métodos estacionários encontram-se no tempo necessário para se atingir o estado estacionário, principalmente para materiais isolantes, além da necessidade de altos gradientes térmicos e de rigorosas condições para realizar a medição

(FRANCO, 2007). Silva (2017) também cita como desvantagem o elevado consumo de recursos, como energia e água, para o funcionamento de alguns equipamentos.

Os instrumentos que fixam o gradiente térmico através de calor isotérmico e placas frias intercaladas na amostra são os mais utilizados - os métodos da “placa quente protegida” e o “fluximétrico” são exemplos (FRANCO, 2007). O “Disco de Lee” é outro método baseado em condições estacionárias de temperatura para a obtenção da condutividade térmica (SILVA, 2017).

A norma ABNT NBR 15220, em suas partes 4 - Medição da resistência e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida e 5 - Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico, prescreve dois desses métodos citados com critérios essenciais de projeto, dimensões e tolerâncias para o conjunto de equipamentos, especificação das exigências mínimas em termos de instrumentação, além de detalhes para os procedimentos de medições, condições de ensaio e o modo de preparação dos corpos de prova (ABNT, 2005).

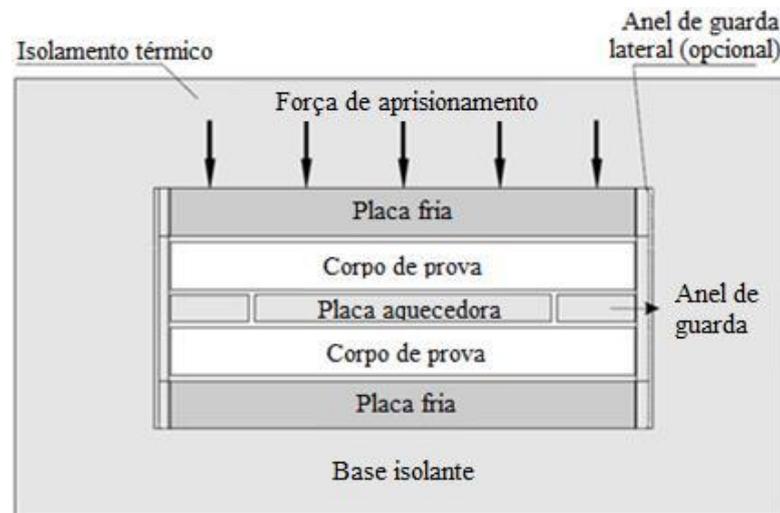
#### 2.2.1.1. Método da placa quente protegida

O princípio da placa quente protegida é um método absoluto para a determinação da resistência térmica ( $R$ ) e da condutividade térmica ( $\lambda$ ) de materiais sólidos, é recomendado para as seguintes faixas:  $R$  maior que  $0,02 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$  e  $\lambda$  menor que  $2,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  (ABNT, 2005). Quando se trata da determinação da condutividade térmica por esse método, as amostras devem ser planas e de materiais homogêneos de baixa condutividade térmica (SIMIONI, 2005).

A montagem do conjunto (Figura 2) deve ser desenvolvida de modo a se obter as condições necessárias para a medição da condutividade térmica em regime permanente. A determinação envolve a medição do gradiente de temperatura médio estabelecido sobre o corpo de prova, com a utilização de termopares montados em suas superfícies, a partir do fluxo de calor gerado pela placa aquecedora (ABNT, 2005).

De acordo com Simioni (2005), como desvantagem tem-se a demora em atingir o regime permanente, o que dificulta seu emprego na indústria. Os erros com a utilização dessa metodologia aumentam com a espessura do material ensaiado, o aumento do diâmetro e da condutividade térmica do termopar (SIMIONI, 2005). A redução dos erros acontece quando se aumenta a diferença de temperatura entre as amostras (SIMIONI, 2005).

Figura 2 – Montagem do ensaio da placa quente protegida para determinação da condutividade térmica.



Fonte: Autora, adaptado de ABNT (2005).

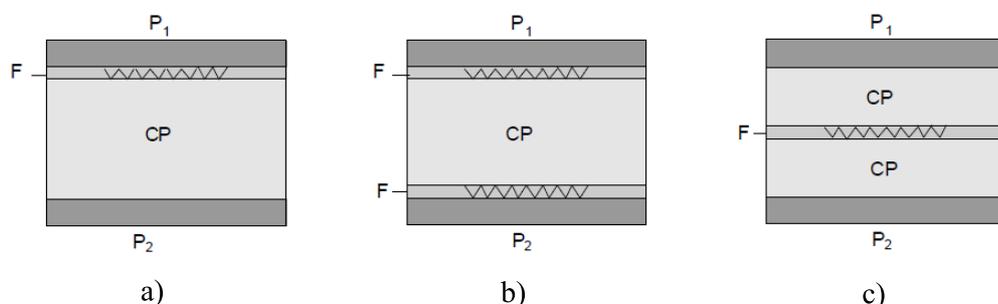
#### 2.2.1.2. Método fluximétrico

Esse método se baseia no uso de fluxímetros para medir a resistência térmica e, por dedução, a condutividade (ABNT, 2005). Para sua execução, há necessidade de pré-calibração periódica baseada em corpos de prova ensaiados pelo método da placa quente protegida (ABNT, 2005). Na

Figura 3 observam-se as três configurações de ensaio possíveis, segundo a NBR 15220-5 (ABNT, 2005), envolvendo uma placa quente ( $P_1$ ), uma placa fria ( $P_2$ ), um ou dois fluxímetros ( $F$ ) e corpos de prova ( $CP$ ), dependendo da configuração escolhida.

Figura 3 – Configurações esquemáticas para a montagem do método fluximétrico:

a) assimétrica com um fluxímetro e um corpo de prova; b) simétrica com dois fluxímetros e um corpo de prova; c) simétrica com um fluxímetro e dois corpos de prova.



Fonte: ABNT (2005).

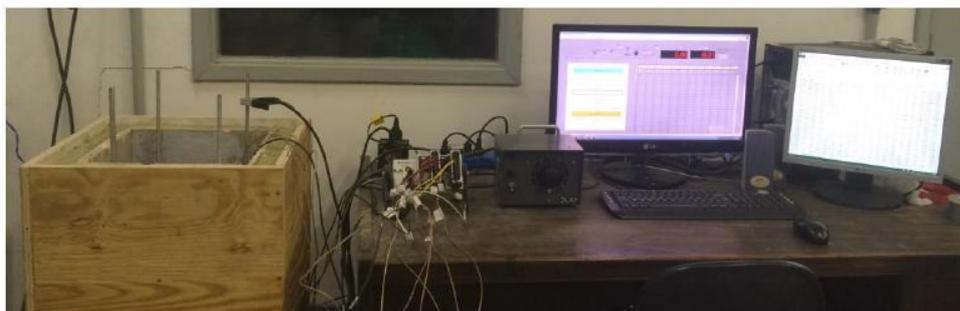
Existem equipamentos disponíveis comercialmente que seguem essa metodologia e facilitam a obtenção do valor da condutividade térmica - como exemplo tem-se o *Rapid K* (Figura 4), um dos equipamentos utilizados na pesquisa de Gomes, Flores-Colen, *et al.* (2018). A montagem de um equipamento baseado nesse método também é possível e encontrada na literatura. Pinto (2015), em sua dissertação, montou, validou e estudou o método fluximétrico seguindo a NBR 15220-5 (Figura 5).

Figura 4 – Aparato *Rapid K*.



Fonte: Gomes, Flores-Colen, *et al.* (2018).

Figura 5 – Aparelho desenvolvido por Pinto (2015) em sua dissertação, baseado na norma ABNT NBR 15220-5.



Fonte: Pinto (2015).

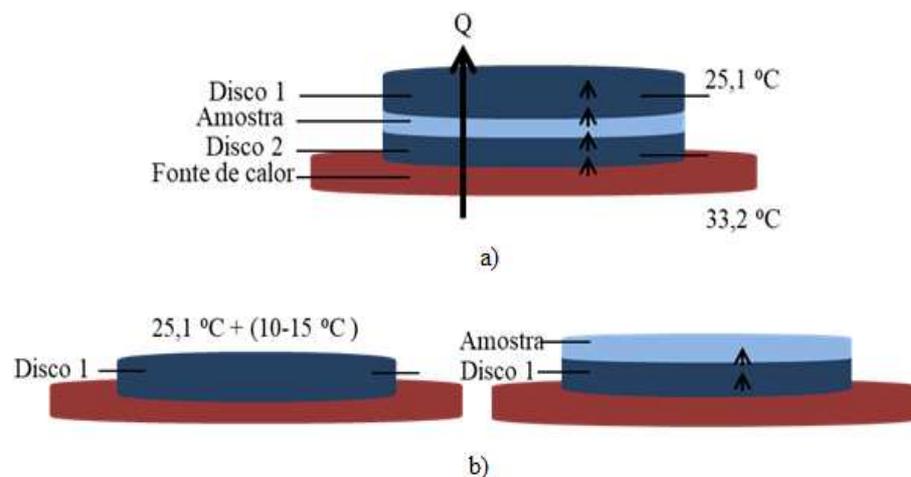
Simioni (2005) analisou fatores de influência nos resultados de medições da condutividade térmica pelo método do fluxímetro e observou que os erros são maiores para amostras com espessuras superior a dez milímetros e de condutividade térmica baixa, à medida que se aumenta o coeficiente de troca de calor por convecção e quanto maior a condutividade térmica

do fluxímetro. Os erros são menores com maior isolamento lateral, quanto menor for a temperatura da placa fria e à medida que se aumenta a dimensão do anel de proteção lateral (SIMIONI, 2005).

### 2.2.1.3. Disco de Lee

Conforme Gomes, Flores-Colen, *et al.* (2018), o método de estado estacionário do disco de Lee consiste basicamente em duas etapas (Figura 6): a) colocação da amostra entre dois discos de cobre, ligação da fonte de calor e espera até se atingir o estado estacionário; b) aquecimento do disco 1 de cobre entre 10 °C e 15 °C acima da sua temperatura no estado estacionário e posicionamento da amostra, em cima (após esse processo a fonte de calor deve ser desligada); enquanto o sistema estiver esfriando, a temperatura é medida em intervalos de cinco segundos. O teste termina quando ocorrer equilíbrio entre o sistema e a temperatura do ambiente e a condutividade térmica é obtida igualando-se as equações do fluxo de calor nas duas etapas (GOMES, FLORES-COLEN, *et al.*, 2018).

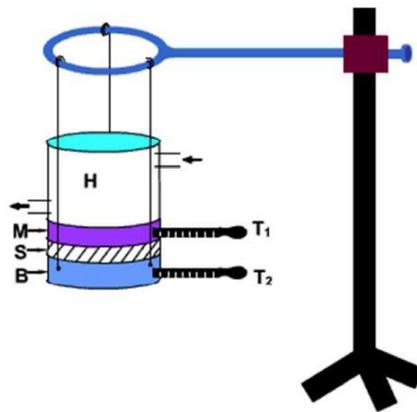
Figura 6 – Fases do ensaio pelo Disco de Lee: a) primeira fase; b) segunda fase. Desenho esquemático.



Fonte: autora, adaptado de Gomes, Flores-Colen, *et al.* (2018).

Seguindo o princípio básico do disco de Lee, Philip e Fagbenle (2014) desenvolveram modificações no método para medição da condutividade térmica de materiais isolantes visando minimizar erros na medição com modificações no desenho do equipamento. A montagem experimental é mostrada na Figura 7.

Figura 7 – Montagem experimental da modificação no desenho do equipamento seguindo os princípios do Disco de Lee.



Fonte: Lee, Philip e Fagbenle (2014).

A amostra “S” é colocada entre dois discos de latão (B e M) e todo o conjunto é pendurado por três cordas. Sobre o disco superior é inserida uma câmara de aquecimento (H) na qual percorrerá vapor. Esses discos metálicos possuem uma abertura para a inserção do sensor de temperatura (termopar). Todo o aparato foi colocado em um local fechado para minimizar os efeitos de correntes de ar. No início de cada determinação, a temperatura dos discos é monitorada até a temperatura do disco que está em contato com o vapor atingir o valor desejado. As leituras são realizadas em intervalos de tempo até se atingir estabilidade de temperatura nos discos. Os valores de condutividade térmica são estimados a partir de equações, atingindo eficácia quando comparados com valores de literatura para os materiais ensaiados.

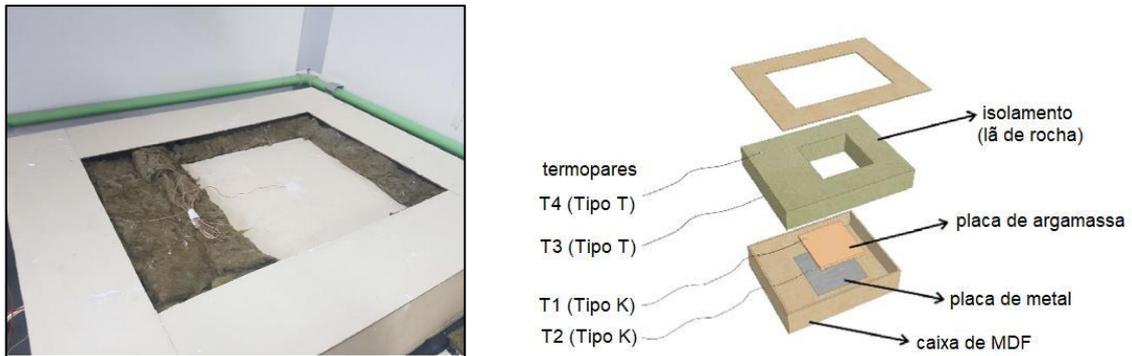
#### 2.2.1.4. Métodos alternativos e adaptados

Seguindo os métodos estacionários, Moraes, Belo, *et al.* (2021) montaram um equipamento usando o método do balanço de energia para analisar a condutividade térmica de argamassas com substituições de cimento por rejeitos de minério de ferro. Para a montagem do equipamento utilizou-se: um “varivolt” (aparelho regulador de tensão), um sistema de aquisição de dados, uma caixa de MDF, lã de rocha para isolamento, placa metálica conectada a uma resistência elétrica e quatro termopares posicionados de acordo com a

Figura 8 (MORAIS, BELO, *et al.*, 2021). As placas de argamassa foram moldadas no formato quadrado 30 x 30 centímetros e espessura 2,5 centímetros, comum em revestimentos cimentícios de alvenaria. O tempo necessário para que as placas de argamassa atingissem o regime permanente era, em média, de 5,5 horas, em ambiente com temperatura e umidade

monitoradas. Em seguida a essa fase, as temperaturas foram registradas nos termopares, (MORAIS, BELO, *et al.*, 2021). Finalmente, com o fluxo de calor e pela equação de Fourier, determinou-se a condutividade térmica da amostra.

Figura 8 – Método do balanço de energia para medição da condutividade térmica de argamassas.

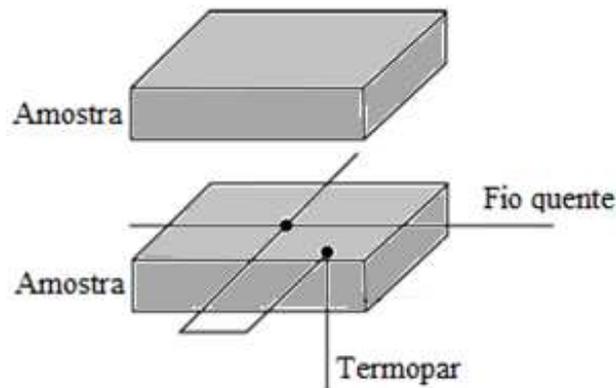


Fonte: adaptado de Moraes, Belo, *et al.* (2021).

### 2.2.2. Métodos transientes

Diferentemente dos métodos estacionários, os métodos transientes consideram a variação de temperatura com o tempo (ASADI, SHAFIGH, *et al.*, 2018). Os métodos transientes são métodos dinâmicos que medem a resposta a um impulso de calor elétrico enviado por uma fonte, calculada por modelos matemáticos, com temperatura medida em intervalos de tempo (GOMES, FLORES-COLEN, *et al.*, 2018). São métodos cujos ensaios são de curta duração, comparados com os métodos estacionários, e menos propensos a erros do operador, por sua facilidade de execução (GOMES, FLORES-COLEN, *et al.*, 2018). Franco (2007) cita também como vantagem a dispensa de calibração antes de cada ensaio, mas ressalta a necessidade de realizar medidas em amostras que estejam em equilíbrio com as condições ambientes. Asadi, Shafigh, *et al.* (2018), em sua revisão sobre condutividade térmica de concretos, observaram que os métodos transientes são utilizados com mais frequência, devido à disponibilidade de equipamentos nos laboratórios de pesquisa, ao custo do equipamento, ao tempo menor de experimentação e à capacidade de se medir amostras úmidas. O método do fio quente (Figura 9) é constantemente encontrado na literatura para a aplicação em argamassas e concretos.

Figura 9 – Método padrão de fio quente: desenho esquemático.

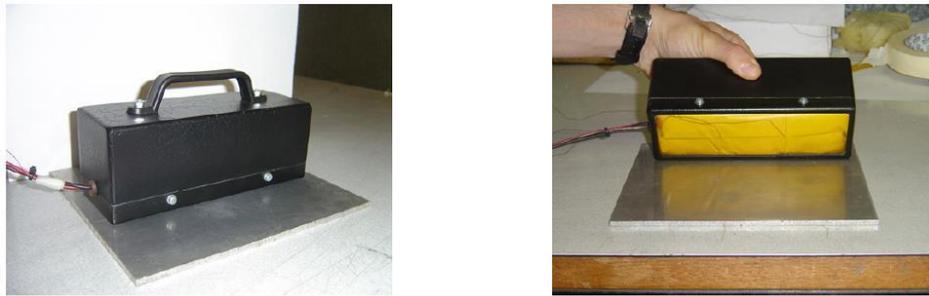


Fonte: Autora, adaptado de Santos (2005).

Esse método é baseado na medição da temperatura a uma distância específica do fio quente, que é uma fonte de calor linear dentro da amostra de material testada (ASADI, SHAFIGH, *et al.*, 2018). Segundo Santos (2005), o cálculo da condutividade pelo método do fio quente é feito a uma temperatura fixa determinada, com pequeno gradiente de temperatura através da amostra. Essa técnica é adequada para materiais de condutividade térmica menor que  $2,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , ou seja, isolantes, tendo como limitação a não aplicação em materiais condutores elétricos (SANTOS, 2005).

Franco (2007), projetou e desenvolveu um aparato (Figura 10) para a medição da condutividade térmica de amostras de materiais não metálicos de baixa condutividade térmica (entre  $0,2$  e  $4,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) pelo método transiente do fio quente. O autor afirma ser um método rápido e econômico para medição em materiais de construção, como argamassas e blocos. Como resultado, chegou a bons valores para a faixa entre  $0,2$  e  $1,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  com precisão menor que 5% e reprodutibilidade entre 2 e 3%. Relatou ainda que a faixa operacional do aparelho pode ser estendida para materiais com condutividade térmica entre  $0,04$  e  $0,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , e que com algumas técnicas de refinamento pode ser viável também para a faixa entre  $1,5$  e  $4,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

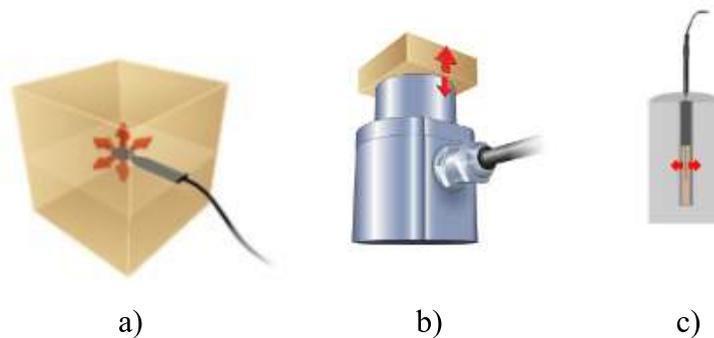
Figura 10 – Aparato para medição de condutividade térmica em materiais não metálicos de baixa condutividade.



Fonte: Franco (2007).

Além do método do fio quente, observa-se também, na literatura, a utilização dos métodos da fonte plana e da fonte linear (Figura 11) para a medição da condutividade térmica em materiais isolantes. Segundo Asadi, Shafigh, *et al.* (2018), no método da fonte plana a condutividade é medida com base na entrada de energia e sua variação dependente do tempo, com a utilização de um sensor plano cuja temperatura é aumentada enquanto a corrente elétrica passa pelo sensor. O método da fonte plana modificado, segundo Gomes, Flores-Colen, *et al.* (2018), é aplicável em materiais com  $\lambda$  mínimo de  $0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , valor superior da condutividade de algumas argamassas isolantes. O método de fonte linear é de fácil operação, obtenção rápida de  $\lambda$  e aplicável a partir de  $0,015 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , muito interessante para argamassas isolantes (GOMES, FLORES-COLEN, *et al.*, 2018). Os métodos da fonte plana modificada e da fonte linear utilizados por Gomes, Flores-Colen, *et al.* (2018) foram realizados usando-se o aparato ISOMET 2114.

Figura 11 – Métodos transientes de fontes linear e plana: a) fonte plana; b) fonte plana modificada; c) fonte linear.



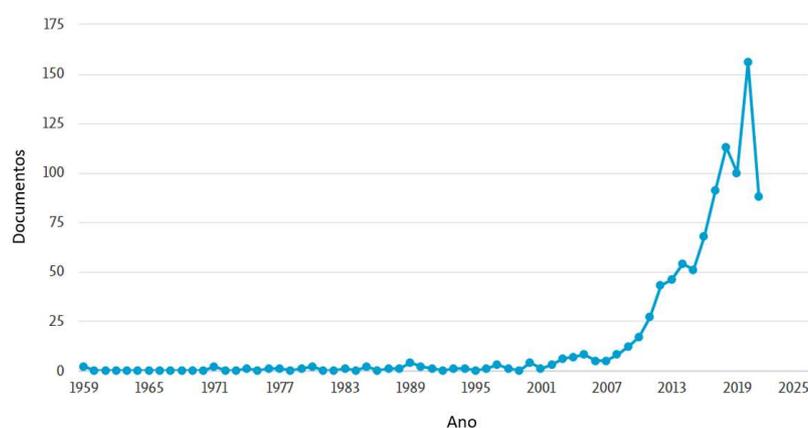
Fonte: C-THERM (2019).

### 2.3. Argamassas de desempenho térmico melhorado

Argamassas de revestimento podem influenciar significativamente o desempenho térmico dos edifícios, por melhorarem características de seu envelope. Materiais isolantes impactam o gasto com energia nas edificações ao longo da fase de uso da construção e existem trabalhos que comprovam essa eficiência energética, como os trabalhos já citados de Bastos, Castro e Zambrano (2017) e Mendes, Barreto et al. (2020), além de Quiñones-Bolaños, Gómez-Oviedo, et al. (2021), entre outros.

De acordo com Stefanidou (2014), o papel das argamassas, que antes era basicamente de proteção de paredes e estruturas, hoje já inclui critérios funcionais, estéticos, econômicos e de conforto (isolamento). De acordo com a Figura 12, é possível notar, a partir de dados obtidos na plataforma Scopus pela autora do presente trabalho, o crescimento do número de trabalhos publicados relacionados ao desempenho térmico das argamassas ao longo dos anos, notadamente a partir de 2007, com pico no ano de 2020 (158 documentos publicados). Em 2021 até a data da busca realizada, já tinham sido publicados 88.

Figura 12 – Número de documentos publicados por ano relacionados ao desempenho térmico de argamassas na base de dados Scopus no dia 06/06/21. Palavras-chave da busca: argamassa e (“condutividade térmica” ou “desempenho térmico”).



Fonte: elaborado pela autora, a partir de Scopus (2021).

Além disso, durante essa revisão bibliométrica, observou-se grande destaque para publicações provenientes da China (220), quando comparadas ao segundo país que mais publicou, Itália (70) e ao Brasil, que aparece em 11º (30). Quando se trata das revistas que mais publicam sobre o tema, destaca-se a “*Construction and Building Materials*”, com 138 documentos publicados, seguida da “*Energy and Buildings*” com 42 publicações na temática.

Para a obtenção de argamassas com melhores desempenhos térmico e acústico, usualmente são incorporados componentes na mistura como agregados leves, fibras ou subprodutos de outras atividades (PALOMAR, BARLUENGA e PUENTES, 2015). Segundo Silva (2017), para a melhoria de desempenho podem-se introduzir também materiais avançados, como os materiais de mudança de fase (PCM, sigla em inglês para *phase change materials*) e os aerogéis. Aditivos incorporadores de ar também são utilizados para melhoria de desempenho a partir da introdução de vazios no compósito.

Conforme Mendes, Barreto, *et al.* (2019), quando se trata de agregados, o tipo e o volume presentes nas misturas são importantes para o desempenho térmico de argamassas, principalmente devido ao sistema de poros que se forma na matriz cimentícia. De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2014), materiais isolantes, por possuírem baixa densidade devido à sua alta porosidade, têm capacidade de reduzir a transferência de calor, por causa do ar contido nos poros, de baixa condutividade térmica. Asadi, Shafigh, *et al.* (2018) encontraram tendência de redução de cerca de 0,6% do valor da condutividade térmica de argamassas quando a porosidade é aumentada em 1%.

Conforme a norma NBR NM 35 - Agregados leves para concreto estrutural – Especificação (ABNT, 1995), os agregados são classificados como leves quando possuem massa unitária, no estado seco e solto, menor que 1,12 g/cm<sup>3</sup>. Neville (2016) classifica os agregados leves em naturais (diatomita, pedra-pomes, escória, cinzas vulcânicas e tufos) ou artificiais, que podem ser produzidos a partir de materiais naturais (argila expandida, folhelho, ardósia, vermiculita e perlita) ou de resíduos industriais (cinza volante e escória de alto-forno).

Além desses agregados, encontram-se muitos outros materiais na literatura que podem ser utilizados com essa finalidade, incluindo resíduos como pode ser observado em um resumo na Tabela 4. Quiñones-Bolaños, Gómez-Oviedo *et al.* (2021), estudaram a adição de fibras de mesocarpo de coco, encontrando reduções de até 80% nos valores de condutividade térmica para uma adição de 15%, em massa, na argamassa, com manutenção da resistência à compressão. Além disso, os autores simularam o material em edificações populares em áreas tropicais, encontrando redução da temperatura interna entre 0,5 e 1,5 °C e redução de 16% no consumo de energia anual para refrigeração.

Ramírez, Barriguete, *et al.* (2020) analisaram a resistência ao fogo de argamassas com diferentes resíduos de lã mineral, avaliando também sua condutividade térmica antes e depois da exposição a altas temperaturas. Os autores concluíram que a adição dessas fibras recicladas pode ser uma alternativa sustentável às comerciais atualmente em uso, com melhoria do comportamento mecânico-térmico após o incêndio.

Salem, Fois, *et al.* (2020) investigaram a performance de argamassas contendo resíduos industriais de esponjas sintéticas vegetais (VSS) em substituição, à areia natural, encontrando diminuição da condutividade térmica de até 63% para substituição de 20% em massa e, também, redução da resistência à compressão. Levando em conta os dois fatores, os autores concluíram pelo potencial uso com 8% de substituição.

Kazmierczak, Schneider, *et al.* (2020) estudaram a substituição de borracha fragmentada e encontraram reduções na condutividade térmica de até 32% para argamassas com 6% de borracha. Concluíram que substituições de 2% e 4% de teor de borracha fragmentada apresentaram melhores conjuntos de propriedades relacionadas à capacidade de deformação, isolamento térmico e menor fissuração, com resistência à tração acima do mínimo necessário de acordo com os padrões.

AlArab, Hamad, *et al.* (2020) investigaram o efeito sinérgico de resíduo de cerâmica e escória de alto forno adicionadas no cimento e analisadas em argamassas, diferentemente dos outros artigos já citados. Observaram reduções na condutividade térmica maiores para a adição de escória, comparada ao pó residual de cerâmica. Quando analisados os dois juntos, observaram um resultado intermediário, com redução de 15%, além de resistência à compressão maior do que quando usados separadamente.

Tabela 4 – Resultados de revisão da literatura sobre condutividade térmica de argamassas com resíduos.

| Referência                            | Tipo de resíduo<br>(obs: siglas do original em inglês)                                                                                                  | Adição / substituição           | Tipo de argamassa e porcentagem de adição / substituição                                                                                     | Nomenclatura    | $\lambda$<br>W/(m·K) | Método de medição da condutividade térmica                   |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------|--------------------------------------------------------------|
| Quiñones- Bolaños <i>et al</i> (2021) | Fibras de mesocarpo de côco (extraídas de resíduos da indústria do côco)                                                                                | Adição na argamassa             | Argamassa 1:3<br>Cimento:areia<br>Adição de 0, 5, 10, 15 e 20%, em massa.                                                                    | 0               | 1,4<br>(aprox.)      | Adaptação da ASTM C177-13 - Método da placa quente protegida |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | 5               | 0,8<br>(aprox.)      |                                                              |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | 10              | 0,77<br>(aprox.)     |                                                              |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | 15              | 0,27                 |                                                              |
| Rámirez <i>et al.</i> (2020)          | Lã mineral de reciclagem de resíduos de construção civil (resíduos de lã de rocha (RW) e fibra de vidro (FG) e mistura de resíduos de lã mineral (MIX). | Substituição parcial da areia   | Argamassa 1:3<br>Cimento e areia<br>50% de cada, em volume.                                                                                  | REF             | 1,17                 | Método transiente de fonte plana modificada (MTPS)           |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | RW 50%          | 0,78                 |                                                              |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | FG 50%          | 0,93                 |                                                              |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | MIX 50%         | 0,90                 |                                                              |
| Salem <i>et al.</i> (2020)            | Resíduos industriais de esponjas sintéticas vegetais (VSS)                                                                                              | Substituição parcial da areia   | Argamassa 1:2<br>Cimento e areia<br>Substituição em massa: 0, 5, 8, 10, 15 e 20% + 20% de substituição em massa do cimento por sílica ativa. | VSS-0           | -                    | Método transiente de fonte plana (TPS)                       |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | VSS-5           | 0,769                |                                                              |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | VSS-8           | 0,663                |                                                              |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | VSS-10          | 0,528                |                                                              |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | VSS-15          | 0,453                |                                                              |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | VSS-20          | 0,368                |                                                              |
| AlArab <i>et al.</i> (2020)           | Pó residual de cerâmica (CWP) e escória de alto forno (BFS)                                                                                             | Substituição parcial do cimento | Argamassa 1:2,75<br>Cimento e areia                                                                                                          | Cimento         | 1,89                 | ASTM C518 - Método fluximétrico                              |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | Cimento/CWP     | 1,75                 |                                                              |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | Cimento/BFS     | 1,26                 |                                                              |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | Cimento/BFS/CWP | 1,61                 |                                                              |
| Kazmierczak <i>et al.</i> (2020)      | Migalhas de borracha                                                                                                                                    | Substituição parcial da areia   | Argamassa 1:2:9<br>Cimento, cal e areia<br>Substituição em volume 2, 4 e 6%.                                                                 | M0              | 1,00                 | ASTM C177 - Método da placa quente protegida                 |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | M2              | 0,85                 |                                                              |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | M4              | 0,72                 |                                                              |
|                                       |                                                                                                                                                         |                                 |                                                                                                                                              | M6              | 0,68                 |                                                              |

Fonte: Autora (2021).

### 3. Metodologia e planejamento experimental

O presente estudo objetiva desenvolver um aparato de baixo custo para a medição da condutividade térmica de materiais de construção em laboratório, chamado neste trabalho de ATA – aparato térmico alternativo, especialmente argamassas de revestimento termoisolantes. Como visto anteriormente, a medição da condutividade térmica em argamassas pode ser realizada por meio de equipamentos automáticos, geralmente de preço elevado. Como exemplos, podem ser citados o *Rapid K* utilizado na pesquisa de Gomes, Flores-Colen, *et al.* (2018) e o HFM 436/3 Lambda, da empresa NETZSCH, orçado em 52.900 euros em 2019 (aproximadamente R\$ 355.000,00)<sup>4</sup>, ambos métodos estacionários.

Os ensaios com o ATA proposto foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia da UFJF. As amostras de argamassas ensaiadas já haviam sido previamente moldadas e testadas em uma pesquisa relacionada ao mesmo tema na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC<sup>2</sup>), e foram cedidas por essa instituição. Suas condutividades térmicas determinadas com o uso do equipamento automático HFM 436, da marca NETZSCH, que se baseia no método estacionário do fluxo de calor, foram utilizadas como referência na montagem da curva de calibração do ATA. O equipamento HFM pertence ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC<sup>2</sup>) da UFOP.

#### 3.1. Princípio de funcionamento do Aparato Térmico Alternativo - ATA

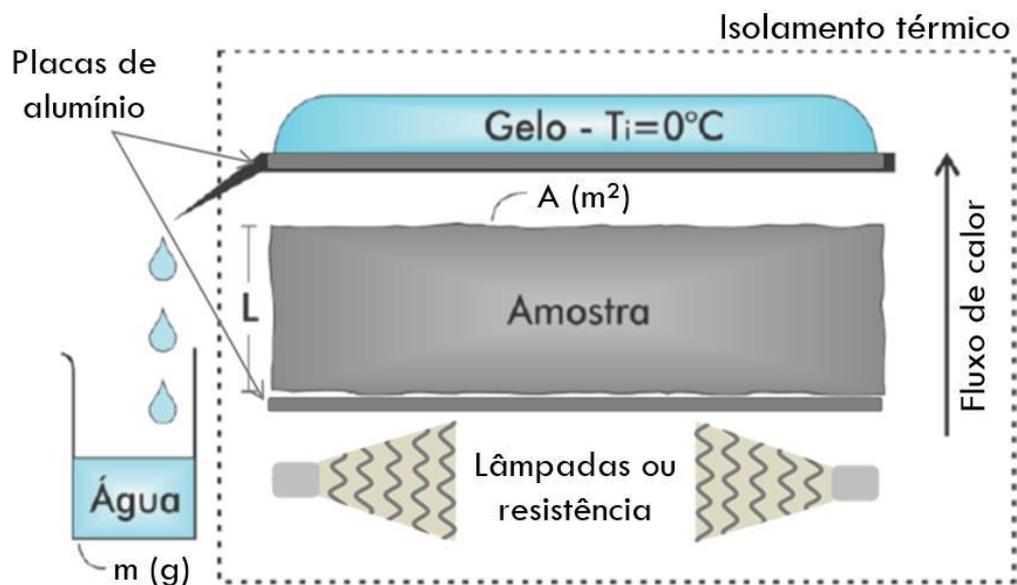
O Aparato Térmico Alternativo (ATA) desenvolvido no presente trabalho tem uma proposta de montagem simples para a medição da condutividade térmica de materiais isolantes em laboratório. O ATA segue os princípios dos métodos estacionários, baseados em regime permanente de transferência de calor para a medição da propriedade térmica. O equipamento foi confeccionado a partir do sistema placa quente/amostra/placa fria no interior de uma caixa de madeira, como pode ser observado, de modo esquemático, na Figura 13. O calor gerado pelas resistências elétricas aquecedoras é homogeneizado pela placa de alumínio e chega à

---

<sup>4</sup> Cotação do Euro em 04/04/2021: R\$ 6,71.

amostra de maneira distribuída, atravessando-a até chegar à placa de alumínio superior, que é aquecida de maneira uniforme, de modo a provocar o derretimento da camada inferior da placa de gelo sobreposta no topo do conjunto. A água derretida será coletada e pesada para representar a quantidade de calor que terá passado pelo material ensaiado. Espera-se, assim, que quanto maior a condutividade térmica do material, maior será o calor transmitido, e por consequência, maior o volume de água derretida e coletada.

Figura 13 – Princípio de funcionamento do Aparato Térmico Alternativo.



Fonte: Autora (2020).

A equação adaptada (equação 8) para a obtenção da condutividade térmica com o dispositivo segue os princípios da lei de Fourier unidirecional (equação 7), conforme mostrado a seguir:

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot \frac{L}{A \cdot \Delta T} \quad (8)$$

Onde:

$\lambda$  = condutividade térmica [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ];

$\Delta Q$  = massa de água (medida com precisão de 0,01 g) x calor latente de fusão da água (333 J/g), em Joules (J);

$\Delta t$  = tempo durante o qual a massa de água é derretida (precisão de 0,01 s);

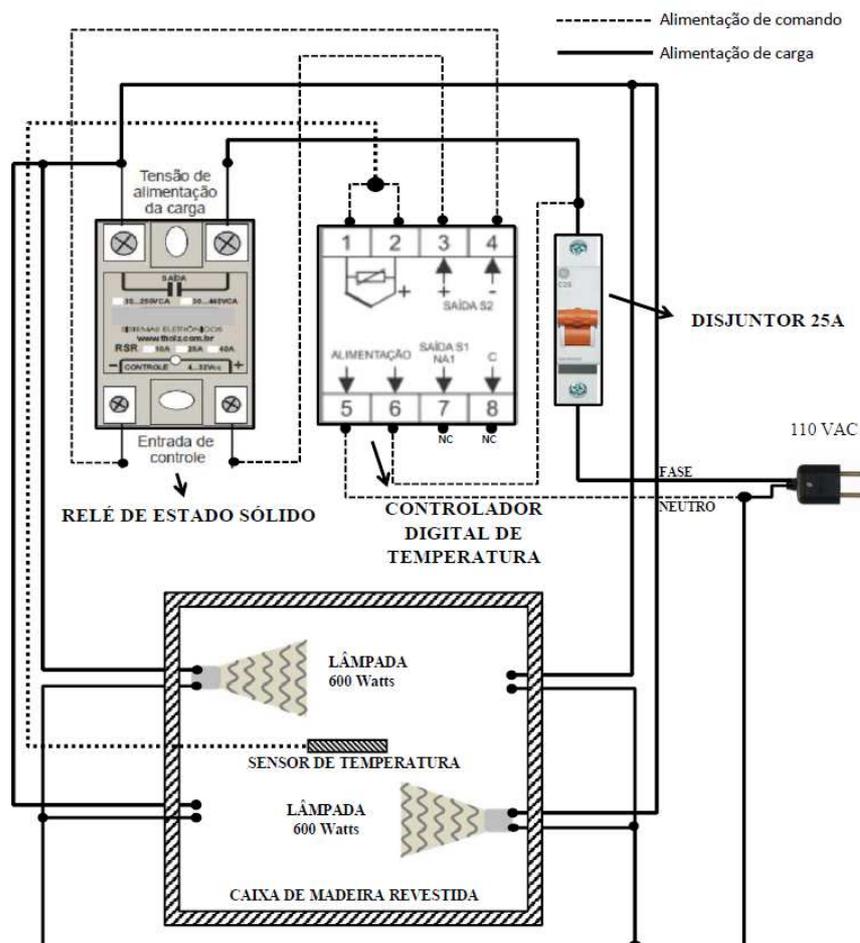
$L$  = espessura do corpo de prova (m);

$A$  = área da superfície do corpo-de-prova em contato com a placa de alumínio ( $m^2$ );

$\Delta T$  = diferença de temperatura entre a fonte de calor (controlada pelo operador na temperatura escolhida de  $40\text{ }^\circ\text{C}$  e o gelo ( $0\text{ }^\circ\text{C}$ ) (K).

O esquema de ligação do sistema de aquecimento com controle da temperatura encontra-se ilustrado na Figura 14, que mostra como funciona a geração de calor constante no interior da caixa. De forma geral, o controlador digital de temperatura recebe de um sensor a informação de temperatura, em graus Celsius, da placa de alumínio posicionada acima das resistências que emitem o calor. O controlador, previamente parametrizado na temperatura requerida, liga o relé de estado sólido sempre que a temperatura for inferior à programada; o relé, por sua vez, comanda o acionamento e desligamento das lâmpadas. O sensor de temperatura utilizado consiste em um termopar do tipo “J”, que pode ser utilizado em condições de  $-50$  a  $760\text{ }^\circ\text{C}$ .

Figura 14 – Ligação do sistema de aquecimento com controle de temperatura do ATA - desenho esquemático.



Fonte: Autora (2020).

A caixa foi projetada, inicialmente, para receber quatro resistências de 600 W. Porém, nos primeiros testes notou-se que a faixa de temperatura com as quatro resistências estava muito alta, ou seja, com um simples acionamento a temperatura subia em aproximadamente 10 °C acima do programado. Com isso, optou-se pela retirada de duas resistências do sistema e pela programação do controlador para uma temperatura de 39 °C, de modo que o acionamento das resistências ocorra a 38 °C. Com essa programação, a temperatura chegava a, no máximo, 42 °C no interior da caixa e a faixa de temperatura obtida ao longo do ensaio foi reduzida para 40 °C ( $\pm 2$  °C).

### **3.2. Critério para término do ensaio**

A metodologia proposta foi adaptada, a partir da NBR 15220 – parte 5 (ABNT, 2005), para o regime permanente de fluxo de calor, isto é, com coleta de resultados a partir do ponto em que não sofrem influência do tempo de ensaio. Como critério de término das leituras no ATA foi estabelecido que ao menos três medições sucessivas deveriam satisfazer às seguintes condições:

- a) Não é notada variação contínua crescente ou decrescente no valor de condutividade térmica calculado;
- b) Nenhuma medição individual da condutividade térmica deve variar mais que 5%, para cima ou para baixo, em relação à medição anterior.

### **3.3. Escolha e preparação das amostras de calibração**

As placas de argamassas ensaiadas foram moldadas na UFOP (Figura 15a), como já mencionado, com diversas composições e valores de condutividade térmica. Foram ensaiados materiais que possuem em sua composição, além dos materiais tradicionais (cimento, cal e agregado), rejeitos de minério de ferro, quartzito friável e escória de siderurgia e aditivo incorporador de ar. Todos estão relacionados a pesquisas desenvolvidas naquela universidade (MENDES, BARRETO, *et al.*, 2020) (MENDES, BARRETO, *et al.*, 2019), cujos autores demonstraram interesse e espírito de colaboração para o fornecimento das amostras e trocas de experiências. Foram ensaiados, também, materiais de construção especialmente isolantes, como poliestireno expandido (EPS, sigla em inglês) e madeira (pinus e compensado) (Figura 15b) para a elaboração da curva de calibração de forma mais completa em termos de valores de condutividade.

Figura 15 – Amostras ensaiadas: a) amostras de placas de argamassas com diferentes composições; b) amostras de placas de argamassa, compensado, pinus e EPS (respectivamente, da esquerda para a direita).



Fonte: Autora (2021).

As amostras utilizadas para a calibração do ATA possuem as dimensões 300 x 300 (mm) e espessura variável, entre 10 e 50 mm. Essa variação na espessura é compensada no ATA com o posicionamento e ajuste de calços posicionados no fundo da caixa que compõe o aparato, conforme será descrito adiante.

Todas as amostras foram previamente medidas, com oito leituras para a espessura e três leituras para o comprimento e para a largura da amostra. O valor adotado para cada uma das dimensões foi a média das leituras.

Para a realização dos ensaios, as amostras foram secas em estufa para a retirada da umidade presente nos poros do material, que pode influenciar nos resultados de condutividade térmica, pois a água é melhor condutora que o ar. As amostras de argamassas foram secas gradualmente com temperatura inicial de 40 °C e aumento de 20 °C a cada 24 horas até 80 °C, valor que permaneceu até se atingir constância de massa (diferença entre pesagens com intervalos de 12 horas abaixo de 0,05%). Para a amostra de madeira compensada, a metodologia foi a mesma, porém com temperaturas menores - 35 °C, 40 °C e 45 °C, de modo a se evitar contrações que provocassem empenamento. Para o EPS, a secagem ocorreu na temperatura de 40 °C, por 24 horas. A Tabela 5 mostra um resumo dos procedimentos de secagem para todos os materiais.

Como as amostras de argamassa e concreto saíam a 80 °C da estufa, caso colocadas no ATA de imediato, derreteriam a placa de gelo em curto intervalo de tempo. Com isso, convencionou-se um tempo de duas horas após a saída da estufa, para o esfriamento. Para os demais materiais não houve necessidade desse procedimento, uma vez que as temperaturas eram inferiores e próximas da temperatura da placa quente.

Tabela 5 – Procedimentos de secagem das amostras.

| Material da amostra | Procedimentos de secagem em estufa<br>(tempo e temperatura) |            |            | Pesagem                                   |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|------------|------------|-------------------------------------------|
|                     | 24 horas                                                    | + 24 horas | + 24 horas |                                           |
| Argamassas          | 40 °C                                                       | + 20 °C    | + 20 °C    | A cada 12 horas, até constância de massa. |
| Madeira compensada  | 35 °C                                                       | + 5 °C     | + 5 °C     | A cada 12 horas, até constância de massa. |
| EPS                 | 40 °C                                                       |            |            | Após 24 horas na estufa.                  |

Fonte: Autora (2021).

Para a preparação da placa de gelo foi estabelecido um volume padrão de água de 3,5 litros, com o preenchimento da forma plástica em duas etapas (2,5 litros + 1,0 litro após 24 horas), de maneira a evitar deformação do gelo e do recipiente durante o congelamento. Por fim, o ambiente do laboratório era climatizado, mantido com temperatura de  $23 \pm 3$  °C.

### 3.4. Veracidade e precisão do equipamento

Para analisar a exatidão do ATA baseou-se na NBR ISO 5725 – Exatidão (veracidade e precisão) dos métodos e dos resultados de medição (ABNT, 2018), que “define os valores que descrevem, em termos quantitativos, a capacidade de um método de medição fornecer resultados corretos (veracidade) ou de reproduzir um dado resultado (precisão)” (ABNT, 2018, p. 1). Segundo a NBR ISO 5725 (ABNT, 2018), veracidade se refere ao grau de concordância entre o valor médio de muitos resultados de ensaio e o seu valor verdadeiro, mensurado por um método reconhecido, expressa em termos de tendência. Para verificar a veracidade do método desenvolvido na presente pesquisa, os valores encontrados foram comparados com valores de referência provenientes do equipamento automático Lambda HFM 436, da marca NETZSCH, que se baseia no método estacionário do fluxo de calor (HFM). A partir dessa comparação foram elaboradas curvas de correlação dos resultados do ATA com os resultados de referência.

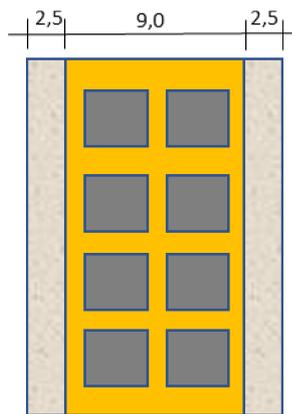
### 3.5. Impacto dos resultados encontrados na transmitância térmica

Conforme abordado anteriormente (item 2.1.4), a condutividade térmica exerce influência direta na transmitância térmica de paredes e, portanto, tem extrema importância em estudos de conforto de edificações. Surge, portanto, a necessidade de verificação do impacto das diferenças entre valores de condutividade encontrados com o ATA e valores de referência, seu impacto no

cálculo de U e suas eventuais consequências na avaliação de paredes de acordo com os limites da norma ABNT NBR 15575-4, apresentados na Tabela 3. Em outras palavras, vale verificar se, em função de uma diferença de valor de condutividade encontrado, ou do conjunto delas, um determinado tipo de parede pode passar a não obedecer aos limites de U para uma ou mais zonas bioclimáticas (ZB).

Para a verificação, escolheu-se uma configuração de parede extremamente comum no cenário brasileiro, composta de três camadas: emboço externo de argamassa cimentícia, alvenaria de bloco cerâmico vazado e emboço interno de argamassa cimentícia (Figura 16). A espessura do emboço foi fixada em 2,5 cm, tanto a camada externa quanto para a interna, e a espessura do bloco adotada foi de 9,0 cm.

Figura 16 – Configuração de parede de alvenaria para verificação da influência dos resultados do ATA no cálculo da transmitância térmica (U).



Fonte: Autora (2021).

Os cálculos foram feitos em planilha eletrônica, com fórmulas que seguiram o que estabelece a norma NBR 15220 – “Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações” (ABNT, 2005). A argamassa interna e a argamassa de assentamento foram consideradas sempre argamassas comuns, com  $\lambda = 1,15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , variando-se o valor de  $\lambda$  da camada interna, de acordo obtidos nos ensaios com o ATA e com o HFM. Para o valor de condutividade da cerâmica do bloco adotou-se  $0,9 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  (ABNT, 2005).

## 4. Resultados e discussão

### 4.1. Montagem do ATA

#### 4.1.1. Materiais utilizados

Para a montagem do ATA foi necessário o material listado e com cotação de preços da Tabela 6. Alguns materiais foram reutilizados a partir de sobras de processos de instalações hidráulicas, de esquadrias e de montagem de armários e, portanto, cotados de forma aproximada. Com isso, o valor total gasto para a montagem e execução dos ensaios com o ATA foi de R\$ 935,82 a partir de uma cotação realizada no ano de 2021. Vale mencionar que essa lista e o detalhamento dos componentes a seguir não foram observados em nenhum trabalho da mesma temática.

Tabela 6 – Lista de materiais utilizados para a montagem e execução de ensaios no ATA.

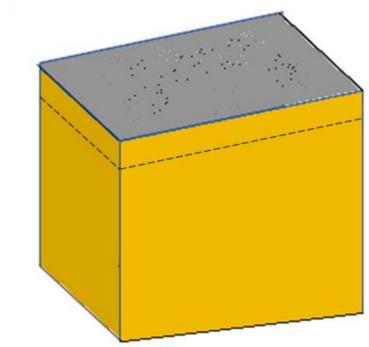
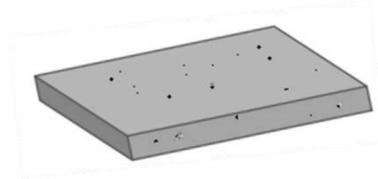
| <b>Material</b>                                         | <b>Quantidade</b> | <b>Preços<br/>ref. 25/07/2021 (R\$)</b> |
|---------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|
| Caixa de madeira                                        | 1                 | 40,00                                   |
| Controlador digital de temperatura                      | 1                 | 195,00                                  |
| Relé de estado sólido 40 <sup>a</sup>                   | 1                 | 73,00                                   |
| Disjuntor 25 <sup>a</sup>                               | 1                 | 8,50                                    |
| Termopar tipo "J"                                       | 1                 | 27,00                                   |
| Resistência Cônica Cerâmica 600w X 127V Com Bocal E27   | 2                 | 79,96                                   |
| Plug 20A                                                | 1                 | 12,99                                   |
| Pasta térmica (tubo 10g)                                | 1                 | 7,00                                    |
| Placas de alumínio 30 x 30 x 0,5 (cm)                   | 2                 | 198,00                                  |
| Isolamento (cortiça e lã de vidro)                      | -                 | 60,00                                   |
| Tampa do sistema (Isopor e fita adesiva)                | -                 | 23,95                                   |
| Tubo de PVC rígido Ø 25 mm adaptado com rosca 17,5 (cm) | 4                 | 4,54                                    |
| Parafuso de união plástico                              | 4                 | 2,44                                    |
| Canaleta de alumínio tipo "U" (peças de 4 cm)           | 5                 | 1,34                                    |
| Dissipador (perfil de alumínio)                         | 1                 | 27,91                                   |
| Cabo flexível Ø1 mm (m)                                 | 2                 | 2,60                                    |
| Cabo flexível Ø 4 mm (m)                                | 5                 | 13,38                                   |
| Fita isolante (rolo)                                    | 1                 | 4,65                                    |
| Canaleta barra com adesivo para fixação (m)             | 1                 | 11,61                                   |
| Deflector (tubo de alumínio 80 mm cortado)              | 2                 | 24,00                                   |
| Formas plásticas para gelo                              | 2                 | 44,40                                   |
| Perfil siliconado de vedação aba flexível (m)           | 1,20              | 43,85                                   |
| Mangueira cristal (m)                                   | 1                 | 8,00                                    |
| Cola epóxi (tubo 16g)                                   | 1                 | 21,70                                   |
| <b>Total</b>                                            |                   | <b>935,82</b>                           |

Fonte: Autora (2021).

A caixa de madeira foi projetada com formato e dimensões tais que permitissem: i) que as amostras quadradas (30 x 30 cm) ficassem precisamente encaixadas internamente junto do isolamento interno, sem frestas; ii) que a face da placa que fica voltada para cima no ensaio coincidisse com o plano formado pela boca da caixa, em sua parte superior; iii) uma inclinação no topo que favorecesse o escoamento da água derretida na placa superior de alumínio (Figura 17). O desenho da Figura 18 apresenta as dimensões exatas da caixa de madeira e da tampa.

Figura 17 – Posição da amostra na caixa de madeira do ATA.

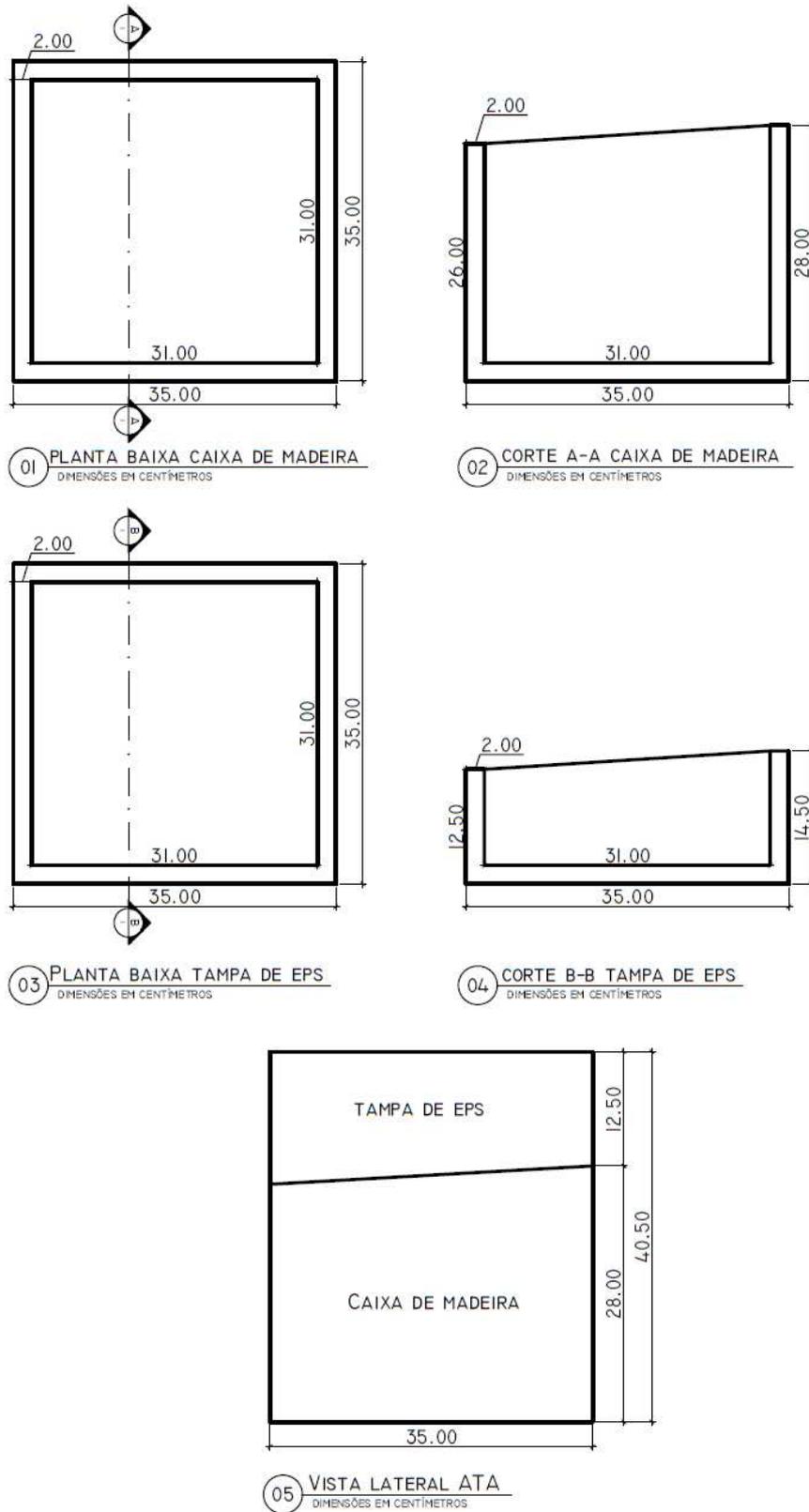
Placa de argamassa ou concreto



Caixa de madeira

Fonte: Autora (2021).

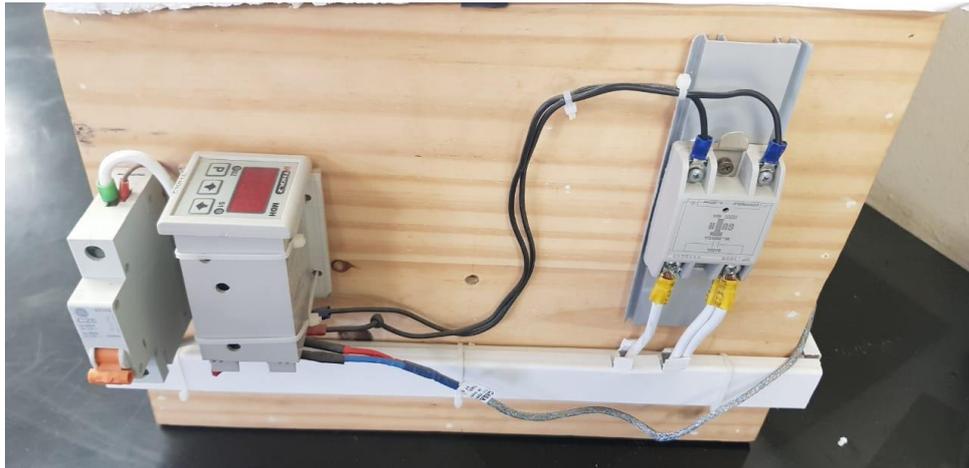
Figura 18 – Projeto do ATA.



Fonte: Autora (2021).

O controlador digital de temperatura, o termopar, o relé de estado sólido, o disjuntor, as resistências, a pasta térmica e o plug compõem a instalação da geração do calor e controle da temperatura da placa quente (Figura 19). A pasta térmica melhora a área de contato dos componentes, por isso foi utilizada tanto no termopar quanto no relé.

Figura 19 – Componentes externos da instalação da geração do calor e controle da temperatura relativo à placa quente: disjuntor, controlador digital de temperatura, relé de estado sólido.



Fonte: Autora (2021).

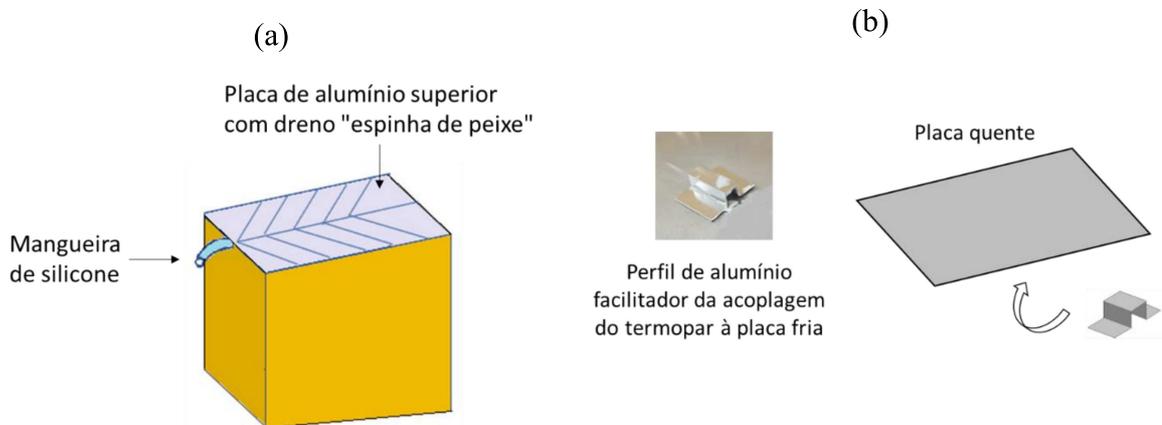
As placas de alumínio passaram por trabalhos facilitadores de suas funções: na placa fria foi realizada uma usinagem<sup>5</sup>, com sulcos em formato de “espinha de peixe”, para favorecer o escoamento da água derretida; na placa quente foi colado um perfil de alumínio para melhor fixação do termopar, como mostra a Figura 20b. Na mesma Figura 20a pode-se observar também, a mangueira de silicone usada para direcionar a água derretida para o recipiente de coleta.

As formas plásticas foram necessárias para a moldagem das placas de gelo no tamanho adequado, em relação à placa fria. O perfil siliconado foi utilizado como vedação lateral da placa fria.

---

<sup>5</sup> Usinagem realizada em parceria com o Laboratório de Processos de Fabricação da UFJF, pelo técnico Elias Ramos Vilas Boas.

Figura 20 – Placa fria de alumínio com usinagem para escoamento da água e mangueira acoplada, posicionadas sobre a caixa; b) Perfil de alumínio (foto) e desenho ilustrativo do posicionamento para favorecer a acoplagem do termopar na placa quente.



Fonte: Autora (2020).

Para restringir ao máximo a troca de calor com o meio externo foi instalado um isolamento interno de folha de cortiça na parte superior da caixa para que o alumínio da lâ de vidro não conduzisse o calor da parte inferior pelas laterais (Figura 21).

Figura 21 – Detalhe interno do ATA.



Fonte: Autora (2020).

Para que o bloco de gelo também não trocasse calor com o meio externo, foi confeccionada uma tampa de poliestireno expandido (EPS) para cobri-lo, com fita adesiva ao redor para reforço e proteção (Figura 22).

Figura 22 – ATA em funcionamento.



Fonte: Autora (2020).

O tubo de PVC adaptado com rosca e o parafuso de união plástico foram utilizados para suportar todo o sistema de placa quente/amostra/placa fria, permitindo um ajuste fino de acordo com as variações do tamanho da amostra utilizada (Figura 21). A canaleta de alumínio do tipo “U” foi utilizada tanto para fixar o tubo de PVC nas laterais internas da caixa, quanto para manter o termopar encostado na placa quente.

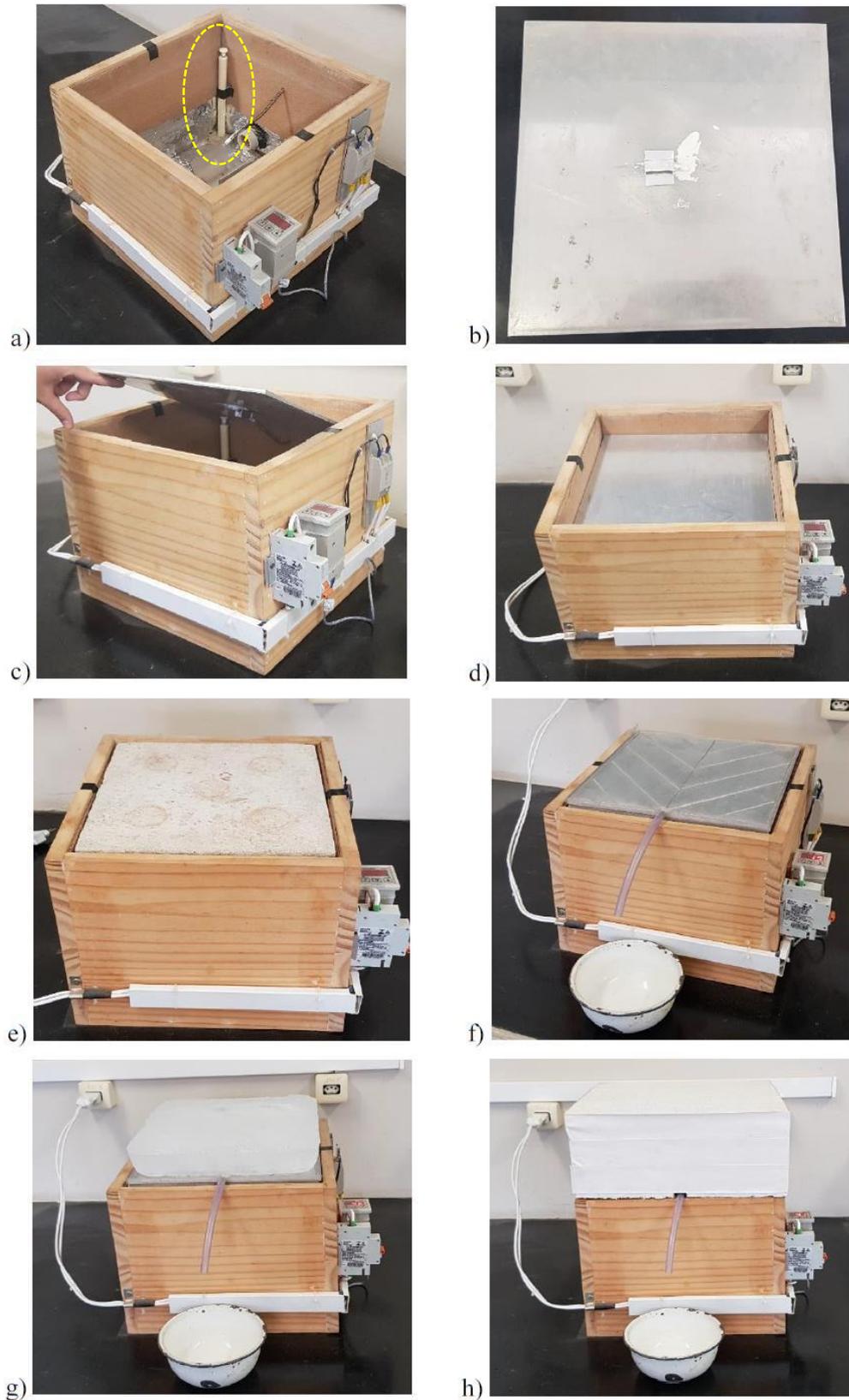
O dissipador de alumínio foi anexado na lateral da caixa junto do relé de estado sólido para que a energia térmica gerada durante o seu funcionamento possa ser dissipada e não danifique o equipamento. Os cabos foram utilizados para fazer as ligações entre as partes da instalação de geração e controle de calor. A fita isolante foi necessária para fazer isolamento nas ligações elétricas. A canaleta recebeu a essa fiação. O deflector (tubo de alumínio cortado) foi necessário para a proteção do isolamento quanto ao calor gerado pelas resistências, refletindo o calor e protegendo o fundo da caixa de madeira. Por fim, a cola epóxi foi utilizada para fixação dos elementos, tais como o perfil siliconado e a mangueira na placa fria, isolamento na caixa de madeira etc.

## 4.2. Procedimento de ensaio

O ensaio de medição de condutividade térmica no ATA foi realizado de acordo com a sequência de procedimentos a seguir:

- i. Conferir se os calços das placas estão posicionados na altura certa (ajuste fino por meio de parafuso) e se estão seguros (Figura 23a);
- ii. Passar uma camada generosa de pasta térmica em torno da ponta do termopar e da superfície da placa inferior (quente) de alumínio (Figura 23b);
- iii. Posicionar a placa inferior de alumínio no interior da caixa, encaixando-se o termopar no apoio fixado na placa, de forma a obter o contato placa/termopar (Figura 23c e Figura 23d);
- iv. Medir as dimensões da amostra, pesá-la e posicioná-la em cima da placa de alumínio (Figura 23e);
- v. Posicionar placa superior (fria) de alumínio (com sulcos de drenagem) sobre a superfície da amostra (Figura 23f);
- vi. Retirar a placa de gelo do freezer, pesá-la e colocá-la sobre a superfície da placa superior de alumínio (Figura 23g);
- vii. Cobrir o gelo com a tampa de EPS (Figura 23h);
- viii. Ligar o ATA na tomada com o controlador programado em 39 °C;
- ix. Esperar 30 minutos até a primeira leitura - coletar a água derretida durante dois minutos e pesar;
- x. Realizar as outras leituras de 15 em 15 minutos, até que se atinja o regime permanente e seja atingido o critério de parada estabelecido no item 3.2;
- xi. Realizar a medição da temperatura e da umidade em que se encontra o ambiente no entorno próximo ao ATA;
- xii. Finalizado o ensaio, desligar o ATA da tomada e retirar a placa de gelo junto com a placa superior metálica;
- xiii. Retirar o corpo de prova e pesá-lo.

Figura 23 – Estágios de montagem do ensaio no ATA.

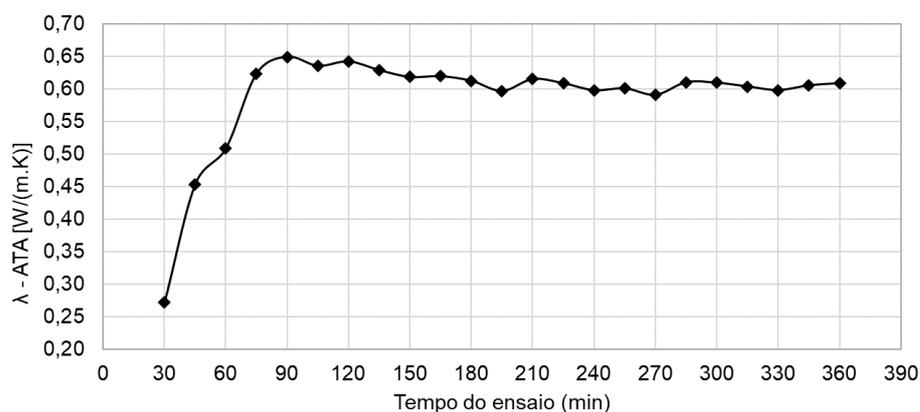


Fonte: Autora (2020).

### 4.3. Confirmação do critério de término do ensaio adotado

Ao longo dos ensaios com argamassas observou-se que o critério de término das leituras adotado, indicando que o regime permanente foi atingido, deu-se em torno de duas horas de ensaio. Para confirmar essa condição foi realizado um ensaio com duração de seis horas, cujo resultado se encontra na Figura 24. Pode-se notar que, após noventa minutos iniciais de ensaio, começa a ocorrer a estabilização dos resultados encontrados, indicando que o regime estacionário foi alcançado. A ligeira queda observada entre 120 e 360 minutos talvez tenha se dado em função do ATA não ter um isolamento perfeito, mas que ainda sim é considerada desprezível. Combinando-se esta observação com os critérios descritos em 3.2, pode-se afirmar que o término da maioria dos ensaios se deu em torno de duas horas, em função da precisão desejada do aparato e dentro de um intervalo de tempo razoável para sua aplicabilidade em laboratório.

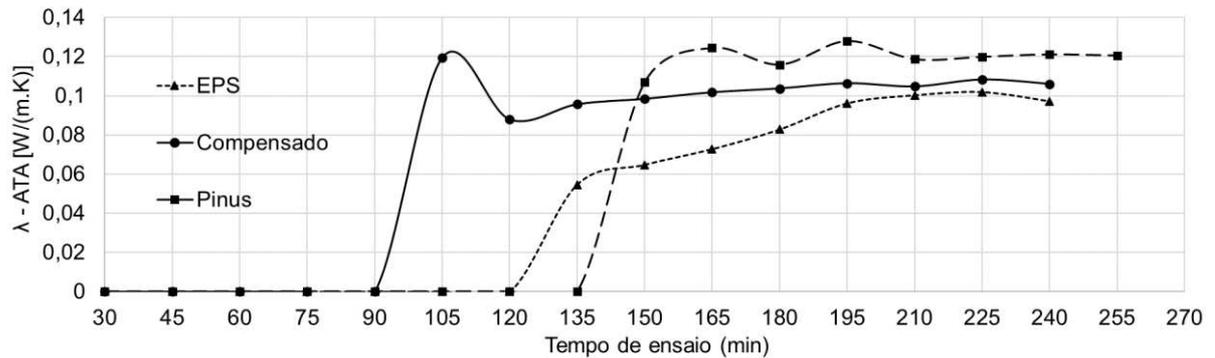
Figura 24 – Análise do tempo de ensaio para atingir o regime estacionário com o ATA.



Fonte: Autora (2020).

Para os materiais mais isolantes ensaiados (placa de EPS, chapa de madeira compensada e tábuas de pinus), observou-se que o período até a estabilização foi maior. Para o EPS e o pinus ocorreu a partir de 210 minutos de ensaio e, para o compensado, a partir de 150 minutos, aproximadamente (Figura 25). Essa condição era esperada e pode ser justificada pela baixa condutividade térmica desses materiais, quando comparada à das argamassas ensaiadas - por serem mais isolantes, impedem com mais eficiência a propagação do fluxo de calor no interior do ATA para derreter o gelo. Quanto ao critério de término, as condições foram aquelas mesmas já descritas em 3.2.

Figura 25 – Comportamento do ATA com EPS e madeiras -  $\lambda$  menor que 0,075 W/(m.K).



Fonte: Autora (2021).

#### 4.4. Veracidade do ATA - dispersão dos resultados de calibração

A Tabela 7 apresenta os resultados de condutividade térmica de 35 ensaios válidos realizados com o ATA, a saber: 30 placas de argamassa fornecidas pela UFOP, duas placas de EPS, duas placas de madeira compensada e uma placa de tábua de pinus. Paralelamente, são mostrados também os valores de referência obtidos no aparelho HFM.

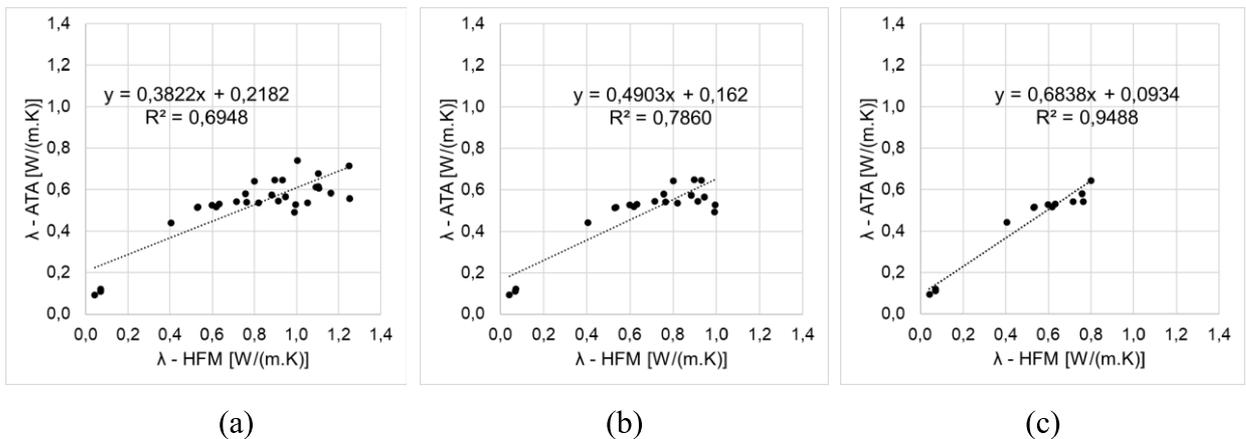
A partir dos ensaios realizados nas condições especificadas na metodologia, no capítulo anterior, obteve-se a correlação dos resultados obtidos no ATA com os resultados do equipamento automático HFM. Considerando todo o conjunto de valores de condutividade térmica apresentados na Tabela 7, o coeficiente de determinação  $R^2$  foi de 0,69 (Figura 26a). Ao analisar apenas valores de condutividade térmica menores que 1,0 W/(m·K) (Figura 26b), observou-se uma melhoria na correlação, com aumento do coeficiente de determinação, ou seja,  $R^2 = 0,78$ . Quando se limita ainda mais a faixa de comparação para  $\lambda \leq 0,80$  W/(m·K) (Figura 26c), a correlação melhora novamente, com  $R^2$  próximo de 1,00. Essa tendência pode ser entendida como uma faixa em que o aparato seria mais preciso. Outros equipamentos possuem limitações semelhantes e, em alguns deles, é necessário fazer adaptações para ampliar a faixa de aplicabilidade. Como exemplo, o método da placa quente protegida (ABNT, 2005) pode ser aplicado em materiais com condutividade inferior a 2,0 W/(m·K). Franco (2007) alcançou em seu estudo a faixa de 0,2 a 1,5 W/(m·K), mas mencionou que esse intervalo poderia ser ampliado com técnicas de refinamento.

Tabela 7 – Resultados de condutividade térmica - HFM e ATA.

| <b>N. da amostra</b> | <b>Material</b> | <b><math>\lambda</math> HFM<br/>[W/(m.K)]</b> | <b><math>\lambda</math> ATA<br/>[W/(m.K)]</b> |
|----------------------|-----------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1                    | EPS_1           | 0,043                                         | 0,088                                         |
| 2                    | EPS_2           | 0,043                                         | 0,100                                         |
| 3                    | COMPENSADO_1    | 0,070                                         | 0,118                                         |
| 4                    | COMPENSADO_2    | 0,070                                         | 0,100                                         |
| 5                    | PINUS           | 0,071                                         | 0,121                                         |
| 6                    | ARGAMASSA_1     | 0,405                                         | 0,442                                         |
| 7                    | ARGAMASSA_2     | 0,530                                         | 0,514                                         |
| 8                    | ARGAMASSA_3     | 0,534                                         | 0,518                                         |
| 9                    | ARGAMASSA_3     | 0,598                                         | 0,527                                         |
| 10                   | ARGAMASSA_5     | 0,617                                         | 0,518                                         |
| 11                   | ARGAMASSA_6_1   | 0,632                                         | 0,532                                         |
| 12                   | ARGAMASSA_6_2   | 0,632                                         | 0,531                                         |
| 13                   | ARGAMASSA_7     | 0,715                                         | 0,544                                         |
| 14                   | ARGAMASSA_8     | 0,757                                         | 0,580                                         |
| 15                   | ARGAMASSA_9     | 0,764                                         | 0,542                                         |
| 16                   | ARGAMASSA_10    | 0,800                                         | 0,642                                         |
| 17                   | ARGAMASSA_11    | 0,820                                         | 0,538                                         |
| 18                   | ARGAMASSA_12    | 0,883                                         | 0,575                                         |
| 19                   | ARGAMASSA_13    | 0,897                                         | 0,647                                         |
| 20                   | ARGAMASSA_14    | 0,914                                         | 0,546                                         |
| 21                   | ARGAMASSA_15    | 0,932                                         | 0,646                                         |
| 22                   | ARGAMASSA_16    | 0,946                                         | 0,565                                         |
| 23                   | ARGAMASSA_17    | 0,991                                         | 0,493                                         |
| 24                   | ARGAMASSA_18    | 0,995                                         | 0,529                                         |
| 25                   | ARGAMASSA_19    | 1,005                                         | 0,741                                         |
| 26                   | ARGAMASSA_20    | 1,053                                         | 0,590                                         |
| 27                   | ARGAMASSA_21_1  | 1,091                                         | 0,604                                         |
| 28                   | ARGAMASSA_21_2  | 1,091                                         | 0,623                                         |
| 29                   | ARGAMASSA_22    | 1,102                                         | 0,614                                         |
| 30                   | ARGAMASSA_23    | 1,103                                         | 0,678                                         |
| 31                   | ARGAMASSA_24    | 1,107                                         | 0,608                                         |
| 32                   | ARGAMASSA_25    | 1,163                                         | 0,584                                         |
| 33                   | ARGAMASSA_26    | 1,249                                         | 0,716                                         |
| 34                   | ARGAMASSA_27_1  | 1,252                                         | 0,561                                         |
| 35                   | ARGAMASSA_27_2  | 1,252                                         | 0,556                                         |

Fonte: Autora (2021).

Figura 26 – Correlação entre resultados de ensaios ATA e HFM: a) todos os resultados; b) resultados menores que 1,0 W/(m·K); c) resultados menores que 0,8 W/(m·K).



Fonte: Autora (2021).

A Tabela 8 mostra o conjunto de valores de  $\lambda \leq 0,80$  W/(m·K) obtidos com o ATA e sua diferença percentual em relação aos valores medidos pelo HFM. Nota-se, para as argamassas, que quase todos os resultados (exceção para o menor deles) do ATA são menores, com a diferença percentual entre 3% e 20%. Observa-se, ainda para as argamassas, a tendência de diminuição da diferença absoluta à medida que diminui o valor de condutividade. Os menores resultados encontrados podem ser justificados pelo fato de o isolamento no ATA não ser perfeito e, dessa forma, uma parcela do calor gerado pode estar ter sido perdido, não se transferindo diretamente para a placa de gelo, ocasionando menor resultado para a condutividade térmica. Para os demais materiais mais isolantes (madeira e EPS), as diferenças percentuais foram bem mais altas, não em valores absolutos. No entanto, nota-se que isso ocorre para os resultados de condutividade muito baixos, cuja variação pode estar sujeita a fatores muito sensíveis que afetam a precisão do ensaio em níveis que certamente o ATA não possui.

Tabela 8 – Variação percentual dos resultados de  $\lambda \leq 0,80 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  medidos no ATA, em relação aos valores de referência do HFM.

| Material   | $\lambda$ HFM<br>[W/(m.K)] | $\lambda$ ATA<br>[W/(m.K)] | Variação<br>Percentual |
|------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| EPS        | 0,043                      | 0,092                      | 114%                   |
| Compensado | 0,070                      | 0,109                      | 56%                    |
| Pinus      | 0,071                      | 0,121                      | 70%                    |
|            | 0,405                      | 0,442                      | 9%                     |
|            | 0,530                      | 0,514                      | -3%                    |
|            | 0,534                      | 0,518                      | -3%                    |
|            | 0,598                      | 0,527                      | -12%                   |
| Argamassas | 0,617                      | 0,518                      | -16%                   |
|            | 0,632                      | 0,531                      | -16%                   |
|            | 0,715                      | 0,544                      | -24%                   |
|            | 0,757                      | 0,580                      | -23%                   |
|            | 0,764                      | 0,542                      | -29%                   |
|            | 0,800                      | 0,642                      | -20%                   |

Fonte: Autora (2021).

#### 4.5. Aplicação e limitações do equipamento

O método proposto no presente trabalho se aplica à medição, em regime permanente, da condutividade térmica de materiais de construção sólidos em forma de placa de dimensões 300 x 300 mm e espessura entre 20 e 50 mm. Por ser de pequeno porte, o ATA pode ser facilmente transportado e instalado em outro local, bastando que haja instalação elétrica adequada, além de: a) possibilidade de fabricar as placas de gelo previstas no ensaio; b) estufa para secagem das amostras; c) balança de precisão; d) ambiente climatizado.

Como em muitos experimentos de laboratório da área de materiais de construção, o ensaio com o ATA depende de um certo nível de habilidade do operador, no sentido de manusear componentes delicados e manter o controle das condições gerais do ambiente, não havendo, entretanto, necessidade de capacitação além do treino em algumas amostras.

Os resultados obtidos para as amostras estudadas indicam melhor funcionamento para amostras de  $\lambda \leq 0,80 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Essa pode ser uma limitação do aparelho, a ser verificada com outros materiais e maior número de testes.

#### 4.6. Impacto dos resultados de transmitância térmica de paredes

Os resultados de U, calculados conforme o item 3.5, encontram-se na Tabela 9. A maior diferença percentual encontrada entre os valores das determinações com o ATA e o HFM foi de 6% e a média entre todas as medições, em valores absolutos, foi de 3%.

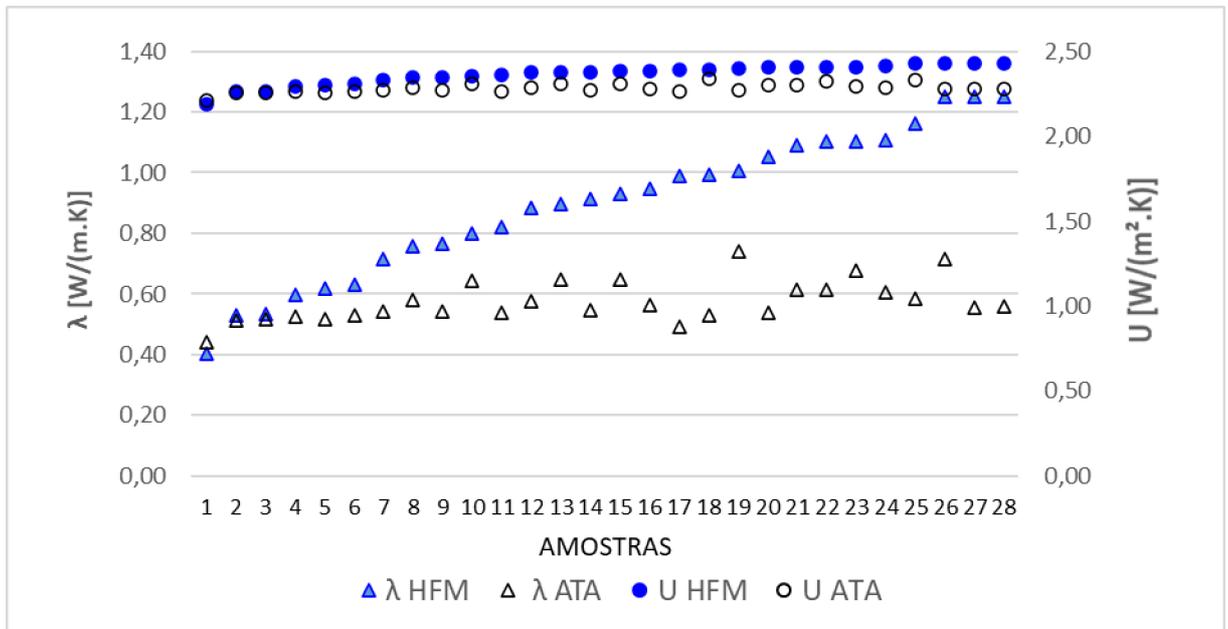
Tabela 9 – Valores de  $\lambda$  determinados no ATA e no HFM e os respectivos valores de U calculados de acordo com a NBR 15220-4 para parede de alvenaria de bloco cerâmico vazado e emboço de argamassa cimentícia externo e interno.

| Amostra        | (1)                      | (2)                            | (3)                      | (4)                            | (5)                                                             |
|----------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|                | $\lambda$ HFM<br>W/(m·K) | U HFM<br>W/(m <sup>2</sup> ·K) | $\lambda$ ATA<br>W/(m·K) | U ATA<br>W/(m <sup>2</sup> ·K) | Diferença percentual<br>entre valores de U<br>100.[(4)-(2)]/(2) |
| Argamassa_1    | 0,405                    | 2,186                          | 0,442                    | 2,212                          | 1%                                                              |
| Argamassa_2    | 0,530                    | 2,263                          | 0,514                    | 2,255                          | 0%                                                              |
| Argamassa_3    | 0,534                    | 2,265                          | 0,518                    | 2,257                          | 0%                                                              |
| Argamassa_3    | 0,598                    | 2,293                          | 0,527                    | 2,261                          | -1%                                                             |
| Argamassa_5    | 0,617                    | 2,300                          | 0,518                    | 2,257                          | -2%                                                             |
| Argamassa_6_1  | 0,632                    | 2,306                          | 0,531                    | 2,263                          | -2%                                                             |
| Argamassa_6_2  | 0,715                    | 2,333                          | 0,544                    | 2,270                          | -3%                                                             |
| Argamassa_7    | 0,757                    | 2,344                          | 0,580                    | 2,285                          | -3%                                                             |
| Argamassa_8    | 0,764                    | 2,346                          | 0,542                    | 2,268                          | -3%                                                             |
| Argamassa_9    | 0,800                    | 2,355                          | 0,642                    | 2,309                          | -2%                                                             |
| Argamassa_10   | 0,820                    | 2,360                          | 0,538                    | 2,267                          | -4%                                                             |
| Argamassa_11   | 0,883                    | 2,373                          | 0,575                    | 2,283                          | -4%                                                             |
| Argamassa_12   | 0,897                    | 2,376                          | 0,647                    | 2,311                          | -3%                                                             |
| Argamassa_13   | 0,914                    | 2,379                          | 0,546                    | 2,270                          | -5%                                                             |
| Argamassa_14   | 0,932                    | 2,382                          | 0,646                    | 2,311                          | -3%                                                             |
| Argamassa_15   | 0,946                    | 2,385                          | 0,565                    | 2,279                          | -4%                                                             |
| Argamassa_16   | 0,991                    | 2,393                          | 0,493                    | 2,262                          | -5%                                                             |
| Argamassa_17   | 0,995                    | 2,394                          | 0,529                    | 2,340                          | -2%                                                             |
| Argamassa_18   | 1,005                    | 2,402                          | 0,741                    | 2,267                          | -6%                                                             |
| Argamassa_19   | 1,053                    | 2,407                          | 0,539                    | 2,299                          | -4%                                                             |
| Argamassa_20   | 1,091                    | 2,408                          | 0,613                    | 2,299                          | -5%                                                             |
| Argamassa_21_1 | 1,102                    | 2,409                          | 0,614                    | 2,321                          | -4%                                                             |
| Argamassa_21_2 | 1,103                    | 2,409                          | 0,678                    | 2,297                          | -5%                                                             |
| Argamassa_22   | 1,107                    | 2,416                          | 0,608                    | 2,287                          | -5%                                                             |
| Argamassa_23   | 1,163                    | 2,426                          | 0,584                    | 2,333                          | -4%                                                             |
| Argamassa_24   | 1,249                    | 2,426                          | 0,716                    | 2,275                          | -6%                                                             |
| Argamassa_25   | 1,252                    | 2,426                          | 0,556                    | 2,277                          | -6%                                                             |
| Argamassa_26   | 1,252                    | 2,426                          | 0,561                    | 2,277                          | -6%                                                             |

Fonte: Autora (2021).

A Figura 27 destaca, graficamente, as diferenças de valores de  $\lambda$  obtidos no ATA em relação àqueles do HFM, assim como os valores calculados de U para a configuração de parede proposta.

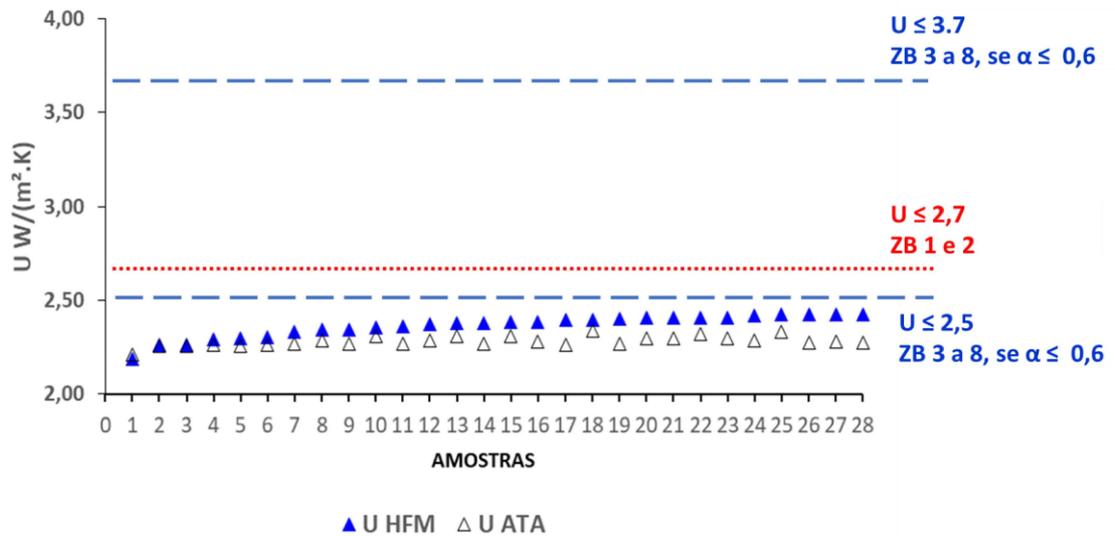
Figura 27 – Condutividade e transmitância calculada de acordo com a NBR 15220-4.



Fonte: Autora (2021).

Com o objetivo de enquadrar os valores calculados de U nos critérios de transmitância recomendados para as zonas bioclimáticas brasileiras, a seguir são inseridos, graficamente, Figura 28, os limites da norma NBR 15575. As linhas tracejadas mostram os limites abaixo dos quais devem se encontrar os valores de transmitância térmica para paredes nas ZBs 3 a 8 e a linha pontilhada mostra o limite máximo para as ZBs 1 e 2.

Figura 28 – Verificação dos valores de transmitância térmica calculados em função dos limites prescritos pela NBR 15575 para as ZBs brasileiras



Fonte: Autora (2021).

Observa-se que os valores de  $U$  obtidos a partir dos resultados de condutividade térmica do ATA não alteram a posição da configuração de parede estudada em relação aos limites da norma para nenhuma das zonas bioclimáticas. Essa constatação, evidentemente, serve como verificação para os limites atualmente em vigor, que podem sofrer alteração em futuras revisões da NBR 15575 ou da NBR 15220. Essa verificação pode ser feita, também, para outras configurações de parede, como as de concreto maciço, parede de bloco cerâmico maciço e parede de bloco de concreto, por exemplo. Os reflexos da obtenção de  $U$  com os resultados do ATA, finalmente, podem ser verificados também em simulações computacionais de desempenho energético de edificações.

## 5. Conclusão

O objetivo da presente dissertação de mestrado foi desenvolver um equipamento de baixo custo para medição da condutividade térmica de materiais de construção, especialmente argamassas, em laboratório, seguindo os princípios dos métodos estacionários. Esses métodos funcionam a partir de um regime permanente de transferência de calor para a medição da propriedade térmica. O Aparato Técnico Alternativo (ATA) desenvolvido foi projetado para amostras em forma de placas rígidas de dimensões 300 x 300 (mm) e espessuras em torno de 50 mm. Um dos principais usos pensados pela autora foi para argamassas de revestimento, tema estudado em uma das linhas de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFJF – PEC. Buscou-se desenvolver um aparelho que pudesse ser reproduzido com facilidade em outros laboratórios, uma vez que equipamentos automáticos chegam a custar valores impraticáveis para a realidade da pesquisa brasileira. No caso do ATA, o seu desenvolvimento custou cerca de R\$ 900,00.

A construção do ATA, de uma forma geral, não requereu mão de obra especializada, ou seja, com os detalhes aqui apresentados é perfeitamente possível sua reprodução, com materiais encontrados facilmente em qualquer localidade. Além disso, o manuseio do equipamento também não é complexo e as condições de ensaio foram sendo aperfeiçoadas ao longo da presente pesquisa, como a colocação de suportes ajustáveis para placas de diferentes espessuras, o desenho de sulcos na placa metálica superior para coleta da água e o tempo de estabilização das leituras para o término dos ensaios, entre outros ajustes. Os resultados de 35 ensaios válidos com o ATA, que envolveram placas de EPS (2), placas de madeira (3) e placas de argamassa (30) apresentaram boa correlação com os valores do equipamento automático de referência, com coeficiente de determinação  $R^2$  próximo de 0,95 para condutividades térmicas menores ou iguais a 0,80 W/(m·K).

Com os resultados dos ensaios de determinação de  $\lambda$ , calculou-se a transmitância térmica (U) de uma configuração de parede muito comum no cenário das edificações brasileiras, constituída por alvenaria de blocos cerâmicos vazados e revestimento de reboco de argamassa cimentícia nos dois lados. O intuito foi verificar o impacto da diferença dos resultados do ATA em relação aos valores de referência nos valores de U, uma vez que essa propriedade é amplamente utilizada como parâmetro em estudos de desempenho térmico e em simulações

computacionais da área de conforto de edificações. Como os resultados de  $\lambda$  com o ATA foram menores que os de referência, a tendência se manteve para U.

Os resultados apresentados foram alcançados com as limitações do equipamento descobertas ao longo dos experimentos, que fazem parte do desenvolvimento de trabalhos dessa natureza. Além disso, deve-se ponderar que os valores de condutividade do equipamento HFM são obtidos por meio de um método comparativo que requer calibração e, dessa maneira, é plausível supor que exista uma variabilidade inerente aos ensaios tomados como referência.

Em trabalhos futuros, sugere-se utilizar outros materiais de construção, como diferentes composições de argamassas e concretos, com o uso de agregados isolantes ou incorporação de ar, outros tipos de madeira e materiais isolantes, como cortiça, para abranger um maior número de resultados para a curva de calibração. Além disso, o ATA pode ser testado para materiais granulares.

A análise de materiais que promovam melhor desempenho térmico de edificações é de suma importância quando se trata de sustentabilidade no setor de edificações. O desenvolvimento de aparatos de baixo custo, como o que foi proposto neste trabalho, auxilia na disseminação de estudos semelhantes, envolvendo alternativas que promovam eficiência energética nas construções, e promovendo a pesquisa em uma temática ainda escassa na construção civil. Entende-se, finalmente, que cada passo na direção da sustentabilidade, ainda que pequeno, pode se juntar a outros que formarão um conjunto maior de iniciativas na busca de um futuro melhor para o planeta.

\*\*\*

## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR NM 35**: Agregados leves para concreto estrutural – Especificação. Rio de Janeiro: [s.n.], 1995.

ABNT. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005.

ABNT. **ISO 5725**: Exatidão (veracidade e precisã) dos métodos e dos resultados de medição. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018.

ABNT. **NBR 15575**: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro: [s.n.], 2021.

ALARAB, A. et al. Use of Ceramic-Waste Powder as Value-Added Pozzolan Material with Improved Thermal Properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 9, p. 04020243 (1-10), 2020.

ASADI, I. et al. Thermal conductivity of concrete - A review. **Journal of Building Engineering**, v. 20, p. 81-93, 2018.

AZARI, R. Integrated energy and environmental life cycle assessment of office buildings envelopes. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 156-162, 2014.

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

BENMANSOUR, N. et al. Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building. **Energy and Buildings**, v. 81, p. 98-104, 2014.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. CBIC. **Energia nas construções - uma contribuição do setor à redução de emissões e de uso de fontes renováveis de energia.**, 2017. Disponível em: <[https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2017/11/Energia\\_na\\_Construcao\\_2017-1.pdf](https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2017/11/Energia_na_Construcao_2017-1.pdf)>. Acesso em: 27 nov. 2019.

CARDOSO, A. A.; CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C. Argamassas produzidas a partir de materiais não convencionais: uma revisão sistemática. **4º Encontro em Engenharia de Edificações e Ambiental**, Cuiabá, 2016.

CAVALLINE , T. L. et al. Influence of Lightweight Aggregate Concrete Materials on Building Energy Performance. **Buildings**, v. 11, n. 94, p. 1-21, 2021.

COURGEY, S.; OLIVA, J. P. **La Conception Bioclimatique des Maisons Économiques et Confortables**. Mens: Terre Vivante, 2010.

C-THERM. Comparing Thermal Conductivity Methods, 2019. Disponível em: <[https://thermalconductivity.ctherm.com/resources/comparing-thermal-conductivity-methods/?/products/tci\\_thermal\\_conductivity/comparing\\_the\\_methods/](https://thermalconductivity.ctherm.com/resources/comparing-thermal-conductivity-methods/?/products/tci_thermal_conductivity/comparing_the_methods/)>. Acesso em: 18 dez. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. EPE. **Nota técnica EPE 030/2018 - Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética.**, 2018. Disponível em: <[http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%20EPE%20030\\_2018\\_18Dez2018.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%20EPE%20030_2018_18Dez2018.pdf)>. Acesso em: 26 nov. 2019.

EPE. **Ações para promoção da eficiência energética nas edificações brasileiras: no caminho da transição energética**. Empresa de Pesquisa Energética. [S.l.], p. 66. 2020.

FRANCO, A. An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transiente hot-wire method. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, p. 2495-2504, 2007.

G1. Emissão de gases de efeito estufa na atmosfera atingiu novo recorde histórico em 2018, diz estudo, 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/natureza/noticia/2019/08/13/emissao-de-gases-de-efeito-estufa-na-atmosfera-atingiu-novo-recorde-historico-em-2018-diz-estudo.ghtml>>. Acesso em: 08 mar. 2020.

GOMES, M. G. et al. The influence of moisture content on the thermal conductivity of external thermal mortars. **Construction and Buildings Materials**, v. 135, p. 279-286, 2017.

GOMES, M. G. et al. Thermal conductivity measurement of thermal insulating mortars with EPS and silica aerogel by steady-state and transient methods. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 696-705, 2018.

IEA. International Energy Agency - 2018 Global Status Report. **Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector**, 2018. Disponível em:

<[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27140/Global\\_Status\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27140/Global_Status_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 16 out. 2021.

KAZMIERCZAK, C. S. et al. Rendering mortars with crumb rubber: Mechanical strength, thermal and fire properties and durability behaviour. **Construction and Building Materials**, v. 253, p. 1-7, 2020.

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

MENDES, J. C. et al. On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p. 1-12, 2019.

MENDES, J. et al. Coating mortars based on mining and industrial residues. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, p. 1569–1586, 2020.

MORAIS, C. F. et al. Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121073 (1-9), 2021.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

PAIVA, R. L. M. et al. Thermal-Energy Analysis and Life Cycle GHG Emissions Assessments of Innovative Earth-Based Bamboo Plastering Mortars. **Sustainability**, v. 13, n. 10429, p. 1-24, 2021.

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

PARAMESHWARAN, R. et al. Sustainable thermal energy storage technologies for buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 2394-2433, 2012.

PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Mitigação das mudanças climáticas (Volume 3 - Primeiro relatório de avaliação nacional)**, 2014. Disponível em: <[http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos\\_publicos/GT3/GT3-Cap1-v2.pdf](http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos_publicos/GT3/GT3-Cap1-v2.pdf)>. Acesso em: 16 out. 2021.

PHILIP , P.; FAGBENLE, L. Design of Lee's disc electrical method for determining thermal conductivity of a poor conductor in the form of a flat disc. **International Journal of Innovation and Scientific Research**, v. 9, n. 2, p. 335-343, 2014.

PINTO, P. R. F. **Medição de Propriedades Térmicas pelo Método Fluximétrico - desenvolvimento de equipamento**. Rio de Janeiro: Dissertação - Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2015. 64 p.

QUIÑONES-BOLAÑOS, E. et al. Potential use of coconut fibre modified mortars to enhance thermal comfort in low-income housing. **Journal of Environmental Management**, v. 277, p. 111503 (1-12), 2021.

RAMÍREZ, C. P. et al. Analysis of fire resistance of cement mortars with mineral wool from recycling. **Construction and Building Materials**, v. 265, p. 120349 (1-7), 2020.

SADINENI, S. B.; MADALA, S.; BOEHM, R. F. Passive buildings energy savings: A review of building envelope components. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 3617-3631, 2011.

SALEM, T. et al. Thermal and mechanical performances of cement-based mortars reinforced with vegetable synthetic sponge wastes and silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 264, p. 120213 (1-11), 2020.

SANTOS, W. N. Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmica de materiais cerâmicos: II - o método do fio quente. **Cerâmica**, v. 51, p. 371-380, 2005.

SILVA, F. S. B. **Condutibilidade térmica de argamassas térmicas com EPS e aerogel de sílica**. Lisboa: Dissertação - Instituto Técnico Superior de Lisboa, 2017. 78 p.

SIMIONI, W. I. **Análise de erros na medição de condutividade térmica de materiais através do método fluximétrico**. Florianópolis: Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. 102 p.

SOUZA, J. A. **Transferência de calor**. São Paulo: Person Education do Brasil, 2016. 123 p.

SOZER, H. Improving energy efficiency through the design of the building envelope. **Building and Environment**, v. 45, p. 2581-2593, 2010.

STANCATO, A. C. **Determinação da condutividade térmica e da resistência mecânica em argamassa leve**. Campinas: Dissertação - Universidade Estadual de Campinas , 2000. 155 p.

STEFANIDOU, M. Cement-based renders with insulation properties. **Construction and Buildings Materials**, v. 65, p. 427-431, 2014.

UGREEN. Desempenho Térmico: Como dados climáticos ajudam na avaliação? **UGREEN**, 2022. Disponível em: <<https://www.ugreen.com.br/desempenho-termico-como-dados-climaticos-ajudam-na-avaliacao/>>. Acesso em: 17 fevereiro 2022.

UNFCCC. The Paris Agreement. **United Nations Climate Changes**, 2020. Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>>. Acesso em: 16 out. 2021.