



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO

**BAMBU NA CONSTRUÇÃO CIVIL: AVALIAÇÃO NO DESEMPENHO  
TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES SUSTENTÁVEIS**

Alana Francischett Pitol

Lajeado/RS, dezembro de 2020



Alana Francischett Pitol

## **BAMBU NA CONSTRUÇÃO CIVIL: AVALIAÇÃO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES SUSTENTÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ambiente e Desenvolvimento na área de concentração Espaço, Ambiente e Sociedade e linha de pesquisa Tecnologia e Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Mont. Odorico Konrad

Coorientadora: Prof. Dr. Andréia Fernandes da Silva

Lajeado/RS, dezembro de 2020

Alana Francischett Pitol

## **BAMBU NA CONSTRUÇÃO CIVIL: AVALIAÇÃO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES SUSTENTÁVEIS**

A Banca examinadora abaixo aprova a Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Mestre em Ambiente e Desenvolvimento na área de concentração Tecnologia e Ambiente:

Prof. Dr. Mont. Odorico Konrad – orientador  
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Dr. Andréia Fernandes da Silva – coorientadora  
Universidade do Estado de Mato Grosso

Prof. Dr. Betina Hansen  
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Dr. Tarsila Marília de Oliveira  
Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. Rodrigo Spinelli  
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Lajeado/RS, 14 de dezembro de 2020

## **AGRADECIMENTOS**

Ao longo destes dois anos de mestrado e desenvolvimento desta dissertação, muitas pessoas passaram pelo meu caminho e me auxiliaram e ajudaram com o que puderam, minha eterna gratidão a todas estas pessoas.

Gostaria de agradecer imensamente a minha mãe, meu pai e meu irmão, por sempre estarem do meu lado, proporcionando o suporte necessário e me guiando para o melhor caminho.

Ao Alan, por sempre estar ao meu lado, me auxiliando sempre que preciso além de colocar a “mão na massa” junto comigo todas as vezes que eu precisei, o meu muito obrigada.

Ao meu Orientador Dr. Odorico, que além de professor virou um amigo, que contribuiu para que este trabalho fosse possível, que me deu o suporte necessário sempre que precisei, és minha inspiração de profissional e pessoa. Agradeço imensamente toda ajuda e orientação.

A minha Coorientadora Dr. Andreia, que aceitou o convite para fazer parte deste trabalho, além de ter me auxiliado demais em tudo que precisei, dedicando seu tempo, te agradeço imensamente por tudo.

Aos meus professores do PPGAD e aos colegas, por toda a contribuição, troca e amizade, realizadas nestes dois anos de curso, agregando demais ao meu desenvolvimento como pessoa e profissional.

À Capes pelo apoio financeiro.

E por fim, agradecer a Deus por tudo o que vivi nestes dois anos!

Minha eterna gratidão a todos!

## RESUMO

O setor da construção civil é um dos maiores causadores de impactos ambientais em função do elevado consumo de materiais, da grande geração de resíduos, gases de efeito estufa e do consumo massivo de água e energia. Nesse sentido, o presente trabalho tem o objetivo de contribuir com a redução dos impactos gerados pela construção civil ao apresentar uma possível aplicação de um material natural como componente de isolamento térmico. O material escolhido foi o bambu da espécie *bambusa vulgaris*, que é facilmente encontrado no país, e apresenta um rápido crescimento, sendo de fácil cultivo. Além disso, esta planta têm a característica de absorver dióxido de carbono, o que contribui ativamente para a diminuição das concentrações de CO<sub>2</sub> no planeta. Sendo assim, este estudo se concentrou em desenvolver uma alternativa de isolamento utilizando o bambu como matéria-prima na construção de uma fachada ventilada, de modo a contribuir com o desempenho térmico das edificações sustentáveis localizadas na cidade de Lajeado/RS. Para estabelecer uma análise comparativa foram construídos dois protótipos com dimensões e características idênticas, porém, um deles possuía a fachada ventilada constituída pelas placas de bambu. O comportamento térmico de ambos os protótipos foi avaliado por meio da coleta de dados relativos à temperatura e umidade entre os meses de março à junho, além disso, as propriedades térmicas dos modelos foram calculadas, o que serviu de suporte para as observações experimentais realizadas. O protótipo com a fachada ventilada (protótipo com isolamento) se mostrou mais eficiente no ponto de vista do desempenho térmico que o protótipo sem isolamento (com tijolos aparentes). Além disso, quando o fluxo de calor era inverso, ou seja, quando ocorria o processo de liberação de calor pelas edificações, em dias com temperaturas baixas, o protótipo com a fachada ventilada demonstrou reter mais calor, sendo assim, a aplicação dessa técnica associada a outra estratégia bioclimática passiva, como o aquecimento solar, poderia ser vantajosa em regiões com períodos de inverno severos.

**Palavras-chave:** Desempenho térmico. Bambu. Isolamento térmico. Sustentabilidade

## ABSTRACT

The construction sector is one of the biggest causes of environmental impacts due to the high consumption of resources, the large waste residues, greenhouse gases and the massive consumption of water and energy. In this sense, this study aims to contribute with the reduction of the impacts generated by the construction sector by presenting a possible application of a natural material as a thermal insulation component. The material chosen was bamboo of the species *bambusa vulgaris*, which is easily found in Brazil, and has a rapid growth, being easy to cultivate. In addition, this plant has the characteristic of absorbing carbon dioxide, which actively contributes to the decrease in CO<sub>2</sub> concentrations on the planet. Thus, this study focused on developing an insulation alternative using bamboo as raw material in the construction of a ventilated facade, in order to contribute to the thermal performance of sustainable buildings located in the city of Lajeado/RS Brazil. To establish a comparative analysis, two prototypes with identical dimensions and characteristics were built, however, one of them had a ventilated facade made up of bamboo plates. The thermal behavior of both prototypes was evaluated through the collection of data related to temperature and humidity between the months of March and June, in addition, the thermal properties of the models were calculated, which supported the experimental observations carried out. The prototype with the ventilated facade (prototype with insulation) proved to be more efficient in terms of thermal performance than the prototype without insulation (with exposed bricks). In addition, when the heat flow was reversed, that is, when the process of releasing heat from the buildings occurred, on days with low temperatures, the prototype with the ventilated facade demonstrated to retain more heat, thus, the application of this technique associated with another passive bioclimatic strategy, such as solar heating, could be advantageous in regions with severe winter periods.

**Keywords:** Thermal performance. Bamboo. Thermal insulation. Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Objetivos mundiais da sustentabilidade. ....	18
Figura 2 – Condomínio Euroville Smart Housing. ....	25
Figura 3 – Parede executada em bambu. ....	31
Figura 4 – Placas produzidas de bambu. ....	33
Figura 5 – Zoneamento bioclimático brasileiro. ....	39
Figura 6 – Carta bioclimática de Lajeado/RS. ....	41
Figura 7 – Bambu colhido na cidade de Arroio do Meio - RS. ....	44
Figura 8 – Máquina para triturar o bambu. ....	45
Figura 9 – Bambu Triturado. ....	45
Figura 10 – Estufa utilizada na secagem das placas confeccionadas. ....	48
Figura 11 – Placa de bambu finalizada. ....	48
Figura 12 – Aparato utilizado na determinação da condutividade térmica da placa. ....	49
Figura 13 – Aparato isolado durante a medição. ....	50
Figura 14 – Camadas da placa pronta. ....	52
Figura 15 – Controle da espessura das camadas de argamassa. ....	52
Figura 16 – Placa com acabamento finalizado. ....	53
Figura 17 – Moldes utilizados para a execução das placas de isolamento. ....	54
Figura 18 – Placa de isolamento sendo finalizada com argamassa. ....	54
Figura 19 – Placas da fachada ventilada finalizadas. ....	55
Figura 20 – Projeto dos protótipos. ....	56
Figura 21 – Porta utilizada para fechamento dos protótipos. ....	57
Figura 22 – Localização dos protótipos. ....	58
Figura 23 – Protótipos finalizados. ....	59
Figura 24 – Inserts metálicos. ....	59
Figura 25 – Datalogger utilizado para as medições de umidade e temperatura. ....	60
Figura 26 – Micrografia da amostra de bambu (Escala 100 $\mu$ m) ....	64

Figura 27 – Micrografia da amostra de bambu (Escala 20 $\mu\text{m}$ ). .....	64
Figura 28 – Micrografia da amostra da placa de bambu e resina (Escala 100 $\mu\text{m}$ ). .	65
Figura 29 – Micrografia da amostra da placa de bambu e resina (Escala 20 $\mu\text{m}$ ). ...	65
Figura 30 – Representação da parede do protótipo sem isolamento.....	78
Figura 31 – Representação da parede do protótipo com isolamento (ganho térmico). .....	80
Figura 32 – Representação da parede do protótipo com isolamento (liberação de calor).....	81

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Semana de temperatura máxima do mês de março.....	68
Gráfico 2 – Semana de temperatura mínima do mês de março. ....	70
Gráfico 3 – Semana de temperatura máxima do mês de abril.....	71
Gráfico 4 – Semana de temperatura mínima do mês de abril.....	72
Gráfico 5 – Semana de temperatura máxima do mês de maio.....	73
Gráfico 6 – Semana de temperatura mínima do mês de maio.....	74
Gráfico 7 – Semana de temperatura máxima do mês de junho. ....	75
Gráfico 8 – Semana de temperatura mínima do mês de junho.....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperatura máxima e mínima do período de coleta de dados .....	76
Tabela 2 – Propriedades térmicas dos elementos construtivos (protótipo sem isolamento) .....	78
Tabela 3 – Propriedades térmicas do protótipo sem isolamento. ....	78
Tabela 4 – Propriedades térmicas dos elementos construtivos (protótipo com isolamento). ....	80
Tabela 5 – Propriedades térmicas do protótipo com isolamento (ganho de calor)....	81
Tabela 6 – Propriedades térmicas do protótipo com isolamento (perda de calor). ...	82

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Condições de ventilação das câmaras de ar. ....	36
Quadro 2 – Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura.....	36
Quadro 3 – Valores de resistência superficial interna e externa. ....	37
Quadro 4 – Quadro de fórmulas utilizadas para cálculo de desempenho térmico. ...	61
Quadro 5 – Comparativo entre paredes de tijolos cerâmicos maciços. ....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONPET	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia do Programa Brasileiro de Etiquetagem
EPS	Poliestireno Expandido
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
LEED	<i>Energy and Environmental Design</i> (Liderança em Energia e Design Ambiental)
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
HVAC	<i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i> (Aquecimento, ventilação e ar condicionado)
ONU	Organização das Nações Unidas
ODS	Objetivos mundiais da sustentabilidade
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PUR	Poliuretano
UNIVATES	Universidade do Vale do Taquari
XPS	Poliestireno Extrudado
µm	milionésimo de metro

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	16
1.1.	Tema.....	19
1.2.	Objetivos.....	19
1.2.1.	Objetivo geral .....	19
1.2.2.	Objetivos específicos.....	19
1.3.	Justificativa .....	19
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1.	Sustentabilidade na construção civil .....	22
2.1.1.	Eficiência energética.....	24
2.2.	Conforto térmico.....	26
2.2.1.	Materiais de isolamento térmico não renováveis .....	27
2.3.	Material natural .....	28
2.3.1.	Bambu .....	29
2.4.	Normativas de desempenho térmico de edificações .....	34
2.4.1.	NBR 15220/2005 – Desempenho térmico de edificações .....	35
2.4.2.	Zona bioclimática.....	39
2.4.2.1.	Carta bioclimática de Lajeado/RS.....	40
2.4.3.	NBR 15575/2013: Edificações habitacionais – Desempenho.....	42
3.	METODOLOGIA.....	43
3.1.	Material de partida .....	43
3.2.	Placa de bambu.....	46
3.3.	Confecção das placas de isolamento .....	51
3.4.	Execução dos protótipos .....	55

3.5.	Avaliação do desempenho térmico dos protótipos .....	60
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	63
4.1.	Caracterização do material de partida e da placa de bambu + resina .....	63
4.1.1.	Determinação da densidade de massa aparente da placa .....	63
4.1.2.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	63
4.1.3.	Determinação da condutividade térmica.....	66
4.2.	Avaliação do desempenho térmico dos protótipos .....	67
4.2.1.	Análise sobre a diferença de temperatura .....	67
4.2.2.	Determinação das propriedades térmicas dos protótipos .....	77
4.2.2.1.	Protótipo com tijolos aparentes (sem isolamento).....	77
4.2.2.2.	Protótipo com a fachada ventilada (com isolamento).....	79
4.2.3.	Análise comparativa das características térmicas dos protótipos com e sem isolamento.....	82
4.2.4.	Análise referente a diferença de umidade.....	83
5.	CONCLUSÃO .....	85
	REFERÊNCIAIS .....	87
	APÊNDICE A – Umidade de março a junho.....	93

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento promovido pela sociedade nos últimos 250 anos, permitiu-se obter maior qualidade e expectativa de vida para os seres vivos. Em contrapartida, discute-se também a sobrevivência das pessoas, pois as mesmas dependem de alterações nos hábitos de consumo e nas formas de produzir e fazer negócios, a fim de garantir uma qualidade de vida melhor e mais duradoura, optando pela utilização de recursos de forma mais conscientes (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Juntamente com o desenvolvimento da sociedade, as suas moradias se devolvem também, sendo necessário haver a incorporação da sustentabilidade nestas edificações a fim de haver desenvolvimento sustentável nas cidades. A tendência no mercado mundial, no que diz respeito à sustentabilidade na construção, sendo uma prática crescente nesta área. Para isso, o setor da construção civil precisa se organizar e gerir a aplicação progressiva de sustentabilidade em suas obras, se tornando positivas economicamente em seus empreendimentos (CORREA, 2009).

A construção civil está entre um dos maiores causadores de impactos no meio ambiente, pois está ligada com o elevado consumo de materiais, geração de resíduos, geração de gases de efeito estufa e no consumo de água e energia. Para uma construção se tornar mais sustentável, depende de soluções tomadas em todos os seus níveis, articuladas dentro de uma visão sistêmica. Por exemplo, as decisões de um projetista afetam no consumo de recursos naturais e de energias no decorrer da construção e do uso da edificação. A cadeia produtiva e a gama de materiais e componentes existentes na construção influenciam a decisão de projetistas e consumidores, para escolhas que podem acarretar impacto ambiental de edifícios e obras ao longo do seu ciclo de vida (AGOPYAN; JOHN, 2011).

O rápido consumo de recursos naturais poderia deixar de satisfazer as necessidades humanas, desacelerar, ou até mesmo interromper o desenvolvimento socioeconômico da população. Entretanto, hoje os estados, instituições, corporações, organizações não-governamentais e outras partes interessadas possuem consenso sobre o fato de que os recursos naturais são limitados e essenciais para a vida humana. Com este intuito, a sustentabilidade realmente prevê um desenvolvimento contínuo, mudando apenas os hábitos de consumo sem redução em nossa qualidade de vida atual, pois o modelo de desenvolvimento sustentável sugere a compreensão do desenvolvimento que visa a gestão ambiental, a responsabilidade social e as soluções econômicas, o abandono de ser sociedade de consumo (YILMAZ; BAKIS, 2015). Os recursos naturais do mundo são finitos e, conforme a população mundial cresce, o limite de recursos diminui cada vez mais, demonstrando necessidade de uma diminuição real no uso de recursos não renováveis (FLANDER; ROVERS, 2009)..

Na busca por materiais sustentáveis, chegou-se ao bambu, altamente resistente e de regeneração rápida. O bambu é uma alternativa de recursos renováveis que mais cresce no cenário mundial, deslocando a sociedade para um uso balanceado de recursos, pois graças a sua flexibilidade e versatilidade, o bambu tem sido utilizado de forma ampla na construção (FLANDER; ROVERS, 2009).

Culturalmente o bambu é reconhecido como “a planta dos mil usos”. O bambu é uma planta com características singulares, crescimento rápido em diferentes climas e pode atingir até oito metros de altura em oito meses. Esta planta tem inúmeras utilizações, por exemplo, os brotos de bambu de 20 ou 30 dias podem ser utilizados como alimento, quando possuírem idade entre 6 meses a um ano utiliza-se na confecção de cestos, esteira e traçados, já com idade entre 2 e 3 anos pode servir como lâminas para a elaboração de painéis e com colmos com 3 anos ou mais, pode ser utilizado na construção civil (NUNES, 2006).

Além dos inúmeros usos, o bambu, segundo Delgado (2011), possui uma grande capacidade de sequestrar o carbono, processo este em que a planta retira o dióxido de carbono do meio ambiente e incorpora em sua biomassa. Durante seu processo de fotossíntese, o CO<sub>2</sub> retirado do meio ambiente é utilizado para o seu desenvolvimento e assim o gás carbônico absorvido é devolvido como oxigênio para

a atmosfera. Por ser uma planta de crescimento acelerado, seu acúmulo de biomassa é maior, conseqüentemente, o sequestro de carbono do meio torna-se elevado, desempenhando um papel fundamental no meio ambiente, a participação na purificação do ar.

Com a utilização de um material benéfico, como o bambu, busca-se contribuir com mais uma opção de material de isolamento térmico para as edificações. Assim contribuindo para o desenvolvimento sustentável do planeta, ou seja, contribuindo com objetivos mundiais da sustentabilidade (ODS). Os ODSs foram promovidos pela Organização Nações Unidas, no ano de 2015, determinaram os 17 objetivos, a fim de até 2030 transformar, com desenvolvimento sustentável, o mundo num lugar melhor e com menos desigualdade. Os objetivos buscam acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente, promover a paz e prosperidade dos povos. Todos os 17 estão demonstrados na Figura 1 (ONU, 2015).

Figura 1 – Objetivos mundiais da sustentabilidade.



Fonte: ONU (2015).

Por meio desta pesquisa busca-se atingir a uma parcela dos objetivos mundiais da Sustentabilidade, a fim de promover e contribuir para o desenvolvimento sustentável do planeta. A inserção do bambu na construção moderna trata-se de um acontecimento recente, porém tipicamente existente há mais tempo em construções localizadas em zonas rurais nas habitações, vedações, instalações na pecuária e na

concessão de pontes, sendo uma matéria-prima de característica satisfatória no ponto de vista construtivo (CORREA, 2014). Este trabalho busca inserir o bambu como material natural, em placas de isolamento térmico composta por bambu envolto por argamassa, para analisar o desempenho térmico da edificação.

## **1.1. Tema**

Isolamento térmico em edificações utilizando placas de bambu envoltas por argamassa como fachada ventilada.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo geral**

Avaliar o desempenho térmico de placas de bambu envoltas com uma fina camada de argamassa, utilizadas como fachada ventilada em edificações.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar o material utilizado na pesquisa (bambu+resina);
- Confeccionar placas utilizando bambu como material para isolamento térmico e avaliação térmica das mesmas;
- Construir protótipos para avaliação térmica utilizando as placas confeccionadas;
- Avaliar a eficiência térmica dos protótipos com isolamento térmico e sem isolamento térmico.

## **1.3. Justificativa**

O Programa de Pós-graduação em Ambiente e Desenvolvimento possui objetivos específicos os quais justificam sua aplicação na Universidade do Vale do Taquari - Univates. Dentre estes objetivos do curso, segundo UNIVATES (2019), está a aplicação de metodologia e tecnologias que diminuam o impacto ambiental em

atividades antrópicas. Seguindo este objetivo, o presente trabalho, que está inserido neste programa, buscará a partir deste estudo uma opção para isolamento térmico com material natural, com o intuito de substituir a utilização do Poliestireno Expandido (EPS), por exemplo, que é um material não renovável muito utilizado para isolamento térmico. O bambu foi escolhido como material natural para análise pois não se encontrou em pesquisas realizadas materiais que identificassem as características térmicas do bambu.

Além de que, a pesquisa busca um olhar sustentável baseado nos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas, buscando alternativas de auxiliar neste desenvolvimento sustentável se enquadrando em quatro dos dezessete objetivos (ONU, 2015), são eles:

- *Objetivo 7 - Energia Acessível e Limpa*: a pesquisa busca contribuir com este objetivo substituindo um material de fonte não renovável por um material renovável para auxiliar na promoção do conforto térmico, diminuindo a utilização de equipamento que auxiliam no aumento ou diminuição de temperatura.

- *Objetivo 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura*: o trabalho buscou opções para o crescimento econômico e sustentável, visando a melhoria da eficiência energética das edificações buscando a opção de materiais inovadores, utilizando a tecnologia aliada ao material natural para promover uma edificação mais sustentável;

- *Objetivo 12 – Consumo e Produção Responsável*: a pesquisa buscou aliar recursos naturais (bambu), como uma forma de padronizar o material de isolamento térmico, cujo impacto ambiental seja o menor possível aumentando as opções sustentável para as edificações;

- *Objetivo 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima*: promover um isolamento térmico em edificação auxilia na diminuição do consumo de energias artificiais na edificação, e para confecção da placa de isolamento foi utilizado um material que retira gás carbônico do meio ambiente, desta forma auxiliando no combate as mudanças climáticas.

Ao trabalhar com materiais alternativos e renováveis, pode-se alcançar uma diminuição considerável no consumo de energia, através da inovação da indústria,

construindo cidades sustentáveis e, com a união destes três fatores, atuamos contra a alteração do clima global.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Sustentabilidade na construção civil

O desenvolvimento sustentável está interligado a fatores econômicos, culturais, sociais e ambientais da sociedade. Para que uma edificação atenda a esse propósito é necessário garantir, por exemplo, por meio da escolha adequada dos materiais que serão utilizados, que esses elementos não irão causar problemas às gerações futuras, preservando os recursos naturais (CORREA, 2009). Na relação entre homem e o meio ambiente, o “limite mínimo para o bem-estar da sociedade” está associado a um “limite máximo de utilização dos recursos naturais de modo que estes sejam preservados” (CORREA, 2009, p. 16).

Os recursos naturais devem ser poupados enquanto ainda existem, pois eles são finitos. De acordo com o relatório da Comissão Brundtland, existe uma série de medidas a serem adotadas visando o desenvolvimento sustentável dos países, dentre elas destaca-se a “diminuição do consumo de energia e desenvolvimento de tecnologias com uso de fontes energéticas renováveis” (CORREA, 2009, p. 16).

Uma maneira de preservar os recursos naturais é optar pela construção sustentável, contudo, esse método apresenta dois grandes desafios. O primeiro deles consiste no cuidado necessário na escolha e no consumo de novos materiais para o emprego na construção e o segundo desafio estaria no trabalho conjunto de arquitetos e engenheiros (SIEFFERT; HUYGEN; DAUDON, 2014).

Considerando a preservação de recursos naturais, uma estratégia interessante consiste na reutilização de materiais da construção civil, para isso, é preciso estimular a conscientização da população, disseminando essas novas tecnologias no mercado

e demonstrando as vantagens que sua utilização acarreta. Essa opção deve ser contemplada já na fase inicial do projeto, para que sua utilização seja devidamente planejada atingindo os benefícios esperados (SIEFFERT; HUYGEN; DAUDON, 2014).

Segundo Salem, Bakr e Sayad (2018), quando aplicado em um planejamento de projeto, os conceitos de construção sustentável especialmente no setor residencial, o ganho de benefícios em prazo relativamente curto, é evidente. Com o devido planejamento os custos energéticos, de água e de manutenção em todas as etapas do material utilizado, desde a sua produção até seu devido descarte, são reduzidos.

O setor da construção civil está sendo pressionado a adotar soluções mais sustentáveis, havendo a necessidade de novas abordagens para garantir uma melhoria duradoura e eficaz da sustentabilidade no setor da construção civil. A construção civil poderá sofrer uma grande mudança a médio prazo, devido à necessidade da opção por recursos e soluções mais sustentáveis (CRUZ; GASPAR; BRITO, 2019).

A sustentabilidade na construção civil faz parte de um processo que se inicia com a extração da matéria prima e se estende até a utilização da edificação, fazendo com que a construção proponha soluções aos principais problemas ambientais sem abdicar de modernas tecnologias no seu desenvolvimento, a fim de que supram todas as necessidades do usuário. Sendo assim, a construção sustentável faz parte de um desenvolvimento onde se busca a melhor qualidade de vida humana, não prejudicando os ecossistemas existentes, utilizando de forma consciente e sustentável os recursos naturais, de forma compatível com a capacidade de regeneração que o mesmo possui (MANHÃES; ARAUJO, 2014).

Uma construção sustentável precisa consumir a menor quantidade possível de recursos naturais, sendo planejada para que consuma o mínimo de eletricidade e de água encanada, proveniente da rede pública. A consideração pelo meio ambiente deve estar presente desde o planejamento até a execução da obra, para ser possível que este baixo consumo de materiais naturais seja atingido (MULLER, TRINDADE e PIOVESAN, 2017). O conceito de baixo consumo de recursos naturais está relacionado, por exemplo, ao baixo consumo de energia proveniente de fontes não

renováveis, o que define a eficiência energética de uma construção, pois uma construção sustentável também deve possuir alta eficiência no quesito energético.

### **2.1.1. Eficiência energética**

Para alcançar um quadro de sustentabilidade, os países que se encontram em desenvolvimento estão em busca de integração entre as energias renováveis e eficientes. A tecnologia verde é uma opção para alcançar de maneira sustentável um ambiente com baixa emissão de carbono. Nos últimos anos, os governos de alguns países desenvolvidos investiram fortemente no desenvolvimento da tecnologia verde e na inovação, para aumentar a eficiência energética e assim conseguir diminuir as emissões de gases poluentes, pois 70% das emissões destes gases são oriundas do consumo excessivo de energia (DHAKOUANI; ZNOUDA; BOUDEN, 2019).

Desde 1980, o Brasil tem incentivado políticas e ações que beneficiam a eficiência energética no país. Foram criados programas públicos como o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), com o objetivo de facilitar as informações para os consumidores referente a equipamentos eletrodomésticos e sua eficiência energética, tornando a compra dos mesmos mais eficiente, programas como o PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), voltado ao uso eficiente da eletricidade, e o CONPET (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia do Programa Brasileiro de Etiquetagem), que se refere ao consumo de gás e combustíveis (EPE, 2016).

Para a avaliação da eficiência energética de edificações no Brasil, existe o Selo Procel Edificações, estabelecido desde 2014, que tem por objetivo a avaliação do nível de eficiência energética de cada edificação, segundo o regulamento que está descrito na concessão do Selo Procel de Economia de Energia para edificações, cujas limitações estão descritas em um regulamento técnico para edifícios comerciais, serviços públicos e/ou no regulamento técnico de edificações residenciais (PROCELINFO, 2019).

Também existe uma certificação americana para edificações, de amplitude internacional, chamada LEED (*Energy and Environmental Design*), que tem o objetivo de garantir o desempenho energético das edificações, além de garantir o conforto dos

seus usuários estabelecendo um conjunto de normativas para desenvolver uma construção sustentável (CAMBEIRO *et al.*, 2016). Na Figura 2 é mostrado uma edificação residencial com selo do INMETRO PBE Edifica, o condomínio Euroville Smart Housing, localizado em Porto Alegre/RS, cuja classificação é A, ou seja, é o nível mais alto de eficiência.

Figura 2 – Condomínio Euroville Smart Housing.



Fonte: PBE EDIFICA, 2017.

A eficiência energética possui um grande impacto no combate às mudanças climáticas no planeta, podendo reduzir o consumo de energia, gerar novos postos de trabalho e promover saúde e bem-estar à população em geral. Programas relacionados a padrões de eficiência energética empregam um grande papel para que se possa alcançar metas em redução de consumo e frenagem das mudanças climáticas, em conjunto com outras políticas relacionadas à redução de gases produzidos no setor industrial e no transporte (NADEL, 2019).

Atualmente, as cidades já consomem mais da metade da energia disponível na natureza. A consequência deste consumo são as emissões de gases de efeito estufa, que contribuem para o aquecimento global, além disso, o consumo de energia desenfreado contribui para o esgotamento dos recursos renováveis do mundo (KAHN, 2015).

Segundo Nadel (2019), além de uma construção eficiente energeticamente reduzir a conta de energia dos seus consumidores, essa eficiência energética nas

construções seria a solução para alcançar metade das metas climáticas de longo prazo dos Estados Unidos, por exemplo. Lamberts, Dutra e Pereira (2014) afirmam que para um edifício ser considerado eficiente energeticamente, ele precisa ter a capacidade de gerar conforto ambiental aos usuários semelhante a outra edificação, porém com menor consumo de energia.

## **2.2. Conforto térmico**

Conforto térmico consiste na “satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente” (ABNT, 2005a, p. 6). O conforto térmico é a condição mental que cada pessoa expressa em relação à satisfação com a temperatura do ambiente. Existem variações fisiológicas e psicológicas que mudam de pessoa para pessoa, sendo assim, o mesmo ambiente não é capaz de satisfazer a todos os indivíduos que ali se encontram simultaneamente.

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), existe uma troca térmica entre o corpo humano e o meio. Essas trocas podem ocorrer através de processos que dependem de variáveis relacionadas ao conforto térmico do ambiente, o qual se encontra relacionado com o bem-estar térmico que o ser humano sente no meio onde se encontra.

O corpo humano pode apresentar aumento ou diminuição da temperatura interna. Por exemplo, se o indivíduo está praticando exercício físico, a temperatura do corpo aumenta, desta maneira o corpo libera uma série de mecanismos naturais para tentar equilibrar sua temperatura, em busca de manter o equilíbrio térmico interno. Nesse sentido, é importante que o arquiteto ou engenheiro que estiver projetando o ambiente conheça a finalidade da edificação para prever o nível de atividades realizadas ali, e assim poder tomar as melhores decisões visando promover o conforto térmico do ambiente (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Os fatores que determinam o conforto térmico do ambiente, a partir das condições térmicas, são a temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do ar e umidade, além dos fatores pessoais de cada indivíduo presente no ambiente, que

são a taxa metabólica e a quantidade de roupas utilizadas, ou seja, o isolamento promovido pelo vestuário (ASHRAE, 2016).

Segundo Frota e Schiffer (2001), existe uma variação de conforto térmico em relação ao inverno e ao verão. No inverno, a consideração em relação a edificação é realizada de forma que se atinja o conforto térmico por meio de ganhos térmicos. Já no verão, para atingir o conforto térmico é necessário um balanço térmico, visando equilibrar principalmente os ganhos de temperatura devido à incidência de radiação solar.

Os materiais e elementos construtivos desempenham papel significativo no desempenho térmico de paredes e coberturas, conseqüentemente, influenciando no conforto térmico. Estes elementos atuam como barreira atenuando o fluxo de calor, que irá acontecer sempre que as temperaturas interna e externa forem diferentes, sendo finalizado somente quando ambos os ambientes atingirem a mesma temperatura, ou seja, o equilíbrio térmico (LAMBERTS; DUARTE, 2016).

Atualmente muitos materiais têm sido utilizados como isolantes térmicos em edificações, a fim de promover o conforto térmico do ambiente. Segundo Jelle (2011), alguns dos materiais tradicionais hoje utilizados são o poliestireno expandido (EPS), a lã mineral e o poliuretano (PUR), que são derivados do petróleo bruto, e, portanto, de fonte não renovável. Também existem materiais naturais que vêm sendo pesquisados para fins de isolamento térmico, como é o caso da casca de pinheiro, palha e o ramo de cebola, estudados por Marcos (2015).

### **2.2.1. Materiais de isolamento térmico não renováveis**

Um material derivado do petróleo muito utilizado para isolamento térmico na construção civil é o Poliestireno Expandido (EPS), um plástico celular rígido, de cor branca e inodoro, que possui alguns “vazios” que contém ar. Possui inúmeras vantagens como baixa condutividade térmica, leveza e baixa absorção de água (ABRAPEX, 2006).

O EPS começou a ser utilizado na construção civil com o intuito de contribuir com projetos de empreendimentos que apresentem economia de energia. Há 35 anos, devido ao seu baixo custo, leveza e facilidade de manuseio, ganhou posição considerável no setor da construção civil, além de ser comprovadamente um material isolante (ABRAPEX, 2006). Segundo a ABNT (2005b), o EPS possui baixa transmitância térmica,  $0,040 \text{ W}/(\text{m.K})$ , o que possibilita sua utilização como isolante térmico.

Outro material que também é derivado do petróleo, sendo portanto, não renovável, é o poliuretano (PUR), que possui uma baixa condutividade térmica,  $0,030 \text{ W}/(\text{m.K})$ , sendo, inclusive mais eficiente que o EPS para finalidades de isolamento (ABNT, 2005b). O PUR é um produto sólido, derivado de uma reação química entre dois componentes químicos líquidos, e possui algumas vantagens como a alta resistência térmica, estanqueidade em relação a água e alta durabilidade (MENDES, 2012).

A lã mineral, com condutividade térmica igual a  $0,045 \text{ W}/(\text{m.K})$  (ABNT 2005b), também apresenta potencial para ser utilizada visando o isolamento térmico de ambientes. As mais comuns são a lã de rocha e a lã de vidro, derivadas de fontes minerais e, portanto, consideradas não renováveis (MENDES, 2012).

### **2.3. Material natural**

Segundo Marcos (2015), estudos recentes exploram a utilização de materiais naturais como opção aos isolantes térmicos não renováveis. A busca pela adaptação de materiais naturais, alternativos e renováveis, passou a ser uma prioridade quando se considera a sustentabilidade na construção civil. Marcos (2015) analisou alguns materiais naturais, alcançando condutividades térmicas próximas às registradas para materiais não renováveis como o EPS, PUR e lã mineral. A casca de pinheiro e o ramo de cebola apresentaram condutividade térmica entre  $0,06$  e  $0,08 \text{ W}/(\text{m.K})$ , já a palha resultou em uma condutividade inferior, de  $0,055 \text{ W}/(\text{m.K})$ . Essa pesquisa demonstra que o estudo com materiais naturais é viável e fundamental.

Segundo Spinelli *et al.* (2019), a utilização de materiais naturais como sabugo de milho, palha de soja e casca de pinus em placas para isolamento térmico, demonstraram resultados significativos em relação à condutividade térmica dos materiais. Além dessa conclusão, os autores caracterizaram a estrutura dos materiais de partida utilizando microscopia eletrônica de varredura.

Atualmente, a ONU vem estabelecendo diversas recomendações e legislações que visam a utilização em edificações, de materiais adequados que contribuam para a eficiência energética. Estas recomendações surgem da necessidade de substituição de materiais convencionais por materiais naturais e renováveis, que não são poluentes para o meio ambiente. Incentivados por essa necessidade, pesquisadores de todo o mundo estão em busca, cada vez mais frequente, por materiais naturais, que possam ser tratados de modo a se tornarem elementos com características construtivas (SPINELLI; CAMBEIO; KONRAD, 2018).

Os materiais, desde os residuais até os naturais, devem ser enxergados como passíveis de utilização, que possam ser vistos com o potencial de matéria-prima. O bambu, como muitos outros, é um exemplo de material natural que pode ser visto como matéria-prima de grande potencial, pois além do seu rápido crescimento e resistência, é um material ecológico (FILGUEIRAS; VIANA, 2017).

### **2.3.1. Bambu**

Segundo Kaminski (2013), o bambu possui baixo custo e alto potencial sustentável para ser utilizado em construções. Porém, sua durabilidade é a preocupação primária, sendo importante dar ênfase ao tratamento do bambu, para poder ser utilizado como matéria-prima.

Acredita-se que se o bambu fosse melhor processado, como acontece com a madeira por exemplo, seria um produto padronizado e ecologicamente correto, resultando em um produto que concorreria facilmente com os disponíveis no mercado. Contudo, o bambu cru, muitas vezes, não se difunde como deveria em comunidades que apresentam um padrão econômico mais elevado (FLANDER; ROVER, 2009).

O bambu usado para construção deve crescer em abundância e em linha reta, possuir diâmetro entre 50 mm a 200 mm, tempo de amadurecimento de 3 a 5 anos e um menor teor de amido para ser mais resistente a insetos e ser menos propenso a rachaduras. É importante assegurar que o bambu colhido realmente seja uma fonte sustentável, da espécie correta para o tipo de construção, faixa etária aceitável, dimensões adequadas para se atender as exigências de projeto, bem conservado (sem danos de insetos e fungos), possuir tratamento contra insetos e estar de preferência seco, sem umidade (KAMINSHI; LAWRENCE; TRUJILLO, 2016).

Na área da construção civil, o bambu como substituto da madeira, pode ser utilizado como piso e material de construção. A madeira de bambu que possui um acabamento de desbaste, na construção, é utilizada como andaime, feixe simples da casa, coluna, parede e escada. A partir dos anos 1980, iniciou-se um processamento profundo no qual o cenário de utilização do bambu começou a mudar, resultando em seu emprego como treliça de compensado, aglomerado, revestimento, entre outras finalidades (LIU *et al.*, 2018).

Na China o bambu é considerado de suma importância para a produção agrícola e rural do país. Devido ao ritmo acelerado de modernização, nos últimos anos, as plantas de bambu substituíram a madeira devido ao seu crescimento rápido, alto rendimento, rotação curta e fácil gerenciamento (LIU *et al.*, 2018).

Atanda (2015) analisou o uso do bambu em construções sustentáveis na Nigéria, país no qual a taxa de utilização do material é baixa, porém com grande abundância de bambu, o que poderia representar um potencial de substituição em relação à madeira comum. O autor argumenta que se o bambu fosse mais utilizado neste país como substituído da madeira, seria possível reduzir alguns impactos negativos existentes, por meio da diminuição do desmatamento, combate a mudanças climáticas, proteção da biodiversidade, além de contribuir para o desenvolvimento de construções sustentáveis de custo baixo, proporcionando mais acesso à moradia para as pessoas de baixa renda.

Na Costa Rica desenvolveu-se um projeto, onde foram plantados centenas de hectares de bambu *guandua*, sendo que, quando as plantas atingiram idade entre 3 a 5 anos, foram cortadas e utilizadas como substituto da madeira, juntamente com

alguns outros materiais como o aço, o concreto e a cana brava, para construir casas térreas mais baratas para comunidades pobres do país (KAMINSKI, 2013).

Melo et al. (2015), baseado em um estudo realizado com painéis elaborados de madeira e de bambu, concluiu que este material apresentou bom potencial para ser utilizado como matéria prima em painéis aglomerados. As propriedades físico-mecânicas da placa bambu-madeira, apresentaram similaridade com as elaboradas somente com madeira.

Segundo Escamilla e Habert (2014), o Peru, a Colômbia e o Equador possuem tradição em construção com bambu, devido à sua força, flexibilidade e versatilidade. Na Figura 3 é possível observar o sistema de paredes de suporte de carga utilizados nesses países, podendo ser utilizada em uma ampla gama de estilos de construção, principalmente para fechamento de casas, no lugar da madeira, pois, segundo a pesquisa, este estilo de parede apresentou alta resistência.

Figura 3 – Parede executada em bambu.



Fonte: ArchDaily (2019).

Segundo Sánchez, Morales e Caicedo (2017) os resultados relacionados à caracterização de painéis feitos com fibras de bambu da espécie *Guadua Angustifolia* Kunth juntamente com óleo de mamona apresentaram resultados positivos, especialmente em categorias relacionadas à absorção de água e à umidade. Os resultados obtidos para as propriedades físicas mostraram um baixo percentual de

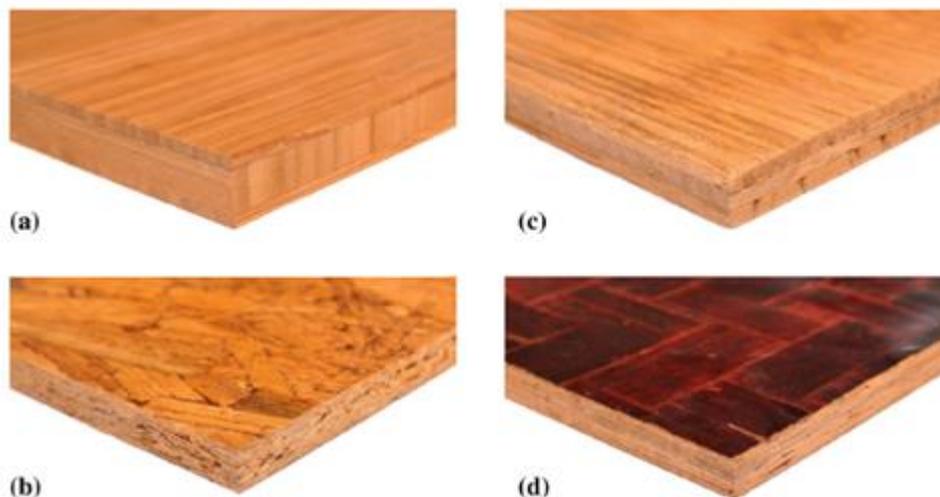
capacidade de absorção e porcentagem de inchaço, os quais podem estar relacionados com a resistência à degradação do material quando submetido a condições de ambiente úmido durante sua vida útil. Esses resultados indicam ser viável a utilização desses painéis em fechamento de residências, substituindo a madeira ou até mesmo os tijolos.

Na Indonésia foram analisadas construções simples com paredes compostas por blocos de terras comprimidas e paredes de bambu. A composição de parede convencional apresentou maior quantidade de energia térmica e maior energia gasta durante a execução, em comparação à parede do edifício que combinava blocos de terra e paredes de bambu. Além disso, foi demonstrado que os resultados eram otimizados ao se considerar uma área de parede maior com a combinação de blocos de terra e bambu (NOERWASITO, 2015).

Segundo Shah *et al.* (2016), a condutividade térmica obtida para painéis executados de bambu da espécie *moso* ou *guandua*, em estudos no Canadá, China e Colômbia, com objetivo de avaliar sua utilização como revestimento ou parede, foi baixa, particularmente, quando o material apresentou densidade elevada, sendo a condutividade térmica inferior aos valores conhecidos para produtos fabricados com madeira.

Os painéis avaliados nos países mencionados constam na Figura 4, onde (a) apresenta um painel de tiras de bambu laminado, (b) um painel de bambu da costa, (c) um painel laminado da esteira de bambu e (d) um painel de bambu folheado, com exceção dos painéis executados de bambu da costa (b), todos os demais estão disponíveis para comercialização (SHAH *et al.*, 2016).

Figura 4 – Placas produzidas de bambu.



Fonte: Shah *et al.* (2016, p. 2994).

Segundo Takagi *et al.* (2007), uma amostra de placa de isolamento contendo fibras de bambu e resina de ácido láctico apresentou resultados para a condutividade térmica melhores quando comparados com amostras de plástico reforçadas com fibra de vidro e de plásticos reforçadas com fibras de carbono. A condutividade térmica demonstrou ser inferior em função da baixa densidade da placa de isolamento, se assemelhando aos resultados conhecidos para a madeira.

Um estudo teórico realizado pelos pesquisadores Huang, Sun e Musso (2017) no programa *WUFI Plus*, simulou a dinâmica de teste das propriedades higrotérmicas, variações de temperatura e umidade do bambu, madeira macia e dura, utilizados em paredes externas. Os resultados mostraram que em comparação com a madeira, o bambu obteve vantagem no desempenho de armazenamento de calor, o que proporcionaria um ambiente térmico interno mais estável, particularmente em condições de não HVAC (*“Heating, Ventilating and Air Conditioning”*, ou seja, aquecimento, ventilação e ar-condicionado) e construção leve. Além disso, a configuração com bambu apresentou resistência ao vapor elevada, o que contribuiria para evitar danos causados pelo fluxo de umidade. Contudo, em relação ao fluxo de calor no material, ficou demonstrado que seria necessário promover melhorias.

## 2.4. Normativas de desempenho térmico de edificações

O desempenho térmico das edificações é uma característica importante a se observar no momento da elaboração de um projeto construtivo. As normas brasileiras que apresentam as bases para o estudo do desempenho e do conforto térmico em edificações são a NBR 15220: Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005) e a NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013).

A NBR 15220 (ABNT, 2005) versa sobre definições e métodos de cálculo para a análise do desempenho térmico, apresenta uma análise sobre o zoneamento bioclimático brasileiro e estabelece os procedimentos para a determinação da resistência e da condutividade térmica de materiais, sendo assim, essa norma é dividida em cinco partes, sendo elas:

- (a) Parte 1: Definições, símbolos e unidades;
- (b) Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações;
- (c) Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;
- (d) Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida;
- (e) Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

Já a NBR 15575 (ABNT, 2013) apresenta, de maneira complementar, as exigências dos usuários em relação ao desempenho das edificações, sendo dividida em seis partes:

- (a) Parte 1: Requisitos gerais;
- (b) Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais;
- (c) Parte 3: Requisitos para os sistemas de piso;
- (d) Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas: SWIE;

- (e) Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas;
- (f) Parte 6: Requisitos para sistemas hidrossanitários.

#### 2.4.1. NBR 15220/2005 – Desempenho térmico de edificações

A NBR 15220-2 (ABNT, 2005) “estabelece procedimentos para o cálculo de propriedades térmicas (...) de elementos e componentes na edificação” (ABNT, 2005b, p. 3). Nesse sentido, esta subseção apresentará a rotina de cálculos e considerações utilizadas no presente trabalho visando a obtenção das propriedades térmicas dos protótipos desenvolvidos.

Segundo a ABNT (2005b), inicialmente é necessário determinar a resistência térmica ( $R$ ) do material, cuja unidade de medida é dada em  $(m^2.K)/W$ . A resistência térmica de um elemento homogêneo é obtida por meio da Equação 1.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (1)$$

onde,  $R$  é a resistência térmica  $((m^2.K) / W)$ , e a espessura (em m) e  $\lambda$  a condutividade térmica do material  $(W/(m.K))$ .

A condutividade térmica, ainda de acordo com a ABNT (2005a), é uma propriedade física específica de cada material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante. A mencionada norma apresenta a condutividade de diversos materiais comumente utilizados na construção civil em sua tabela B.3, sendo que, quando um material não possui uma condutividade conhecida, a NBR apresenta também métodos experimentais que possibilitam sua obtenção.

No caso de a estrutura avaliada não ser completamente homogênea é necessário considerar a contribuição das diferentes seções utilizando a Equação 2.

$$R_t = \frac{A_a + A_b}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b}} \quad (2)$$

sendo que,  $A_a$  é a área da superfície exposta do material “a” e a  $A_b$  é a área da superfície exposta do material “b”, enquanto  $R_a$  é a resistência térmica do material “a” e  $R_b$  é a resistência térmica do material “b”.

O cálculo da resistência dos componentes pode contemplar ainda a necessidade de incluir a contribuição da resistência oferecida por câmaras de ar, caso existam na configuração construtiva. Uma câmara de ar pode ser pouco ou muito ventilada, de acordo com os limites estabelecidos pela norma e apresentados no Quadro 1.

Essa classificação impacta na maneira como esse elemento será considerado no cálculo, além disso, outro fator relevante para a determinação da contribuição da câmara de ar consiste na direção do fluxo térmico, ou seja, se a situação é de ganho ou perda de calor.

Quadro 1 – Condições de ventilação das câmaras de ar.

Posição da câmara de ar	Câmara de ar	
	Pouco ventilada	Muito ventilada
Vertical (paredes)	$S/L < 500$	$S/L \geq 500$
Horizontal (coberturas)	$S/A < 30$	$S/A \geq 30$

Fonte: Adaptado da ABNT (2005b), p. 6.

onde  $S$  é a área total de abertura de ventilação em  $\text{cm}^2$ ,  $L$  é o comprimento da parede em m e  $A$  é a área da cobertura.

O Quadro 2 apresenta os valores atribuídos às câmaras de ar não ventiladas em função de sua espessura em cm e da emissividade ( $\epsilon$ ) da superfície que a envolve.

Quadro 2 – Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura.

Natureza da superfície da câmara de ar	Espessura “e” da câmara de ar (cm)	Resistência térmica $R_{ar}$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ )		
		Direção do fluxo de calor		
		Horizontal	Ascendente	Descendente
Superfície de alta emissividade ( $\epsilon > 0,8$ )	$1 \leq e \leq 2$	0,14	0,13	0,15
	$2 < e \leq 5$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade ( $\epsilon < 0,2$ )	$1 \leq e \leq 2$	0,29	0,23	0,29
	$2 < e \leq 5$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5$	0,34	0,27	0,61

Fonte: Adaptado da ABNT (2005b), p. 11.

Finalmente, a resistência térmica total considera a soma das contribuições das resistências externa e interna, cujos valores são apresentados pela norma, e da resistência  $R_t$  do material, como mostra a Equação 3.

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (3)$$

Nesse estudo, os cálculos foram realizados considerando apenas as paredes, que são elementos de vedação vertical, sendo assim, as resistências interna e externa, admitindo um fluxo de calor horizontal, correspondem aos valores de 0,13 e 0,04 ( $m^2.K/W$ ), respectivamente, como mostra o Quadro 3.

Quadro 3 – Valores de resistência superficial interna e externa.

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

Fonte: Adaptado da ABNT (2005b), p. 10.

A transmitância térmica ( $U$ ) de componentes de diferentes materiais e de ambiente a ambiente, pode ser obtida considerando o inverso da resistência térmica total, como mostra a Equação 4.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (4)$$

em que  $U$  corresponde a transmitância térmica em  $W/(m^2.K)$  e  $R_T$  à resistência térmica total em ( $m^2.K/W$ ).

A capacidade térmica ( $C_T$ ) é a “quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema” (ABNT, 2005a, p. 2). Quando se admite componentes homogêneos é possível determinar essa propriedade de acordo com a Equação 5.

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (5)$$

onde,  $C_T$  é a capacidade térmica em  $kJ/(m^2.K)$ ,  $e_i$  é a espessura,  $c_i$  é o calor específico e  $\rho_i$  é a densidade de massa aparente do material, considerando uma camada  $i$  qualquer.

Assim como ocorre com a condutividade, o calor específico e a densidade de massa aparente podem ser consultados na tabela B.3 da norma ou determinados de acordo com procedimentos específicos.

A capacidade térmica total, apresentada na Equação 6, considera um elemento construtivo com seções heterogêneas.

$$C_T = \frac{A_a + A_b}{\frac{A_a}{C_{T_a}} + \frac{A_b}{C_{T_b}}} \quad (6)$$

Outra propriedade térmica bastante relevante quando a discussão aborda o desempenho térmico de uma estrutura é o atraso térmico. Por definição, o atraso térmico é o “tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor” (ABNT, 2005a, p. 2).

O atraso térmico ( $\varphi$ ), dado em horas, pode ser calculado de formas distintas quando se avalia elementos homogêneos ou heterogêneos. A Equação 7 apresenta o método utilizado para calcular o atraso de componentes homogêneos, que considera a resistência térmica das superfícies ( $R_t$ ) e a capacidade térmica total ( $C_T$ ).

$$\varphi = 0,7284 \cdot \sqrt{R_t \cdot C_T} \quad (7)$$

A Equação 8 apresenta o cálculo necessário para determinar o atraso de elementos heterogêneos, sendo que para tanto é preciso estabelecer os parâmetros  $B_1$  e  $B_2$ , que são dados pelas Equações 9 e 10. O subscrito “ext” indica que aquele componente da equação específica deve ser calculado considerando apenas a camada externa.

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2} \quad (8)$$

$$B_1 = 0,226 \frac{B_0}{R_t} \quad (9)$$

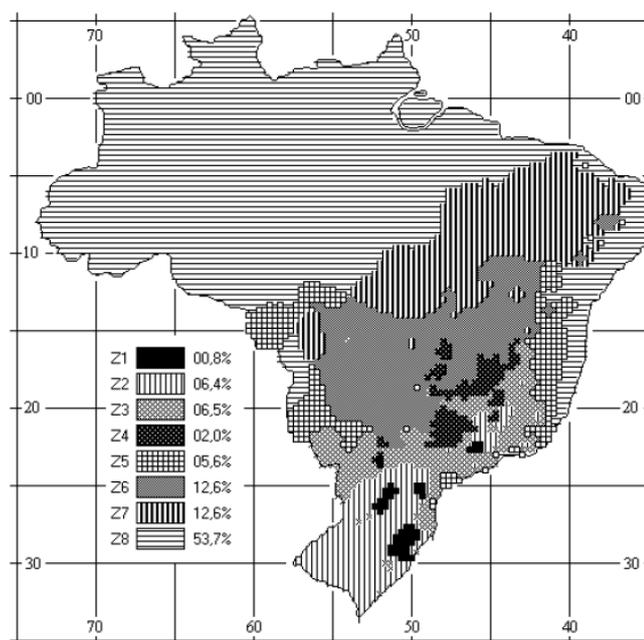
$$B_2 = 0,205 \cdot \left[ \frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{\text{ext}}}{R_t} \right] \cdot \left( R_{\text{ext}} - \frac{R_t - R_{\text{ext}}}{10} \right) \quad (10)$$

O parâmetro  $B_1$  depende diretamente de  $B_0$  que corresponde à diferença entre a capacidade térmica total ( $C_T$ ) e a capacidade térmica da camada externa ( $C_{\text{Text}}$ ), ou seja,  $B_0 = C_T - C_{\text{Text}}$ . Em relação ao parâmetro  $B_2$ , caso a equação resulte em um valor negativo sua contribuição deve ser desconsiderada.

#### 2.4.2. Zona bioclimática

As zonas bioclimáticas são regiões geográficas determinadas a partir da combinação de características climáticas específicas e tem a finalidade de estabelecer diretrizes construtivas adequadas para cada região. A Figura 5 apresenta o zoneamento bioclimático brasileiro, que corresponde a divisão do território nacional em oito zonas (ABNT 2005a).

Figura 5 – Zoneamento bioclimático brasileiro.



Fonte: ABNT (2005c), p. 2.

As diretrizes construtivas estabelecem estratégias de condicionamento térmico para as edificações, por meio de parâmetros como o tamanho das aberturas para

ventilação, proteção dessas aberturas, tipos de vedações externas (paredes e coberturas) e estratégias bioclimáticas de condicionamento passivo (ABNT, 2005c).

A cidade considerada nesse estudo, Lajeado RS, está situada na zona bioclimática 2, sendo que, de acordo com a ABNT (2005c), as edificações construídas nessa região precisam atender as seguintes diretrizes:

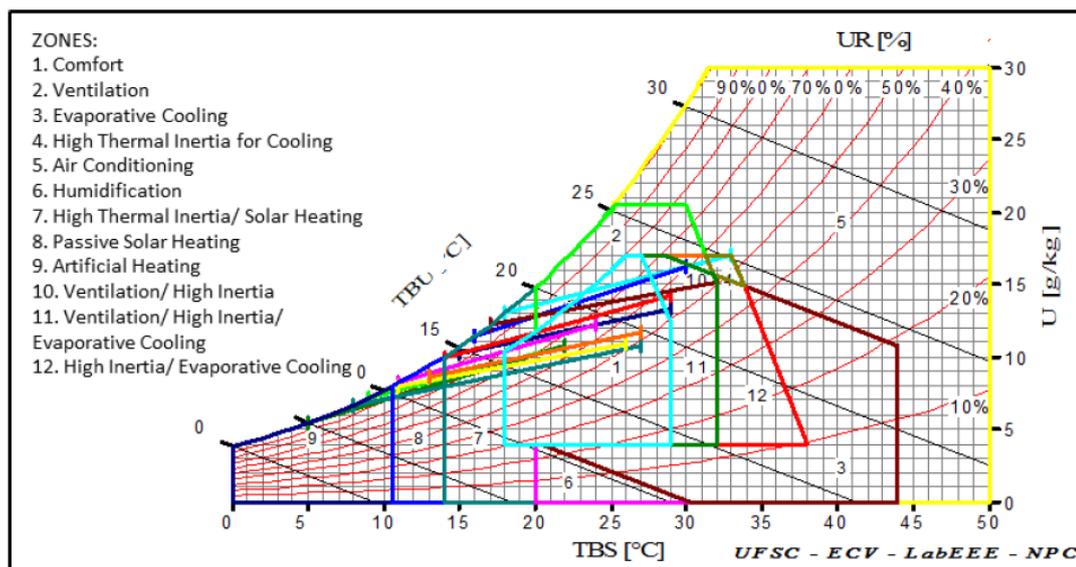
- As aberturas para ventilação devem ser de tamanho médio, ou seja, a área de abertura precisa atender a relação de  $15\% < A < 25\%$ , onde A é a área de piso do cômodo avaliado;
- As aberturas devem permitir sol durante o inverno;
- As vedações externas, paredes e cobertura devem ser leves e leve isolada, respectivamente e,
- A estratégia passiva recomendada para o verão consiste na utilização de ventilação cruzada, enquanto para as situações de inverno recomenda-se o aquecimento solar da edificação associado a vedações internas pesadas, ou seja, com alta inércia térmica.

Segundo Verbeke e Audenaert (2018) uma edificação com alta inércia térmica ou com inércia térmica adicional possui isolamento térmico positivo, trazendo mais conforto térmico aos usuários da edificação, além de contribuir para o atraso térmico reduzindo a necessidade de condicionamento de ar no local.

#### **2.4.2.1. Carta bioclimática de Lajeado/RS**

Spinelli *et al.* (2017) desenvolveram a carta bioclimática da cidade de Lajeado – Rio Grande do Sul, definindo assim, as estratégias bioclimáticas recomendadas visando o desempenho térmico das edificações. A carta bioclimática obtido no estudo é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Carta bioclimática de Lajeado/RS.



Fonte: Spinelli *et al.*, (2017).

Segundo o estudo, as características climáticas de Lajeado RS indicam a necessidade da utilização das estratégias recomendadas nas zonas 2, 7, 8, 9, 10 e 11, que consistem respectivamente, em ventilação natural, inércia térmica e aquecimento solar, aquecimento solar passivo, aquecimento artificial, ventilação natural associado a alta inércia e ventilação natural associada a alta inércia e ao resfriamento evaporativo. Além disso, em 45,26% do ano a cidade não demanda de nenhuma estratégia adicional por se encontrar em condições que possibilitam o conforto térmico (SPINELLI *et al.*, 2017).

A demanda por alta inércia dos materiais e aquecimento solar passivo corresponde a um total de 29,92% do período avaliado, enquanto a ventilação natural é indicada em 15% do ano, desta forma, os projetos construtivos na cidade devem privilegiar a aplicação de estratégias de isolamento térmico, o que pode incentivar a procura por novos materiais para este fim (SPINELLI *et al.*, 2017). Outra conclusão relevante do estudo mencionado consiste na determinação de que os meses de dezembro a março são aqueles em que ocorre o registro dos índices mais elevados de temperatura (SPINELLI *et al.*, 2017).

### **2.4.3. NBR 15575/2013: Edificações habitacionais – Desempenho**

A NBR 15575 (ABNT, 2013) trata dos requisitos mínimos necessários para garantir o desempenho e as condições de conforto para o usuário. Esses requisitos buscam estabelecer parâmetros para os projetistas e usuários que indicam os limites aceitos visando atender as condições de conforto adequado.

Por exemplo, considerando novos materiais e a sustentabilidade, segundo a norma, é preciso assegurar questões como durabilidade, manutenibilidade e impacto ambiental (ABNT, 2013a). Além disso, em relação ao desempenho térmico, a edificação deve atender as diretrizes construtivas indicadas pela NBR 15220 (ABNT, 2005) e as estratégias estabelecidas pela carta bioclimática. Outra consideração relevante consiste na opção adequada para o posicionamento dos cômodos visando otimizar seu desempenho em condições de inverno e verão.

### 3. METODOLOGIA

A presente pesquisa seguiu etapas pré-estabelecidas para a obtenção dos seus objetivos, sendo que as principais consistiram no planejamento, na coleta de dados, na análise e interpretação e na redação do texto, seguindo a descrição de Gil (2019), referente aos processos de pesquisa. O caráter explicativo e exploratório. A parte explicativa da pesquisa consiste em “identificar os fatores que contribuem para a ocorrência dos fenômenos” (GIL, 2019, p. 27), aprofundando o conhecimento da realidade; já a parte exploratória visa “desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideia, tendo em vista a modificação de formulação de problema mais precisos” (GIL, 2019, p. 26).

Nesse sentido, o perfil exploratório desta pesquisa é caracterizado pela execução das placas e protótipos, bem como coleta de dados a campo. E o caráter explicativo, consiste em apresentar e discutir os resultados obtidos por meio do trabalho desenvolvido a campo.

#### 3.1. Material de partida

Nessa pesquisa, foi investigado o desempenho térmico de fachadas ventiladas com a utilização de placas de argamassa formando o encapsulamento de uma camada interna que consistia em uma placa prensada de bambu triturado com resina a base de água (bambu+ resina).

O bambu utilizado, da espécie *bambusa vulgaris*, demonstrado na Figura 7, foi colhido em uma propriedade na cidade de Arroio do Meio – Rio Grande do Sul, no dia 17 de maio de 2019.

Figura 7 – Bambu colhido na cidade de Arroio do Meio - RS.



O bambu foi escolhido como material, para esta pesquisa, devido ao seu crescimento rápido e sua absorção de carbono, colaborando assim para o bem-estar ambiental (DELGADO, 2011). Segundo Cruz (2002), o bambu quando comparado com a madeira apresenta condutividade térmica 15% menor para uma transmissão de calor radial e, nas mesmas condições de umidade, apresenta uma condutividade 25% menor, para a transmissão de calor longitudinal.

O bambu colhido foi armazenado em local fechado e seco até que pudesse ser moído. Então com o auxílio de um moinho, da marca Mecanofar MF 230 (Figura 8), foi triturado, sendo que o resultado deste processo está representado na Figura 9.

O resultado da trituração foi acompanhado por peneiramento utilizando uma peneira com abertura de 6,3 mm e malha de 1/4 de polegada para garantir que as placas mantivessem um padrão de granulometria o mais constante possível. O bambu triturado foi armazenado em local seco e arejado, para não comprometer a sua qualidade.

Figura 8 – Máquina para triturar o bambu.



Figura 9 – Bambu Triturado.



A caracterização inicial do material consistiu em determinar a densidade de massa aparente de acordo com a metodologia apresentada na NBR 15220-1 (2005a), na qual define-se densidade como o quociente da massa pelo volume aparente do

corpo. Sendo assim, para essa análise, utilizou-se uma placa de bambu + resina com dimensões de 30 x 40 x 2 cm (cujas especificações de confecção serão apresentadas posteriormente) foi pesada com o auxílio de uma balança de precisão da marca Shimadzu, em seguida, esse valor foi dividido pelo volume da placa, resultando em uma densidade dada em kg/m<sup>3</sup>.

O bambu *in natura* foi seco em uma estufa durante 24 horas, com a finalidade de realizar o teste de umidade por meio do método descrito em APHA (2005), no qual o material seco é triturado e sua umidade é determinada pela medição de sólidos totais. Os sólidos totais são obtidos por secagem em uma estufa adequada, na qual três amostras, previamente pesadas, foram deixadas por 24 horas a 105 °C, e a umidade foi determinada, sendo que o bambu utilizado na confecção das placas precisava estar completamente seco, então a secagem na estufa e o teste de umidade serviram para confirmar que a umidade do material era de 0%.

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas no laboratório de química de alimentos da UNIVATES (CTPPA), em um microscópio da marca Carl Zeiss, modelo LS-10, com detector de elétrons secundários e voltagem de aceleração (EHT) de 10 kV. As amostras foram dispostas em suportes metálicos apropriados, chamados *stubs*, sendo fixadas por uma fita de carbono de dupla face. Foram analisadas amostras do bambu puro e da placa de bambu e resina, sendo que as escalas das imagens obtidas foram de 100 µm e 20 µm.

### **3.2. Placa de bambu**

As placas de bambu foram desenvolvidas no Laboratório de Tecnologia da Construção – LATEC, na Universidade do Vale do Taquari.

A confecção das placas iniciou-se com a mistura entre o bambu triturado e a resina acrílica *Premiun Plus*, a base de água, da marca Lukscolor. Após testes realizados com diferentes relações de quantidade de bambu e resina, as placas foram desenvolvidas utilizando um traço de 1:0,8, ou seja, para cada parte de bambu foi utilizado 80% dessa massa em resina na mistura.

Segundo o fabricante, a resina utilizada é composta por caulim, dióxido de titânio, ácido sulfônico, C13-C17-SEC-alcano, negro de fumo, propilenoglicol, 1-fenóxi-2-propanol, aguarrás mineral, e não é um material inflamável (LUKSCOLOR, 2016).

Como o bambu é um material higroscópico, a resina foi utilizada com o intuito de minimizar a absorção de umidade pelo material, além disso, pela característica aglutinante, a resina contribuiu para a formação do conglomerado de partículas que deram origem às placas. Também como a referida resina é a base de água, o odor é mínimo e sua utilização garante uma pequena emissão de compostos orgânicos voláteis, não sendo, portanto, um material inflamável.

A mistura de bambu e resina foi depositada em uma forma feita de MDF (Medium-density fiberboard, em tradução livre placa de fibra de média densidade), forrada com papel manteiga com o intuito de impedir que a massa não grudasse nas bordas, o que dificultaria sua remoção do molde. As formas empregados na confecção das placas utilizadas na caracterização do material possuíam dimensões de 30 cm x 40 cm e 2 cm de altura, enquanto as utilizadas posteriormente no revestimento da fachada no protótipo, 40cm x 42cm x 2cm.

Após ser colocada na forma, a mistura foi submetida a uma pequena pressão manual distribuída uniformemente por meio de uma placa de madeira, no formato de uma “tampa”. Essa pressão consistiu na aplicação de seis golpes manuais leves ao longo da tampa, sendo que esse cuidado foi necessário visando não compactar o material em demasia, de modo a eliminar todos os vazios formados pelo ar na placa, visto que estes vazios poderiam contribuir com o desempenho térmico da camada.

Em seguida, as placas, ainda nos moldes, foram colocadas em uma estufa da marca Quimis (Figura 10), sendo deixadas lá por aproximadamente 8 horas a temperatura de 105 °C, visando minimizar a umidade da placa e assegurar a secagem da resina.

Figura 10 – Estufa utilizada na secagem das placas confeccionadas.



Ao ser finalizada esta etapa, a placa de bambu (Figura 11) estava pronta para ser encapsulada entre camadas de argamassa para ser utilizada como revestimento no protótipo, cujos processos construtivos estão detalhados adequadamente adiante neste texto.

Figura 11 – Placa de bambu finalizada.



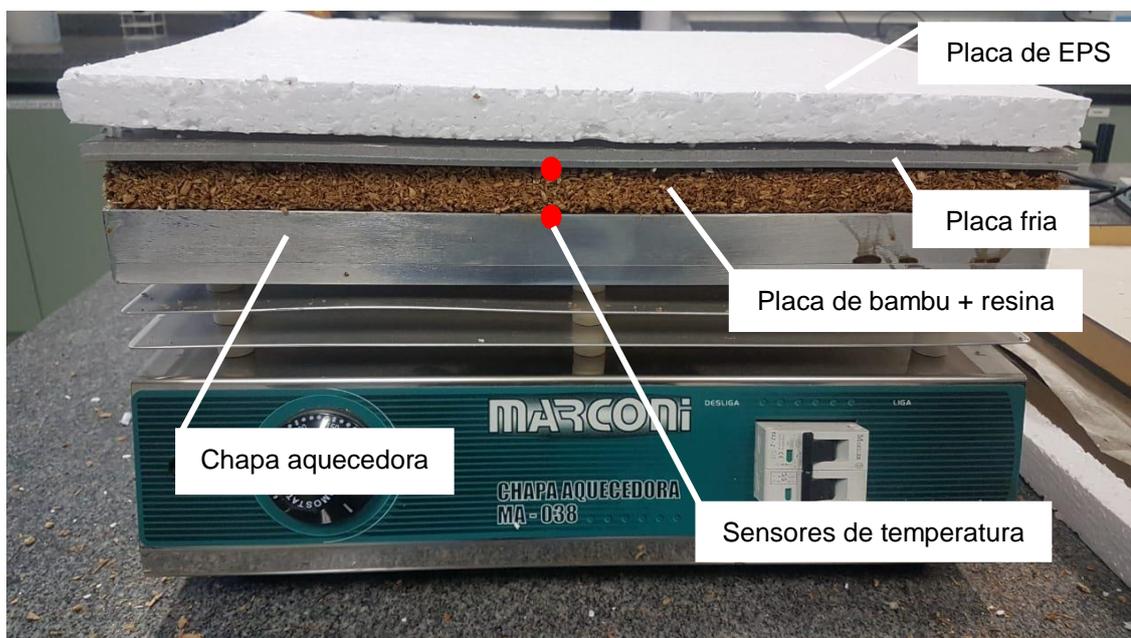
As placas de bambu + resina foram caracterizadas, nessa etapa, quanto a sua condutividade térmica. O procedimento experimental para tanto consistiu em uma

adaptação do princípio da placa quente protegida apresentado na norma da ABNT (2005d).

Este ensaio foi realizado no Prédio 11 da UNIVATES, no Laboratório de Biorreatores, sendo que durante as medições a temperatura do ambiente foi mantida em 23 °C, podendo ser considerada aproximadamente constante. O conjunto utilizado na medição surgiu de uma adaptação de equipamentos e materiais desenvolvida por Spinelli et al. (2019) com base na metodologia utilizada por Simioni (2005).

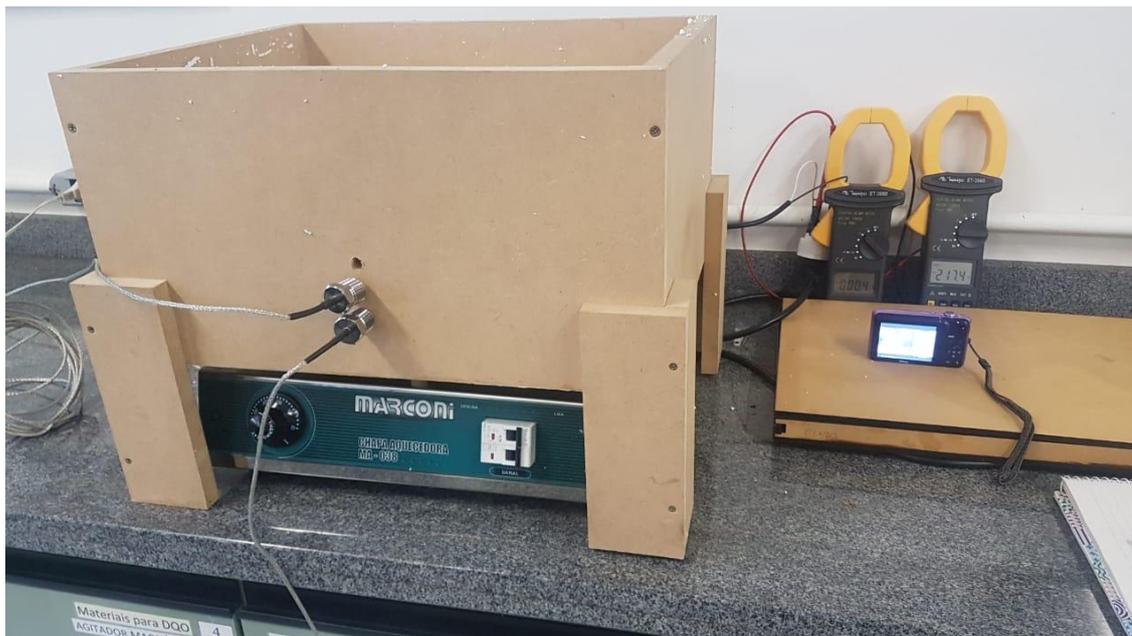
De forma simplificada, o procedimento experimental consistiu em colocar a placa da amostra de bambu + resina entre a chapa aquecedora (placa indutora de calor) e uma placa fria de alumínio com as mesmas dimensões da placa da amostra, 30 x 40 cm, além disso, o sistema foi isolado com uma placa de poliestireno expansível (EPS) na parte superior, como pode ser visto na Figura 12, na qual também é possível observar a ordem com que os elementos foram posicionados.

Figura 12 – Aparato utilizado na determinação da condutividade térmica da placa.



A Figura 13 apresenta o conjunto indicado na Figura 12 protegido por uma caixa em MDF e com isolamento feito com EPS nas laterais da caixa. Essa medida teve por finalidade promover o isolamento térmico do sistema durante as medições evitando perdas de calor.

Figura 13 – Aparato isolado durante a medição.



A chapa indutora de calor utilizada foi o modelo MA-038 da marca Marconi, que apresenta uma potência total de 2000W, podendo chegar a uma temperatura de 300°C, contudo, nesse estudo, a placa aquecedora foi mantida constantemente em 60°C. Para acompanhar as temperaturas das placas quente e fria foi necessário acoplar sensores de temperatura ao aparato. Os sensores, indicados na Figura 12 por pontos em vermelho, eram de platina Pt-100, com 17,5 cm de comprimento, sendo que um deles ficou entre a chapa aquecedora e a placa de bambu (sensor 1) e o outro, entre a placa de bambu e a placa fria de alumínio (sensor 2). Ambos os sensores foram conectados a um *data logger* modelo FieldLogger 128k e a um conversor modelo USB-i485 que foram utilizados para coletar continuamente a temperatura, em intervalos de 1 em 1 hora durante 5 dias, totalizando 100 horas coletadas.

A metodologia utilizada para o cálculo da condutividade ( $\lambda$ ), dada em W/m.K, considera uma adaptação proposta por Simioni (2005), na qual a propriedade térmica de um elemento pode ser calculada levando em consideração a relação entre o produto do fluxo de calor ( $q$ ) por área, dado em Watts por metro, pela espessura ( $e$ ) da placa, em metros, dividida pela variação de temperatura ( $\Delta T$ ), dada em Kelvin, sendo que esse  $\Delta T$  resulta da diferença entre a média das temperaturas da placa quente e a média das temperaturas da placa fria, tal que:

$$\lambda = \frac{q \cdot e}{\Delta T} \quad (11)$$

Para determinar o fluxo de calor ( $q$ ) foi utilizado a metodologia descrita por Moura (1993) que considera que o fluxo de calor através da placa corresponde à potência dissipada pela chapa aquecedora, sendo assim, foi necessário acompanhar os valores de tensão ( $V$ ) e corrente ( $i$ ) utilizando dois multímetros digitais do tipo alicate, da marca Minipa modelo ET-3860, para medir a tensão e corrente solicitadas pela chapa aquecedora para chegar à 60 °C, sendo que um alicate foi utilizado na função voltímetro, enquanto o outro, na função amperímetro.

### 3.3. Confecção das placas de isolamento

A confecção das placas que seriam utilizadas visando o isolamento térmico na fachada ventilada dos protótipos aconteceu no prédio 17, no Laboratório de Tecnologia da Construção – LATEC da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES.

As placas possuíam três camadas de materiais (Figura 14). A primeira camada consistiu em argamassa com espessura de 0,5 cm, a segunda camada correspondia a placa de bambu e resina com 2 cm de espessura, e por fim, a terceira camada também foi de argamassa com 0,5 cm, resultando em uma placa de 3 cm. Essas dimensões são uniformes e foram controladas com o auxílio de um paquímetro universal (Figura 15) e uma régua na escala de 1:10.

As camadas de argamassa utilizadas tiveram a finalidade de proteger o material natural (bambu) das intempéries, além de auxiliar no acabamento visando fins estéticos. A argamassa também foi utilizada para fechamento nas laterais da placa, sendo que a espessura necessária foi de 1 cm (Figura 16).

A resistência mecânica da camada de argamassa foi definida por meio de testes realizados no Laboratório de Tecnologia da Construção (LATEC) – UNIVATES. Foram analisados dois traços, um deles com relação peso de 1:1 entre cimento CP V e areia fina para 40% de água com 0,16% de aditivo e o segundo traço possuía a mesma relação entre cimento, areia fina e água, porém sem a inclusão de aditivo.

Figura 14 – Camadas da placa pronta.

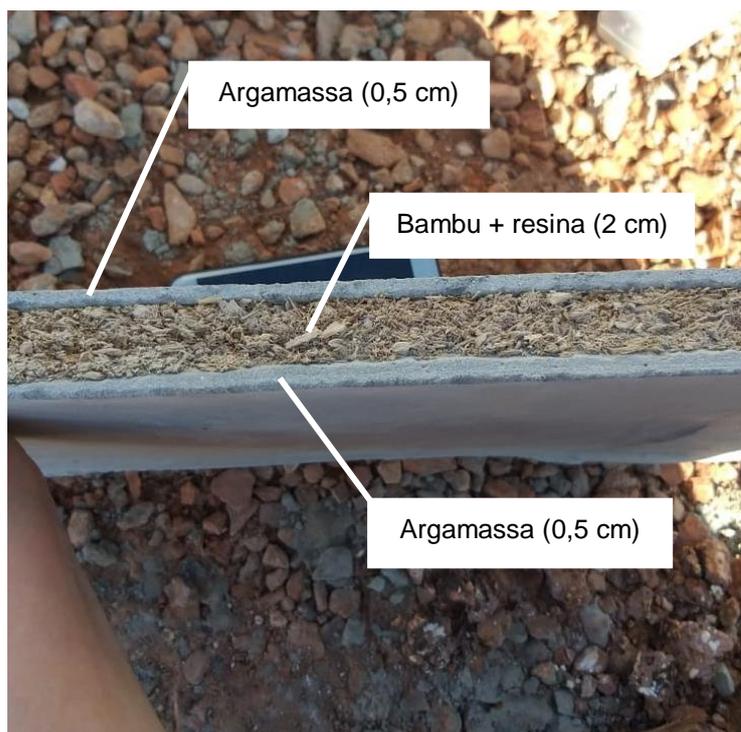


Figura 15 – Controle da espessura das camadas de argamassa.



Figura 16 – Placa com acabamento finalizado.



Ambos os traços apresentaram uma boa resistência à compressão. A mistura contendo aditivo resultou em 4,41 MPa, enquanto o traço sem aditivo, em 4,15 MPa, em 5 dias de cura úmida. Entretanto, apesar de apresentar uma resistência superior, o traço com aditivo secava mais rapidamente, o que prejudicou a trabalhabilidade da massa e dificultaria a execução das placas, sendo assim, optou-se pela utilização da mistura sem aditivo.

De acordo com a ABNT (2005b), a argamassa utilizada possui como propriedades térmicas, considerando uma densidade de massa aparente ( $\rho$ ) de 2000 kg/m<sup>3</sup>, condutividade térmica ( $\lambda$ ) de 1,15 W/(m.K) e calor específico ( $c$ ) de 1 kJ/(kg.K).

Em função das dimensões dos protótipos, que serão discutidas posteriormente no texto, foi necessário executar 36 placas com tamanho final de 40cm x 42cm. A Figura 17 apresenta os moldes utilizados para a confecção das placas, sendo que essas formas foram desenvolvidas em compensado naval, com 5 cm de altura, visando garantir a espessura final das placas de 3 cm, o que foi acompanhado com a utilização de régua e paquímetro, além disso, cada molde permitia a execução de 8 placas simultaneamente. A Figura 18 mostra uma placa sendo finalizada com a camada final de argamassa.

Figura 17 – Moldes utilizados para a execução das placas de isolamento.



Figura 18 – Placa de isolamento sendo finalizada com argamassa.



Com o intuito de facilitar a desforma das placas, os moldes foram “untados” com um desmoldante, deforma Plus da marca Viapol, e posteriormente foram executadas a camada de argamassa, a adição da placa de bambu e resina, devidamente centralizada no molde e a camada final de argamassa, além disso, as laterais da placa também receberam acabamento em argamassa, como mencionado

anteriormente. A Figura 19, apresenta os moldes com as placas finalizadas e em processo de cura.

Figura 19 – Placas da fachada ventilada finalizadas.



As placas passaram pelo processo de cura úmida, durante 5 dias, até que atingissem a resistência adequada que possibilitaria sua utilização na fachada do protótipo.

### 3.4. Execução dos protótipos

Foram construídos dois protótipos, com dimensões de 1,24 m x 1,115 m e altura de aproximadamente 1,14 m, sem considerar a dimensão das placas, cujo projeto está apresentado na Figura 20.

Ambos os protótipos possuem fundação tipo *radier* em concreto armado, com espessura de 10 cm, forro de laje maciça, na qual foi utilizada uma laje treliçada constituída por mini painéis treliçados como forma, sobre a laje uma camada de EPS (poliestireno expandido) de 2 cm e telhado de fibrocimento. As portas dos protótipos foram feitas de madeira com 33,5 cm de altura, sendo que houve um cuidado especial para que o elemento se encaixasse perfeitamente no vão deixado na parede para

garantir a vedação completa, como demonstrado na Figura 21. A tipologia utilizada para a construção dos protótipos é usualmente empregada na região do estudo.

Figura 20 – Projeto dos protótipos.

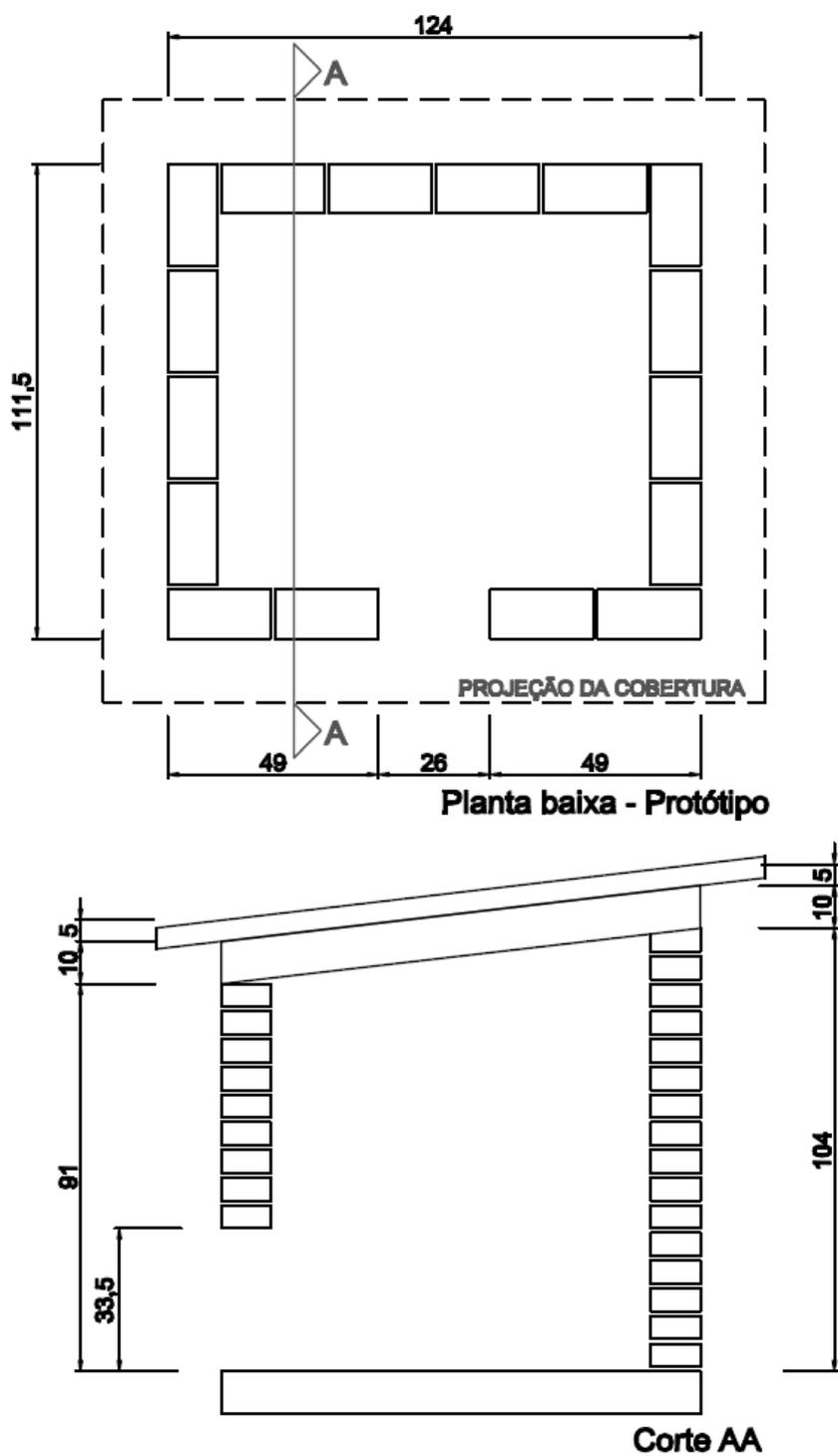


Figura 21 – Porta utilizada para fechamento dos protótipos.



As paredes dos protótipos foram construídas com tijolos maciços de 24 cm x 11,5 cm x 5,5 cm, com densidade de massa aparente ( $\rho$ ) de 1600 kg/m<sup>3</sup>, condutividade térmica ( $\lambda$ ) de 0,90 W/(m.K) e calor específico ( $c$ ) de 0,92 kJ/(kg.K). A argamassa utilizada para o assentamento dos tijolos possuía uma espessura de 1 cm.

Os protótipos foram construídos na rua Pedro Petry, 711, no bairro Universitário na cidade de Lajeado, Rio Grande do Sul, com coordenadas 29°25'35,42''S de latitude e longitude de 51°57'52,08''O. Esse espaço consiste em um condomínio de casas que está em execução, sendo cedido por uma empresa particular.

A Figura 22 apresenta, indicado em vermelho, o local em que foram executados os protótipos no interior do condomínio, sendo que este espaço se encontra à aproximadamente 2,7 quilômetros do prédio 1 da UNIVATES, também indicado no mapa.

Figura 22 – Localização dos protótipos.



Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH, 2020.

A principal diferença entre os protótipos consiste na presença de uma fachada ventilada em um deles, enquanto o outro ficou com os tijolos aparentes. Nesse sentido, os protótipos serão diferenciados com as terminologias “com isolamento” e “sem isolamento”, tal como apresentado na Figura 23.

O protótipo com isolamento térmico foi envolto por uma fachada ventilada composta pelas placas de bambu + resina encapsuladas por argamassa, afastadas da parede de tijolos maciços em 2 cm. A circulação das massas de ar na câmara foi assegurada em função de aberturas na base e no topo da fachada. Essa movimentação do ar acontece de forma natural, por diferenças de pressão causadas pelo vento ou fluxo ascendente devido ao aquecimento do ambiente (MULLER; ALARCON, 2005).

Figura 23 – Protótipos finalizados.



As placas foram fixadas nos tijolos maciços com auxílio de *inserts* metálicos de alumínio, uma vez que esse material é resistente à corrosão e o calor. Os *inserts* foram adaptados por meio de trilhos utilizados em portas de alumínio, sendo necessário dois segmentos de trilho em cada apoio, conforme apresentado na Figura 24. Esse sistema garantiu o afastamento uniforme de 2 cm entre a fachada com as placas isolantes e a parede de tijolos maciços.

Figura 24 – *Inserts* metálicos.

### 3.5. Avaliação do desempenho térmico dos protótipos

Visando a avaliação do desempenho térmico dos protótipos foram utilizados três *dataloggers* de umidade e temperatura (Figura 25), modelo HT-70, da marca Instrutherm com o objetivo de registrar os valores de temperatura e umidade relativa do ar no interior de ambos os protótipos e no ambiente externo.

Figura 25 – Datalogger utilizado para as medições de umidade e temperatura.



Os dataloggers foram posicionados exatamente da mesma maneira em ambos os protótipos, centralizados em relação ao plano horizontal e dispostos sobre quatro tijolos e um pedaço de madeira, de modo que os equipamentos ficaram aproximadamente no ponto médio da altura dos protótipos. O datalogger externo foi protegido da incidência solar direta, de ventos e quaisquer eventuais intempéries ocorridas no local.

Os equipamentos registraram os dados mencionados a cada hora durante 122 dias, de março até junho. Os dados coletados foram reunidos em planilhas e avaliados da seguinte forma:

- 1) análise comparativa do comportamento das temperaturas no interior dos protótipos, tendo como referência as temperaturas externas, em semanas de “extremos”, ou seja, naquela semana de cada mês investigado em que as temperaturas tiveram registro máximo e mínimo;

2) inicialmente apresentou-se a análise e os gráficos de duas semanas de cada mês, a semana que apresentou a maior temperatura externa e a que apresentou a menor temperatura externa, a temperatura foi comparada ao protótipo com isolamento em relação ao protótipo sem isolamento relacionando ambas as temperaturas atingidas com a temperatura externa;

3) após apresentou-se um comparativo do dia de maior e menor temperatura apresentada em todos os ambientes que foram coletados, e fez-se uma análise do horário e do atraso térmico apresentado nestes dias;

4) outro aspecto relevante da análise do desempenho térmico consistiu em utilizar os métodos de cálculo propostos pela ABNT (2005b) com o objetivo de determinar as propriedades térmicas de ambos os protótipos. Especificamente considerando o protótipo com isolamento, foi necessário seguir a rotina experimental mencionada na seção 3.2 deste capítulo para que a condutividade da placa de bambu + resina fosse determinada e utilizada posteriormente nos cálculos. As fórmulas utilizadas para a análise do desempenho térmico estão reunidas no Quadro 4.

Quadro 4 – Quadro de fórmulas utilizadas para cálculo de desempenho térmico.

Resistência térmica	Transmitância	Capacidade térmica	Atraso térmico
$R = \frac{e}{\lambda}$	$U_T = \frac{1}{R_T}$	$C_T = \sum_{i=1}^n (e_i \times c_i \times \rho_i)$	$\varphi = 0,7284 \times \sqrt{R_{parede} + C_T}$
$R_{parede} = \frac{A_a + A_b}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b}}$		$C_T = \frac{A_a + A_b}{\frac{A_a}{C_{T_a}} + \frac{A_b}{C_{T_b}}}$	
$R_T = R_{si} + R_{parede} + R_{se}$			

Para o protótipo sem isolamento foram utilizadas todas as fórmulas que constam acima para obter os resultados de resistência térmica, transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico, porém para o protótipo com isolamento foram utilizadas as fórmulas da resistência térmica e da transmitância térmica, pois não se obteve o valor de calor específico da placa de bambu, pois não existe normativa que contenha este valor, impossibilitando o cálculo de capacidade térmica e atraso térmico. O atraso térmico foi determinado analisando as diferenças térmicas apresentadas pelo protótipo com isolamento comparando com a temperatura externa e a temperatura do protótipo sem isolamento.

5) por fim foi apresentado uma análise breve do comportamento da umidade durante as semanas que a temperatura apresentou os picos de máxima e mínima temperatura.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. Caracterização do material de partida e da placa de bambu + resina**

Nesta etapa, buscou-se determinar a microestrutura do bambu puro, bem como da placa confeccionada com bambu + resina, além disso, a densidade de massa aparente e a condutividade deste elemento foram igualmente avaliados.

#### **4.1.1. Determinação da densidade de massa aparente da placa**

A densidade de massa aparente do material foi calculada de acordo com a metodologia proposta na ABNT (2005a), sendo obtida uma densidade ( $\rho$ ) igual a 225,33 kg/m<sup>3</sup>. O valor encontrado se aproxima do citado na ABNT (2005b) para a lã de rocha, material isolante térmico, que apresenta uma densidade de massa aparente igual a 200 kg/m<sup>3</sup>.

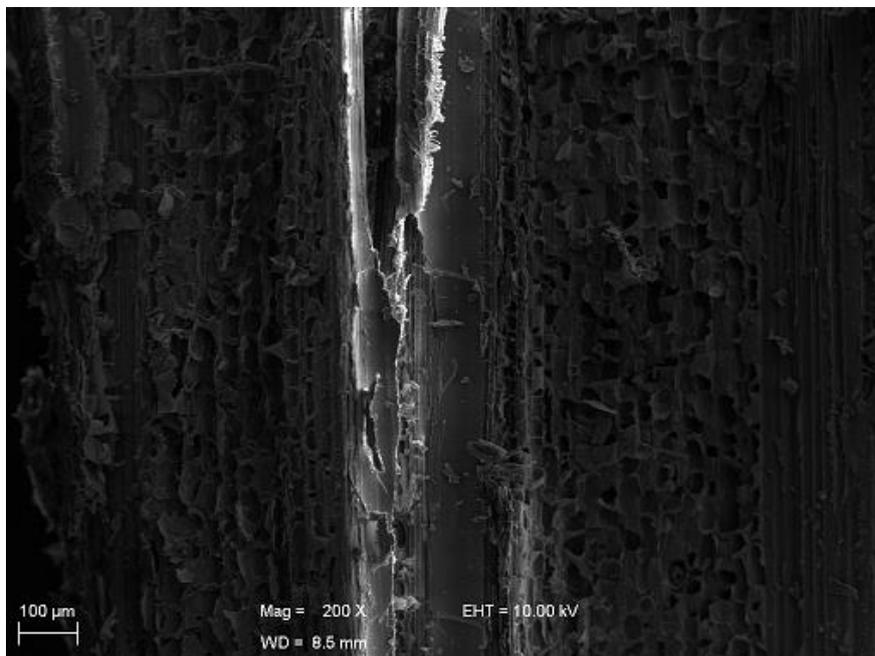
#### **4.1.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

As análises de microscopia eletrônica de varredura foram realizadas tanto em amostras de bambu puro, triturado e seco, quanto em fragmentos das placas de bambu + resina, com o intuito de avaliar a morfologia do bambu nessas duas configurações.

A Figura 26 apresenta a micrografia do bambu puro, na escala 100  $\mu\text{m}$ . A figura demonstra poros em formato esférico, que podem ter se tornado mais aparentes devido ao processo de trituração do bambu, presume-se que esses espaços

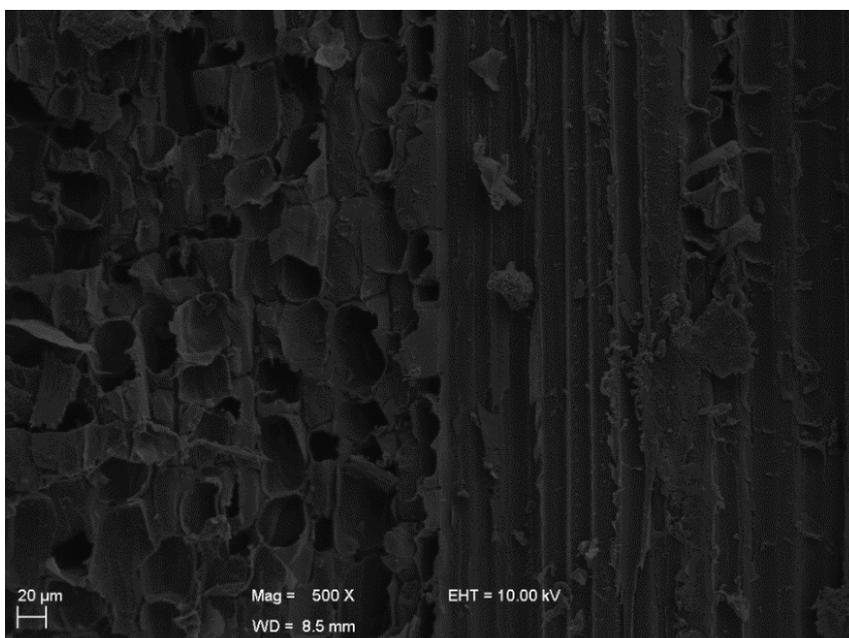
contenham ar. Além disso, é possível observar as fibras inteiriças do bambu que tem um perfil estriado e são resistentes.

Figura 26 – Micrografia da amostra de bambu (Escala 100  $\mu\text{m}$ )



Na Figura 27, a micrografia da amostra de bambu puro em escala de 20  $\mu\text{m}$ , corrobora as observações anteriores, sendo possível observar o padrão de poros e fibras contínuas, de maneira mais aproximada.

Figura 27 – Micrografia da amostra de bambu (Escala 20  $\mu\text{m}$ ).



As Figuras 28 e 29 apresentam as micrografias do fragmento da placa de bambu e resina na escala de 100 e 20  $\mu\text{m}$ , respectivamente, nas quais observa-se que alguns dos vazios presentes na amostra de bambu puro foram preenchidos, possivelmente pela resina a base de água utilizada na confecção das placas.

Figura 28 – Micrografia da amostra da placa de bambu e resina (Escala 100  $\mu\text{m}$ ).

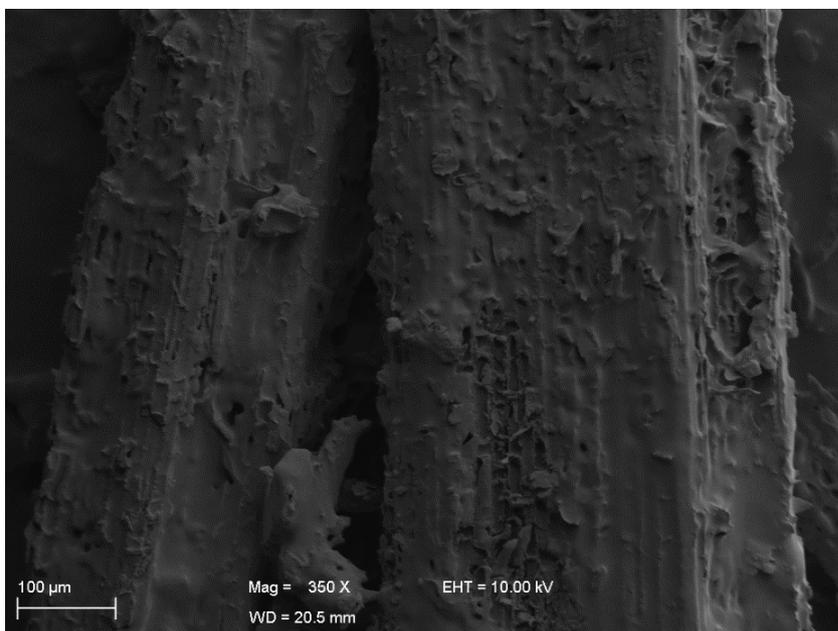
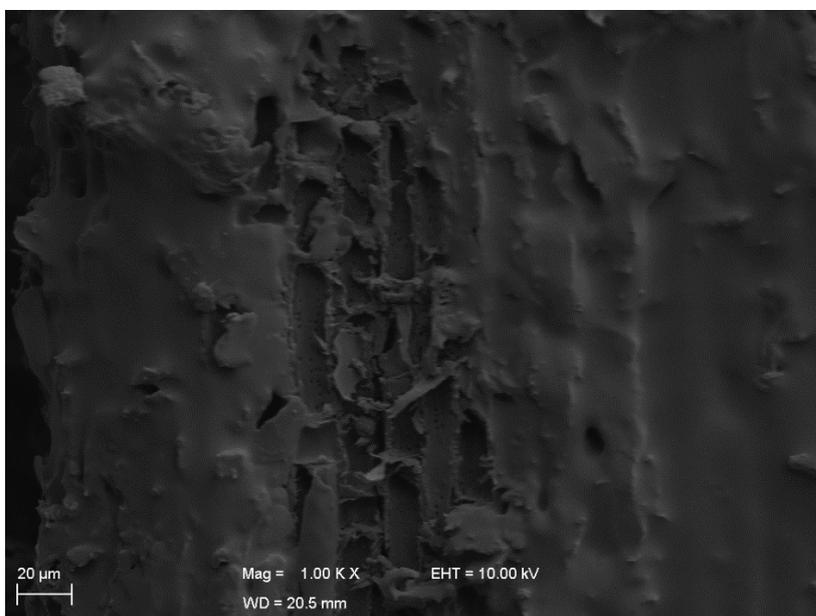


Figura 29 – Micrografia da amostra da placa de bambu e resina (Escala 20  $\mu\text{m}$ ).



A quantidade de espaços contendo ar na estrutura do bambu, ao ser introduzido a resina, foram reduzidas significativamente, o que pode ter afetado o comportamento térmico da placa bambu + resina, de acordo com a resposta térmica da placa em testes posteriores.

#### **4.1.3. Determinação da condutividade térmica**

Depois de montado o aparato, conforme item 3.2, iniciou-se a coleta das temperaturas. Após 100 horas de medição, ao final da coleta das temperaturas, as médias de temperatura dos dois sensores foram calculadas, em seguida, foi determinada a diferença entre essas médias, resultando em  $\Delta T = 18,2$  K.

O fluxo de calor ( $q$ ) foi calculado com base na potência dissipada pela chapa aquecedora ao atingir  $60$  °C. A corrente média registrada durante o procedimento foi de  $0,4$  A, enquanto a tensão foi de  $219$  V, resultando em uma potência de  $87,6$  W. Para o cálculo da condutividade é preciso considerar o fluxo de calor pela área da placa, que é de  $0,12$  m<sup>2</sup>, sendo assim, obtém-se  $730$  W/m<sup>2</sup>.

Admitindo que a espessura da placa de bambu e resina utilizada no aparato é de  $0,02$  m e aplicando a equação 11, é possível ver que a condutividade térmica da placa de bambu/resina é de  $\lambda = 0,80$  W/m.K.

A condutividade térmica obtida para a placa foi superior aos valores registrados na ABNT (2005b) para materiais considerados isolantes térmicos, que variam entre  $0,030$  a  $0,045$  W/m.K. Além disso, segundo Asdrubali et al. (2015), um material é considerado bom isolante térmico se sua condutividade ( $\lambda$ ) for inferior a  $0,07$  W/m.K, fazendo com que a condutividade térmica da placa de bambu + resina não se enquadre nestes requisitos.

Embora o bambu seja considerado um material com alto potencial para aplicações visando o desempenho térmico, no processo de confecção das placas foi utilizado um tipo de resina, o que, de acordo com as análises de microscopia eletrônica, promoveu a diminuição dos vazios que continham ar na estrutura. Nesse sentido, a adição da resina pode ter contribuído para o valor de condutividade obtido,

pois de acordo com Dubbel (1974), os vazios ou poros favorecem o isolamento térmico uma vez que o ar contido em seu interior é um mau condutor térmico.

Além disso, considerando o resultado obtido na transmitância térmica da placa estudada (bambu + resina) no valor de 0,80 W/mK, entende-se que possa haver um erro, podendo ter sido no material (resina) ou o método empregado para a determinação da transmitância. Materiais com densidade similar a placa de bambu + resina, por exemplo, a similaridade deste material com a densidade de lã de rocha tem resultados de transmitância térmica coerentes com os desejados para material isolante térmico pela ABNT (2005b). Ainda, é necessário demonstrar que o valor obtido de 0,80 W/mK não se justifica, pois, o mesmo está próximo de um material muito conhecido dentro da construção civil, que é o tijolo maciço cerâmico que tem uma transmitância térmica de 0,90 W/mK. Desta forma, reforça-se mais uma vez que há uma necessidade de um estudo aprofundado nos resultados de transmitância térmica, e a partir desta rever o material aqui estudado, tal avaliação poderá ser realizada posteriormente, em um trabalho futuro.

## **4.2. Avaliação do desempenho térmico dos protótipos**

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados encontrados na medição de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e umidade in loco do protótipo com isolamento, protótipo sem isolamento e da medição externa realizada, além dos resultados dos cálculos de desempenho térmico dos protótipos, seguindo as diretrizes de cálculo da ABNT (2005b).

### **4.2.1. Análise sobre a diferença de temperatura**

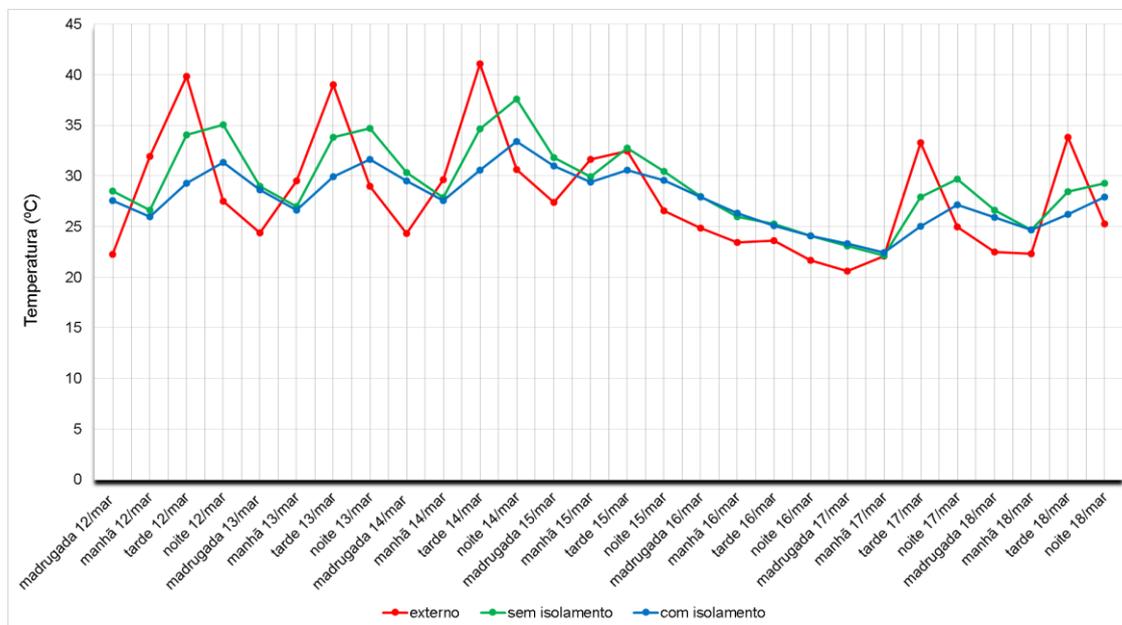
A coleta de dados foi iniciada no mês de março, nas últimas semanas do verão e, se estendeu até junho, nas primeiras semanas de inverno. A primeira análise dos dados coletados consistiu em avaliar mensalmente quais seriam as semanas cujas temperaturas médias registradas foram máximas e mínimas, naquele período. A partir

dessa identificação os dados obtidos para o ambiente externo e interno de ambos os protótipos foram comparados, com o intuito de investigar o comportamento dos modelos.

Visando facilitar a análise, os dados foram tratados em intervalos de 6 em 6 horas, fazendo a média a cada 6 horas, a saber: madrugada (de 00 às 6h), manhã (de 6 às 12h), tarde (de 12 às 18h) e noite (de 18 às 00h).

Iniciando as discussões, a semana de temperatura máxima no mês de março foi registrada entre os dias 12 e 18, sendo que está também foi a semana com as maiores temperaturas em todo o período de estudo, o que é consistente com a estação do verão, da qual a semana faz parte. Os dados obtidos estão apresentados no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Semana de temperatura máxima do mês de março.



A semana demonstrada no Gráfico 1 foi caracterizada por uma grande variação diária de temperatura, com destaque para o dia 14, no qual foi registrada uma amplitude térmica de aproximadamente 20 °C, de 22,7 °C na madrugada para 42,5 °C durante a tarde.

De modo geral, como era de se esperar, ambos os protótipos registraram temperaturas inferiores aos valores obtidos no ambiente externo. Além disso, o protótipo com isolamento apresentou temperaturas inferiores ao protótipo sem

isolamento. Por exemplo, ainda considerando o dia 14, o protótipo com a fachada ventilada indicou uma temperatura 10 °C abaixo da temperatura externa, e 5 °C menor do que a obtida no protótipo com tijolos aparentes.

Nesse sentido, esse resultado vai ao encontro do que afirma Verbeke e Audenaert (2018), que consideram que quando existir em uma edificação uma inércia térmica adicional, como ocorre com o protótipo com isolamento, a capacidade de promover um atraso térmico no fluxo de calor pela adição de densidade na parede é intensificada, o que contribui para o aumento do isolamento térmico, diminuindo a temperatura interna, além de trazer benefícios como a redução de consumo de energia.

As diferenças entre as temperaturas dos protótipos mais significativas foram observadas durante os períodos da tarde e da noite, enquanto nas madrugadas e manhãs, essa variação foi menos expressiva. Essa observação poderia estar relacionada ao fato de que nesses intervalos (madrugadas e manhãs) de tempo, ambos os modelos estariam cedendo calor ao ambiente externo, e nesse caso, o comportamento de ambos seria semelhante. Essa conclusão será melhor discutida ao longo do texto.

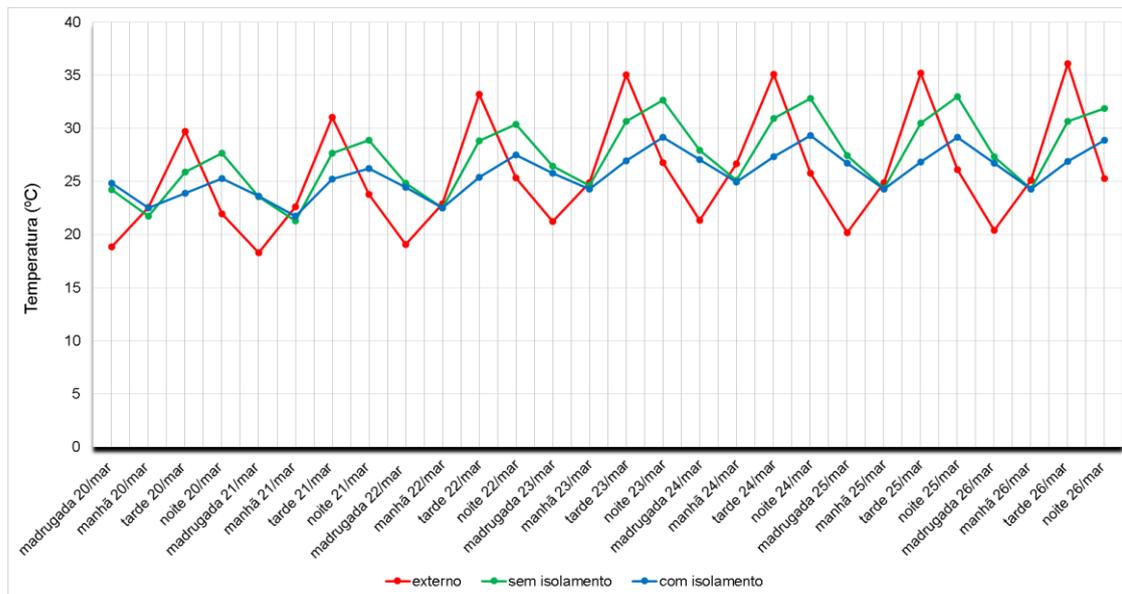
O dia 16 apresentou um comportamento diferente dos outros dias avaliados no período, uma vez que as medições em ambos os protótipos indicaram temperaturas aproximadamente equivalentes e superiores ao ambiente externo. O comportamento térmico do protótipo com isolamento parece se assemelhar ao do protótipo sem isolamento quando a temperatura externa é amena.

Quando se observam os picos de máximo de cada dia, é possível notar que enquanto no ambiente externo a maior intensidade nas temperaturas é registrada durante as tardes, em ambos os protótipos são verificadas no período noturno, o que demonstra que o atraso térmico que os elementos construtivos dos dois modelos oferecem seria similar. Contudo, a fachada ventilada parece contribuir com a redução do ganho térmico do ambiente interno.

Entre os dias 20 e 26 foram registradas as menores temperaturas para o mês de março, coincidindo com o início da estação do outono, sendo que a temperatura

mínima no período, 16,9 °C, ocorreu no dia 21. Os dados estão apresentados no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Semana de temperatura mínima do mês de março.

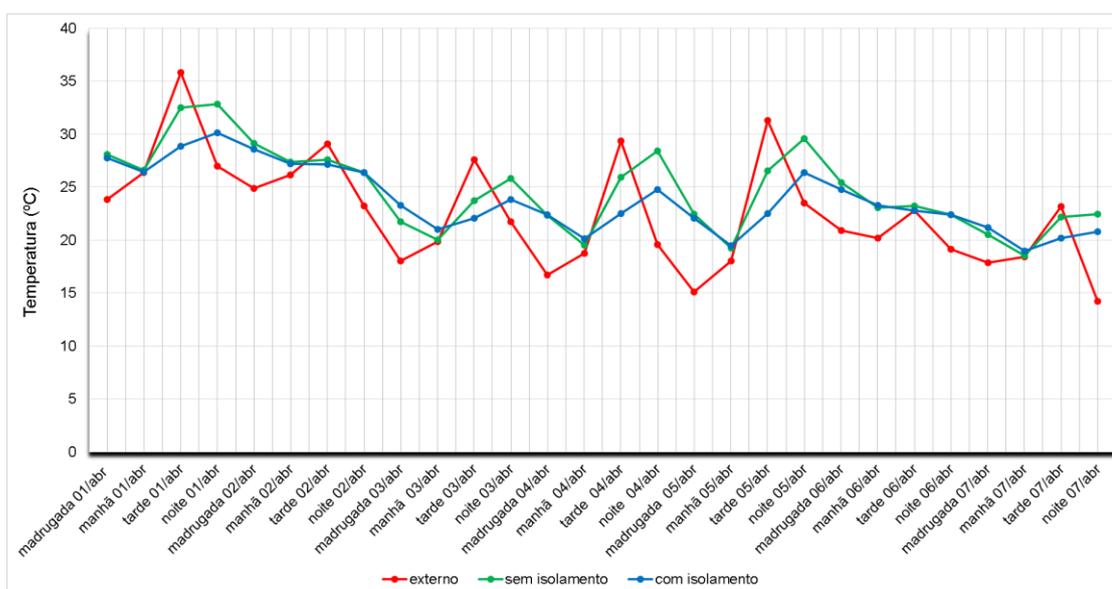


Tal como observado no Gráfico 1, o Gráfico 2 apresenta que as temperaturas máximas no interior dos protótipos são registradas no período noturno, enquanto no ambiente externo isso ocorre durante as tardes, além disso, a temperatura do protótipo com isolamento é inferior ao outro modelo sem isolamento, como observado anteriormente.

Outra observação que parece ser consistente diz respeito ao fato de que quando a temperatura externa é mais baixa, ou seja, quando o sentido do fluxo de calor seria possivelmente invertido, de dentro para fora e não de fora para dentro, ambos os protótipos parecem apresentar comportamento similar, como observado para as manhãs e madrugadas.

O Gráfico 3 apresenta a semana de maior temperatura para o mês de abril, que foi do dia 1º ao dia 7, com a temperatura máxima no período, 37,6 °C, registrada no primeiro dia do mês.

Gráfico 3 – Semana de temperatura máxima do mês de abril.

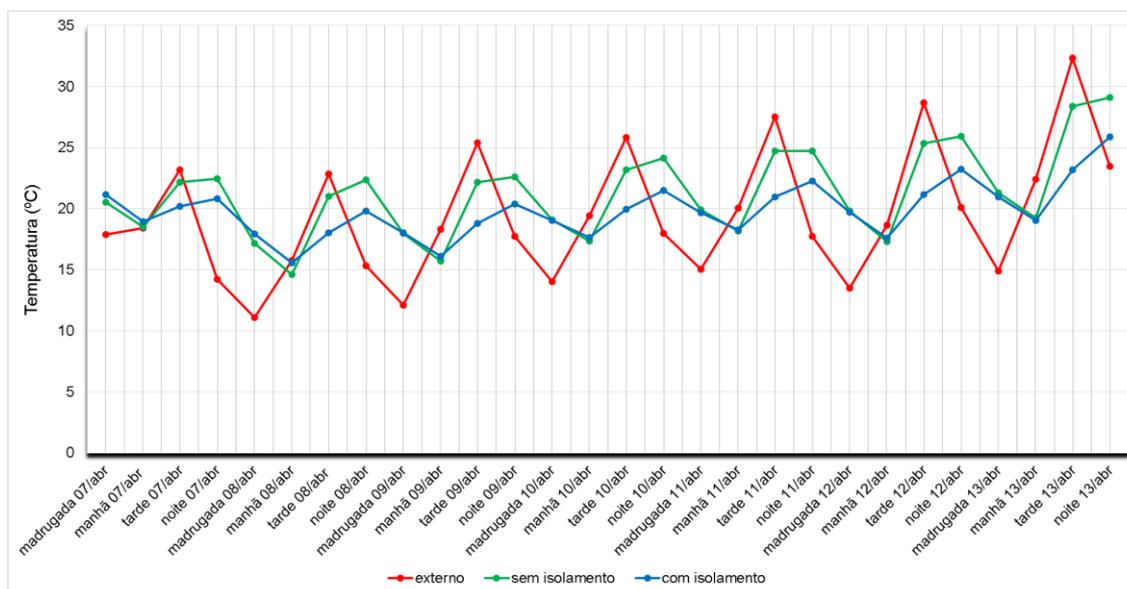


De modo geral, no Gráfico 3 com exceção do dia 1º, as temperaturas máximas dessa semana podem ser consideradas amenas, nesse sentido, observa-se, em mais de um período, a equivalência entre as temperaturas dos protótipos e sua superioridade em relação ao ambiente externo.

As amplitudes térmicas do protótipo com isolamento são menores do que as registradas para os demais casos, o que poderia indicar uma estabilidade térmica maior desse modelo em relação ao de tijolos aparentes.

A semana com as menores temperaturas no mês de abril foi do dia 7 ao 13, sendo que no dia 8 foi registrada a menor temperatura do período, 9,9 °C. O período de menor temperatura surge na semana seguinte ao de maior temperatura, sendo que este comportamento de variações climáticas rápidas pode ser entendido como uma característica da estação do outono (INPE, 2019). O Gráfico 4 apresenta os dados referentes a esse período.

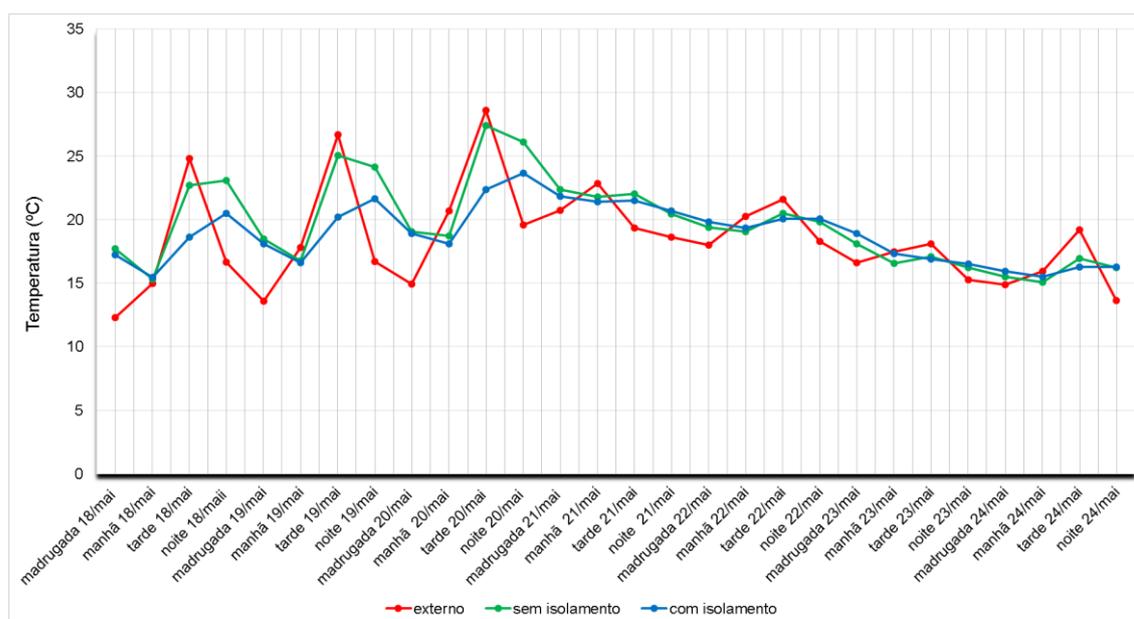
Gráfico 4 – Semana de temperatura mínima do mês de abril.



O período evidenciado no Gráfico 4 demonstra similaridade com as observações anteriores, além de apresentar os mesmos turnos, madrugada e manhã, com as temperaturas internas de ambos os protótipos se encontrando e em alguns dias até chegam a se igualar. Porém á tarde e noite, a temperatura do protótipo com isolamento é menor que o protótipo sem isolamento, sendo que no dia 13 durante a tarde foi registrada a maior diferença entre a temperatura externa e a interna no protótipo com fachada ventilada, 9 °C, enquanto no protótipo sem isolamento a diferença foi de 4 °C.

O Gráfico 5 apresenta a semana com temperaturas máximas no mês de maio, que foi do dia 18 a 24.

Gráfico 5 – Semana de temperatura máxima do mês de maio.

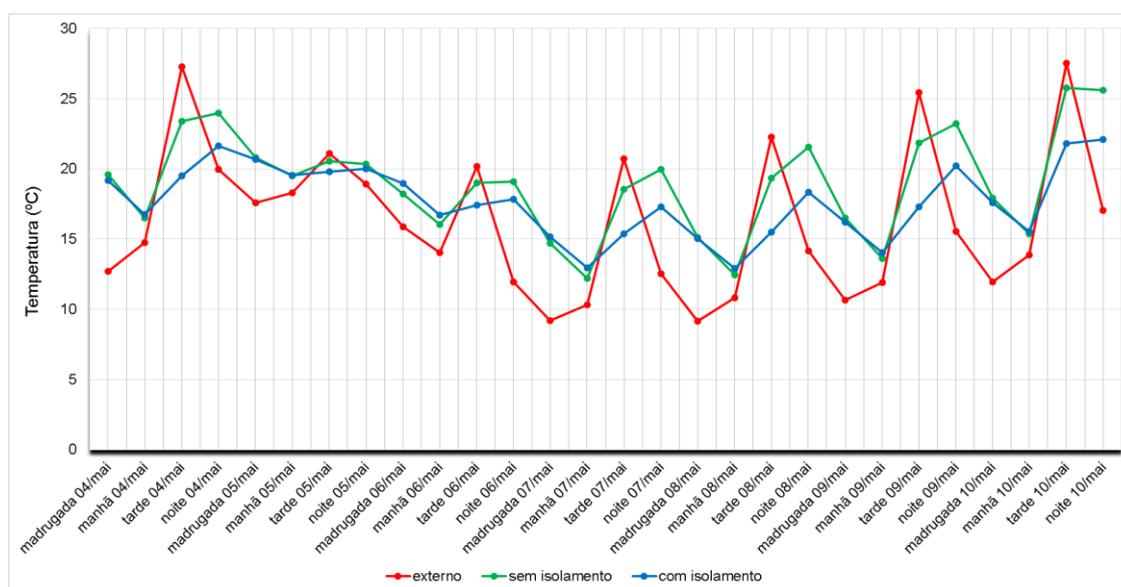


As temperaturas, demonstradas no período do Gráfico 5, são relativamente inferiores aos valores registrados como máximos nos meses anteriores. Observa-se que nos primeiros três dias, o protótipo com fachadas ventiladas apresenta uma temperatura inferior ao protótipo com tijolos aparentes. Além disso, nestes mesmos dias, o protótipo sem isolamento apresenta uma diferença de temperatura mais sutil em relação à temperatura externa do que as observadas anteriormente.

No dia 20, a temperatura externa cai consideravelmente, por volta de 9 °C. E após a temperatura externa atingir seu pico, próximo aos 30°C, a mesma começa a diminuir, sendo assim, as temperaturas do protótipo com isolamento em relação ao protótipo sem isolamento passam a ficar semelhantes, além de haver pouca diferença em relação à temperatura externa.

O Gráfico 6 apresenta a semana de menor temperatura para o mês de maio, do dia 4 ao dia 10, sendo que neste período ocorreu uma intensa variação de temperatura ao longo do dia, típico da estação do ano de outono, caracterizada pela amplitude térmica do dia 10, que atingiu 16 °C.

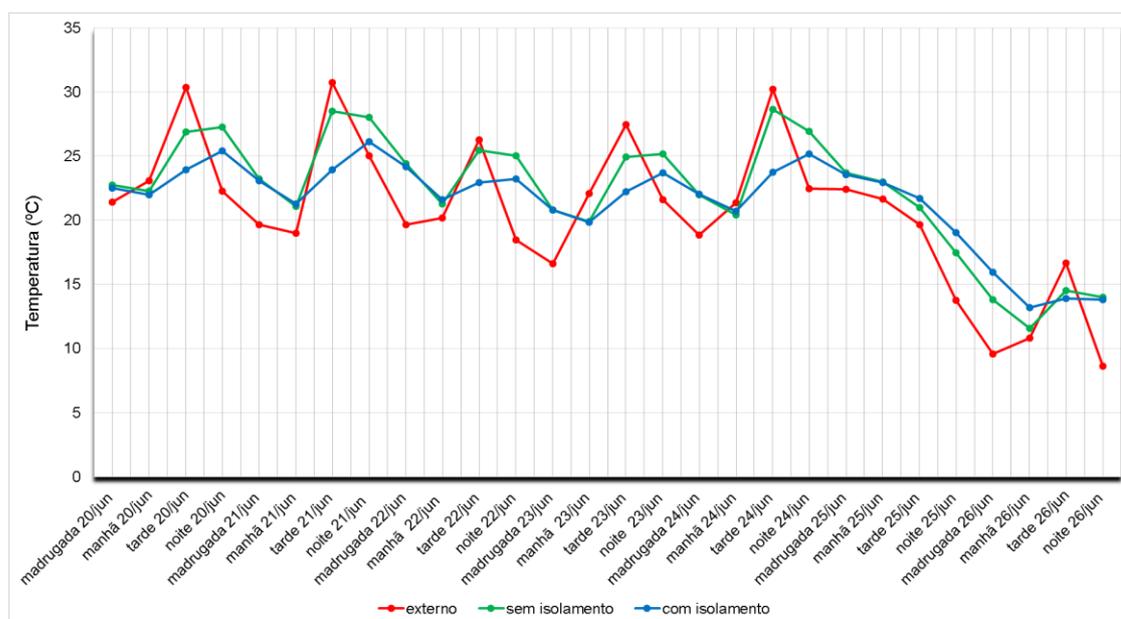
Gráfico 6 – Semana de temperatura mínima do mês de maio.



O Gráfico 6 demonstra que as temperaturas dos protótipos foram menores do que a do ambiente externo somente nos períodos da tarde. Nos demais intervalos considerados ambos os protótipos apresentaram temperaturas superiores, tendo diferenças mais expressivas para o protótipo com tijolos aparentes. Contudo, para as manhãs e madrugadas, com temperaturas externas baixas, os desempenhos térmicos de ambos os protótipos são semelhantes.

O Gráfico 7 apresenta a semana com temperaturas máximas para o mês de junho, do dia 20 a 26, sendo que a maior temperatura registrada no período, 30,75 °C, ocorreu no dia 21, sendo esta semana o início do inverno.

Gráfico 7 – Semana de temperatura máxima do mês de junho.



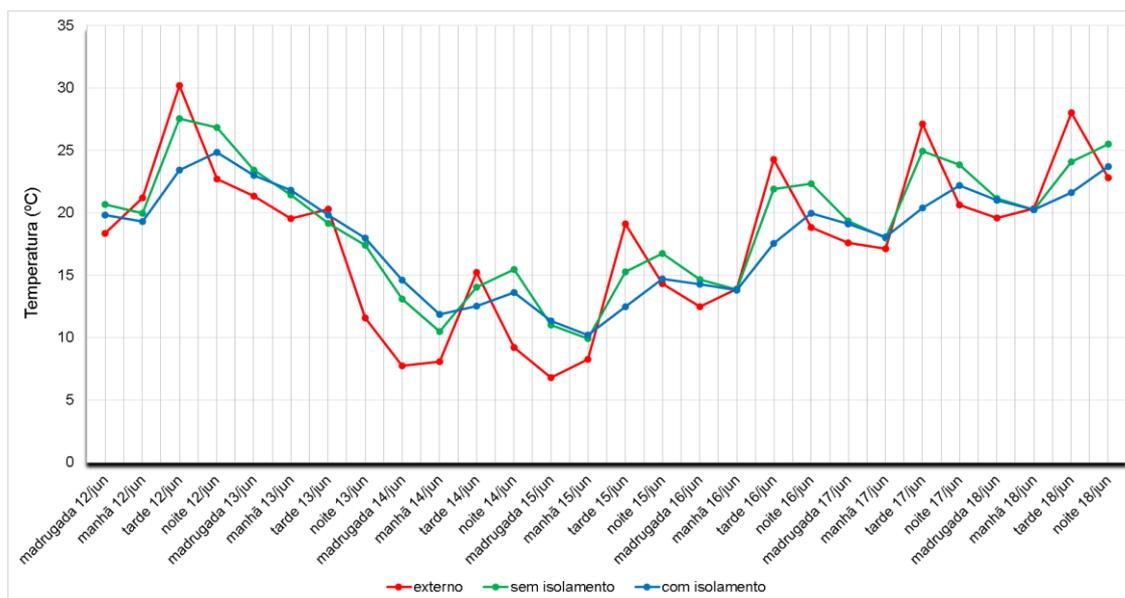
A semana máxima do mês de junho (Gráfico 7) foi caracterizada por extremos, enquanto a medição do dia 21 indicou uma temperatura de 30,75 °C, no dia 26, o valor registrado foi de 8,6 °C.

O comportamento observado se assemelha as discussões realizadas para os meses anteriores, entretanto destaca-se aqui o desempenho do protótipo com isolamento entre os dias 25 e 26. O aumento da densidade provocado pela fachada parece contribuir para a manutenção do calor no ambiente interno, quando, externamente, a temperatura é baixa.

Tendo em vista a característica climática da região de estudo, esse comportamento seria interessante para as situações extremas de inverno, principalmente aliado a uma fonte interna geradora de calor.

Esse comportamento é observado novamente no Gráfico 8, que apresenta os dados da semana de temperaturas mínimas para o mês de junho, entre os dias 12 e 18. Essa semana registrou a temperatura mais baixa de todo estudo, 6 °C, no dia 15.

Gráfico 8 – Semana de temperatura mínima do mês de junho.



O desempenho dos protótipos é consistente com as observações anteriores, para temperaturas relativamente elevadas o protótipo com tijolos aparentes absorve mais calor, enquanto para temperaturas mais amenas, o desempenho dos dois modelos é semelhante. Além disso, para temperaturas externas mais baixas, o protótipo com isolamento mantém mais calor do que o outro modelo.

Ainda levando em consideração o desempenho térmico dos protótipos, a Tabela 1 apresenta os dias e horários nos quais foram registradas as temperaturas máximas e mínimas no período do estudo.

Tabela 1 – Temperatura máxima e mínima do período de coleta de dados

	Temp. máxima	Data	Horário	Temp. mínima	Data	Horário
<b>Ambiente externo</b>	42,5 °C	14/mar	15h	6 °C	15/jun	02h
<b>Sem isolamento</b>	38,6 °C	14/mar	19h	9,6 °C	15/jun	10h
<b>Com isolamento</b>	33,6 °C	14/mar	19h	10 °C	15/jun	10h

Considerando o dia de temperatura máxima, 42,5 °C em 14 de março, nota-se que ambos os protótipos registraram seus máximos 4 horas depois, contudo foram temperaturas inferiores, sendo que a fachada ventilada com placas de isolamento

resultou em uma atenuação térmica de 8,9 °C, enquanto o protótipo com tijolos aparentes, indicou uma atenuação menor, de 3,9 °C. Nesse sentido, o protótipo com isolamento demonstra um comportamento positivo quando a temperatura externa é máxima, reduzindo a absorção de calor e mantendo a temperatura do ambiente interno expressivamente inferior.

Quando se avalia o comportamento para o dia de mínima temperatura registrada, 6 °C em 15 de junho, nota-se que ocorreu um atraso térmico de 8 horas para que ambos os protótipos atingissem suas temperaturas mínimas. Contudo, as temperaturas internas se mantiveram superiores, com uma pequena diferença entre os protótipos, sendo que o protótipo com isolamento manteve, relativamente, mais calor. Mesmo que a diferença tenha sido pequena, 0,4 °C, esse comportamento aliado a outras estratégias de condicionamento térmico, tal como o aquecimento solar passivo ou ainda uma lareira ligada, poderia ser positivo considerando situações extremas de inverno.

#### **4.2.2. Determinação das propriedades térmicas dos protótipos**

As propriedades térmicas dos protótipos foram determinadas com base nos métodos de cálculo apresentados na ABNT (2005b). Como ambos os protótipos foram desenvolvidos com a mesma fundação, tipo de cobertura e fechamento, nos cálculos foi considerado apenas o impacto da vedação vertical (parede).

##### **4.2.2.1. Protótipo com tijolos aparentes (sem isolamento)**

A Figura 30 mostra uma representação da parede de tijolos aparentes do protótipo sem isolamento, enquanto na Tabela 2 constam as propriedades térmicas dos elementos considerados no cálculo.

Figura 30 – Representação da parede do protótipo sem isolamento.

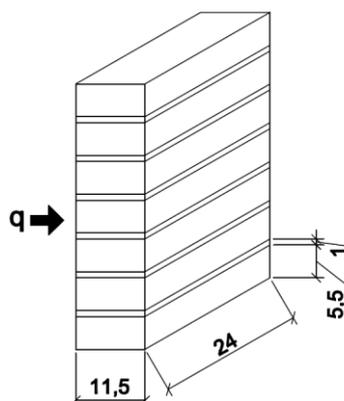


Tabela 2 – Propriedades térmicas dos elementos construtivos (protótipo sem isolamento)

	Dimensões	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	$c$ (kJ/kg.K)
<b>Tijolo cerâmico</b>	5,5 x 11,5 x 24 cm	1600	0,90	0,92
<b>Argamassa (assentamento)</b>	1 cm	2000	1,15	1,00

Fonte: ABNT (2005b).

Com base nas informações apresentadas e na ABNT (2005b), os dados obtidos para as propriedades térmicas do protótipo estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades térmicas do protótipo sem isolamento.

Resistência Térmica	Transmitância Térmica	Capacidade Térmica	Atraso Térmico
0,29 (m <sup>2</sup> .K)/W	3,43 W/(m <sup>2</sup> .K)	178,1 kJ/(m <sup>2</sup> .K)	3,38 horas

Os valores obtidos para as propriedades térmicas desse protótipo são os mesmos considerando ambos os sentidos de fluxo de calor, ou seja, tanto de “fora para dentro”, quanto de “dentro para fora” do ambiente.

Lajeado/RS encontra-se localizada na zona bioclimática 2, sendo recomendada a aplicação de estratégias de isolamento térmico da edificação, o que significa dizer que a transmitância térmica (U) das edificações deve ser menor ou igual a 3 W/(m<sup>2</sup>.K) e o atraso térmico igual ou inferior a 4,3 horas, sendo assim, a transmitância térmica da configuração utilizada no protótipo estaria em desacordo com os valores recomendados (ABNT, 2005c; SPINELLI et al., 2017).

A ABNT (2005c) apresenta uma série de combinações para paredes e coberturas com as propriedades térmicas definidas, sendo assim, foi possível estabelecer uma comparação entre o modelo com tijolos maciços aparentes apresentado na norma e o protótipo utilizado nesse estudo, como é possível observar no Quadro 5.

Quadro 5 – Comparativo entre paredes de tijolos cerâmicos maciços.

		U [W/(m <sup>2</sup> .K)]	C <sub>T</sub> [kJ/(m <sup>2</sup> .K)]	φ [horas]
ABNT (2005c)	Paredes de tijolos maciços aparentes Dimensão do tijolo: 10 x 6 x 22 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1 cm Espessura total da parede: 10 cm	3,7	149	2,4
Protótipo	Parede de tijolos maciços aparentes Dimensão do tijolo: 11,5 x 5,5 x 24 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1 cm Espessura total da parede: 11,5 cm	3,43	178,11	3,39

Fonte: Adaptação ABNT (2005c)

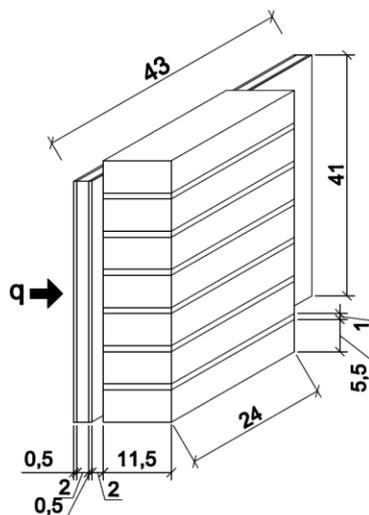
O tijolo utilizado no desenvolvimento do protótipo possui uma espessura maior do que a do modelo apresentado na norma (11,5 cm versus 10 cm), logo a transmitância do protótipo é menor, pois esta característica depende diretamente da espessura, sendo assim, quanto maior a espessura, maior será a “dificuldade” enfrentada pelo fluxo de calor para atravessá-la, resultando em uma transmitância térmica menor.

Além disso, a capacidade térmica, parâmetro que igualmente depende da espessura da parede é maior, assim, esses fatores acabam contribuindo para um atraso térmico maior, em aproximadamente, 59 minutos.

#### 4.2.2.2. Protótipo com a fachada ventilada (com isolamento)

A Figura 31 mostra uma representação da parede com fachada ventilada, sendo indicado o sentido de ganho de calor, que ocorre quando a temperatura externa é elevada.

Figura 31 – Representação da parede do protótipo com isolamento (ganho térmico).



Na Tabela 4 constam as propriedades térmicas dos elementos considerados no cálculo.

Tabela 4 – Propriedades térmicas dos elementos construtivos (protótipo com isolamento).

	Dimensões	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	$c$ (kJ/kg.K)
<b>Argamassa (externa)</b>	0,5 cm	2000	1,15	1,00
<b>Placa (bambu + resina)</b>	0,02 x 0,39 x 0,41 cm	225,33	0,80	-
<b>Argamassa (interna)</b>	0,5 cm	2000	1,15	1,00
<b>Camada de ar (ventilada)</b>	2 cm	-	-	-
<b>Tijolo cerâmico</b>	5,5 x 11,5 x 24 cm	1600	0,90	0,92
<b>Argamassa (assentamento)</b>	1 cm	2000	1,15	1,00

Neste estudo, não foi possível determinar o calor específico da placa de bambu + resina, por isso, alguns dos cálculos para obtenção das propriedades térmicas não puderam ser realizados.

Em relação a câmara de ar, a resistência térmica da câmara de ar ventilada deve ser igual à da câmara de ar não ventilada quando a situação considerada é a de ganho de calor, nesse caso,  $R_{ar} = 0,16 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ .

Com base nas informações apresentadas e na ABNT (2005b), os dados obtidos para as propriedades térmicas do protótipo com isolamento, considerando as situações de absorção de calor, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades térmicas do protótipo com isolamento (ganho de calor).

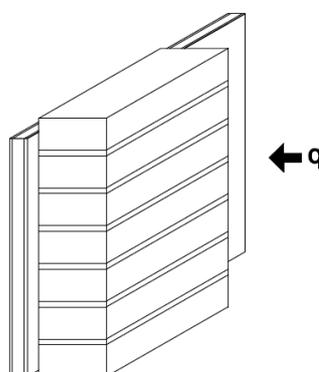
Resistência Térmica	Transmitância Térmica
0,49 (m <sup>2</sup> . K)/W	2,06 W (m <sup>2</sup> .K)

Os valores obtidos representam a situação em que a temperatura externa é superior a temperatura interna, sendo assim, o fluxo horizontal de calor ocorre de “fora” para dentro, ou seja, do ambiente externo para o interior do protótipo.

Nessa condição, diferente do que acontece com o protótipo sem isolamento, a transmitância térmica atenderia a recomendação para a zona bioclimática 2, se mantendo inferior a 3 W/(m<sup>2</sup>.K), o que é um resultado positivo do ponto de vista de desempenho e conforto térmico.

A Figura 33 mostra uma representação da parede com fachada ventilada, sendo indicado o sentido do fluxo de perda de calor, que ocorre quando a temperatura externa é menor que a interna.

Figura 32 – Representação da parede do protótipo com isolamento (liberação de calor).



De acordo com as informações expostas no Quadro 1, a câmara de ar do protótipo pôde ser considerada como pouco ventilada, uma vez que a relação S/L obtida, considerando a área total de abertura de ventilação (S) de 942 cm<sup>2</sup> e o comprimento da parede (L) de 4,3 m, foi de 219,07 cm<sup>2</sup>/m.

Nesta situação, a norma estabelece que a camada de ar possuirá resistência térmica igual à da câmara não ventilada, sendo assim,  $R_{ar} = 0,16 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ . Sendo assim, os valores de resistência térmica e transmitância térmica para o sentido de perda de calor, temperatura externa menor que a temperatura interna, estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades térmicas do protótipo com isolamento (perda de calor).

Resistência Térmica	Transmitância Térmica
0,32 ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ )	3,17 W ( $\text{m}^2\cdot\text{K}$ )

Nessa condição, assim como o protótipo sem isolamento, a transmitância térmica não atenderia a recomendação para a zona bioclimática 2, se mantendo superior a  $3 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Desta maneira, apesar de não ser considerado material com desempenho térmico, a transmitância térmica apresentou-se 8% menor que apresentada pelo protótipo sem isolamento.

A transmitância térmica do protótipo com isolamento é menor quando se considera o ganho de calor e igual ao protótipo sem isolamento quando se admite a situação de dissipação de calor. Os resultados teóricos reforçam as observações obtidas experimentalmente, uma vez que para as situações em que a temperatura externa era elevada, o protótipo com isolamento demonstrou uma atenuação térmica superior ao protótipo de tijolos aparentes, e quando a temperatura no interior dos protótipos era superior ao ambiente externo, ambos demonstraram comportamento similar em determinados períodos ou ligeiramente mais vantajosos no protótipo com isolamento.

#### **4.2.3. Análise comparativa das características térmicas dos protótipos com e sem isolamento**

Em resumo, quando se considera o ganho de calor, ou seja, o fluxo de calor do ambiente externo para o interno, tanto os cálculos quanto as medidas experimentais indicam que o protótipo com isolamento apresenta um desempenho térmico superior ao protótipo com tijolos aparentes.

Quando a situação considerada é a de dissipação de calor, ou seja, o fluxo é oposto, do interior dos protótipos para o ambiente externo, o impacto da camada de isolamento não é tão significativo, demonstrando experimentalmente, ser equivalente ao modelo sem isolamento.

Dentro de um contexto mais amplo, pode-se considerar que o revestimento com as placas poderia contribuir com o condicionamento do ambiente interno, em situações de baixas temperaturas, associado à outra estratégia bioclimática, tal como o aquecimento solar passivo. Isso porque o calor gerado por uma fonte secundária poderia sofrer relativamente menos perdas para o ambiente externo do que no modelo com alvenaria convencional.

#### **4.2.4. Análise referente a diferença de umidade**

Além das temperaturas, foram coletados também os dados relativos à umidade relativa do ar do ambiente externo e interno aos protótipos. Para objetivar as análises foram consideradas as semanas que apresentaram temperaturas máximas e mínimas mensais, ou seja, a análise da umidade aconteceu nas mesmas semanas em que o comportamento térmico foi avaliado. Os gráficos gerados encontram-se no Apêndice A.

O comportamento da umidade nos protótipos foi semelhante em todos os períodos analisados. A umidade relativa do ar no protótipo com isolamento foi maior do que no protótipo sem isolamento, sendo que essa observação pode estar relacionada ao fato de que, de acordo com Bodig e Jayne, (1992) apud Miranda et al. (2017), o bambu por ser um material higroscópico, assim como a madeira, quando está seco absorve umidade da atmosfera, buscando atingir um equilíbrio com as condições de umidade do ar. Ou ainda, a placa pode ter servido de barreira para esta umidade se dissipar no meio, segurando-a internamente no protótipo.

Ambos os protótipos mantiveram a umidade relativa do ar no ambiente interno praticamente constante, com variações muito pequenas. Em relação à umidade externa, pode-se observar que a umidade relativa do ar aumenta com a redução da

temperatura, pois as temperaturas mais altas tendem a tornar o ar mais seco e com menos umidade (MASIERO; SOUZA, 2013).

## 5. CONCLUSÃO

A aplicação do bambu na construção civil vem crescendo e variando sua utilização conforme o passar dos anos. Apesar de ser um material que contribui ativamente para uma construção sustentável, na pesquisa teórica do trabalho sobre esta planta tão versátil, sentiu-se dificuldade de encontrar materiais onde realizou-se uma pesquisa exploratória referente ao desempenho térmico do bambu, demonstrando a falta de aprofundamento na temática do estudo.

Nas imagens microscópicas do bambu, foram visualizados poros de ar, o que contribui para o baixo transporte de calor, porém ao ser introduzido a resina a base de água no bambu para formação da placa, ocorreu um fechamento destes poros que pode ter contribuído para a transmitância térmica apresentada pela placa de bambu + resina.

A transmitância térmica apresentada pela placa de bambu + resina se demonstrou acima do esperado, comparando com o desempenho térmico dos protótipos. Além de possuir uma densidade similar a da lã de rocha, esperava-se que sua transmitância fosse significativamente inferior ao valor resultante do fluxiométrico, ficando como sugestão para trabalhos futuros uma investigação aprofundada abordando este tema como principal.

A avaliação térmica dos protótipos com e sem isolamento demonstraram que a placa possui um bom desempenho térmico. O protótipo com isolamento apresentou melhores resultados, ou seja, apresentou uma diferença térmica significativa para o fluxo de calor no sentido de ganho térmico, de fora para dentro, sendo esta situação ocorrida em dias de temperaturas externas mais elevadas.

Em dias de temperatura mais baixas, pode-se considerar que o revestimento com as placas poderia contribuir com o condicionamento do ambiente interno, em situações de baixas temperaturas, associado à outra estratégia bioclimática, tal como o aquecimento solar passivo.

Os cálculos do desempenho térmico seguindo a ABNT (2005b) corroboram com os resultados apresentados pela avaliação *in loco* dos protótipos, demonstrando que o protótipo com isolamento apresenta desempenho térmico superior em comparação ao protótipo sem isolamento.

Para a análise de umidade relativa do ar, os comportamentos em ambas as diferenças de temperatura dos ambientes analisados foram similares, porém o protótipo com isolamento apresentou maior umidade que o protótipo sem isolamento, demonstrando dificuldade para a umidade sair do protótipo.

Por fim, o presente trabalho contribuiu em relação às edificações sustentáveis, demonstrando que, com alguns aprimoramentos de materiais, a placa de bambu funciona para isolamento térmico, principalmente em dias de maiores temperaturas externas. Além do bambu ser um material natural que contribui positivamente para o meio ambiente.

Em relação à trabalhos futuros sugere-se:

- a) Avaliar protótipos com as placas encostadas na alvenaria, sem deixar a camada de ar na fachada;
- b) Avaliar a transmitância térmica da placa utilizando outra metodologia;
- c) Estudar outro tipo de material para ser utilizado na placa de bambu no lugar da resina a base de água.

## REFERÊNCIAS

ABRAPEX, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO. **Manual de utilização EPS na construção civil**. São Paulo, 2006. Disponível em <<https://www.passeidireto.com/arquivo/65585187/pini-manual-de-utilizacao-eps-na-construcao-civil>> Acesso em: 10 de janeiro de 2020.

AGOPYAN, Vahan; JOHN, Vanderley M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. São Paulo: Blucher, 2011.

A.P.H. Association, A.D. Eaton, A.W.W. Association, W.E. **Federation Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WEF**, Washington, D.C. (2005)

ARCHDAILY. **Casas Pedro Carbo, Equador**. Ensusitio Arquitectura 2019. Disponível em < [https://www.archdaily.com.br/br/921523/a-casa-de-meche-oficina-de-boas-praticas-construtivas-ensusitio-arquitectura?ad\\_medium=widget&ad\\_name=navigatio-n-prev](https://www.archdaily.com.br/br/921523/a-casa-de-meche-oficina-de-boas-praticas-construtivas-ensusitio-arquitectura?ad_medium=widget&ad_name=navigatio-n-prev)>. Acesso em 17 de novembro de 2019.

ASDRUBALI, Francesco; D’ALESSANDRO, Francesco; SCHIAVONI; Samuel. **A review of unconventional sustainable building insulation materials**. Sustainable Materials and Technologies. V.4, P. 1-17. 2015.

ASHRAE. **Thermal Environment Conditions for Human Occupancy**. Standard 55-2013, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho Térmico de Edificações. Rio de janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_ **NBR 15220-1**: Desempenho Térmico de Edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de janeiro, 2005a.

\_\_\_\_\_ **NBR 15220-2**: Desempenho Térmico de Edificações – Parte 2: Métodos de cálculos da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de janeiro, 2005b.

\_\_\_\_\_ **NBR 15220-3**: Desempenho Térmico de Edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de janeiro, 2005c.

\_\_\_\_\_ **NBR 15220-3**: Desempenho Térmico de Edificações – Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de janeiro, 2005d.

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

\_\_\_\_\_**NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013a.

\_\_\_\_\_**NBR 15575-4**: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2013b.

ATANDA, J. **Environmental impacts of bamboo as a substitute constructional material in Nigeria**. Case Studies in Construction Materials. V. 3, P. 33-39, 2015.

CAMBEIRO, Faustino Patiño. ARMESTO, Julia. BARBEITO, Faustino Patiño. BASTOS, Guillermo. **Perspectives on Near ZEB Renovation Projects for Residential Buildings: The Spanish Case**. Energies, V. 9, P. 2-16, 2016.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em Busca de uma Arquitetura Sustentável para os Trópicos: conforto ambiental**. Rio de Janeiro: Revan, 2003.

CORREA, Lásaro Roberto. **Sustentabilidade na construção civil**. Monografia do curso de especialização em construção civil da Escola de Engenharia UFMG. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2009.

CORREA, Marcio A.P. **Utilização de Bambu na Construção**. 2014. 107f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2014.

CRUZ, Carlos Oliveira. GASPAR, Patrícia. BRITO, Jorde de. **On the concept of sustainable sustainability: An application to the Portuguese construction sector**. Journal of Building Engineering 25, 2019.

CRUZ, Martha Lissete Sánchez. **Caracterização física e mecânica de colmos inteiros do bambu da espécie Phyllostachys aurea: comportamento à flambagem**. Dissertação de mestrado apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2002.

DELGADO, Patrícia Santos. **O bambu como material eco eficiente: caracterização e estudos exploratórios de aplicações**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – Minas Gerais, 2011.

DHAKOUANI, Asma. ZNOUDA, Essia. BOUDEN, Chihed. **Impacts of energy efficiency policies on the integration of renewable energy**. Energy Policy. V. 133, 2019.

DUBBEL, H. **Manual da construção de máquinas**. São Paulo: Hemus, 1974. 1043p.

ESCAMILLA, Edwin Zea; HABERT, G. **Environmental impacts of bamboo-based construction materials representing global production diversity**. Institute of Construction and Infrastructure Management, Chair of Sustainable Construction, Federal Institute of Technology (ETHZ), Zurique, Suíça. Janeiro, 2014.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia**. Ministério de Minas e Energia. 2016.

FILGUEIRAS, Tarciso S. VIANA, Pedro Lage. **Bambus brasileiros: morfologia, taxonomia, distribuição e conservação**. Bambus no Brasil da Biologia à tecnologia. Ministério da Ciência, Tecnologia, inovação e comunicações, 2017.

FLANDER, Katleen De.; ROVERS, Ronald. **One laminated bamboo-frame house per hectare per year**. Construction and Building Material, V. 23, P. 210-218. Inglaterra, 2009.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. **Manual de conforto térmico**. 5<sup>o</sup> edição. São Paulo 2001.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. Ed. São Paulo: Atlas, 2019.

HUANG, Zujian; SUN, Yimin; MUSSO, Florian. **Assessment on bamboo scrimber as a substitute for timber in building envelope in tropical and humid subtropical climate zones - part 2 performance in building envelope**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 264, Conference 1. 2017.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro de previsão de tempo e estudos climáticos. 2019. Disponível em: <<http://clima1.cptec.inpe.br/estacoes/pt#>> Acesso em 01 de outubro de 2020.

JELLE, Bjorn Petter. **Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials solutions – Properties, requirements and possibilities**. Energy and Buildings. V. 43, P. 2549-2563, 2011.

KAHN, Suzana. **Reflexões sobre sustentabilidade urbana**. Cienc. Cult. V. 67. N.1 São Paulo. 2015

KAMINSKI, Sebastian. **Engineered bamboo for low-income communities in Latin America**. The Structural Engineer, V. 91, ed. 10, 2013.

KAMINSKI, Sebastian; LAWRENCE, Andrew; TRUJILLO, David J A. **Structural use of bamboo: Part 1: Introduction to bamboo**. Structural Engineer. V.94(8), P. 40-43. Agosto, 2016.

LAMBERTS, Roberto. DUARTE, Vanessa C. P. **Desempenho térmico de Edificações**. Laboratório de Eficiência energética em edificações da Universidade Federal de Santa Catarina – CTC – Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis, 2016.

LAMBERTS, Roberto. DUTRA, Luciano. PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. Editora: ELETROBRAS/PROCEL, 2014.

LIU, Weiyi; HUI, Chaomao; WANG, Fang; WANG, Meng; LIU, Guanglu. **Review of the Resources and Utilization of Bamboo in China**. Cap. 8, Bamboo – Current and Future Prospects, P. 133–142, 2018.

LUKSCOLOR, **Resina Acrílica Premium Plus – Base água**. 2016. Disponível em: <<https://www.lukscolor.com.br/produto/158>>. Acesso em 30 de setembro de 2020.

MANHÃES, Gabriela Siqueira. ARAÚJO, Ronaldo de Sousa. **Sustentabilidade nas construções**. Ciências humanas e sociais aplicadas, Campos do Goytacazes, V. 11 (4), P. 15-24, 2014.

MARCOS, Juliana Sofia Lopes. **Materiais Naturais Alternativos de Isolamento térmico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2015.

MASIERO, Erico. SOUZA, Léa Cristina Lucas. **Variação de umidade absoluta e temperatura do ar intraurbano nos arredores de um corpo d'água**. Ambiente Construído, Vol. 13, N. 4, Porto Alegre, 2013.

MELO, Rafael Rodolfo de. STANGERLIN, Diego Martins. SOUSA, Adilson Pacheco de. CADERMARTORI, Pedro Henrique Gonzalez de. SCHNEID, Eduardo. **Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados madeira-bambu**. Ciências Rural, V. 45, N. 1, P. 35-42. Santa Maria, RS, Brasil. Janeiro de 2015.

MENDES, Pedro Filipe Sousa. **Isolamentos térmicos em edifícios e seu contributo para a eficiência energética**. Dissertação de mestrado em engenharia civil da Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2012.

MIRANDA, Elias Melo. AFONSO, Dixon Gomes. PONTES, Suelem Marian de Araújo. SOUZA, João Carlos Neves. LIMA, Daniel do Nascimento. FREITAS, João Lima junior. **Estrutura populacional e o potencial de Guadua cf. superba na região do Alto Acre**. Bambus no Brasil da Biologia à tecnologia. Ministério da Ciência, Tecnologia, inovação e comunicações, 2017.

MOURA, Luís Mauro. **Desenvolvimento de um protótipo de equipamento de placa quente protegida**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil, 1993.

MULLER, A. ALARCON, O.E. **Desenvolvimento de um sistema de fachada ventilada com placas cerâmicas de grês porcelanato voltado para a construção civil do Brasil**. Cerâmica 51. P. 354-360. 2005.

MULLER, Jéssica Hartge. TRINDADE, Juliana Flores. PIOVESAN, Tenile Rieger. **A sustentabilidade como parte integrante da construção civil**. XXV Seminário de Iniciação Científica. UNIJUÍ, 2017.

NADEL, Steven. **Focusing and improving traditional energy efficiency strategies.** The Electricity Journal. V. 32, Ed. 7. United States, 2019.

NOERWASITO, Vincentius Totok. **Composition of Bamboo Walls and Compressed Earth Block Walls in a Simple House that Produces Energy Efficient to Heat and Embodied Energy in Indonesia.** Engineering and Physical Sciences, Walailak Sci & Tech. V. 13(8), P. 631-640. 2015.

NUNES, Antônio Ricardo Sampaio. **Construindo com a natureza bambu: uma alternativa de ecodesenvolvimento.** Revista TOMO da Faculdade Federal do Sergipe, N. 9, 2006.

ONU – Organização das Nações Unidas. Plataforma Agenda 2030. 2015. Disponível em <<http://www.agenda2030.com.br/>>. Acesso em 04 de outubro de 2020.

PBE EDIFICA. **Edificações residenciais etiquetadas.** 2017. Disponível em: <<http://pbeedifica.com.br/edificacoes-etiquetadas/residencial>> Acesso em: 21 de outubro de 2019.

SALEM, Dina. BAKR, Ali. SAYAD, Zeyad. **Post-construction stages cost management: Sustainable design approach.** Alexandria Engineering journal. V. 57, Ed. 4, P. 3429-3435, dezembro de 2018.

SÁNCHEZ, Martha L.; MORALES, Luz Y.; CAICEDO, Juan D. **Physical and mechanical properties of agglomerated panels made from bamboo fiber and vegetable resin.** Construction and Building Materials, V. 156, P. 330-339, 2017.

SHAH, Darchil U.; BOCK, Maximilian C. D.; MULLIGAN, Helen; RAMAGE, Michael H. **Thermal conductivity of engineered bamboo composites.** Journal of Materials Science. V. 51, ed. 6, P. 2991-3002, março 2016.

SIMIONI, Wagner Isidoro. **Análise de erros na medição de condutividade térmica de materiais através do método fluximétrico.** 2005. 116 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SIEFFERT, Y. HUYGEN, J. M. DAUDON, D. **Sustainable construction with repurposed materials in the context of a civil engineering–architecture collaboration.** Journal of Cleaner Production. V. 67, P. 125-138. Março de 2014.

PROCELINFO, Centro Brasileiro de Informações de Eficiência Energética. **Selo Procel Edificações.** Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={8E03DCDE-FAE6-470C-90CB-922E4DD0542C}>>. Acesso em: 21 de outubro de 2019.

SPINELLI, Rodrigo. AHLERT, Edson Moacir. KONRAD, Odorico. BRAUN, Fabiana. **Bioclimatic strategies for the city of Lajeado/RS-Brasil, using data analysis of regional climate.** Revista Brasileira de Climatologia. Ano 13, V. 21, jul-dez, 2017.

SPINELLI, R.; CAMBEIO, F. P.; KONRAD, O.. **Estudo de materiais naturais para aplicação em isolamento térmico de edificações**. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, V.9, n.3, P.121-135, 2018.

SPINELLI, Rodrigo. PASQUALI, Pedro Henrique Dall Agnol. BERTOTTI, Angélica. LERIN, Dantara. PITOL, Alana F. CAMBEIRO, Faustino Patiño. KONRAD, Odorico. **Development of Methodology for Determining the Physical Properties of Natural and Innovative Materials**. Advanced Materials Research, 2019.

TAKAGI, Hitoshi; KAKO, Shuhei; KUSANO, Koji; OUSAKA, Akiharu. **Thermal conductivity of PLA-bamboo fiber composites**. Adv. Composite Mater, V. 16, N. 4, P. 377-384, Brill. 2007.

UNIVATES. **Programa de pós-graduação em ambiente e desenvolvimento**. Disponível em: <<https://www.univates.br/ppgad/conheca-o-ppgad>>. Acesso em: 10 outubro de 2019.

VERBEKE, Stijn. AUDENAERT, Amaryllis. **Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use**. Renewable and Sustainable energy reviews. Volume 82, Parte 3, P. 2300-2318. 2018.

YILMAZ, Mustafa; BAKIS, Adem. **Sustainability in Construction Sector**. Istanbul University - Turquia: Procedia – Social and Behavioral Sciences 195, 2015.

## APÊNDICE A – Umidade de março a junho

Gráficos comparativos da umidade relativa do ar interno no protótipo com e sem isolamento e umidade externa, referente a semana de maior e menor temperatura, durante o período de coleta de dados que durou de março a junho de 2020.

Gráfico A 1 – Umidade da semana de temperatura máxima de março.

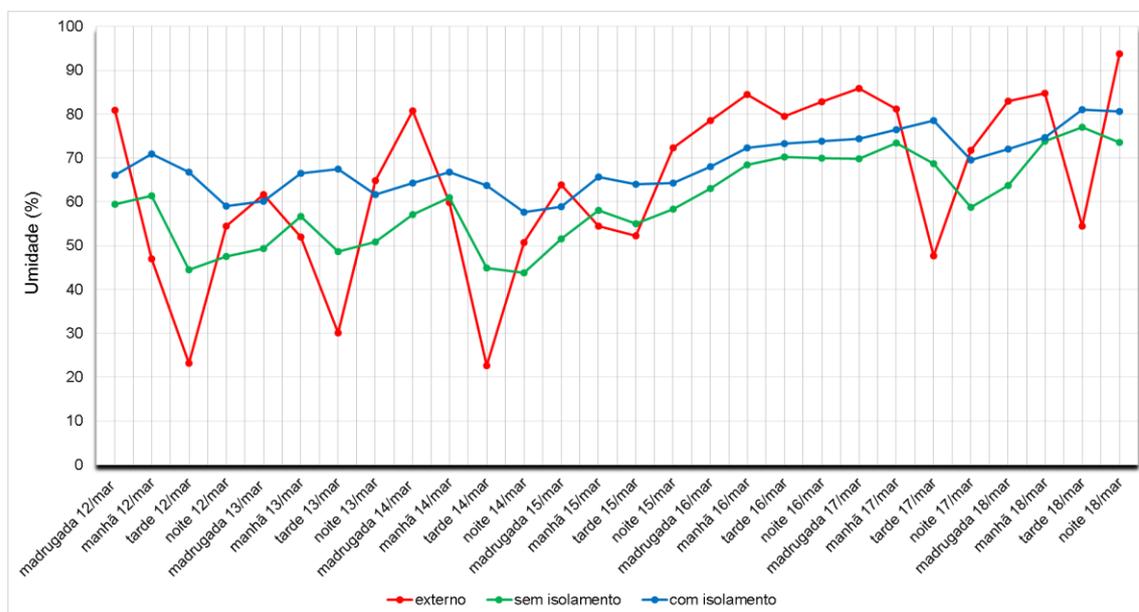


Gráfico A 2 – Umidade da semana de temperatura mínima de março.

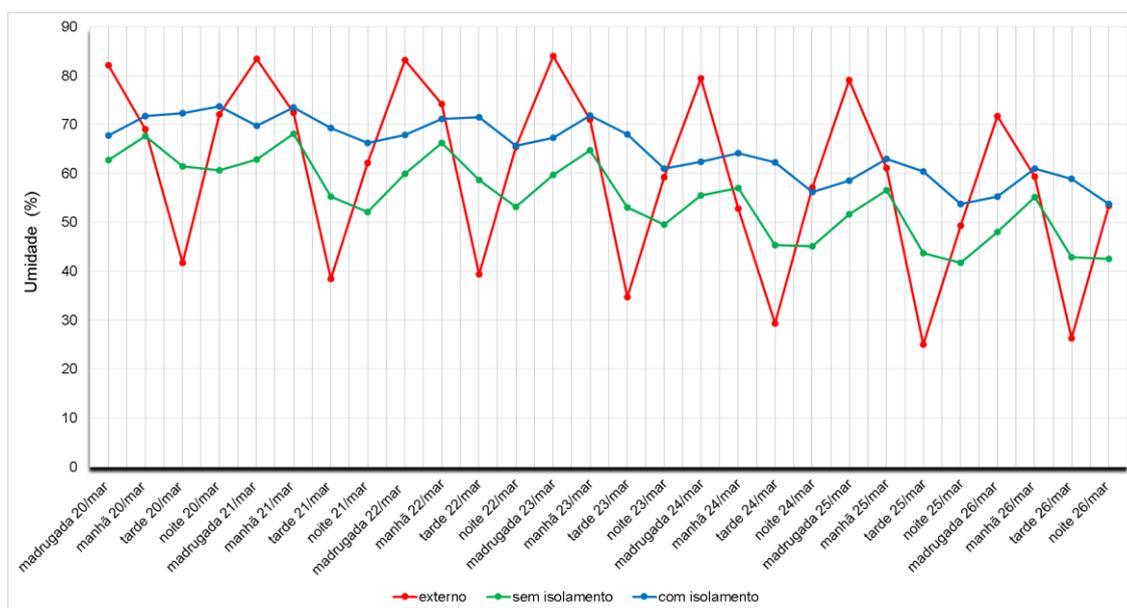


Gráfico A 3 – Umidade da semana de temperatura máxima de abril.

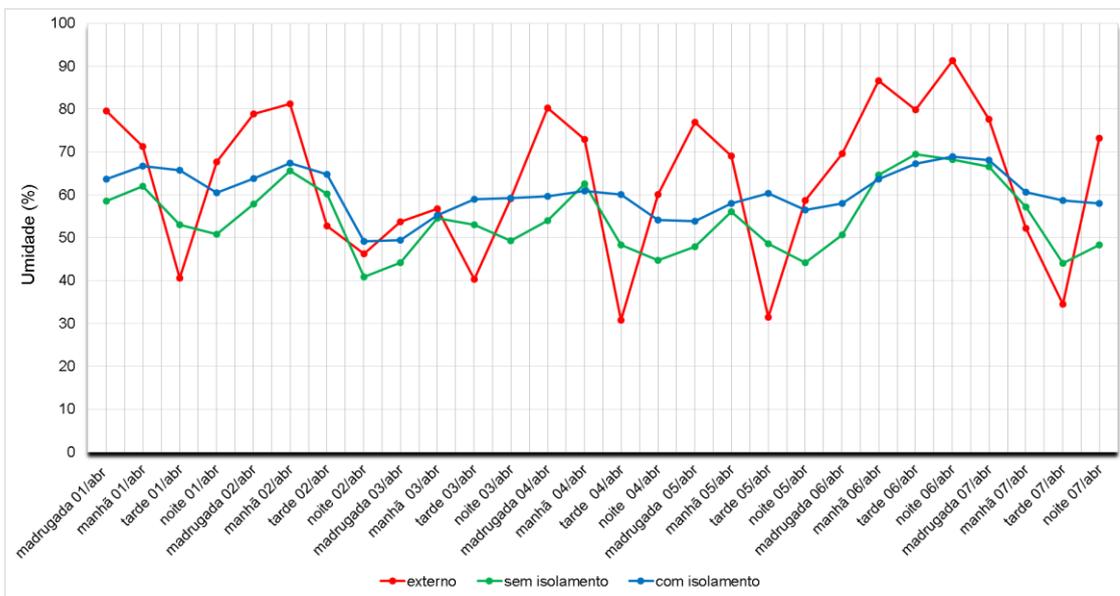


Gráfico A 4 – Umidade da semana de temperatura mínima de abril.

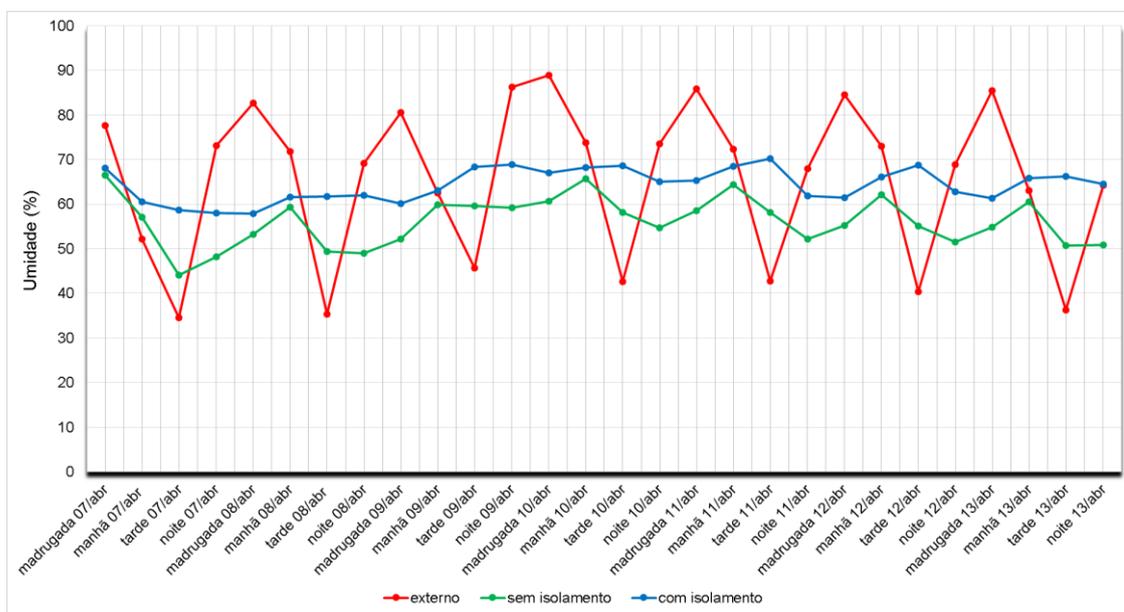


Gráfico A 5 – Umidade da semana de temperatura máxima de maio.

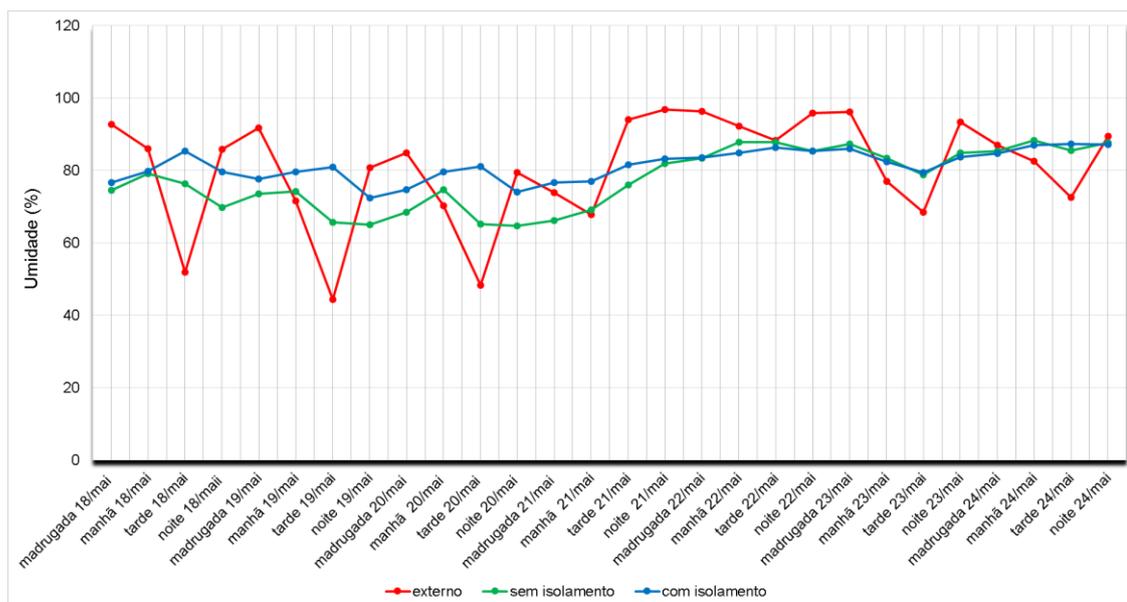


Gráfico A 6 – Umidade da semana de temperatura mínima de maio.

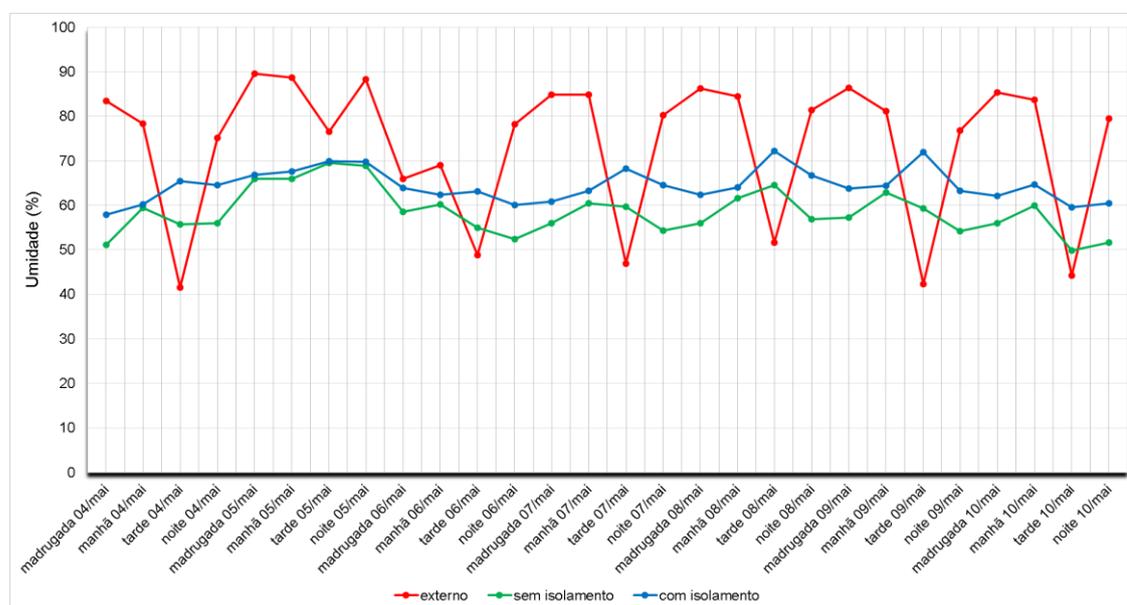


Gráfico A 7 – Umidade da semana de temperatura máxima de junho.

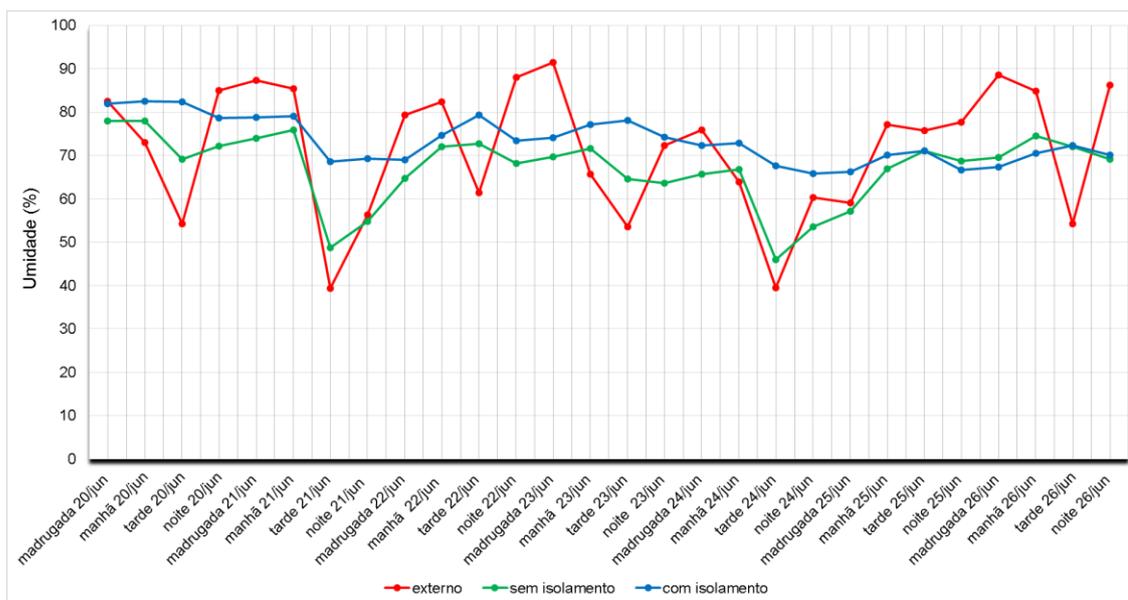
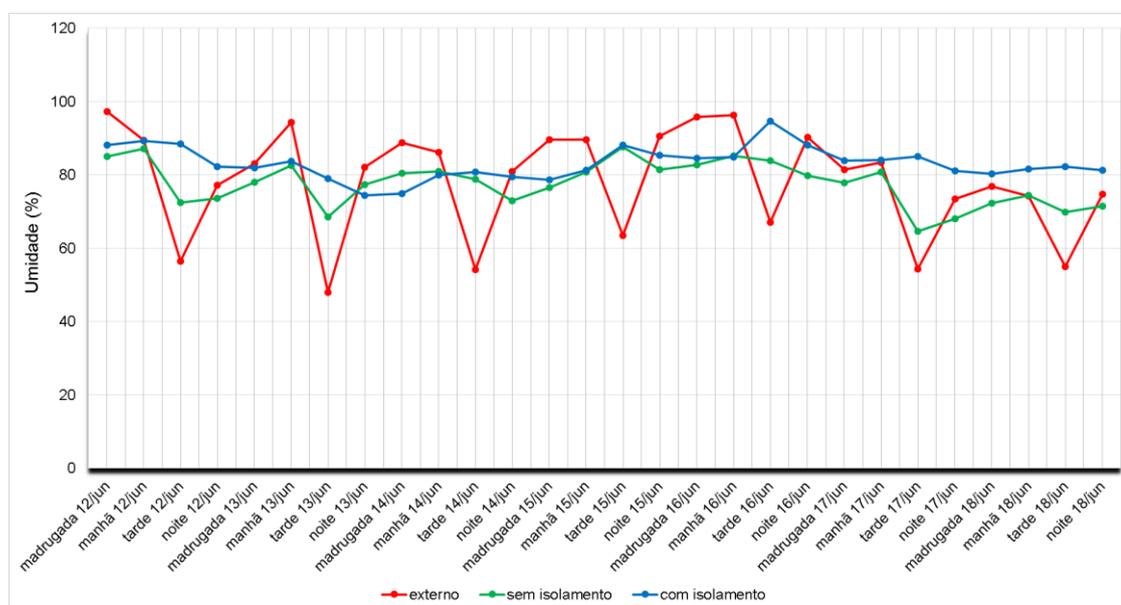


Gráfico A 8 – Umidade da semana de temperatura mínima de junho.



Rua Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil

CEP 95900-000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714-7000

[www.univates.br](http://www.univates.br) | 0800 7 07 08 09



**UNIVATES**