

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “Júlio de Mesquita Filho”

CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

JOSÉ AUGUSTO POLETE LEMOS DE ALMEIDA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO  
DE PAREDES DE MADEIRA**

Itapeva/SP

2013

**JOSÉ AUGUSTO POLETE LEMOS DE ALMEIDA**

**ANÁLISE DA DO COMPORAMENTO TÉRMICO  
DE PAREDES DE MADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Industrial Madeireira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

Itapeva/SP

2013

## FICHA CATALOGRÁFICA

A447a	Almeida, José Augusto Polete Lemos de Análise do Comportamento Térmico de Paredes de Madeira / José Augusto Polete Lemos de Almeida. -- Itapeva, SP, 2013 64 f. : il.
	Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Itapeva, 2013 Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves Banca examinadora: Prof <sup>a</sup> . Dr <sup>ª</sup> . Maria Angélica Martins Costa, Prof. Msc. Paulo Roberto Gomes Alves Bibliografia
	1. Madeira – Propriedades térmicas. 2. Conforto térmico. 3. Calor - Transmissão. I. Título. II. Itapeva - Curso de Engenharia Industrial Madeireira.
	CDD 620.12

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca - UNESP, Câmpus de Itapeva

*À meus pais, José Elias Lemos de Almeida e  
Lucimara Polete Lemos de Almeida*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a todas às pessoas que se envolveram neste trabalho e principalmente de minha graduação, o espaço porém não seria suficiente para relacionar todas as pessoas, porém dou meu agradecimento sincero a:

A minha família que me apoiou e fez tudo isto possível desde o primeiro momento, sem nunca questionar sobre as minhas escolhas, todo o apoio financeiro e sentimental que foram essenciais para minha vida durante estes longos anos na universidade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves por todo o conhecimento passado durante a minha graduação, foram especialmente suas aulas que me fizeram nunca esquecer o motivo de eu ter optado por ser um engenheiro

Aos técnicos Tiago Matos Andrés e David José Tenório de Aquino pelo auxílio e desenvolvimento prático deste projeto e de tantos outros durante estes anos.

Ao engenheiro Paulo Henrique Nunes Monis por toda a ajuda prática e teórica para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus amigos e colegas que fizeram parte da minha vida de forma construtiva ou não durante este período, em especial para o engenheiro Bruno Chiaramonti, que me acompanhou durante a jornada desde o colégio técnico em 2001 e Luiz Paulo Alves Bittencourt de Faria pela ajuda com softwares de edição de imagem.

A todos os professores que certamente me fizeram enxergar o mundo de forma diferente depois de todo o conhecimento fornecido.

## RESUMO

Este trabalho consiste na observação e avaliação do comportamento térmico de diferentes tipos de paredes constituídas em sua maior parte por madeira (MDF – Medium Density Fiberboard, HDF - High Density Fiberboard, OSB – Oriented Strand Board e EGP – Edge Glued Panel). Teve-se como objetivo apresentar o comportamento térmico experimental destas paredes e materiais e quais se adequam aos padrões de conforto térmico para o trabalho humano. Para a realização deste trabalho foi desenvolvido uma câmara térmica, onde um dos lados é intercambiável, para que os protótipos de paredes em estudos pudessem ser encaixados para os experimentos. Foram estudadas paredes constituídas de MDF, HDF, OSB e EGP, as quais tiveram comportamentos distintos devido as suas características construtivas. Utilizou-se ainda neste trabalho termopares e câmera termovisora para captação dos resultados. O EGP se mostrou como material de mais confiabilidade para conforto térmico nos testes ao ser submetido à alta temperatura. Com este trabalho ficou demonstrado a importância da escolha dos materiais e métodos para a construção de paredes em madeira, pois caso estas sejam dimensionadas de modo errado, o conforto das pessoas que estarão expostas ao ambiente proporcionado pela construção será ruim e o preço para adequação posterior ao térmico da construção será elevado.

**Palavras-Chave:** Madeira. Comportamento Térmico. Transferência de Calor.

## **ABSTRACT**

This study consists in the observation and evaluation of the thermal behavior and distribution of wood composite walls, MDF – Medium Density Fiberboard, HDF – High Density Fiberboard, OSB – Oriented Strand Board and EGP – Edge Glued Panel. This study had the objective to present the experimental thermal behavior and to verify which one fit the thermal comfort standards for human labor

For this work, was developed a thermal chamber, with one interchangeable side, so the wall prototypes would fit for each experiment. We studied walls made of MDF, HDF, OSB and EGP, which one had its own distinct behavior due to the panel construction.

The EGP wall had shown the most reliable material for this usage at high temperatures. With this work, it was demonstrated the importance of choice for the right material and construction method for wooden composite walls, because if they were scaled poorly, the people exposed to them would be uncomfortable by the proportionate environment, and the costs for a resizing would be too high.

**Keywords:** Wood, Thermal Behavior, Heat Transfer

## Lista de Figuras

Figura 1: Modos de Transferência de Calor.....	20
Figura 2:Revestimento em Poliestireno Expandido – Interior e Extremidades .....	30
Figura 3:Pistola elétrica para silicone e bastões de adesivo silicone .....	31
Figura 4 Gaxeta de borracha com miolo magnético.....	32
Figura 5: Termostato NOVUS N32TR.....	33
Figura 6: Câmara Térmica, Fonte de Calor, Termopar e Termostato .....	34
Figura 7: Termo Higrômetro S-SW8062 .....	34
Figura 8: Termopar Instrutemp itti-1600 .....	35
Figura 9: Câmera Infravermelha FLIR i5 .....	36
Figura 10: Câmera Infravermelha FLIR i5, Tela LCD e botões de operação.....	37
Figura 11: Câmera Infravermelha FLIR i5, Lente e Gatilho .....	37
Figura 12: Imagem Térmica gerada pela câmera FLIR i5 - Parede HDF .....	38
Figura 13: Disposição das Paredes e Temperaturas .....	39
Figura 14: Ilustração de parede multicamadas.....	40
Figura 15 Parede de HDF .....	41
Figura 16: Divisória HDF – Estrutura interna.....	42
Figura 17: Divisória HDF - Fechamento de Laterais .....	42
Figura 18: Camadas de MDF sobre frame.....	43
Figura 19: Parede MDF .....	44
Figura 20: Parede OSB Parcialmente Montada .....	45
Figura 21: Camadas de OSB sobre frame.....	45
Figura 22: Parede OSB .....	46
Figura 23: Parede EGP .....	47
Figura 24: Temperaturas Experimentais por Tempo - MDF.....	52
Figura 25: Média das temperaturas experimentais MDF.....	53
Figura 26: Temperaturas Experimentais por Tempo - OSB .....	54
Figura 27: Média das temperaturas OSB.....	55
Figura 28: Temperaturas Experimentais – Parede HDF.....	56
Figura 29: Média das Temperaturas – Parede HDF.....	57
Figura 30: Temperaturas Experimentais – Parede EGP .....	59
Figura 31: Média de Temperaturas EGP .....	59

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 Propriedades Físicas de Madeiras e Derivados.....	23
Tabela 2 Especificações Técnicas Instrutemp itti-1600 .....	36
Tabela 3 Especificações Técnicas FLIR i5 .....	38
Tabela 4 Ilustração de Parde Multicamadas .....	40
Tabela 5 Temperaturas Teóricas e Experimentais da Parede MDF .....	51
Tabela 6 Temperaturas Teóricas e Experimentais da Parede OSB .....	53
Tabela 7 Temperaturas Teóricas e Experimentais Parede HDF .....	55
Tabela 8 Temperaturas Experimentais e Teórica – Parede EGP .....	57

## **Lista de Siglas**

EGP: Edge Glued Panel

HDF: High Density Fiber Board

MDF: Medium Density Fiber Board

NBR: Norma Brasileira

OSB: Oriented Strand Board

PROEX: Pró-Reitoria de Extensão

SP: São Paulo

UNESP: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

## Lista de Símbolos

$\alpha$ : Difusividade Térmica

$\varepsilon$ : Emissividade

$\rho$ : Peso Específico

$\delta$ : Absorvidade

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann

A: Área

$^{\circ}\text{C}$ : Graus Celcius

$C_p$ : Calor específico

Cm: Centímetro

dT: Variação da temperatura

dx: Variação da distância na direção x

E: Poder Emissivo da Superfície

$E_g$ : Energia gerada

$E_{ac}$ : Energia Acumulada

$E_{in}$ : Energia que entra no volume de controle

$E_{out}$  Energia que sai do volume de controle

G: Irradiação

$G_{abs}$ : Energia radiante absorvida

h: Coeficiente de Transferência de Calor

L: Espessura Total da parede

K: Kelvin

k: Condutividade Térmica

kg: Kilograma

m: Metro

m<sup>2</sup>: Metro quadrado

m<sup>3</sup>: Metro cúbico

mm: Milímetro

qx: Taxa de Transferência de Calor

q''<sub>cond</sub>: Fluxo de Calor Condutivo

q''<sub>conv</sub>: Fluxo de Calor Convectivo

q''<sub>rad</sub>: Fluxo de Calor por Radiação

R<sub>t,cond</sub>: Resistência Térmica Condutiva

R<sub>t,conv</sub>: Resistência Térmica Convectiva

R<sub>t,k,x</sub>: Resistência Térmica Condutiva para Segmento X

R<sub>t,c,x</sub>: Resistência Térmica Convectiva para Segmento X

s: Segundos

T: Temperatura

T<sub>s</sub>: Temperatura da Superfície

T<sub>∞</sub>: Temperatura do Fluido

T<sub>1</sub>: Temperatura do Fluido Interno

T<sub>2</sub>: Temperatura superficial

T<sub>3</sub>: Temperatura Superficial

T<sub>4</sub>: Temperatura do fluido, registrada pelo Termopar

T<sub>5</sub>: Temperatura Superficial

T<sub>6</sub>: Temperatura Superficial registrada pela câmera infravermelha

T<sub>7</sub>: Temperatura Ambiente

x: Espessura

W: Watts

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 Justificativa .....	16
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
3.1 Transferência de Calor .....	19
3.1.1 Condução .....	19
3.1.2 Convecção .....	20
3.1.3 Radiação.....	20
3.2 Propriedades Térmicas .....	20
3.2.1 Resistência Térmica .....	21
3.2.2 Difusividade Térmica.....	22
3.2.3 Condutividade Térmica.....	22
3.2.4 Conceitos e Cálculos .....	23
3.3 Conforto Térmico.....	26
3.4 Paredes de Madeira.....	26
3.4.1 MDF.....	27
3.4.2 HDF .....	27
3.4.3 OSB .....	27
3.4.4 EGP.....	28
3.5 Sistema Construtivo Wood Frame .....	28
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>30</b>
4.1 Câmara Térmica e seus Componentes.....	30
4.2 Medidores de Temperatura .....	32
4.3 Protótipos de Paredes.....	39
4.3.1 Divisória HDF .....	40
4.3.2 MDF.....	43
4.3.3 OSB .....	44
4.3.4 EGP.....	46
4.4 Ciclo de Teste .....	47
<b>5 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>49</b>
5.1 Parede MDF .....	51
5.2 Parede OSB .....	53

<b>5.3 Parede HDF.....</b>	<b>55</b>
<b>5.4 Parede EGP.....</b>	<b>57</b>
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>60</b>
<b>7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>62</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>63</b>

## **1 Introdução**

A madeira propriamente dita é utilizada há muitos anos como material construtivo, sendo um dos materiais pioneiros para residências e outros tipos de construções, porém é de conhecimento popular que a madeira sofreu por um período de tempo um grande preconceito devido ao uso errôneo e mal emprego de suas propriedades, isto se deve à falta de conhecimento necessário para o uso da madeira como material compatível aos diversos tipos de climas brasileiros, ou mesmo a omissão de técnicas para obter um melhor desempenho térmico.

No Brasil começou a ser utilizado em maior escala o sistema construtivo Wood-Frame (CANADIAN WOOD COUNCIL 1997), que consiste de peças de madeira pregadas de secção padronizada, este sistema já é utilizado há muito tempo em países de clima mais frio e permite uma variação de suas propriedades termo físicas para adaptação ao que os clientes necessitam, isso se deve aos tipos de isolantes que podem ser introduzidos dentro das paredes, não dependendo somente das propriedades da madeira.

Em Itapeva – São Paulo, pode ser encontrada uma construção experimental em Wood-Frame no Campus UNESP – Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, construída no Projeto PROEX Educação em Madeira.

### **1.1 Justificativa**

A madeira é um importante material para o estudo, sua baixa demanda energética faz frente aos outros métodos construtivos e sua natureza porosa proporciona uma baixa condução térmica, isto faz com que as construções de madeira ou produtos derivados da madeira, como painéis, sejam objetos valiosos para estudos e discussões sobre suas outras qualidades.

Deve ser observado que o aproveitamento da madeira serrada não é tão grande, tendo média de 50% de rendimento segundo Olandoski et al. (1998), porém a madeira contém um alto valor calorífico, podendo assim seus resíduos serem utilizados como forma de compensação energética dentro do próprio processo e fabricação de painéis de madeira.

Um dos fatores mais importantes para o projeto de construções em madeira é a escolha do material a ser empregado, a escolha de uma madeira com propriedades térmicas

inadequadas podem fazer com que o projeto seja um fracasso, isto se deve a fatores como por exemplo o coeficiente de condutividade térmica, que é informado nas normas vigentes e literaturas, porém o valor encontrado em diversas fontes é genérico para madeiras de alta e baixa densidade, o que pode ocasionar um erro ao empregar madeiras de diferentes espécies e mais comumente os painéis e outros derivados de madeira. O conforto térmico e a eficiência energética são diretamente influenciados por coeficientes térmicos e a obtenção de um valor apropriado para o material utilizado é de grande importância.

A região de Itapeva, segundo a norma brasileira de desempenho térmico (NBR 15220-3 de 04/2005), está situada na sub-região 2 e segundo a norma é recomendada a utilização de paredes pesadas, com maior massa térmica e a facilitação da desumidificação do ar. Devido a estes fatores foi proposto que os corpos-de-prova sejam de materiais diversos para a verificação da norma.

A melhoria dos sistemas construtivos em madeira será benéfica para a aceitação da tecnologia no Brasil, visto que a maioria das residências no país são constituídas de alvenaria, o que acarreta em um maior consumo energético tanto na fabricação da matéria prima, montagem e regulação da temperatura interna das construções.

## **2 Objetivos**

Este trabalho teve como objetivo propor uma metodologia de análise do comportamento térmico de diferentes paredes de madeira ao serem expostas a alta temperatura durante uma jornada diária, utilizando uma câmera fotográfica infravermelha e termopares.

Após a construção de uma câmara térmica para o experimento, foi de interesse verificar se a sua eficiência e confiabilidade eram suficientes para a sua aplicação em trabalhos derivados a este.

### 3 Revisão Bibliográfica

Será descrito neste capítulo todo embasamento teórico necessário para a formulação deste trabalho.

#### 3.1 Transferência de Calor

Segundo (DeWitt & Incropera, 2003) uma transferência de calor é a energia térmica em movimento devido a uma diferença de temperatura; também pode ser dito, segundo (Costa, 1974) em um espaço, sempre que houver uma diferença de temperatura entre duas regiões, esta tende a desaparecer devido ao fluxo de energia térmica.

O fluxo térmico segundo (DeWitt & Incropera, 2003), pode chamado de fluxos estacionários e transientes, e é dado pela transferência de calor pela área.

(Costa, 1974) classifica o fluxo térmico estacionário como quando não há variação no tempo, ou seja, todo o calor que entra em um corpo ou ambiente deverá sair por completo, também é visto que a distribuição de temperatura deste processo também não varia com o tempo.

O fluxo térmico transiente se dá quando há variação de tempo, ou seja, caso as condições de contorno sejam alteradas, por exemplo a temperatura de um uma superfície do sistema seja alterada, ao longo do tempo as temperaturas dos demais pontos do sistema também serão alteradas em direção ao equilíbrio térmico (DeWitt & Incropera, 2003).

Existem diferentes tipos de processos de transferência de calor, de acordo com (DeWitt & Incropera, 2003) estes podem ser referidos como *modos*, isto é, existem 3 modos que serão detalhados neste estudo, são os 3: Condução, Convecção e Radiação que serão brevemente detalhados e exemplificados conforme Figura 1.

##### 3.1.1 Condução

A condução pode ser descrita como a transferência de energia devido ao movimento aleatório dos átomos que ao interagirem entre si transmitem energia do átomo mais energético para o menos energético, este modo de transferência de energia existe em corpos sólidos devido as vibrações dos átomos e a energia é transferida por elétrons livres. Em fluídos estagnados a condução se dá pelas interações ocasionadas pelas colisões e difusão de moléculas em movimento aleatório (ÇENGEL & GHAJAR, 2011)

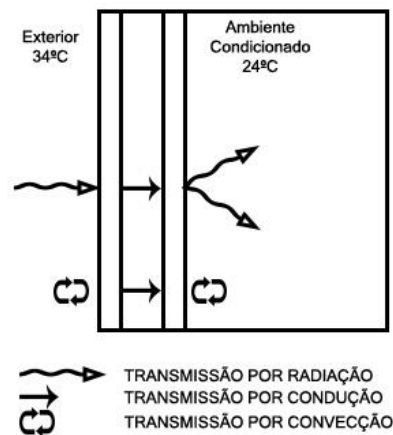
### 3.1.2 Convecção

A convecção existe devido as contribuições de difusão, ou seja, o movimento aleatório das moléculas que compõem o fluido e a contribuição macroscópica ou global do fluido, no caso a contribuição dominante geralmente é a macroscópica. A convecção é a transferência atuante quando há interações fluido-superfície e fluido-fluido segundo Jiji (2009).

### 3.1.3 Radiação

A radiação é o único modo de transmissão de energia térmica atuante na ausência de meio material, ou seja, ocorre inclusive no vácuo. Este modo de energia existe em todo corpo devido as agitações moleculares e atômicas e relação com a energia interna, ou seja, para que isto aconteça, o corpo necessita estar em uma temperatura finita acima do zero absoluto e é transferida por meio de ondas eletromagnéticas de acordo com Siegel & Howell (2002).

Figura 1: Modos de Transferência de Calor



FONTE: Aatoria Própria, 2013

## 3.2 Propriedades Térmicas

O comportamento da madeira responde a diversas propriedades térmicas que serão apresentadas neste capítulo.

### 3.2.1 Resistência Térmica

A difusão de calor pode ser comparada analogamente a carga elétrica, sendo assim, pode-se observar que existe uma resistência térmica da mesma forma que a elétrica, que retém parte da energia em transporte em forma de calor. Esta resistência térmica pode ser definida como a razão entre o potencial motriz e a taxa correspondente de transferência.

Segue a equação da resistência térmica para condução em paredes planas como citado por (Jorge, 1990), com os nomes de variáveis adaptados a teste trabalho.

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (1)$$

Onde:

$R_{t,cond}$  = Resistência térmica para condução em uma parede plana ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$ )

$T_{s,x}$  = Temperatura da superfície x ( $^{\circ}\text{C}$ )

$q_x$  = Taxa de transferência de calor para condução (W)

L = Espessura da parede plana (m).

A = Área total da parede ( $\text{m}^2$ )

k = Condutividade térmica (W /  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}$ )

Pode-se também obter a resistência térmica por convecção de forma similiar:

$$R_{t,conv} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (2)$$

Onde:

$R_{t,conv}$  = Resistência térmica para convecção ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$ )

A = Área total da parede ( $\text{m}^2$ )

### 3.2.2 Difusividade Térmica

Uma propriedade térmica importante a ser citada é a difusividade térmica, esta propriedade traduz a razão entre a capacidade do material em conduzir energia térmica e a capacidade de armazenamento da mesma. A resposta dos materiais a mudanças térmicas é diretamente proporcional a esta propriedade, ou seja, quanto maior for a difusividade térmica de um material, mais rapidamente ele responderá as mudanças impostas, conseqüentemente alcançando o equilíbrio térmico mais rápido. A difusividade térmica pode ser descrita conforme equação (2) proposta por (DeWitt & Incropera, 2003):

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (3)$$

Onde:

$\alpha$  = Difusividade Térmica (m<sup>2</sup>/s)

$\rho$ : Peso específico do material (kg/m<sup>3</sup>)

$k$  = Condutividade Térmica (W/K.m)

$C_p$  = Calor específico do material (J/kg.K)

### 3.2.3 Condutividade Térmica

A condutividade térmica é vital para o cálculo de transferência calor na condução, de natureza empírica, a condutividade térmica pode ser encontrada nas normas vigentes, como as nacionais NBR 15220/05 e NBR 7190/97. Como visto no tópico 2.2.2, pode-se perceber que a condutividade térmica é diretamente relacionada aos cálculos e sua utilização com valores confiáveis é de extrema importância. Hoje em dia, como citado, a condutividade térmica pode ser encontrada nas normas, mas com valores para os materiais mais importantes e a temperaturas de trabalho pré-definidas, a Tabela 1 apresenta valores da condutividade térmica e outras propriedades segundo NBR 15220/97.

A lei de Fourier (4) será utilizada para a obtenção de valores da taxa de transferência de calor por condução em cada um dos protótipos que foram submetidos aos experimentos.

$$q_x = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Onde:

$q_x$  = Taxa de transferência de Calor (W/°C)

$k$  = Condutividade térmica do material (W/K.m)

$A$  = Área de secção transversal (m<sup>2</sup>)

$T$  = Temperatura (K)

$x$  = Espessura da parede relacionada as condições de contorno. (m)

Tabela 1 Propriedades Físicas de Madeiras e Derivados

<b>Materiais</b>	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>k</math>(W/m.K)</b>	<b><math>c_p</math> (kJ/kg.K)</b>
Madeiras de Massa elevada	800-1000	0.29	1.34
Pinus, Cedro, Pinho, Carvalho, Freijó	600-750	0.23	1.34
	450-600	0.15	1.34
	300-450	0.12	1.34
Aglomerado de fibras (denso)	850-1000	0.20	2.30
Aglomerado de fibras (leve)	200-250	0.06	2.30
Aglomerado de partículas	645-750	0.17	2.30
	550-650	0.14	2.30
Placasprensadas	450-550	0.12	2.30
	350-450	0.10	2.30
Placasextrudadas	550-650	0.16	2.30
Compensado	450-550	0.15	2.30
	350-450	0.12	2.30
Aparas de madeira aglomerada com cimento em fábrica	450-550	0.15	2.30
	350-450	0.12	2.30
	250-350	0.10	2.30
Palha (capim Santa Fé)	200.00	0.12	2.30

FONTE: Adaptado da norma ABNT 15220-2 Tabela B.3

### .3.2.4 Conceitos e Cálculos

Para a análise do comportamento térmico das paredes, foi utilizada a equação (5) - balanço de energia.

$$E_{in} + E_g - E_{out} = E_{ac} \quad (5)$$

Onde:

$E_{in}$  = Energia que entra no volume de controle (W)

$E_g$  = Energia gerada dentro do volume de controle (W)

$E_{ac}$  = Energia acumulada pelo volume de controle (W)

$E_{out}$  = Energia liberada para o ambiente (W)

Para a transferência de calor por condução, foi utilizada a Equação (4) – Lei de Fourier. Porém foi observada a necessidade de se utilizar a Lei de Resfriamento de Newton – Equação (6) para a parcela convectiva.

$$q'' = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (6)$$

Onde:

$q''$  = Fluxo de Calor Convectivo (W/m<sup>2</sup>)

$h$  = Coeficiente de Transferência de calor por Convecção (W/m<sup>2</sup>.K)

$T_s$  = Temperatura da Superfície (K)

$T_\infty$  = Temperatura do Fluido (K)

Para a última forma de transferência de calor, a radiação, foi utilizado o equacionamento proposto em (DeWitt & Incropera, 2003):

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (7)$$

Onde:

$E$  = Poder Emissivo da superfície (W/m<sup>2</sup>)

$\varepsilon$  = Emissividade

$\sigma$  =  $5.670373 \times 10^{-8}$  (W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>)

$T_s$  = Temperatura da superfície (K)

Esta equação é uma adaptação prática da Lei de Stefan-Boltzmann, em que a emissividade foi implementada sendo um valor adimensional entre  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , isto ocorre pois a equação original de Stefan-Boltzmann descreve um corpo-negro, que existe idealmente e absorve toda a energia incidida, portando foi inserida o conceito de emissividade, que é a relação da capacidade de emissão de energia de uma superfície em relação a um corpo-negro.

No caso da radiação ser incidente, utilizaremos o fator  $G$  – irradiação, parte da irradiação pode ser absorvida pelo material e depende da propriedade da superfície denominada absorvidade  $\delta$ .

$$G_{abs} = \delta \cdot G \quad (8)$$

Onde:

$G_{abs}$  = Energia radiante absorvida (W)

$G$  = Irradiação (W)

$\delta$  = Absorvidade

Ao levar em consideração que uma superfície muito maior pode englobar a superfície menor, esta é considerada como vizinhança e representa por exemplos as paredes do ambiente em torno da superfície menor, pode-se considerar que:

$$G = T_{viz} \quad (9)$$

Onde:

$T_{viz}$  = Temperatura da vizinhança (K)

$G$  = Irradiação (W)

Portanto a taxa líquida de transferência de calor por radiação expressa por unidade de área, é dada por:

$$q''_{rad} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_s) - \delta G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (10)$$

Onde:

$A$  = Área da superfície ( $m^2$ )

$q$  = Taxa de Calor por radiação (W)

$q''_{\text{rad}}$  = Fluxo de Calor por radiação (W/m<sup>2</sup>)

### 3.3 Conforto Térmico

O conforto térmico é baseado em sensações subjetivas, ou seja, cada indivíduo tem uma resposta diferente ao ambiente a qual é exposto; pode ser definido como uma combinação satisfatória de fatores para o bem estar da pessoa no ambiente, os fatores de maior importância de acordo com (SILVA, 2008) são divididos em dois tipos:

\* Fatores ambientais: Velocidade relativa do ar, temperatura radiante média, umidade relativa e temperatura do ambiente.

\* Fatores de natureza pessoal: Vestimenta das pessoas expostas ao ambiente e atividade física executada.

Alguns autores divergem sobre a obtenção do conforto térmico, pode ser visto, que Lamberts, Dutra & Pereira, (1997) afirmam que se o balanço térmico de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a análise da transferência de calor em paredes compostas por tijolos maciços temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o homem sente conforto térmico.

E Ruas, (1997) afirma que mesmo em um ambiente visto como termicamente confortável, uma pessoa pode muito bem sentir desconforto devido à assimetria de perda de calor no corpo, isto pode ser facilmente verificado deixando as mãos de uma pessoa submersas em um recipiente com água gelada, este experimento fará com que o corpo perca sua neutralidade térmica, gerando desconforto apesar do ambiente ser apropriado para trabalho humano.

### 3.4 Paredes de Madeira

Nesta subdivisão serão apresentados os materiais derivados de madeira que foram utilizados para a confecção das paredes utilizadas.

### **3.4.1 MDF**

O MDF – Medium Density Fiberboard, é um painel de madeira reconstituída muito utilizado no mercado atual, o painel apresenta superfície lisa e uniforme, alta estabilidade dimensional e pode ser utilizado com acabamento superficial como fórmica, finish foil, entre outros. É formado por fibras de madeira aglutinadas e compactadas com adição de resina sintética, sua compactação é feita por prensa industrial a alta temperatura. Segundo (ABIPA, 2013), são produzidos cerca de 5,7 milhões de metros cúbicos por ano pelas empresas nacionais do setor, são empregadas madeiras de reflorestamento para a confecção do material, como Pinus e Eucaliptus, o uso de madeira reflorestada confere a possibilidade do grande volume gerado.

Este material tem a sua usinabilidade como sua principal característica, a homogeneidade adquirida no processo produtivo confere uma facilidade de entalhe, usinagem e torneamento tanto nas bordas como nas faces do painel.

Geralmente utilizado na indústria moveleira por suas características para utilização em peças com acabamento em baixo relevo, fundos de armários e laterais de gavetas; porém é utilizado em construções como recheio de portas, batentes e rodapés.

### **3.4.2 HDF**

É como o MDF, um material formado a partir de fibras de madeira com adição de resina sintética, aglutinado e compactado por prensa contínua de alta temperatura.

O HDF – High Density Fiberboard tem superfície lisa, alta estabilidade dimensional e alta densidade, é comumente chamada de Chapa Dura no mercado brasileiro. Produzidos com madeiras provenientes de reflorestamento, tem alta capacidade de produção e reduz a necessidade de utilização de madeira nativa. O HDF pode receber acabamento como Finish Foil e pintura ou utilizado naturalmente.

É um material muito versátil, utilizado desde a fabricação de brinquedos infantis, como na indústria moveleira para confecção de fundos para gavetas, armários e outros; pode ser utilizado para compor pisos laminados, portas e divisórias.

### **3.4.3 OSB**

O OSB – Oriented Strand Board, é um painel constituído de tiras de Madeira orientadas em três camadas de forma perpendicular, isto confere ao painel uma resistência muito grande se comparado a outros painéis de madeira reconstituída.

Segundo (ABIPA,2013) são produzidos 350 mil metros cúbicos de OSB anualmente no país, devido a sua utilização mais específica este painel acaba sendo produzido em menor escala em relação aos painéis citados em 3.4.1 e 3.4.2.

Tem como sua principal característica em ser um painel estrutural, muito utilizado para contraventamento em construções, podendo ser também utilizado como apoio para telhas asfálticas. Tem grande resistência mecânica e pode ser confeccionado para diferentes usos baseados em condições ambientais as quais será submetido, para isto utiliza-se resinas resistentes ou não à água.

Pode ser utilizadas para a confecção de móveis, paredes, embalagens entre outros. É possível receber acabamento superficial para alguns tipos de utilização do painel à vista, porém é mais comum ser utilizado in natura.

#### **3.4.4 EGP**

O EGP – Edge Glued Panel é formado por sarrafos de madeira colados lateralmente sob calor e pressão; também pode ser utilizada a junção por finger-joint, que é a união por dentes feitos na madeira para possibilidade de encaixe macho-fêmea, para a colagem.

É um painel de alto valor agregado pois utiliza madeira sólida sem qualquer tipo de desfibramento, pode ser utilizado em peças estruturais e confeccionado em grandes dimensões devido ao seu processo produtivo.

Muito utilizado na confecção de móveis, pois sua construção possibilita a utilização de aspectos naturais da madeira e a escolha de visuais limpos ou com defeitos naturais da madeira, o que dá uma gama elevada de possibilidades de decoração.

É muito comum a utilização de Pinus para a produção deste painel, porém outros tipos de madeira são utilizados, como o Abeto Chinês. Comumente feito de madeira de reflorestamento, tem cor clara e boa possibilidade de acabamento superficial, pode ser utilizado in natura ou com acabamentos utilizados em madeira, como vernizes, pinturas, finish foil, entre outros.

### **3.5 Sistema Construtivo Wood Frame**

Este sistema construtivo é largamente difundido na América do Norte, porém devido aos preconceitos relacionados à madeira, ainda precisa de propaganda no mercado brasileiro, porém, segundo o American Wood Council, (2012), este sistema é muito simples e possui uma eficiência muito grande se comparado aos sistemas usuais.

Uma das vantagens deste sistema é a rapidez com que se pode construir uma casa, a empresa alemã Weinmann é famosa por construir uma casa em Wood frame em 12 horas, porém este tipo de ação promocional é praticamente inviável, em condições normais é normalmente observada uma redução de cerca de 20% no tempo construção se comparado à uma casa de alvenaria.

A possibilidade de renovação da matéria prima necessária para a utilização neste processo é de grande importância ambiental, pois toda a madeira utilizada neste sistema construtivo pode ser proveniente de reflorestamento, além de reduzir drasticamente o consumo de energia de produção e beneficiamento da matéria-prima, segundo o Canadian Wood Council (1997), estima-se que são gastos em média 2x menos energia em relação ao concreto e 1,5x em relação ao aço.

Há a possibilidade de grande personalização para inclusão de uma construção em ambientes dependendo do seu clima, pode-se efetuar facilmente o isolamento termo-acústico de uma casa com a inserção de material isolante dentro das paredes ocas dependendo da necessidade. Comparando-se com o aço e concreto, não há o problema de condensação em superfícies devido a baixa temperatura, o que ajuda na manutenção do material.

## 4 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados e descritos todos os equipamentos utilizados para os experimentos e análises efetuadas.

### 4.1 Câmara Térmica e seus Componentes

Para a realização deste trabalho foi desenvolvida uma câmara térmica constituída de madeira, a função desta câmara foi de simular um ambiente com temperatura interna constante a 40°C. A câmara é constituída de madeira, porém para uma diminuição de perda energética, a câmara foi revestida com poliestireno expandido com 1 cm de espessura em seu interior e extremidades em contato com os protótipos de paredes, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2: Revestimento em Poliestireno Expandido – Interior e Extremidades



FONTE: Autoria Própria, 2013

Para a fixação do poliestireno expandido na madeira foi utilizado adesivo silicone em bastões com o auxílio de pistolas aplicadoras de silicone derretido, conforme Figura 3:

Figura 3:Pistola elétrica para silicone e bastões de adesivo silicone



FONTE: Autoria Própria, 2013

Após a aplicação e cura do adesivo silicone, foi observada a necessidade de um melhor isolamento térmico na interface isopor-parede, para isto foi fixada, também utilizando adesivo silicone, gaxetas de borracha, comumente utilizadas em geladeiras da marca Electrolux, esta gaxeta veio de fábrica em formato quadrático, foi recortada em laboratório para ser utilizada nas dimensões da câmara térmica. A gaxeta, conforme pode ser observado na Figura 4, possui além de sua estrutura em borracha um miolo confeccionado em um metal mole levemente magnetizado para sua utilização original, porém apesar de seu potencial magnético não ser utilizado neste experimento, acredita-se que o material não deve ser retirado do interior da estrutura para não modificar os parâmetros de isolamento fornecidos pelo fabricante.

Figura 4 Gaxeta de borracha com miolo magnético



FONTE: Aatoria Própria, 2013

Como a função da câmara térmica é de fornecer um ambiente em que o ar interno esteja estagnado e não há troca de fluido entre o interior e o exterior, uma geração de energia térmica interna foi necessária, para isto foi utilizada uma lâmpada elétrica incandescente comum de 100W.

## 4.2 Medidores de Temperatura

Ao assegurar uma fonte de calor interna, foi notada a preocupação do sistema se manter controlado, com temperatura interna constante, isto não poderia ser alcançado somente utilizando a lâmpada, pois o sistema poderia superaquecer, mesmo supondo que o sistema tivesse uma temperatura auto regulável somente utilizando a fonte de calor como parâmetro, a temperatura final seria muito alta e possivelmente impraticável para a simulação estipulada. Para o controle de temperatura, foi utilizado um termostato NOVUS modelo N32TR com alimentação 110/220v mostrado na Figura 6, o termostato foi regulado para ter uma temperatura máxima de 40°C com variação de 0,2 °C.

Figura 5: Termostato NOVUS N32TR



FONTE: Autoria Própria, 2013

O termostato foi montado na superfície exterior da câmara térmica para uma melhor visualização da temperatura mostrada e seu termopar foi introduzido por um pequeno furo na parte superior da câmara. Este termopar foi então deslocado para ficar próximo a superfície interna dos protótipos de paredes quando estes estivessem em experimento, isto foi feito para que a temperatura medida fosse a mais próxima possível levando-se em consideração o ar e a superfície interna da parede, além de ficar afastada da fonte de calor para não ocorrer um erro muito grande devido à alta temperatura da lâmpada. O posicionamento interno do termopar, assim como os outros componentes da câmara térmica pronta para o experimento podem ser observados na Figura 7.

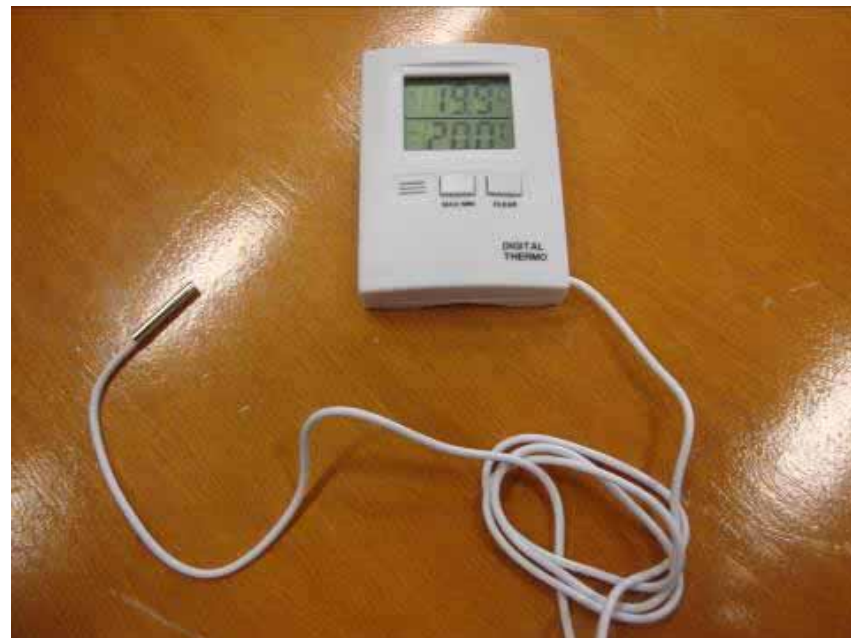
Figura 6: Câmara Térmica, Fonte de Calor, Termopar e Termostato



FONTE: Aatoria Própria, 2013

A temperatura externa foi aferida a cada ciclo com um termo higrômetro S-WS8062 apresentado na Figura 8.

Figura 7: Termo Higrômetro S-SW8062



FONTE: Aatoria Própria, 2013

Visto que as temperaturas dos fluidos poderiam ser confiavelmente medidas, foi necessária a utilização de outros equipamentos de medição para as paredes, foram feitas duas

medições de temperatura nas paredes em cada ciclo, uma interna com o auxílio de um termopar Instrutemp itti-1600, este que foi inserido em  $\frac{L}{2}$ , onde L é a espessura da parede, o equipamento utilizado para esta medição pode ser visto na Figura 10 e suas especificações técnicas estão apresentadas na Tabela 2. Além da temperatura interna da parede, foi obtida a temperatura de sua superfície externa, esta medição foi a mais importante pois refletia também a possibilidade do material ser utilizado como uma parede termicamente confortável. Para isto foi utilizado uma câmera fotográfica infravermelha FLIR i5, mostrada nas Figuras 10,11 e 12, a câmera foi regulada para a emissividade média de madeira 0,82 segundo NBR 15220; suas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 3, as fotografias térmicas foram tiradas durante o ciclo sempre a 4m da câmara com uma altura de aproximadamente 1,60m e focando o ponto central da parede. Apesar de não ter um controle muito preciso da posição para a fotografia, a temperatura pontual pode ser obtido posteriormente no software FLIR ThermoVision System Tools and Utilities, fornecido pelo fabricante.

Figura 8: Termopar Instrutemp itti-1600



FONTE: Instrutemp, 2013

Tabela 2 Especificações Técnicas Instrutemp itti-1600

<b>Especificações Técnicas Instrutemp itti-1600</b>	<b>Column1</b>
Display	LCD
Escala	-30°C a 1650°C
Precisão	±1,5%
Emissividade	0.10 a 1.0
Coeficiente de Distancia	50:01:00
Tempo de resposta	<1s
Temperatura de Operação	-10°C a 50°C
Temperatura de Armazenamento	-20°C a 50°C
Umidade de Operação	10 a 90% UR
Alimentação	9V
Termômetro	Tipo K

FONTE: Adaptado de Instrutemp.com

Figura 9: Câmera Infravermelha FLIR i5



FONTE: Autoria Própria, 2013

Figura 10: Câmera Infravermelha FLIR i5, Tela LCD e botões de operação



FONTE: Autoria Própria, 2013

Figura 11: Câmera Infravermelha FLIR i5, Lente e Gatilho



FONTE: Autoria Própria, 2013

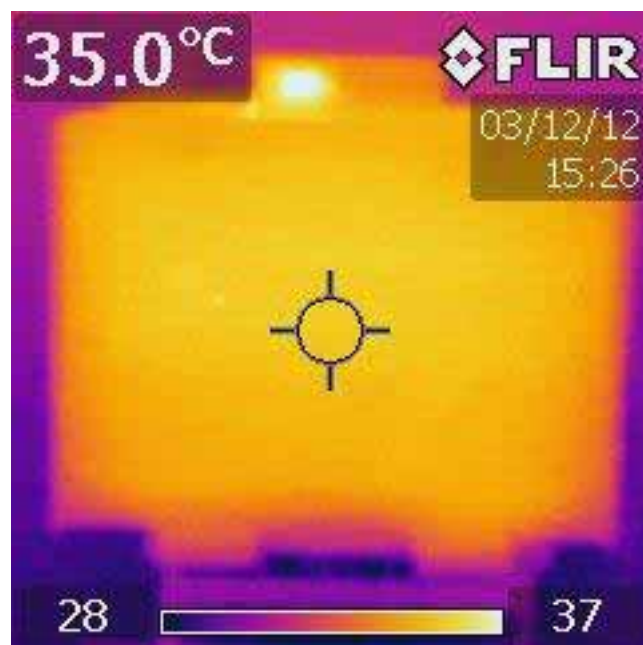
Tabela 3 Especificações Técnicas FLIR i5

<b>Especificações Técnicas FLIR i5</b>	<b>Column1</b>
Resolução	100x100 pixels
Pixeis Totais	10,000
Sensividade Térmica	<0.1°C
Alcance de Operação	20°C a 250°C
Precisão	± 2% ou 2°C
Campo de Visão	21°x21°
Foco	Livre de Foco
Detector	Microbolômetro não-resfriado
Tela	2.8" LCD Colorido
Frame Rate	9Hz
Emissividade	0.1 a 1.0

Fonte: Adaptado de FLIR.com

As imagens geradas pela câmera podem ser livremente analisadas no software especificado, foram geradas 17 imagens por experimento, elas foram utilizadas para a obtenção da temperatura pontual da superfície externa das paredes, pode-se observar uma imagem retirada da parede HDF como exemplo na figura 12.

Figura 12: Imagem Térmica gerada pela câmera FLIR i5 - Parede HDF

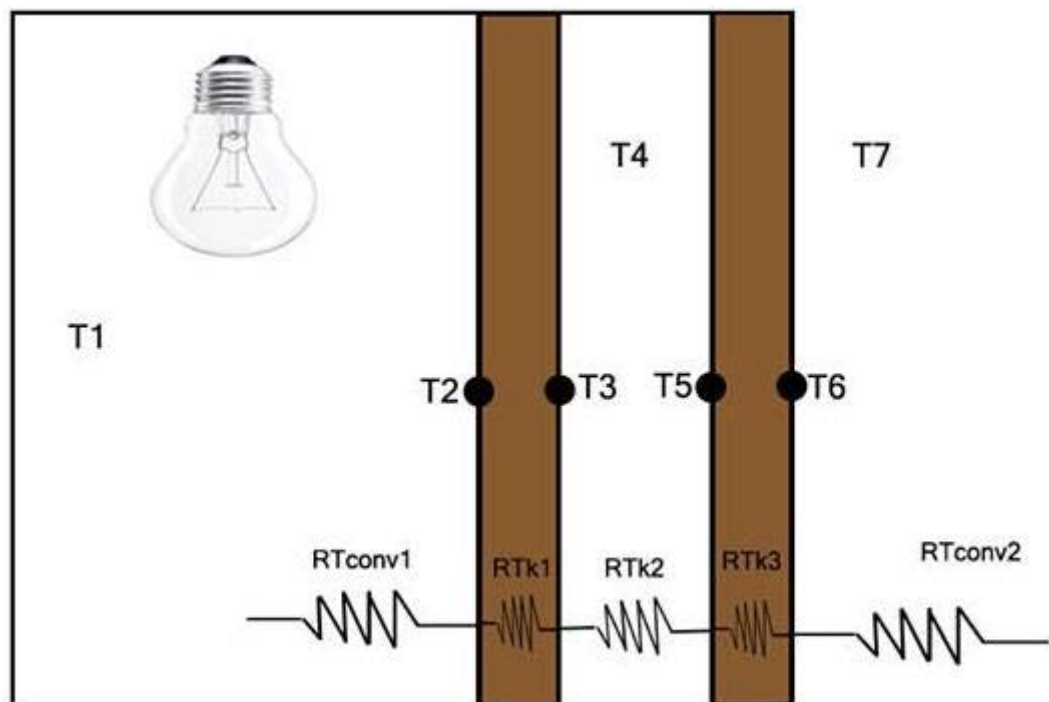


FONTE: Autoria Própria, 2013

### 4.3 Protótipos de Paredes

Foram utilizadas quatro paredes de madeira de 76x59cm, sendo uma delas pré fabricada e as outras três confeccionadas no Laboratório de Beneficiamento de Madeira – UNESP Itapeva, os materiais utilizados foram derivados comuns de madeira, facilmente encontrados para construções e reposição, além das propriedades físico-mecânicas as paredes possuem também dimensões diferentes para cada caso e devem apresentar resultados diversos. É apresentada na Figura 13 a disposição das camadas de madeira e suas temperaturas na câmara térmica devidamente montada e pronta para uso.

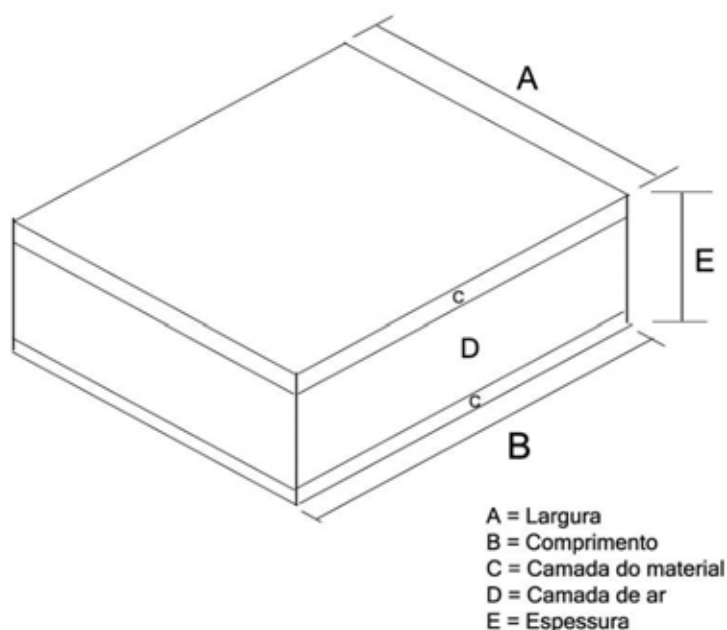
Figura 13: Disposição das Paredes e Temperaturas



FONTE: Autoria Própria, 2013

Na Figura 14 é apresentado uma ilustração do conceito utilizado para montagem das paredes de HDF, MDF e OSB. A Parede de EGP não possui duas camadas de madeira, portanto exclue-se as temperaturas T3, T4, E, T5; assim como as resistências Rtk2 e Rtk3.

Figura 14: Ilustração de parede multicamadas.



FONTE: Autoria Própria, 2013

Na Tabela são mostradas as dimensões de cada parede conforme mostrado na Figura 14:

Tabela 4 Ilustração de Parde Multicamadas

	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)
MDF	76,10	59,00	1,60	7,20	10,4
HDF	76,10	59,00	1,00	7,20	9,2
OSB	76,10	59,00	0,90	7,20	9
EGP	76,10	59,00	#		3,50

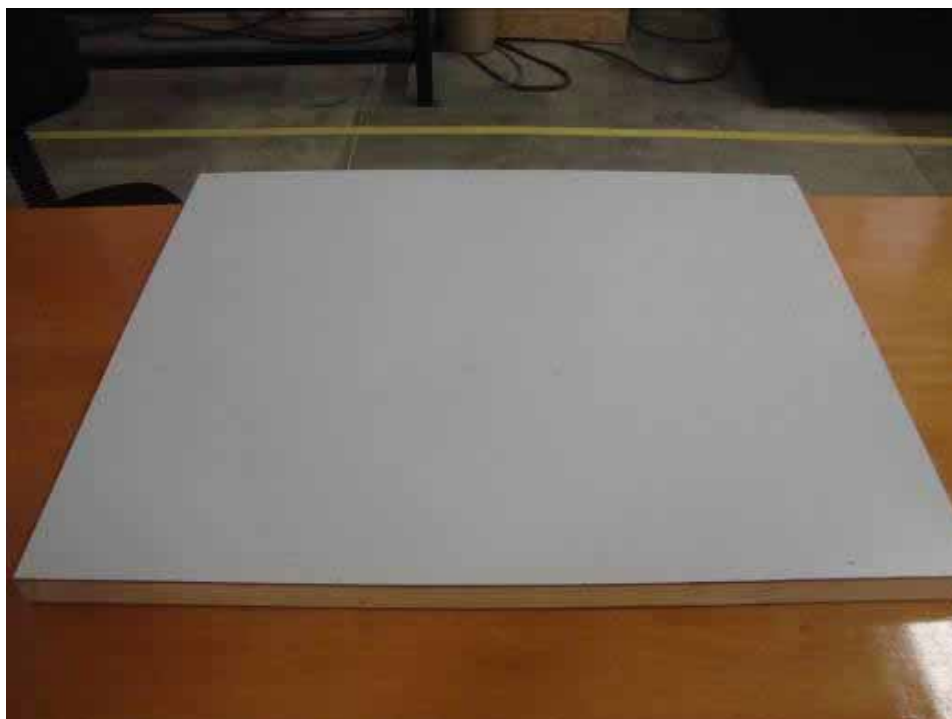
### 4.3.1 Divisória HDF

A primeira parede analisada é composta de duas superfícies de HDF de 9mm que possuem acabamento em Finish Foil e com o interior preenchido com uma estrutura de papelão mostrada na Figura 15, a princípio notou-se que a parede é leve, pois possui boa parte do seu interior preenchido com ar, isto faz com que teoricamente a parede tenha uma propriedade isolante fraca, porém a parede possui uma disposição estrutural que acarreta em muitas mudanças de fase para o fluxo de calor percorrer a caminho superfície-superfície, na Figura 16 pode-se perceber que o frame estrutural foi acoplado nos 4 lados da parede para

uma melhor fixação e evitar perda de calor lateral. Esta parede foi a única a ser encontrada pré-fabricada, foram feitos ajustes em suas dimensões para o experimento. A divisória HDF foi a que apresentou a menor variação de temperatura na superfície externa durante o experimento entre todos os protótipos: 1,89°C.

A Figura 15 apresenta a parede em seu modelo utilizado no experimento.

Figura 15 Parede de HDF



FONTE: Autoria Própria, 2013

Figura 16: Divisória HDF – Estrutura interna



FONTE: Aatoria Própria, 2013

Figura 17: Divisória HDF - Fechamento de Laterais



FONTE: Aatoria Própria, 2013

### 4.3.2 MDF

O MDF é um material muito difundido no mercado atual, substituindo muitas vezes outros painéis de madeira para diversos tipos de utilidades, foi com esse intuito que foi escolhido para o teste de conforto térmico para construções, o MDF apresenta, como nomeado, fibras de média densidade de madeira, ele possui fácil usinabilidade e tem uma boa estabilidade dimensional. A parede de MDF foi composta por duas camadas de 16mm de MDF com acabamento de Finish Foil montadas sobre um frame oco de pinus, a Figura 18 destaca as camadas de MDF e a Figura 19 mostra a parede pronta para o experimento.

Figura 18: Camadas de MDF sobre frame



FONTE: Autoria Própria, 2013

Figura 19: Parede MDF



FONTE: Aatoria Própria, 2013

### 4.3.3 OSB

A parede de OSB é um painel já utilizado para construções em woodframe e também para alguns fechamentos de forros, é conhecida por sua resistência mecânica e hoje em dia considerado como painel estrutural. O protótipo fabricado teve duas superfícies de OSB (interna e externa) de 9 mm, ela teve um frame de pinus montado para conferir estabilidade, porém o pinus foi desconsiderado nos cálculos devido a sua pequena quantidade utilizada. Pode ser visto na Figura 20 a parede com uma das suas superfícies retiradas para uma melhor visualização do interior e montagem.

Figura 20: Parede OSB Parcialmente Montada



FONTE: Aatoria Própria, 2013

Também pode ser observada na Figura 21 a espessura das camadas de OSB utilizadas:

Figura 21: Camadas de OSB sobre frame



FONTE: Aatoria Própria, 2013

A parede utilizada para o experimento é apresentada na Figura 22.

Figura 22: Parede OSB



FONTE: Autoria Própria, 2013

#### 4.3.4 EGP

O painel de EGP foi o material de maior valor agregado utilizado neste trabalho, por ser constituída de madeira maciça esta parede não teve sua temperatura interna aferida, portanto os cálculos foram efetuados levando-se em consideração somente as temperaturas das superfícies e fluidos. Espera-se que o comportamento do EGP seja similar ao proposto para madeiras de baixa densidade na norma vigente, pois além do Pinus o painel é composto por linhas de cola para a fixação dos sarrafos de madeira, acredita-se que a cola não tenha uma grande parcela na transferência de calor do material. O protótipo de 3,5 cm de espessura pode ser observado em vista lateral na Figura 23.

Figura 23: Parede EGP



FONTE: Autoria Própria, 2013

#### 4.4 Ciclo de Teste

Após a montagem de todos os componentes de medidas na câmara térmica e a parede em estudo ser devidamente fixada, a fonte de calor foi ligada, a primeira medida do dia deve ser levada como um período de adaptação da câmara e paredes a mudança gradual de temperatura, visto que mesmo que o experimento tenha sido realizado em sua totalidade durante o período de primavera-verão, a temperatura ambiente esteve baixa em algumas ocasiões durante o período da manhã, portanto foi observado que tanto a câmara térmica como as paredes em estudo alcançaram equilíbrio térmico já na segunda medição diária, elevando sua temperatura original em até 9°C.

O ciclo de teste foi elaborado em torno de uma jornada de 8 horas por parede, com os dados aferidos a cada 30 minutos. Foram realizadas medições sempre na mesma sequência; a temperatura ambiente foi a primeira a ser observada, logo após a temperatura interna da câmara térmica, após isto o operador deveria se distanciar 4m da câmara térmica e tirar uma

fotografia infravermelha do ponto central da parede em estudo utilizando a câmera FLIR i5. Após estes 3 passos o operador realizava a medição da temperatura interna da parede, utilizando o termopar Instrutemp itti-1600, esta medida com o termopar foi sempre executada com gatilho ativado por 3 segundos, pois foi observado que a temperatura sempre diminuiu ao longo do tempo de medida, como não foi estabelecido uma diminuição linear de temperatura, foi então decidido que a medição com o termopar deveria ser rápida, foi estimado um tempo de 3 segundos para que o alinhamento da pistola e o termopar fosse alcançado e o valor registrado.

A parede a de EGP teve um ciclo de teste diferente, pois esta possuía somente uma camada, portanto sua temperatura interna não foi aferida.

## 5 Apresentação de Resultados e Análises

Foram realizadas 255 medições de temperatura ao longo deste trabalho para a verificação do comportamento térmico das paredes, as temperaturas obtidas foram relacionadas com as suas devidas formas de transferência de calor, ou seja, foram consideradas para cálculos de transferências de calor por condução somente as temperaturas que possuíam relação direta de superfícies interna e externa. Foram utilizadas as propriedades físicas coeficiente de condução apresentas na Tabela 1.

Os dados obtidos foram compilados para a obtenção teórica da distribuição das temperaturas da superfície que não teve suas medidas, foi calculada então a temperatura  $T_4$  para cada parede, excluindo a parede de EGP por não possuir a medida de temperatura pelo termopar. O termopar foi utilizado para a medição do ar entre duas superfícies internas e a superfície mais próxima da fonte de calor também não teve sua temperatura experimentalmente obtida.

Para este trabalho foi considerado que não houve incidência solar e nenhuma outra forma de energia externa que pudesse ter magnitude para causar uma interferência no processo, foi considerado também que o material idealmente não acumularia qualquer porção de energia gerada, ou seja, toda a energia seria dissipada durante o experimento. Portanto segundo Equação (4),  $E_{in}$  e  $E_{ac}$  podem ser considerados nulos em uma visão geral do experimento.

O problema foi resolvido partindo do ponto externo, pois as temperaturas do ambiente e superfície externa eram conhecidas, assim como os valores tabelados de suas constantes. A partir do momento que o balanço de energia foi considerado como que  $E_g$  era igual à  $E_{out}$ , conforme utilização da Equação 4:

$$E_g = E_{out}$$

Foi considera que o fluxo de energia condutiva é a soma das energias perdidas, esta que se refere a parcela convectiva de energia e a resistência térmica total, segundo relação das Equações 1 e 2:

$$q'' = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{Rt} \quad (11)$$

$$q'' = \frac{(T_{\infty,1} - T_{\infty,2})}{(Rt_{c1} + Rt_{k1} + Rt_{k2} + Rt_{k3} + Rt_{c2})} \quad (12)$$

Onde:

$T_{\infty,1}$  = Temperatura do ar no interior da câmara (K)

$T_{\infty,2}$  = Temperatura do ar ambiente (K)

$Rt_{cx}$  = Resistência Térmica Convectiva da região X ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$ )

$Rt_{kx}$  = Resistência Térmica Condução da região X ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$ )

A equação (1) foi rearranjada de forma a se isolar uma das temperaturas em questão:

$$T_1 = \left( \frac{L \cdot q''_{cond}}{k} \right) + T_2 \quad (13)$$

Onde:

$T_1$  = Temperatura da parede interna (K)

$T_2$  = Temperatura da parede externa (K)

$L$  = Espessura da parede (m)

$k$  = Coeficiente de transferência de calor por condução ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )

Ao relacionar as equações (1) e (12), pode-se então obter o valor de  $T_2$ . Utilizando o valor de temperatura encontrado, foi necessária a análise da próxima etapa da transferência de calor, o novo ambiente em estudo seria o interior da parede onde a temperatura do ar ambiente corresponde as medidas de temperatura do termopar, para isto foi considerado que o ar está estagnado, isto significa que a transferência térmica nesta região se comporta de forma condutiva, portanto  $T_3$  e  $T_5$  puderam ser obtidas utilizando as equações (12) e (13).

## 5.1 Parede MDF

A parede constituída de MDF teve seu comportamento térmico registrado na Tabela 5, em que estão todas as temperaturas experimentais e teóricas.

Tabela 5 Temperaturas Teóricas e Experimentais da Parede MDF

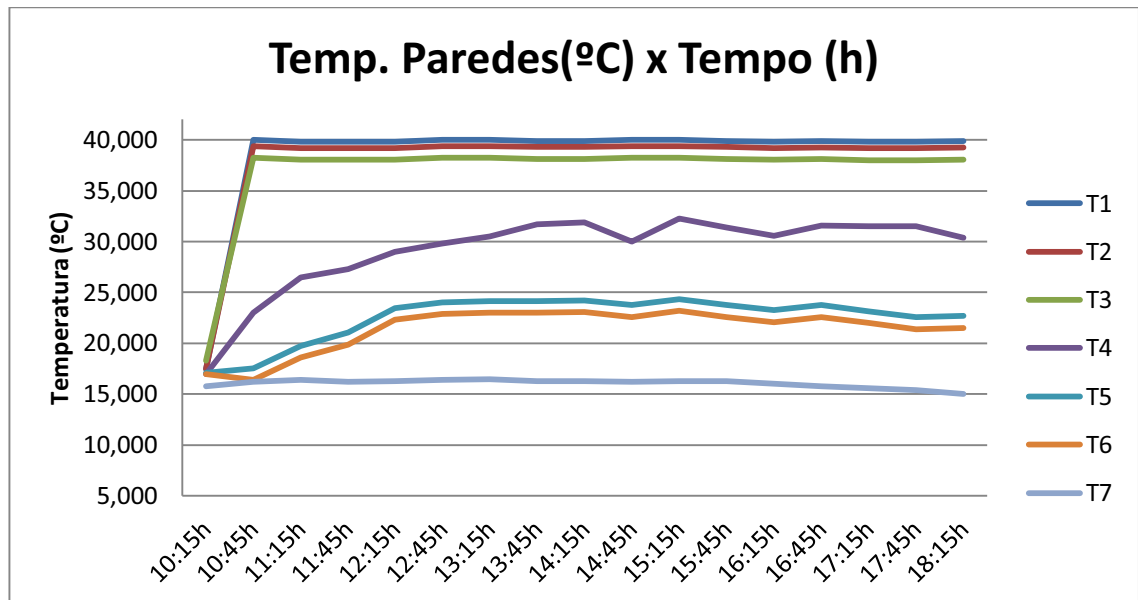
HORA	T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C	T5 °C	T6 °C	T7 °C
10:15h	17,500	17,467	18,408	17,000	17,063	17,000	15,800
10:45h	40,000	39,533	38,654	23,000	17,279	16,400	16,200
11:15h	39,800	39,341	38,476	26,500	19,464	18,600	16,400
11:45h	39,800	39,337	38,465	27,300	20,772	19,900	16,200
12:15h	39,800	39,339	38,471	29,000	23,168	22,300	16,300
12:45h	40,000	39,537	38,665	29,800	23,772	22,900	16,400
13:15h	40,000	39,539	38,671	30,500	23,868	23,000	16,500
13:45h	39,900	39,437	38,565	31,700	23,872	23,000	16,300
14:15h	39,900	39,437	38,565	31,900	23,972	23,100	16,300
14:45h	40,000	39,533	38,654	30,000	23,479	22,600	16,200
15:15h	40,000	39,535	38,659	32,300	24,076	23,200	16,300
15:45h	39,900	39,437	38,565	31,400	23,472	22,600	16,300
16:15h	39,800	39,333	38,454	30,600	22,979	22,100	16,000
16:45h	39,900	39,427	38,537	31,600	23,490	22,600	15,800
17:15h	39,800	39,325	38,431	31,500	22,894	22,000	15,600
17:45h	39,800	39,321	38,420	31,500	22,301	21,400	15,400
18:15h	39,900	39,411	38,491	30,400	22,420	21,500	15,000
Média	39,894	39,426	38,546	29,938	22,580	21,700	16,075
Desvio Padrão	0,085	0,087	0,091	2,464	1,882	1,882	0,417

Fonte: Autoria Própria, 2013

Na Figura 24 é apresentada a distribuição das temperaturas experimentais e teóricas obtidos na parede de MDF, pode-se observar que ao longo do tempo há a transferência gradativa de energia desde a geração de calor, representada por T<sub>1</sub>, até o último ponto T<sub>6</sub>, que representa a temperatura superficial externa, registrada pela câmera infravermelha. Como esperado a temperatura interna se manteve perto do limite pré-estabelecido pelo termostato, vale lembrar que a primeira medição efetuada as 10:15h foi um período de adaptação para a medição efetuada as 10:45h, ao analisar T<sub>4</sub>, que representa a temperatura indicada pelo termopar, pode-se observar que houve ganho de energia gradativo ao longo da manhã e a tarde teve um decréscimo apenas em algumas ocasiões, isto pode ter sido causado pela resposta do material a leve variação de temperatura externa. A temperatura da superfície T<sub>6</sub> teve um aumento gradativo de temperatura até período mais quente do dia, após o declínio da

temperatura ambiente esta superfície respondeu de acordo baixando sua temperatura ao perder energia para o ambiente.

Figura 24: Temperaturas Experimentais por Tempo - MDF



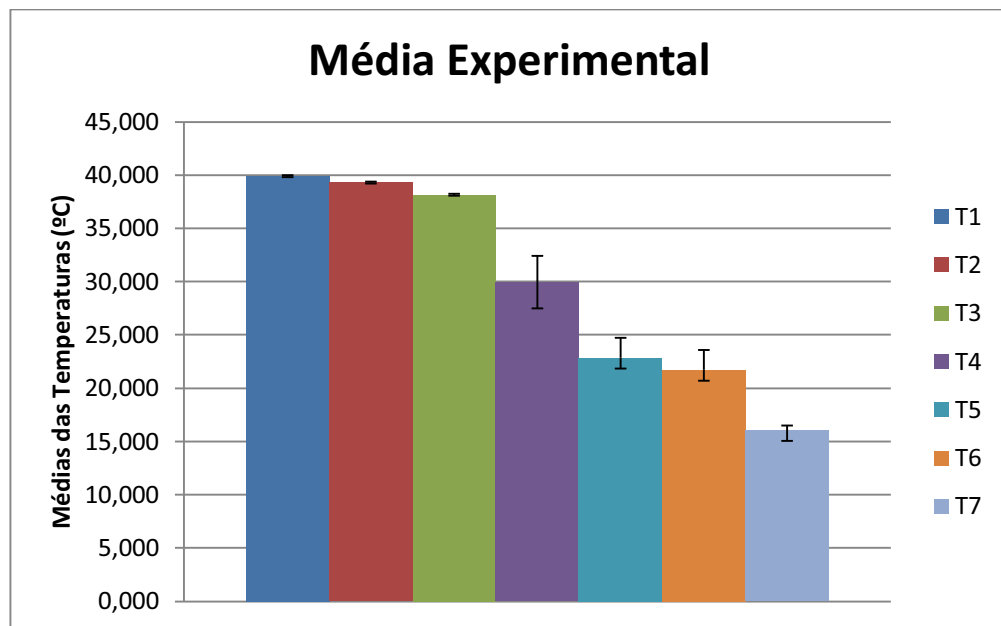
FONTE: Autoria Própria, 2013

Pode ser observado que a ambas as camadas tiveram comportamento similar em limitadas pelo ambiente em que foram expostas, a parede mais próxima a fonte de calor teve as superfícies com temperaturas muito próximas e somente após a camada de ar estagnada foi observada uma queda significante de temperatura. As camadas responsáveis por T5 e T6 também tiveram o mesmo comportamento, porém com uma temperatura mais baixa pode-se observar uma variação maior entre as temperaturas superficiais.

As temperaturas estão de acordo com o esperado e mostram que o MDF pode muito bem ser empregado como uma forma alternativa de revestimento para conforto térmico, foi simulada uma temperatura muito alta, fora dos padrões regionais e pode-se perceber que o MDF foi capaz de reduzir a temperatura incidida pela fonte de calor, mantendo-se levemente acima do ambiente.

Na Figura 25, são apresentadas as médias de temperaturas experimentais da parede MDF, pode-se notar que a superfície exposta ao ambiente teve uma média de 25°C, dentro dos padrões de conforto térmico.

Figura 25: Média das temperaturas experimentais MDF



FONTE: Aatoria Própria, 2013

## 5.2 Parede OSB

São apresentadas na Tabela 6 as temperaturas teóricas e experimentais desta parede.

Tabela 6 Temperaturas Teóricas e Experimentais da Parede OSB

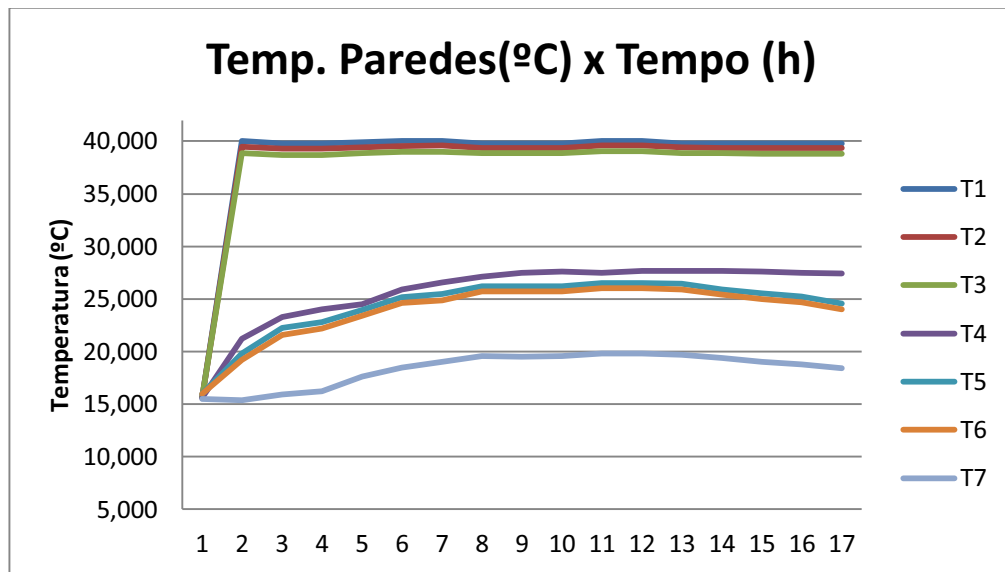
HORA	T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C	T5 °C	T6 °C	T7 °C
10:15h	15,600	15,598	15,685	15,600	16,003	16,000	15,500
10:45h	40,000	39,499	38,855	21,200	19,844	19,200	15,400
11:15h	39,800	39,313	38,688	23,300	22,226	21,600	15,900
11:45h	39,800	39,319	38,702	24,000	22,818	22,200	16,200
12:15h	39,900	39,446	38,862	24,500	23,984	23,400	17,600
12:45h	40,000	39,562	38,999	25,900	25,163	24,600	18,500
13:15h	40,000	39,572	39,023	26,600	25,450	24,900	19,000
13:45h	39,800	39,389	38,860	27,100	26,229	25,700	19,600
14:15h	39,800	39,387	38,855	27,500	26,231	25,700	19,500
14:45h	39,800	39,389	38,860	27,600	26,229	25,700	19,600
15:15h	40,000	39,589	39,060	27,500	26,529	26,000	19,800
15:45h	40,000	39,589	39,060	27,700	26,529	26,000	19,800
16:15h	39,800	39,391	38,864	27,700	26,426	25,900	19,700
16:45h	39,800	39,385	38,851	27,700	25,934	25,400	19,400
17:15h	39,800	39,376	38,832	27,600	25,545	25,000	19,000
17:45h	39,800	39,372	38,823	27,500	25,250	24,700	18,800

18:15h	39,800	39,364	38,804	27,400	24,560	24,000	18,400
Média	39,869	39,434	38,875	26,300	24,934	24,375	18,513
Desvio Padrão	0,095	0,096	0,110	1,987	1,878	1,916	1,463

FONTE: Aatoria Própria, 2013

Na Figura 26 é apresentada a distribuição das temperaturas experimentais e teóricas obtidas na parede de OSB:

Figura 26: Temperaturas Experimentais por Tempo - OSB

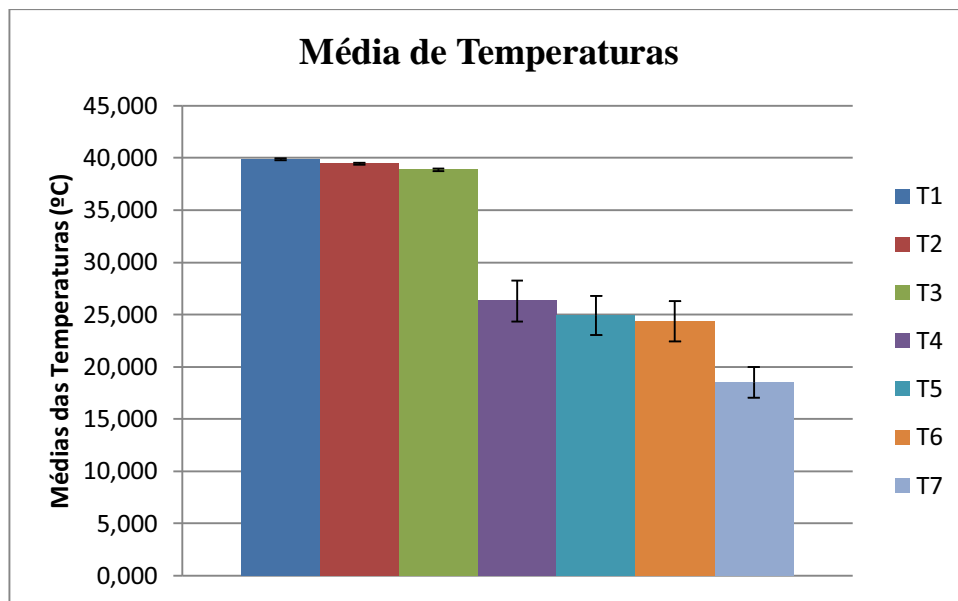


FONTE: Aatoria Própria, 2013

A parede de OSB teve uma distribuição acentuada devido a temperatura externa ser mais baixa neste dia, pode-se observar que mesmo com a temperatura interna constante, houve um crescimento gradativo, até o pico de temperatura do dia. O OSB mostrou-se eficiente para o isolamento térmico, mas apesar de suas propriedades mecânicas serem excelentes, recomenda-se a utilização de outros tipos de materiais para compor uma parede juntamente com o OSB, pois observa-se que a camada de material, nesta espessura em particular, esquentou rapidamente nas suas duas superfícies, nota-se que a variação entre T1, T2 e T3 é mínima, porém a partir do momento que outro material é colocado para compor a parede isto muda totalmente, tendo uma temperatura mais amena.

Este teste foi feito durante um frio e a parede conseguiu manter uma temperatura com uma certa diferença da temperatura ambiente, o que seria bom se ela fosse utilizada para compor uma parede. Conforme mostra a Figura 27, a temperatura da superfície externa – T6, ficou acima da temperatura ambiente em aproximadamente 6°C, o que pode ser considerado uma temperatura agradável segundo (RUAS,1999) neste caso específico de temperatura ambiente fria.

Figura 27: Média das temperaturas OSB



FONTE: Autoria Própria, 2013

### 5.3 Parede HDF

São apresentadas na Tabela 7 as temperaturas teóricas e experimentais desta parede.

Tabela 7 Temperaturas Teóricas e Experimentais Parede HDF

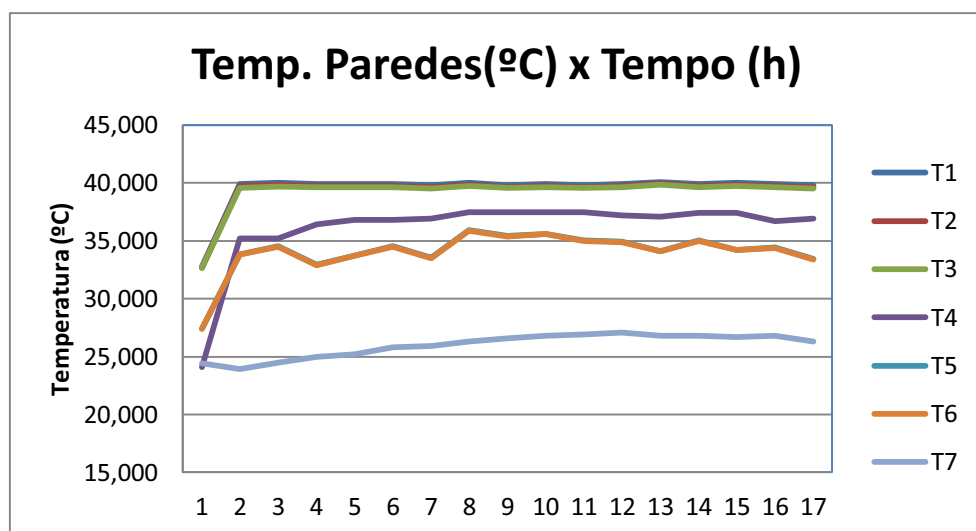
HORA	T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C	T5 °C	T6 °C	T7 °C
10:15h	32,800	32,658	32,644	24,100	27,414	27,400	24,400
10:45h	39,900	39,758	39,602	35,200	33,827	33,800	23,900
11:15h	40,000	39,858	39,711	35,200	34,526	34,500	24,500
11:45h	39,900	39,758	39,622	36,400	32,925	32,900	25,000
12:15h	39,900	39,758	39,626	36,800	33,725	33,700	25,200
12:45h	39,900	39,758	39,637	36,800	34,524	34,500	25,800
13:15h	39,800	39,658	39,541	36,900	33,524	33,500	25,900
13:45h	40,000	39,858	39,745	37,500	35,923	35,900	26,300
14:15h	39,800	39,658	39,554	37,500	35,422	35,400	26,600

14:45h	39,900	39,758	39,656	37,500	35,622	35,600	26,800
15:15h	39,800	39,658	39,560	37,500	35,022	35,000	26,900
15:45h	39,900	39,758	39,662	37,200	34,922	34,900	27,100
16:15h	40,100	39,958	39,852	37,100	34,123	34,100	26,800
16:45h	39,900	39,758	39,656	37,400	35,022	35,000	26,800
17:15h	40,000	39,858	39,752	37,400	34,223	34,200	26,700
17:45h	39,900	39,758	39,656	36,700	34,422	34,400	26,800
18:15h	39,800	39,658	39,549	36,900	33,423	33,400	26,300
Média	39,906	39,764	39,649	36,875	34,448	34,425	26,088
Desvio Padrão	0,085	0,085	0,085	0,737	0,844	0,845	0,960

FONTE: Autoria Própria, 2013

Pode ser observado na Figura 28 o comportamento da parede em relação ao ambiente, foi um experimento com poucas variações de temperatura, pode-se observar que após o período de adaptação, foram registradas temperaturas praticamente constantes no interior da câmara, a temperatura do ar interno da parede teve uma variação pequena ao longo do dia e a temperatura ambiente se mostrou sem grandes variações. Nota-se que a temperatura registrada na fotografia infravermelha teve uma maior variância que as outras, porém foi um comportamento esperado, pois foi a única parte exposta a outros fatores como a variação de umidade por exemplo, deve-se levar em consideração que a transferência não é uniforme e vários pontos da parede podem estar a temperaturas diferentes no mesmo período de tempo

Figura 28: Temperaturas Experimentais – Parede HDF

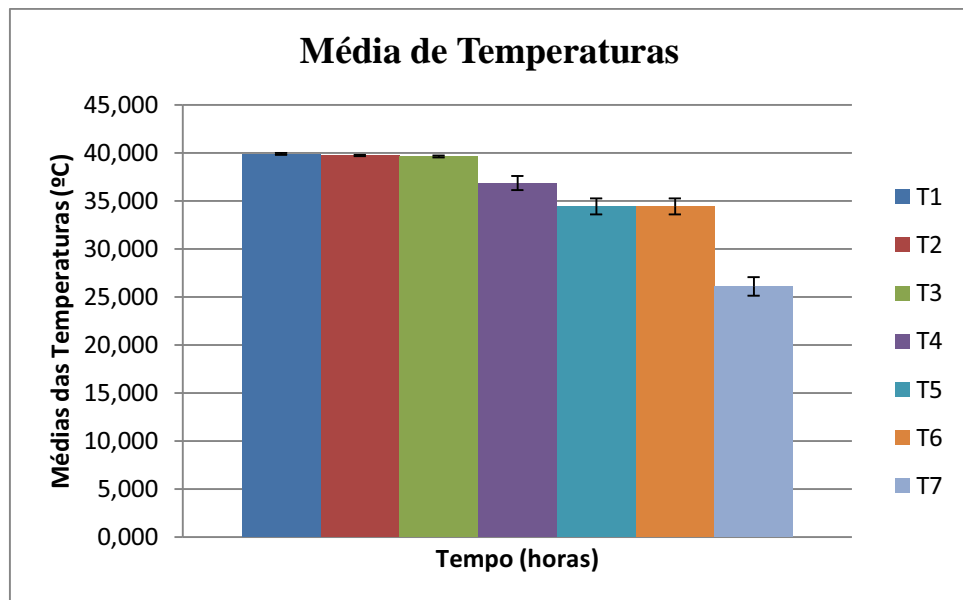


FONTE: Autoria Própria, 2013

Esta parede teve um comportamento similar nas duas camadas de HDF, que por característica construtiva é normalmente encontrado em espessuras finas, é observado que as

temperaturas superficiais de cada camada praticamente se igualam, isto mostra que o HDF, nesta espessura, não retém calor, deixando praticamente toda a energia passar, o que sugere que ele pode não ser um material adequado para isolamento térmico, mesmo com a camada de ar no interior, que teve sua importância e conseguiu reter boa parte da temperatura, a superfície mostrou uma média T6 muito acima da temperatura ambiente, o que pode não ser o ideal segundo (COSTA, 1974), que afirma que um dos fatores para o desconforto térmico é amplitude da variação de temperaturas em ambientes. Podem ser observadas as médias de temperaturas obtidas para esta parede na Figura 29:

Figura 29: Média das Temperaturas – Parede HDF



FONTE: Autoria Própria, 2013

## 5.4 Parede EGP

Esta amostra, foi a única a não possuir mais de 1 camada de madeira, portanto não houve necessidade de medição da temperatura do ar no seu interior, as temperaturas experimentais e a temperatura teórica obtida são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 8 Temperaturas Experimentais e Teórica – Parede EGP

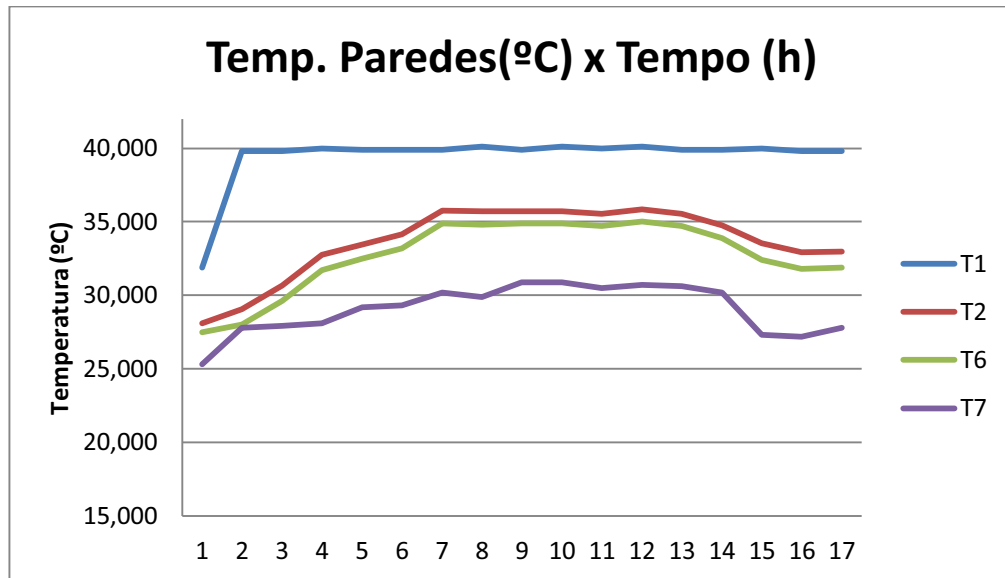
HORA	T1	T2	T6	T7
------	----	----	----	----

10:15h	31,900	28,083	27,500	25,300
10:45h	39,800	29,059	28,000	27,800
11:15h	39,800	30,650	29,600	27,900
11:45h	40,000	32,750	31,700	28,100
12:15h	39,900	33,445	32,500	29,200
12:45h	39,900	34,136	33,200	29,300
13:15h	39,900	35,756	34,900	30,200
13:45h	40,100	35,700	34,800	29,900
14:15h	39,900	35,694	34,900	30,900
14:45h	40,100	35,712	34,900	30,900
15:15h	40,000	35,539	34,700	30,500
15:45h	40,100	35,830	35,000	30,700
16:15h	39,900	35,521	34,700	30,600
16:45h	39,900	34,756	33,900	30,200
17:15h	40,000	33,521	32,400	27,300
17:45h	39,800	32,912	31,800	27,200
18:15h	39,800	32,959	31,900	27,800
Média	39,931	33,996	33,056	29,281
Desvio Padrão	0,108	2,007	2,100	1,379

FONTE: Autoria Própria, 2013

Na Figura 30, pode-se observar que a parede alcançou uma alta temperatura se comparada com o ambiente, porém esta amostra apresentou uma maior dificuldade para atingir esta temperatura, isto deve ser levado em consideração pois teoricamente a falta de interfaces facilitam a transferência de calor, visto que sempre há uma variação de temperatura quando é variado o tipo de material utilizado em conjunto. Esta parede se mostrou resistente a mudança brusca de temperatura ocasionada pela geração de calor possivelmente devido a sua difusividade térmica. Outro fator a ser observado é a queda de temperatura no período da tarde, uma queda abrupta na temperatura do ambiente foi ocasionada por uma forte chuva, mas a amostra, apesar de perder energia para o ambiente, fez isto de forma amena. É recomendável que sejam realizados outros testes com este material para observar o comportamento do material com mais de uma interface e outras espessuras como nos outros protótipos estudados.

Figura 30: Temperaturas Experimentais – Parede EGP

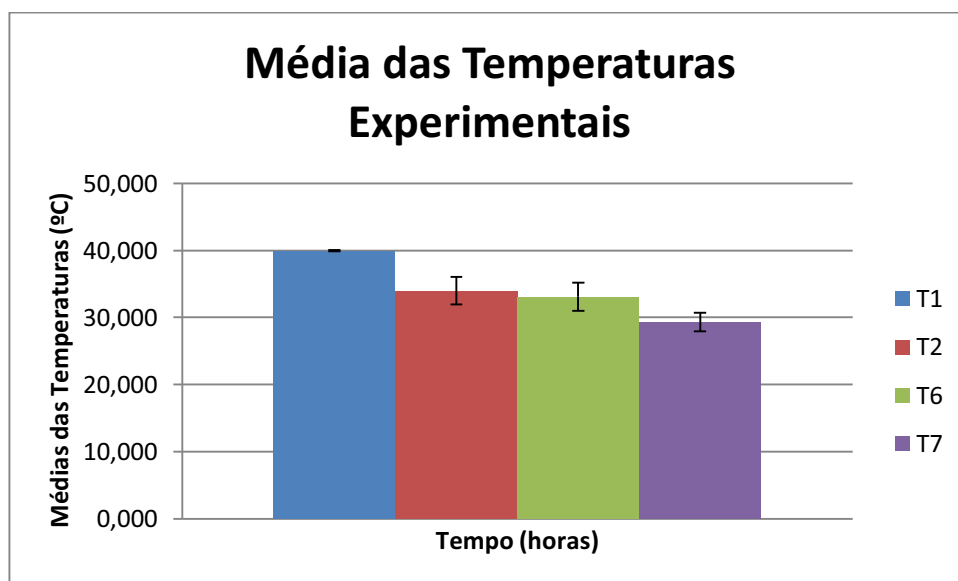


FONTE: Aatoria Própria, 2013

A Figura 30 mostra que houve uma diferença significativa entre as duas superfícies, porém de forma simétrica, isto foi esperado e mostra que a parede respondeu de forma uniforme a transferência de calor.

A Figura 31 evidencia as médias das temperaturas da parede EGP durante o experimento.

Figura 31: Média de Temperaturas EGP



FONTE: Aatoria Própria, 2013

## 6 Conclusões

Este trabalho foi desenvolvido como forma de estudo para comparação entre diferentes tipos de materiais lignocelulósicos facilmente encontrados no mercado nacional. Há claro, materiais já conhecidos de melhor eficiência térmica e até mesmo que possam servir também de isolamento acústico. Porém, soluções de baixo custo são sempre bem vindas para melhorar a competitividade e até como forma de alternativa para pessoas com menor poder aquisitivo.

Os experimentos em sua maioria tiveram desempenho de acordo com o esperado foi utilizado uma fonte de calor de 40°C, o que não corresponde à normalidade do clima brasileiro, principalmente na região Sul-Sudeste, portanto alguns dos materiais poderiam ser empregados para construções, porém é recomendável que a parede de HDF seja utilizada somente como divisórias em ambientes com temperatura controlada, como escritórios devido ao fato de ganhar e perder energia muito rapidamente para fontes de calor e ambiente.

A parede OSB se mostra como uma parede interessante pois acredita-se que o material tenha propriedades térmicas de qualidade, já que é empregado em construções, com a obtenção da temperatura registrada pela câmera infravermelha, pode-se concluir que é uma boa alternativa a madeira maciça devido ao seu custo reduzido e pode ser bem empregada para conforto térmico com a adição de outros materiais específicos para este fim, entretanto não é recomendável a utilização deste material com a espessura utilizada neste trabalho como isolante primário, pois ele tem uma resposta muito rápida a variações de temperatura.

Um painel que mostrou um comportamento bom foi o MDF, com a superfície exposta ao ambiente, o MDF apresentou temperaturas com uma variação média de quase 6°C em relação ao ambiente, porém, para este comportamento foi utilizada duas camadas relativamente grossas de material, o que acarretaria um custo maior de obtenção e transporte. Recomenda-se que o MDF, apesar de ter um comportamento aceitável, seja utilizado para outros fins, pois tem outras qualidades que seriam melhor aproveitadas, como facilidade de acabamento, usinabilidade, estabilidade dimensional, entre outros. O OSB seria uma alternativa melhor ao MDF na substituição por outro painel para isolamento térmico pois possui uma maior versatilidade para utilização.

A parede de EGP se mostrou como um bom material a ser utilizado se complementado com outras camadas ou outro material isolante, visto que seu comportamento foi relativamente bom ao ser exposto a uma simulação de alta temperatura, porém ele provavelmente não poderia ser utilizado como principal material construtivo pois teria um custo viável se comparado com a realidade brasileira, este material pode no entanto ser empregado como material de acabamento e/ou substituído pelos painéis OSB, pois a sua utilização seria mais viável economicamente.

Neste trabalho verificou-se que o EGP se saiu melhor em relação a seu comportamento térmico na espessura analisada, porém o OSB se mostrou como uma alternativa viável para utilização, pois é um painel estrutural, possui menor custo, é mais leve e pode ter seu comportamento enriquecido pela adição de outros materiais na composição estrutural das construções, dando a ele uma maior versatilidade no desenvolvimento de projetos.

## **7 Recomendações para Trabalhos Futuros**

Para trabalhos e artigos futuros que tenham uma linha de pesquisa similar a este, recomenda-se:

Obter o comportamento térmico de paredes de madeira em baixas temperaturas.

Executar os experimentos com em sala com temperatura e umidade controladas.

Utilizar paredes com e sem acabamentos superficiais.

Utilizar outros materiais isolantes em conjunto, como lã de vidro e lã de rocha.

## 8 Referências Bibliográficas

COSTA, E.C.D. **Física Aplicada à Construção: Conforto Térmico**. 2. ed. São Paulo: Blücher, 1974. 259 p.

DEWITT, D.P.; INCROPERA, F.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6ª Edição. Rio de Janeiro: Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2003. 698 p.

RUAS, A. C. **Avaliação de conforto térmico – Contribuição à Aplicação Prática das Normas Internacionais**. Campinas, 1999 b. 71 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas.

ÇENGEL, Y.A.; GHAJAR, A.J. **Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications**, 4th edition. 2011

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo: PW Editores, 1997. 188 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 23 mai. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2005). NBR 15220/05 **Desempenho Térmico de Edificações**. Rio de Janeiro

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). NBR -7190/97 – **Projetos de Estruturas de Madeira**. São Paulo.

INSTRUTEMP – **Instrumentos de Medida**. Disponível em <<http://www.instrutemp.com.br/>>. Acessado em: 09 jun 2013

FLIR – **Thermal Imaging**, Disponível em: <<http://www.flir.com>>. Acesso em: 06 jun 2013

ABIPA – Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira Disponível em <<http://www.abipa.org.br/>>. Acesso em 01 jul 2013.

OLANDOSKI, D.P; BRAND M.A; ROCHA, M.P. **Avaliação do Rendimento em Madeira Serrada, Qualidade e Quantidade de Resíduos no Desdobro de *Pinus spp***. Revista do Setor de Ciências Agrárias 1998; 17(1-2): 177-184.

JIJI, M.L. **Heat Convection**, 2<sup>nd</sup> Edition, New York, Springer Publisher, 2009, 543p.

SIEGEL, R; HOWELL, J. **Thermal Radiation Heat Transfer**. 4<sup>th</sup> Edition. New York. Taylor & Francis, 2002. 868p

JORGE, W. **Analogia no Ensino da Física**, 1990. Uberlândia

SILVA, R. N; **Avaliação do Conforto Térmico**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Santa Cecília. Santos. 2008.

CANADIAN WOOD COUNCIL. **BP4 - Wood-Frame Housing: A North-American Marvel**. 2002. Disponível em: <<http://www.cwc.ca>>, Acesso em 02 jul 2013

AMERICAN WOOD COUNCIL. **WCD 1 - Details for Conventional Wood Frame Construction**. 2001. Disponível em: <<http://www.awc.com>>, Acesso em 02.jul.2013