



**HAYSA MOREIRA FRANCO ROCHA**

**PROTOCOLO PARA ENSAIOS DE ABSORÇÃO TÉRMICA  
DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA A CONSTRUÇÃO  
CIVIL**

**LAVRAS – MG  
2019**

**HAYSA MOREIRA FRANCO ROCHA**

**PROTOCOLO PARA ENSAIOS DE ABSORÇÃO TÉRMICA DE MATERIAIS  
ALTERNATIVOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2019**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Rocha, Haysa Moreira Franco.

Protocolo para ensaios de absorção térmica de materiais  
alternativos para a construção civil / Haysa Moreira Franco Rocha. -  
2019.

58 p. : il.

Orientador(a): Giovanni Francisco Rabelo.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Desempenho térmico. 2. Isolantes. 3. Painéis de madeira. I.  
Rabelo, Giovanni Francisco. II. Título.

**HAYSA MOREIRA FRANCO ROCHA**

**PROTOCOLO PARA ENSAIOS DE ABSORÇÃO TÉRMICA DE MATERIAIS  
ALTERNATIVOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PROTOCOL FOR THERMAL ABSORPTION TESTS ON ALTERNATIVE  
MATERIALS FOR CIVIL CONSTRUCTION**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 05 de dezembro de 2019.

Dra. Luciana Barbosa de Abreu – UFLA

Dra. Thais Martins Mendes – Unilavras

Dr. Rodrigo Allan Pereira – UFLA

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2019**

## RESUMO

Nas últimas décadas, o gasto energético para controle de temperatura nas edificações vem crescendo, e os materiais empregados nas construções têm influência direta no desempenho térmico das mesmas. Não é raro prédios recém construídos, adotarem a instalação de climatizadores em seus ambientes. O estudo das propriedades térmicas de materiais alternativos, com características isolantes, pode contribuir para a quebra de paradigmas e mudar a realidade da construção, proporcionando edifícios termicamente eficientes. Neste contexto, este trabalho visou definir um protocolo de ensaio térmico para painéis de madeira reconstruída e gesso acartonado (*drywall*), a fim de determinar um tamanho mínimo de corpo de prova que possa garantir com segurança a determinação das propriedades térmicas de absorção e transferência do calor entre ambientes, quando esses materiais são utilizados como isolantes térmicos em edificações. Foram utilizados painéis comerciais de gesso acartonado, compensado e OSB (*Oriented Strand Board*). Foi realizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos painéis. Foram determinadas as densidades dos painéis, que foram submetidos a ensaio térmico em um conjunto de câmaras térmicas com temperatura controlada por um controlador PID. Com as informações obtidas no ensaio térmico, foi calculada a condutividade térmica dos painéis. Pode-se concluir que para atender o valor de condutividade térmica de  $0,35 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  para o gesso acartonado,  $0,15 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  para o compensado e  $0,14 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  para o OSB, os tamanhos dos corpos de prova devem ficar entre  $20 \times 20 \text{ cm}$  e  $30 \times 30 \text{ cm}$  para o gesso acartonado e o compensado e entre  $10 \times 10 \text{ cm}$  e  $20 \times 20 \text{ cm}$  para os painéis OSB.

**Palavras-chave:** Desempenho térmico. Isolantes. Painéis de madeira. Gesso acartonado. Gasto energético.

## ABSTRACT

The energy expenditure for temperature control in buildings has increased in recent decades and the materials used in buildings have a direct influence on their thermal performance. It is not uncommon for newly constructed buildings to adopt the installation of air conditioners in their environments. The study of the thermal properties of alternative materials with insulating characteristics can contribute to breaking paradigms and changing the reality of construction, providing thermally efficient buildings. In this context, this work aimed to define a thermal test protocol for reconstituted wood panels and drywall to determine a minimum sample size that ensures the determination of the thermal absorption and heat transfer properties between environments when these materials are used as thermal insulators in buildings. We used commercial plasterboard, plywood, and OSB (Oriented Strand Board) panels. We performed scanning electron microscopy (SEM) of the panels. We determined the densities of the panels, which were subjected to thermal testing in a set of thermal chambers with temperature controlled by a PID controller. We calculated the thermal conductivity of the panels based on the information obtained with the thermal test. In conclusion, to meet the thermal conductivity value of 0.35 W/m°C for drywall, 0.15 W/m°C for plywood, and 0.14 W/m°C for OSB, the sizes of the specimens must be between 20x20cm and 30x30cm for plasterboard and plywood and between 10x10cm and 20x20cm for OSB panels.

**Keywords:** Thermal performance. Insulating. Wood panels. Drywall. Energy expenditure.

## LISTA DE FIGURAS

### PRIMEIRA PARTE

Figura 1 - Templos de Horyu-Ji – 607 d.C. (A) e Kiyomizu-dera – 778 d.C. (B). .....	11
Figura 2 - Palácio Czar Alexei. ....	12
Figura 4 - Painéis de madeira reconstituída.....	13
Figura 5 – Efeito Seebeck em um termopar. ....	20

### SEGUNDA PARTE

Figura 1 – Painéis utilizados para a análise de desempenho térmico. A) Gesso acartonado ( <i>Drywall</i> ); B) Compensado; C) OSB.....	32
Figura 2 - Diagrama do conjunto de câmaras térmicas. ....	34
Figura 3 – Sensor LM35.....	34
Figura 4 - Conjunto da câmara térmica. ....	36
Figura 5 - Lâmpada no interior do módulo inferior.....	36
Figura 6 - Medidor de radiação. ....	38
Figura 7 – Imagem real e termográfica do painel compensado 30x30cm.....	41
Figura 8 - Imagem real e termográfica do painel de gesso acartonado ( <i>Drywall</i> ) .....	41
Figura 9 - Imagem real e termográfica do painel OSB 30x30cm.....	41
Figura 10 – Microscopia eletrônica de varredura painel compensado. ....	44
Figura 11 – Microscopia eletrônica de varredura painel OSB. ....	45
Figura 12 – Microscopia eletrônica de varredura painel de gesso acartonado.....	45

## LISTA DE TABELAS

### SEGUNDA PARTE

Tabela 1 – Análises físicas e metodologias que serão aplicadas. ....	33
Tabela 2 – Médias e Intervalo de Confiança para a variável condutividade para as três repetições. ....	46
Tabela 3 – Resistência térmica média dos painéis. ....	50

## SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE .....	9
1 INTRODUÇÃO .....	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	10
2.1 Construção civil .....	10
2.2 Madeira .....	11
2.3 Painéis de madeira reconstituída.....	12
2.3.1 Pannel compensado .....	13
2.3.2 Pannel OSB.....	14
2.4 Resíduos agroindustriais .....	14
2.5 Pannel de gesso acartonado .....	15
2.6 Propriedades térmicas dos materiais .....	16
2.6.1 Transferência de calor.....	16
2.6.1.1 Transferência de calor por condução .....	17
2.6.1.2 Transferência de calor por convecção.....	17
2.6.1.3 Transferência de calor por radiação .....	18
2.6.2 Condutividade térmica.....	18
2.6.3 Conforto térmico.....	18
2.7 Sensores de temperatura .....	19
2.8 Controle de temperatura.....	20
2.8.1 Controlador PID.....	20
2.9 Arduino .....	21
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	23
REFERÊNCIAS .....	24
SEGUNDA PARTE – ARTIGO .....	28
1 INTRODUÇÃO .....	30
2 MATERIAL E MÉTODOS .....	32
2.1 Materiais .....	32
2.2 Determinação de propriedades físicas .....	33
2.3 Montagem do experimento .....	33
2.3.1 Controlador PID com Arduino .....	34
2.4 Aquisição dos dados .....	35

2.5	Determinação de propriedades térmicas .....	36
2.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	39
2.7	Análise estatística .....	39
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
3.1	Caracterização física dos painéis – Densidade aparente dos painéis .....	40
3.2	Caracterização térmica dos painéis .....	41
3.2.1	Mensuração das temperaturas .....	42
3.2.2	Condutividade térmica .....	46
3.2.2.1	Análise da média e do intervalo de confiança .....	46
3.2.3	Resistência térmica .....	50
4	CONCLUSÃO .....	52
	AGRADECIMENTOS .....	52
	REFERÊNCIAS .....	53
	APÊNDICE A .....	55

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO

Os pesquisadores das áreas de arquitetura, engenharia civil e zootecnia têm grande interesse em solucionar problemas de conforto térmico em edificações. Vários materiais podem ser empregados em revestimentos de paredes e teto, visando o melhor desempenho no que diz respeito ao isolamento térmico, possibilitando assim, manter a temperatura do ambiente interno, evitando trocas excessivas de calor com o meio externo.

Em geral, a construção convencional no Brasil pouco adota estratégias de conforto térmico levando em conta as propriedades dos materiais utilizados como revestimentos, ao contrário do que se percebe em outros países como da Europa e América do Norte. Isso culmina em estratégias de controle de temperatura das edificações de forma artificial com gasto de energia, seja para resfriar, seja para aquecer o ambiente. Todavia, pesquisas recentes apresentam resultados animadores quanto à incorporação de materiais alternativos, como resíduos de processos industriais e agroindustriais (bagaço de cana-de-açúcar, casca de coco, resíduos de borracha, etc.), a argamassas de revestimento (CASTRO; MARTINS, 2016; EUGÊNIO, 2016; MATOS; GUIMARÃES, 2017). A aplicação desses materiais pode melhorar as propriedades térmicas isolantes dos revestimentos, podendo assim, reduzir os gastos energéticos com climatização artificial dos ambientes.

Nesse sentido, percebe-se forte interesse em estudar as propriedades de materiais alternativos como isolantes térmicos de edificações, mas, para sua avaliação, o ideal é que os experimentos sejam montados em uma edificação real, o que exige um grande volume financeiro à pesquisa. Dessa forma, uma alternativa é estabelecer um protocolo de ensaio desses materiais em escala reduzida, possibilitando inferir sobre uma situação real de campo com exatidão.

Sendo assim, este trabalho visa apresentar um estudo comparativo entre tamanhos diferentes de corpos de prova, de diferentes materiais, a fim de determinar um tamanho mínimo de corpo de prova que possa representar as propriedades térmicas de absorção e transferência do calor entre ambientes, quando esses materiais são utilizados como isolantes térmicos para aplicação em edificações.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Construção civil

A necessidade humana é a grande responsável pelo desenvolvimento das mais diversas áreas, e com a construção civil não é diferente. Na pré-história, o homem utilizou as cavernas como abrigo para se proteger de animais e intempéries. Com o passar do tempo, ele aprendeu a trabalhar com diferentes materiais e assim, desenvolveu os mais diversos tipos de construções.

Segundo Fazio, Moffet e Wodehouse (2011), por volta de 4000 a.C., no sul da Mesopotâmia, grande parte das construções da Suméria eram feitas de tijolos de terra secos ao sol, porém estes não resistiam bem ao intemperismo, logo, posteriormente, passaram a receber revestimentos resistentes a intempéries, proporcionando maior durabilidade às edificações. Já no Egito Antigo, na construção das pirâmides, e também no império Persa por volta de 518 a.C., a pedra foi o material utilizado.

À medida que a civilização se desenvolvia, a preocupação com o conforto das edificações crescia, com isso, os materiais passaram a ser utilizados de maneira a propiciar tal conforto aos ocupantes. Ainda de acordo com Fazio, Moffet e Wodehouse (2011), na China algumas casas eram feitas em formato circular e suas paredes eram confeccionadas de pau a pique com espessas camadas de argila, visando um bom isolamento térmico. Outro material bastante utilizado por possuir características de isolamento térmico é a madeira. Ela está presente em edificações antigas de países como a Rússia, Noruega e Japão, no qual o intuito da sua implementação era suportar os longos invernos.

No Brasil, com a crescente utilização do cimento Portland, o sistema construtivo de concreto armado passou a predominar nas construções, fazendo com que outros materiais fossem deixados em segundo plano. Segundo Molina e Calil Junior (2010, p. 145), a utilização da madeira no Brasil foi perdendo espaço a partir da década de 1970, “enquanto que no resto do mundo as estruturas de madeira continuaram evoluindo”.

O avanço das descobertas de materiais e novos sistemas construtivos trouxe mudanças para a construção civil, o que acarretou em alguns pontos negativos. Segundo John (2000), a construção civil consome entre 20 a 50% dos recursos naturais extraídos no planeta e estima-se, ainda, que ela produza mais da metade dos resíduos sólidos dentre todas as atividades humanas. Visto isso, é importante pensar em técnicas e materiais que busquem otimizar o setor, seja pelo ponto de vista ambiental, seja pelo econômico.

Uma dessas técnicas que corrobora para a otimização da construção gerando menos resíduos é o sistema *Wood Frame*, sistema de construção em madeira que está presente na maior parte das casas dos Estados Unidos, Canadá e países nórdicos, por exemplo. Outro sistema semelhante a este, é o *Light Steel Framing*, que traz também economia de materiais, alívio de cargas nas fundações e menor geração de resíduos quando comparado a construção convencional (CALDAS et al., 2016; VIVAN; PALIARI; NOVAES, 2010).

## 2.2 Madeira

A madeira é considerada um dos materiais de construção mais antigos, visto que é uma matéria-prima de fácil extração e manuseio, que confere resistência e bom isolamento térmico. Segundo Abreu et al. (2015, p. 5), “as moradias de madeira fazem parte de uma arraigada cultura dos povos, em muitos países como nos países nórdicos, Alemanha, França, Suíça, Canadá, EUA, na Patagônia argentina e chilena, entre outras localidades”.

Ela é utilizada para construir variados tipos de edificações, que vão de pequenas casas à grandes templos e palácios, como é o caso dos Templos de Horyu-Ji e Kiyomizu-dera no Japão, (FIGURA 1) e o palácio do Czar Alexei na Rússia, (FIGURA 2).

Figura 1 - Templos de Horyu-Ji – 607 d.C. (A) e Kiyomizu-dera – 778 d.C. (B).



Fonte: Kawanami (2018).

Figura 2 - Palácio Czar Alexei.



Fonte: Wiki Culturama (2018).

Com o passar tempo, no Brasil, a madeira foi sendo substituída por outros materiais nas construções. De acordo com Abreu et al. (2015), isso provém de um fator cultural. Durante algum tempo, casas foram construídas com materiais de baixa qualidade, sem técnicas corretas e sem a manutenção adequada, difundindo assim, a ideia de que casas de madeira não são “ideais” para morar e sim, uma solução provisória.

Contudo, nos últimos anos a madeira está novamente em evidência, sendo muito procurada para fins estéticos, visando trazer um ar mais acolhedor e sofisticado aos ambientes onde a mesma é inserida, uma vez que “a madeira proporciona aconchego, pois impressiona nossos sentidos e provoca conexões inconscientes entre o homem e a natureza” (ABREU et al., 2015, p. 5).

Levando-se em consideração a limitada geometria de peças obtidas através da madeira natural, surgiram assim, outras técnicas para aproveitar o material. Como a madeira laminada colada e os painéis de madeira reconstituída que serão discutidos a seguir.

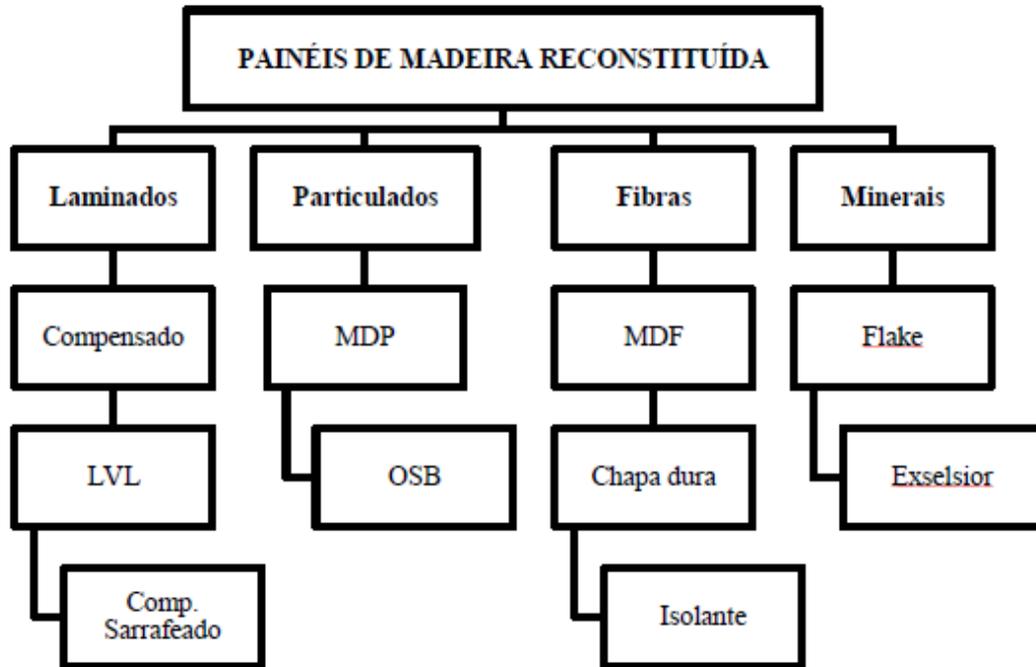
### 2.3 Painéis de madeira reconstituída

Os painéis de madeira reconstituída buscam otimizar a utilização da madeira sólida, tendo um melhor rendimento em relação ao volume das toras, visando assim, fabricar produtos com melhor custo/benefício e melhores dimensões.

Para atingir esse objetivo, os painéis de madeira reconstituída podem ser produzidos a partir de lâminas, sarrafos, partículas ou fibras provenientes da redução da madeira natural, e reconstituídas por ligação adesiva através de adesivos sintéticos ou não, sobre temperatura e pressão adequadas (IWAKIRI, 2005).

De acordo com a característica desejada, a madeira pode ser reconstituída através de processos diferentes, formando os produtos indicados na Figura 4.

Figura 3 - Painéis de madeira reconstituída.



Fonte: Vilela (2016).

### 2.3.1 Painel compensado

Segundo Iwakiri (2005), os painéis compensados são geralmente produzidos com um número ímpar de camadas, cujas lâminas de madeira são coladas sob pressão e temperatura, sendo o sentido das fibras das lâminas perpendicular às camadas adjacentes. O intuito dessa disposição das lâminas é fazer com que o painel tenha melhor estabilidade dimensional e distribuição de resistência.

Os painéis compensados podem ser utilizados na indústria moveleira, na produção de embalagens e também na construção civil, onde são utilizados para montagem de formas para concreto e, em alguns países, no sistema *Wood Frame*. Nesse sistema, os painéis são utilizados para o fechamento de paredes, teto e piso juntamente com outros elementos isolantes, conferindo assim, ótimo isolamento termo acústico para as construções.

### 2.3.2 Painel OSB

Dentre os painéis de madeira reconstituída estão também os painéis OSB (*Oriented Strand Board*), que ganharam o mercado a partir da década de 80, nos Estados Unidos, Canadá e países da Europa (IWAKIRI, 2005).

Esse tipo de painel é produzido com partículas de madeira finas e longas, denominadas *strand*, com a incorporação de resina e prensagem a alta temperatura. Durante o processo produtivo, as partículas são orientadas em camadas, geralmente três, onde as partículas do centro são dispostas perpendiculares às das faces. A geometria e o tipo de disposição das partículas conferem aos painéis OSB características positivas quanto à resistência à flexão estática e estabilidade dimensional (GORSKI et al., 2015; IWAKIRI; MENDES; SALDANHA, 2002).

Segundo Iwakiri, Mendes e Saldanha (2002), esse tipo de painel passou a ocupar um espaço exclusivo dos compensados devido a fatores como: disponibilidade de toras, visto que para produzir os painéis OSB as toras podem ter qualidade inferior, e largura e comprimento das chapas, já que os compensados são limitados ao comprimento da tora.

Os painéis OSB, assim como os compensados, podem ser utilizados em paredes, pisos e forros, no sistema *Wood Frame*, em embalagens e painéis decorativos, além de serem concorrentes diretos dos compensados na construção civil quanto se trata de utilização em instalações provisórias, formas para concreto e tapumes (MATTOS et al., 2008).

## 2.4 Resíduos agroindustriais

O agronegócio e a agroindústria são responsáveis por movimentar grande parte da economia brasileira. Mas, embora tragam inúmeros benefícios, as atividades agroindustriais geram uma considerável quantidade de resíduos durante o processamento e/ou beneficiamento das matérias-primas. Segundo Viana e Cruz (2016), tais resíduos em sua maioria não são reaproveitados, além de não possuírem uma correta destinação, podendo assim, contaminar solos e águas.

Porém, é cada vez maior o número de pesquisas que avaliam a utilização desses resíduos agroindustriais. E dentre os produtos nos quais esses resíduos podem ser utilizados estão os painéis de madeira reconstituída, cuja demanda proveniente dos setores moveleiro e da construção civil vem crescendo. Com isso, aumenta-se a necessidade de matéria-prima para a produção dos painéis, portanto, além de aumentar as áreas de plantio de *Pinus* e

*Eucalyptus*, espécies mais utilizadas atualmente, é necessário buscar novas opções de matéria-prima (FARRAPO et al., 2014).

Diante da crescente procura pelos painéis, da preocupação com meio ambiente e da necessidade de reduzir a utilização da madeira, cresce a busca por materiais que possam atender a substituição parcial ou total da madeira. E os resíduos agroindustriais provenientes de diversas culturas como cana-de-açúcar, casca de arroz, casca de amendoim, milho, sorgo e café estão sendo cada vez mais cotados para essa finalidade (BARBIRATO et al., 2014; CÉSAR et al., 2017; GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2016; MENDES et al., 2012; SCATOLINO et al., 2017).

Segundo Mendes et al. (2010), a aplicação dos resíduos agrícolas na produção de painéis agrega valor ao resíduo, possibilita uma melhor destinação dos mesmos, ajuda a preservar recursos naturais, além de atender à demanda do setor de painéis e reduzir os custos de produção.

## **2.5 PAINEL DE GESSO ACARTONADO**

O gesso acartonado, popularmente chamado de *drywall*, é uma placa formada por gesso e aditivos, recoberta por papel cartão nas duas fases externas. Ele é bastante utilizado na construção civil como forros, divisórias e também como paredes internas. Segundo Oliveira (2016), o gesso acartonado surgiu em 1898 nos Estados Unidos, e passou a ser mais utilizado no pós-guerra em função da sua praticidade, característica esta que o fez ganhar espaço nas construções em países da Europa, no Japão, bem como em seu país de origem. Além das placas padrões existem ainda placas de gesso acartonado que são resistentes ao fogo e à umidade, ampliando assim, sua gama de utilização. Outra característica desse material é o bom isolamento térmico e acústico que ele fornece, fazendo como que ele seja amplamente utilizado para vedação em sistemas construtivos do tipo *Steel Frame*.

Existem pesquisas que buscam avaliar as vantagens e desvantagens da utilização do gesso acartonado em substituição à alvenaria convencional para vedação interna. Oliveira (2016) concluiu por meio dessa comparação que existem vantagens na utilização do sistema *drywall* quando comparado à alvenaria de blocos cerâmicos. De acordo com a autora, o sistema possui uma execução mais rápida e prática e ainda alivia os carregamentos da estrutura. Para a autora, é preciso considerar os diversos aspectos que influenciam e são influenciados por esta escolha, para se obter uma avaliação global do projeto, visto que em seu trabalho as conclusões demonstram apenas as variações referentes à estrutura do edifício.

## **2.6 Propriedades térmicas dos materiais**

### **2.6.1 Transferência de calor**

Segundo Incropera et al. (2007) a transferência de calor pode ser definida como a energia térmica em trânsito devido a diferença de temperatura. Essa diferença é como uma força motriz que leva o calor do meio com maior temperatura ao meio com menor temperatura, buscando uma condição de estabilidade ou equilíbrio térmico entre os meios. Toda vez que existir uma diferença de temperatura entre dois pontos ocorrerá a transferência de calor entre eles (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A transferência de energia térmica ou calor se dá por processos físicos em função do tempo, sendo a grandeza que estima a quantidade de calor que atravessa uma superfície durante um intervalo de tempo chamada de fluxo de calor. A transferência de calor ocorre num processo de “desequilíbrio térmico” medido pela “Taxa de Transferência de Calor” (CALVÃO, 2018).

A quantificação da energia térmica transferida nestes processos é denominada de “temperatura”, ou seja, temperatura é uma grandeza física utilizada para medir o grau de agitação das moléculas dos materiais. Em outras palavras, podemos definir o calor como a energia térmica em trânsito entre materiais ou mesmo dentro de um material com diferentes temperaturas (CALVÃO, 2018).

Quando há diferença de temperatura entre corpos ou mudança de estado físico, haverá transferência de calor ou energia térmica. A diferença de temperatura pode também ocorrer em pontos ou áreas de um mesmo corpo. No primeiro caso, “chama-se essa forma de transferência de calor de troca seca e a energia transmitida de calor sensível, enquanto que a transferência de calor que envolve mudança de estado, chama-se troca úmida e a energia transmitida de calor latente” (RODRIGUES, 2018, p. 3).

Em um mesmo sistema podem coexistir distintas fases ou estados de um material. As mudanças de fase podem ocorrer, devido à mudança nas condições de temperatura e pressão, por evaporação, solidificação, condensação e fusão.

A transferência de calor por trocas secas pode ocorrer por condução, convecção e radiação (LAMBERTS et al., 2005).

### **2.6.1.1 Transferência de calor por condução**

A condução de calor ocorre a níveis de atividade atômicas e moleculares, havendo transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas, através da colisão dessas partículas (INCROPERA et al., 2007). Pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases. Nos líquidos e gases a condução se dá pelo movimento aleatório das moléculas, já nos sólidos, se dá pela combinação da vibração das moléculas, sendo a energia transportada pelos elétrons livres (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Na condução, a energia térmica é transmitida de molécula a molécula pela colisão direta das mesmas, havendo, conseqüentemente, necessidade de um meio material. De acordo com Loureiro (2012), a quantidade de energia que flui através de um corpo depende da constituição desse corpo, de suas dimensões, como espessura, e também depende da diferença de temperatura. A propriedade que caracteriza o material quanto ser bom ou mau condutor de calor é denominada de condutividade térmica ( $k$ ).

### **2.6.1.2 Transferência de calor por convecção**

A transferência de calor por convecção ocorre por dois mecanismos combinados, pela condução e pelo movimento macroscópico de um fluido. Ela ocorre quando há uma diferença de temperatura entre uma superfície sólida e um fluido (líquido ou gás) em movimento. A convecção pode ser definida como natural ou forçada. Na convecção forçada o fluxo provém de meios externos como um ventilador, uma bomba ou o vento. Já na convecção natural, o fluxo é induzido por forças de flutuação devido à diferença de densidade causada pela variação de temperatura no fluido (ÇENGEL; GHAJAR, 2012; INCROPERA et al., 2007).

Na convecção ocorre o transporte de massa, ou seja, as partículas em maior estado de agitação possuem menor densidade (ar quente) e por isso sobem, ao passo que as partículas em menor estado de agitação, com maior densidade (ar frio), descem formando um fluxo de correntes ascendente e descendente. De acordo com Barbosa (2018), a grandeza física que caracteriza se o processo convectivo é mais ou menos intenso chama-se coeficiente de trocas térmicas por convecção ( $h_c - W/m^2 \cdot K$ ).

### **2.6.1.3 Transferência de calor por radiação**

A radiação térmica é emitida por materiais cuja temperatura seja superior ao zero absoluto. A emissão dessa energia pode ser atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas de átomos ou moléculas, sendo transportada por ondas eletromagnéticas. Ao contrário dos fenômenos de condução e convecção, a radiação não necessita de um meio para se propagar, podem ocorrer no vácuo (ÇENGEL; GHAJAR, 2012; INCROPERA et al., 2007).

### **2.6.2 Condutividade térmica**

Uma das propriedades mais importantes em um material é a sua condutividade térmica, ela indica a capacidade que o material tem em conduzir calor. Um material cuja condutividade térmica seja elevada é definido como um bom condutor de calor, já os materiais cuja condutividade é baixa, são conhecidos como isolantes térmicos.

Nos materiais de construção, a condutividade térmica é um parâmetro importante, pois influencia na energia associada com o aquecimento e resfriamento dos edifícios.

Outra propriedade importante é a difusividade térmica que representa a velocidade de propagação do calor no meio.

Essas propriedades são importantes para analisar os materiais utilizados na construção civil, uma vez que há uma busca constante de melhoria do conforto térmico das edificações.

### **2.6.3 Conforto térmico**

De acordo com American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE, 1997), o conforto térmico é definido como uma condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico.

As edificações nas quais o homem passa grande parte do seu dia têm uma grande influência na percepção de conforto térmico dos mesmos. Em muitos países as edificações são feitas levando em consideração o conforto térmico de seus ocupantes, porém há países nos quais essa questão não é levada em conta ao desenvolver o projeto de uma construção. Nas últimas décadas a construção civil criou ambientes dependentes exclusivamente de sistemas de ar condicionado ou aquecimento para se obter conforto térmico, culminando assim, em um grande gasto energético (FU et al., 2017). Segundo Brooks, Zhou e Hanna (2018) e Djamila

(2017) esses sistemas consomem a maior parte da energia total gasta de um edifício. E de acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018, o consumo residencial de energia elétrica representou 28,8% do consumo total do país, sendo parte desse consumo devido aos sistemas mecânicos de climatização (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2018).

Segundo com Pargana et al. (2014) o consumo de energia no mundo contribui para a poluição, a degradação ambiental e as emissões de gases de efeito estufa. Ainda segundo os autores, os quatro setores que mais contribuem para o consumo de energia são os setores industrial, predial (residencial/comercial), de transporte e agrícola, sendo uma grande fração desse consumo dedicada à construção e operação de edifícios.

Levando-se em consideração a crise energética e a preocupação com o meio ambiente, faz necessária a busca por materiais de construção que possuam características de isolamento térmico, com o intuito de reduzir o consumo de energia e maximizar o conforto térmico dos ambientes (GORI; ELWELL, 2017). Brooks, Zhou e Hanna (2018) afirmam que os materiais de construção com baixa condutividade térmica podem efetivamente reduzir o calor trocado entre o espaço interno de um edifício e o ambiente externo. Com isso, Gracia et al. (2011) mencionam que os materiais isolantes têm sido amplamente estudados e utilizados para melhorar o comportamento térmico dos edifícios.

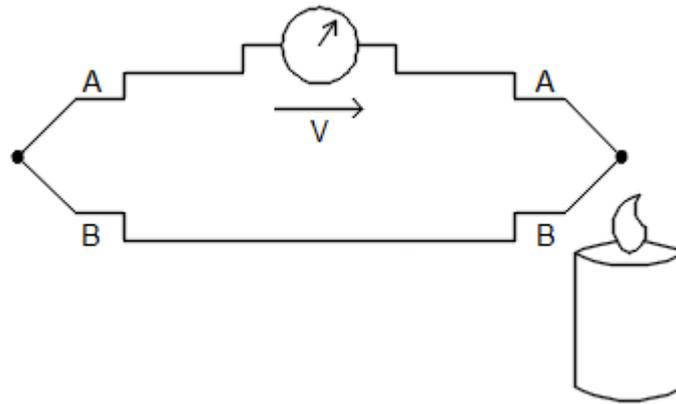
Visto isso, é importante conhecer as propriedades térmicas dos materiais empregados nas construções, para que se consiga aperfeiçoar as trocas de calor nas mesmas, proporcionando um melhor conforto térmico para seus ocupantes.

## **2.7 Sensores de temperatura**

A temperatura é provavelmente uma das grandezas físicas mais comumente medidas na indústria de controle de processos, sendo sua medição, um ponto de interesse na ciência há muitos anos.

Atribui-se a Galileu Galilei a idealização e confecção do primeiro termômetro, posteriormente vários estudiosos fizeram melhorias no conceito e desenvolveram escalas de medição para a temperatura, como as escalas Fahrenheit e Celsius. Já em 1822, Thomas Seebeck, descobriu que a junção de dois fios de metais diferentes gerava uma corrente elétrica no circuito em função da temperatura (RODRÍGUEZ et al., 2007). Desta forma, foi descoberto o termopar, um dos mais importantes sensores de temperatura para aplicações industriais atualmente.

Figura 4 – Efeito Seebeck em um termopar.



Fonte: Adaptado de Rodríguez et al. (2007).

Além dos termopares, existem outros tipos de sensores de temperatura, cujas características variam de acordo com a finalidade dos mesmos. Um exemplo, é o sensor de temperatura LM35. Esse sensor é um circuito integrado com uma voltagem de saída linearmente proporcional à temperatura na escala Celsius. Ele não necessita de calibração externa e proporciona alta precisão na faixa de temperatura de  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , possui um fator de escala de  $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ , o que facilita a obtenção direta da temperatura a partir da voltagem de saída (RODRÍGUEZ et al., 2007).

## 2.8 Controle de temperatura

### 2.8.1 Controlador PID

A introdução de um controlador em um determinado sistema visa a modificação de sua dinâmica, manipulando a relação entrada/saída através da atuação sobre um ou mais dos seus parâmetros, com o objetivo de satisfazer certas especificações com relação a sua resposta (OGATA, 2003).

Apesar dos avanços tecnológicos, os controladores PID, e suas variações, ainda são, extensamente utilizados na indústria, para controlar uma larga variedade de processos. A popularidade de controladores PID pode ser atribuída em parte ao seu desempenho robusto em uma ampla gama de condições de funcionamento e em parte à sua simplicidade de implementação e manutenção, que permite aos engenheiros operá-los de uma forma simples e direta (ARAÚJO, 2007).

A estrutura básica de um PID é composta por três parâmetros: O ganho proporcional –  $k_P$ , a constante de tempo integrativo  $\tau_i$  (ou o ganho integrativo  $k_i$ ), e a constante de tempo derivativo  $\tau_d$  (ou o ganho derivativo  $k_d$ ), que são variados para obter a resposta ideal.

O sistema de malha fechada – PID baseia-se na definição de um set point (valor de trabalho), em conjunto com um sinal de *feedback* (resposta do sistema), podendo ter como variável a temperatura. Através da comparação dos valores de *set point* e *feedback*, será gerado um erro (diferença), que o sistema deverá corrigir (ARAÚJO, 2007).

Para um sistema de controle típico de temperatura, a variável do processo é o parâmetro do sistema que precisa ser controlado – temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). Utiliza-se um sensor para medir a temperatura e fornecer o *feedback* para o sistema de controle. O *set point* é o valor desejado para a variável de processo, por exemplo  $100^{\circ}\text{C}$ . A qualquer momento, a diferença entre a variável de processo e o *set point* é usada pelo algoritmo do sistema de controle (compensador), para determinar a saída desejada do atuador, que por sua vez, irá acionar o sistema (planta). Por exemplo, se a variável de processo “temperatura” medida é de  $80^{\circ}\text{C}$  e o *set point* da temperatura desejada é de  $100^{\circ}\text{C}$ , então, o algoritmo de controle controla o atuador para ligar um aquecedor, fazendo com que o sistema fique mais quente, e haja um aumento na variável de processo “temperatura”, a fim de minimizar o erro.

No controle PID cada ação desenvolve uma função determinada, a ação proporcional busca eliminar as oscilações da variável, tornando o sistema estável, mas devido à presença de um desvio denominado *off-set*, não há garantia de que a variável do processo esteja no valor desejado (*setpoint*). Já a ação integral busca eliminar esse desvio de *off-set*, fazendo com que a variável permaneça próximo ao set-point mesmo que ocorra distúrbios no sistema. Por sua vez, a ação derivativa fornece ao sistema uma ação antecipativa, a fim de evitar que o desvio se torne maior quando o processo se caracteriza por ter uma correção lenta comparada com a velocidade do desvio. Essa ação aumenta a velocidade de resposta do sistema caso a presença do erro seja detectada (FREITAS, 2014).

Para um sistema com resposta lenta como os de controle de temperatura, deve-se utilizar o controlador PID para obter um controle mais rápido e preciso do mesmo.

## 2.9 Arduino

Os microcontroladores são geralmente utilizados na automação e controle de dispositivos com os mais variados níveis de complexidade, podem ser encontrados desde residências até processos industriais. Um exemplo de ferramenta que auxilia nesse controle é

a placa de prototipagem conhecida como Arduino, que possui como uma de suas principais utilizações, a leitura de sensores para uma análise ou para controlar uma interação com o meio.

O Arduino nasceu no Ivrea Interaction Design Institute como uma ferramenta fácil para prototipagem rápida, destinada a estudantes sem formação em eletrônica e programação. Ao atingir uma comunidade mais ampla, mudanças surgiram para que a placa se adaptasse às novas necessidades e desafios. Todas as placas do Arduino são completamente de código aberto, capacitando os usuários a construí-las e adaptá-las às suas necessidades específicas. Ao longo dos anos, o Arduino tem sido o cérebro de milhares de projetos, desde objetos do cotidiano até instrumentos científicos complexos (ARDUINO, 2018).

O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada nos microcontroladores da Atmel, com *hardware* e *software* fáceis de usar e uma ampla disponibilidade de modelos para atender a inúmeras atividades. As placas de Arduino são flexíveis e de fácil manipulação, são capazes de ler entradas e transformá-las em uma saída através de um conjunto de instruções enviados para o microcontrolador na placa, baseada em linguagem C/C++.

A maioria das placas podem ser alimentadas por porta USB, ou através de uma alimentação externa de 6 a 12 V em corrente contínua, sendo a tensão ajustada para 5 V através de um regulador de tensão. As placas de Arduino possuem portas digitais que podem ser utilizadas como entradas ou saídas digitais, além das portas analógicas que podem receber sinais de 0 a 5V, a quantidade de portas varia conforme o modelo de placa (MARTINAZZO; ORLANDO, 2016).

### **3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A preocupação com o conforto térmico das edificações e com o alto consumo de energia gerado para climatizar os ambientes, tem impulsionado pesquisas sobre propriedades térmicas de materiais utilizados nas construções. Sendo assim, a utilização de materiais alternativos que visam melhorar a eficiência das trocas de calor nas edificações é fruto de estudos recentes que têm ganhado destaque em razão dos bons resultados obtidos.

Acredita-se que o presente trabalho poderá contribuir com a determinação de um tamanho mínimo de corpo de prova para analisar propriedades térmicas de diferentes materiais empregados como isolantes térmicos nas construções. Dessa forma, será possível inferir sobre essas propriedades sem que seja necessário ensaiá-las em escala real, reduzindo, por conseguinte, o investimento na pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ABREU, L. B. de et al. Projeto de construção em madeira: centro de informações ao visitante da UFLA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, 2., 2015, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2015. 1 CD-ROM.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE handbook: fundamentals**. New York, 1997. 880 p.

ARAÚJO, F. M. U. **Sistemas de controle**. Natal: Ed. UFRN, 2007.

ARDUINO. **What is Arduino?** Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

BARBIRATO, G. et al. Pannel aglomerado híbrido de casca de amendoim reforçado com partículas de madeira itaúba. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 685-697, jul./set. 2014.

BARBOSA, M. P. **Fenômenos de transporte para bioengenharia: conceitos básicos**. Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema890/aula1.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2018.

BROOKS, A. L.; ZHOU, H.; HANNA, D. Comparative study of the mechanical and thermal properties of light weight cementitious composites. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 159, p. 316-328, 2018.

CALDAS, R. L. et al. Avaliação do ciclo de vida energético (acve) e do desempenho térmico de uma habitação de light steel framing com o uso de diferentes tipos de isolantes térmicos. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 11, n. 2, p. 1-14, dez. 2015/jun. 2016.

CALVÃO, A. O. **Termofísica: física livre**. Disponível em: <<http://www.fisicalivre.com.br>>. Acesso em: 10 ago. 2018.

CASTRO, T. R. de; MARTINS, C. H. Avaliação da adição de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em argamassas mistas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 137-151, jul./set. 2016.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 904 p.

CÉSAR, A. A. S. et al. Transforming rice husk into a high-added value product: potential for particle board production. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 303-313, 2017.

DJAMILA, H. Indoor thermal comfort predictions: selected issues and trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 74, p. 569-580, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário estatístico de energia elétrica**. Brasília, DF, 2018.

EUGÊNIO, T. M. C. **Propriedades físicas, mecânicas e térmicas de argamassas de revestimento com utilização de resíduos de pneu**. 2016. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

FARRAPO, C. L. et al. Utilização da madeira de *Pterocarpus violaceus* na produção de painéis aglomerados. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 103, p. 329-335, set. 2014.

FAZIO, M.; MOFFET, M.; WODEHOUSE, L. **A história da arquitetura mundial**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 616 p.

FREITAS, C. M. **Controle PID em sistemas embarcados**. 2014. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/controle-pid-em-sistemas-embarcados/>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

FU, L. et al. A calcium chloride hexahydrate/expanded perlite composite with good heat storage and insulation properties for building energy conservation. **Renewable Energy**, Oxford, v. 114, p. 733-743, 2017.

GORI, V.; ELWELL, C. A. Characterization of the thermal structure of different building constructions using in-situ measurements and Bayesian analysis. **Energy Procedia**, New York, v. 132, p. 537-542, 2017.

GORSKI, L. et al. Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) de *Eucalyptus benthamii* e *Pinus* spp. em diferentes combinações de camadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 106, p. 367-375, 2015.

GRACIA, A. et al. Dynamic thermal performance of alveolar brick construction system. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 52, p. 2495-2500, 2011.

GUIMARÃES JUNIOR, J. B. et al. Inclusão de resíduo da cultura de sorgo em painéis aglomerados de eucalipto. **Brazilian Journal of Forestry Research**, Colombo, v. 36, n. 88, p. 435-442, out./dez. 2016.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 6. ed. New York: J. Wiley, 2007. 997 p.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: Ed. FUPEF, 2005. 254 p.

IWAKIRI, S.; MENDES, L. M.; SALDANHA, L. K. Produção de chapas de partículas orientadas “OSB” de *Eucalyptus grandis* com diferentes teores de resina, parafina e composição em camadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 89-94, 2002.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 p. Tese (Livre Docência)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KAWANAMI, S. **Patrimônios mundiais da Unesco no Japão**. Disponível em: <<https://www.japaoemfoco.com/patrimonios-mundiais-pela-unesco-no-japao/>>. Acesso em: 10 set. 2018.

LAMBERTS, R. et al. **Desempenho térmico de edificações**. Florianópolis: Ed. UFSC, 2005. 46 p. Apostila.

LOUREIRO, E. **Transmissão de calor**. Recife: POLI/UPE, 2012. Disponível em: <[http://www.eduloureiro.com.br/index\\_arquivos/taula1.pdf](http://www.eduloureiro.com.br/index_arquivos/taula1.pdf)>. Acesso em: 10 ago. 2018.

MARTINAZZO, C. A.; ORLANDO, T. Comparação entre três tipos de sensores de temperatura em associação com arduino. **Perspectiva**, Erechim, v. 40, n. 151, p. 93-104, set. 2016.

MATOS, S. R. C.; GUIMARÃES, C. C. Utilização da cinza da casca do coco verde como substituição parcial do cimento portland em argamassas. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 13, n. 1, p. 251-269, jan./jun. 2017.

MATTOS, R. L. G. et al. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, mar. 2008.

MENDES, R. F. et al. Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 161-170, jan./mar. 2012.

MENDES, R. F. et al. Efeito da incorporação de casca de café nas propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 610-617, maio/jun. 2010.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Sistema construtivo em *wood frame* para casas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 143-156, jul./dez. 2010.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 788 p.

OLIVEIRA, N. **Análise estrutural comparando a aplicação da alvenaria de blocos cerâmicos e drywall como sistemas de vedação vertical interna de uma edificação**. 2016. 95 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

PARGANA, N. et al. Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 82, p. 466-481, 2014.

RODRIGUES, E. **Conforto térmico das construções**. Disponível em: <[https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/c/c6/Transmissao\\_de\\_Calor\\_em\\_Edificacoes.pdf](https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/c/c6/Transmissao_de_Calor_em_Edificacoes.pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2018.

RODRÍGUEZ, E. J. A. et al. Medición de temperatura: sensores termoeléctricos. **Scientia et Technica**, Pereira, año 13, n. 34, p. 1-6, may 2007.

SCATOLINO, M. V. et al. Eucalyptus wood and coffe parchment for particleboard production: physical and mechanical properties. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 2, p. 139-146, mar./abr. 2017.

VIANA, L. G.; CRUZ, P. S. Reaproveitamento de resíduos agroindustriais. In: CONGRESSO BAIANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 4., 2016, Cruz das Almas. **Anais...** Cruz das Almas, 2016. p. 1-3.

VILELA, A. P. **Utilização da borracha de pneu para produção de painéis MDP e cimento-madeira**. 2016. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

VIVAN, A. L.; PALIARI, J. C.; NOVAES, C. C. Vantagem produtiva do sistema *light steel framing*: da construção enxuta à racionalização construtiva. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13., 2010, Canela. **Anais...** Canela, 2010. Disponível em: <<https://www.aea.com.br/blog/vantagem-produtiva-do-sistema-light-steel-framing-da-construcao-enxuta-a-racionalizacao-construtiva/>>. Acesso em: 10 set. 2018.

WIKI CULTURAMA. **O Palácio de madeira do Tsar Alexei Mikhailovich**: incrível mundo. Disponível em: <<https://educavita.blogspot.com/2015/12/o-palacio-de-madeira-do-tsar-alexei.html>>. Acesso em: 10 set. 2018.

## SEGUNDA PARTE – ARTIGO

**PROTOCOLO PARA ENSAIOS DE ABSORÇÃO TÉRMICA DE MATERIAIS  
ALTERNATIVOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL****RESUMO**

Os materiais empregados nas construções têm influência direta no desempenho térmico das mesmas. E, nos últimos anos, os sistemas de climatização de ambientes têm sido cada vez mais utilizados, culminado em um grande gasto energético nas edificações. Sendo assim, o estudo das propriedades térmicas de materiais alternativos, com características isolantes, busca contribuir para a implantação de edifícios termicamente eficientes. Neste contexto, este trabalho visou definir um protocolo de ensaio térmico para painéis de madeira reconstituída e gesso acartonado (*drywall*), a fim de determinar um tamanho mínimo de corpo de prova que possa garantir com segurança a determinação das propriedades térmicas de absorção e transferência do calor entre ambientes, quando esses materiais são utilizados como isolantes térmicos em edificações. Foram utilizados painéis comerciais de gesso acartonado, compensado e OSB (*Oriented Strand Board*). Foi realizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos painéis. Foram determinadas as densidades dos painéis, que foram submetidos a ensaio térmico em um conjunto de câmaras térmicas com temperatura controlada por um controlador PID. Com as informações obtidas no ensaio térmico, foi calculada a condutividade térmica dos painéis. Pode-se concluir que para atender o valor de condutividade térmica de  $0,35 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  para o gesso acartonado, o tamanho do corpo de prova deve ficar entre  $20 \times 20 \text{ cm}$  e  $30 \times 30 \text{ cm}$ , mesmo intervalo encontrado para os painéis compensados, que possuem condutividade térmica de  $0,15 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ . Já para o painel OSB, cuja condutividade é de  $0,14 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , o tamanho do corpo de prova deve estar entre  $10 \times 10 \text{ cm}$  e  $20 \times 20 \text{ cm}$ .

**Palavras-chave:** Desempenho térmico. Isolantes. Painéis de madeira. Gesso acartonado. Gasto energético.

## PROTOCOL FOR THERMAL ABSORPTION TESTS ON ALTERNATIVE MATERIALS FOR CIVIL CONSTRUCTION

### ABSTRACT

The materials used in buildings have a direct influence on their thermal performance. And, in recent years, room air conditioning systems have been increasingly used, culminating in a large energy expenditure in buildings. Thus, the study of the thermal properties of alternative materials with insulating characteristics, can contribute to the implementation of thermally efficient buildings. In this context, this work aimed to define a thermal test protocol for reconstituted wood panels and drywall to determine a minimum sample size that ensures the determination of the thermal absorption and heat transfer properties between environments when these materials are used as thermal insulators in buildings. We used commercial plasterboard, plywood, and OSB (Oriented Strand Board) panels. We performed scanning electron microscopy (SEM) of the panels. We determined the densities of the panels, which were subjected to thermal testing in a set of thermal chambers with temperature controlled by a PID controller. We calculated the thermal conductivity of the panels based on the information obtained with the thermal test. In conclusion, to meet the thermal conductivity value of 0.35 W/m°C for drywall, the size of the specimen must be between 20x20cm and 30x30cm, the same range found for plywood, which has a thermal conductivity of 0.15 W/m°C. As for the OSB panels, whose conductivity is 0.14 W/m°C, the size of the specimen must be between 10x10cm and 20x20cm.

**Keywords:** Thermal performance. Insulating. Wood panels. Drywall. Energy expenditure.

## 1 INTRODUÇÃO

O conforto térmico em construções gera grande interesse em diversas áreas, como arquitetura, engenharia civil e zootecnia. Em alguns países, os projetos de edificações são elaborados levando em consideração este aspecto para conferir maior bem-estar aos seus ocupantes. As trocas de calor são otimizadas, através de aberturas para ventilação mais eficientes, e também pela utilização de materiais isolantes nas paredes e teto, por exemplo. Por outro lado, em países como o Brasil, a construção convencional pouco adota estratégias de conforto térmico levando em conta as propriedades dos materiais utilizados como revestimentos.

Nas últimas décadas a construção civil criou ambientes dependentes exclusivamente de sistemas de ar condicionado ou aquecimento para obter uma sensação térmica agradável, culminando assim, em um grande gasto energético, uma vez que, esses sistemas consomem a maior parte da energia total gasta de um edifício (BROOKS; ZHOU; HANNA, 2018; DJAMILA, 2017; FU et al., 2017).

Com o intuito de reduzir o consumo de energia e maximizar a eficiência das trocas de calor entre o espaço interno de um edifício e o ambiente externo, cresce a busca por materiais de construção que possuam características de isolamento térmico, ou seja, materiais com baixa condutividade térmica, a serem utilizados para melhorar o comportamento térmico dos edifícios (BROOKS; ZHOU; HANNA, 2018; GORI; ELWELL, 2017; GRACIA et al., 2011).

Materiais ainda pouco utilizados nas construções brasileiras, como os painéis compensados e OSB, e o gesso acartonado (*drywall*), podem conferir às edificações trocas de calor eficientes, proporcionando aos usuários uma maior satisfação com o ambiente. Além disso, os sistemas onde estes materiais são mais empregados, *Wood Frame* e *Steel Frame*, trazem ganhos do ponto de vista da sustentabilidade, visto que, geram uma quantidade de resíduos menor que as construções convencionais (OLIVIERI et al., 2017; SANTOS et al., 2018).

Mediante o exposto, há grande interesse em examinar diferentes materiais com propriedades termicamente isolantes, para melhorar a eficiência energética das construções. Contudo, tal análise necessita, preferencialmente, de uma edificação real, o que demanda grande volume financeiro às pesquisas. Logo, faz-se mister estabelecer um protocolo de ensaio dos materiais em escala reduzida, possibilitando depreender o comportamento destes em uma situação real.

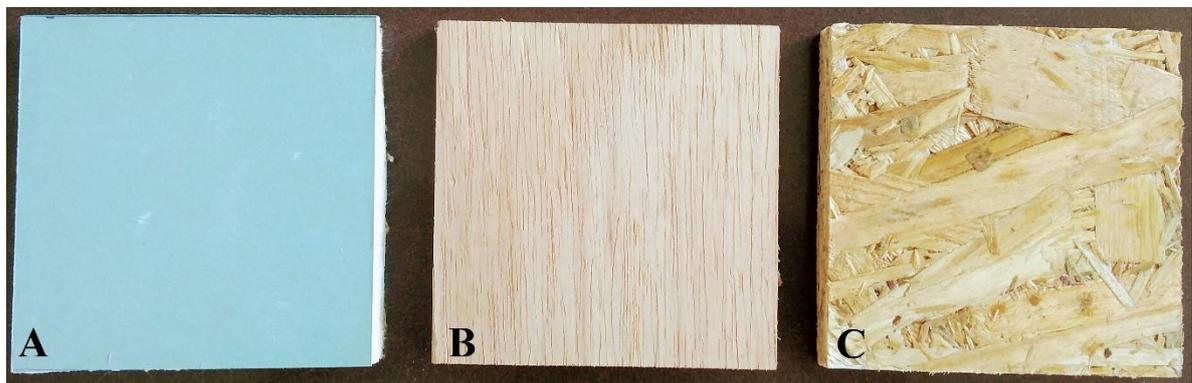
Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar um estudo comparativo entre tamanhos diferentes de corpos de prova; de materiais variados, com o propósito de determinar um tamanho mínimo de corpo de prova que possa retratar com exatidão as propriedades térmicas de absorção e transferência do calor entre os ambientes, quando esses materiais são utilizados como isolantes térmicos em edificações.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Para a análise de desempenho térmico foram utilizados painéis comerciais de gesso acartonado (*Drywall*), compensado e OSB com espessuras de 12,5mm, 10,5mm e 13mm respectivamente, conforme Figura 1.

Figura 1 – Painéis utilizados para a análise de desempenho térmico. A) Gesso acartonado (*Drywall*); B) Compensado; C) OSB.



Fonte: Do autor (2019).

Foram definidos 12 tratamentos de acordo com a dimensão e o tipo de painel, conforme Quadro 1.

Quadro 1 – Tratamentos classificados por dimensões e material de cada painel.

Dimensões	Painel de gesso acartonado ( <i>Drywall</i> )	Painel compensado	Painel OSB
5x5cm	T1-D	T1-C	T1-O
10x10cm	T2-D	T2-C	T2-O
20x20cm	T3-D	T3-C	T3-O
30x30cm	T4-D	T4-C	T4-O

Fonte: Do autor (2019).

## 2.2 Determinação de propriedades físicas

As metodologias utilizadas para a determinação das propriedades físicas dos painéis estão expostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Análises físicas e metodologias que serão aplicadas.

Análise física	Metodologia
Densidade – OSB	EN 323 (BRITISH STANDARD - BS, 1993)
Densidade – Compensado	NBR 9485 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2011)
Densidade – Drywall	NBR 14715-2 (ABNT, 2010b)

Fonte: Do autor (2019).

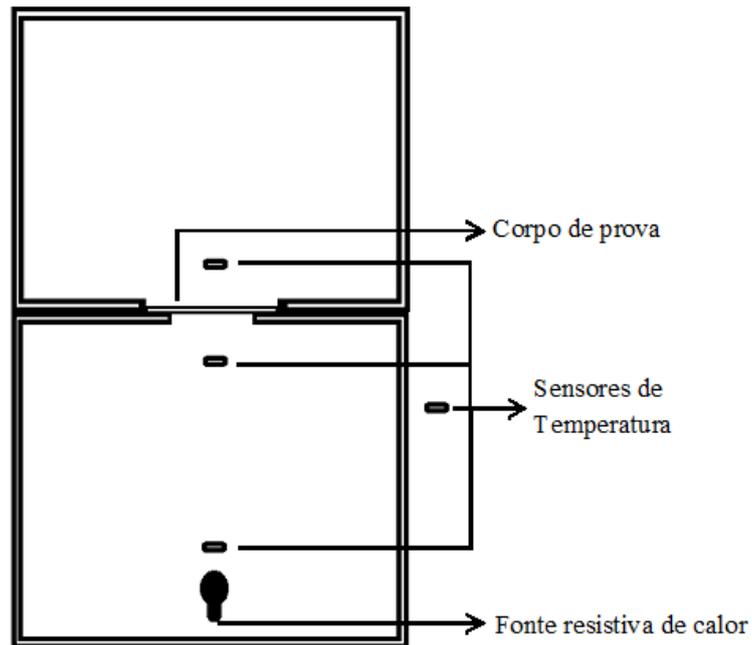
## 2.3 Montagem do experimento

Foram utilizados módulos semelhantes aos desenvolvidos por Carvalho (2012) de dimensões de 600 mm de aresta e 15 mm de espessura. Os módulos são construídos de painéis de bagaço de cana, revestidos internamente com uma placa de isopor de 15 mm, coberta por manta aluminizada. Dois módulos foram sobrepostos e, entre eles, foi instalado um porta-amostra de isopor de modo que o calor seja transmitido apenas pelo material em análise (corpo de prova).

Uma fonte de calor resistiva foi instalada no interior do módulo inferior, sendo esta, alimentada por uma fonte de tensão controlada por uma malha fechada PID, ligada a um microcontrolador. Para a aquisição das temperaturas foram utilizados sensores de temperatura conectados a um sistema de aquisição de dados.

A Figura 2 mostra um diagrama do conjunto dos módulos, com a disposição dos sensores, da fonte resistiva e do corpo de prova.

Figura 2 - Diagrama do conjunto de câmaras térmicas.

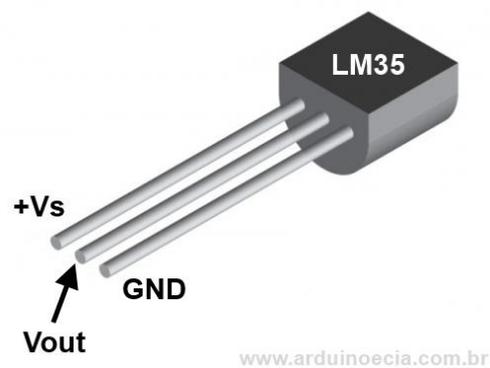


Fonte: Eugênio (2016).

### 2.3.1 Controlador PID com Arduino

Para medir as variações de temperatura no sistema foram utilizados sensores do tipo LM35 representado na Figura 3.

Figura 3 – Sensor LM35.



Fonte: Arduino e Cia (2013).

Os pinos +Vs, GND e Vout foram conectados na placa de Arduino. Conforme a temperatura medida na superfície do sensor varia, a tensão de saída (Vout) também varia,

sendo assim, pino Vout do sensor foi conectado na entrada analógica do Arduino e a tensão lida no LM35 foi utilizada para calcular a temperatura medida pelo sensor.

O LM35 possui um fator de escala de  $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ , portanto, para obter a temperatura basta multiplicar o valor lido por um fator de escala  $100 \text{ }^\circ\text{C}/\text{V}$ . O sensor LM35 possui uma precisão de  $0,5^\circ\text{C}$ .

O calor que incidiu sobre a amostra do material em análise foi fornecido por uma lâmpada incandescente ligada a uma fonte de tensão controlada por uma malha fechada PID no Arduino. Os parâmetros do PID foram atribuídos por meio de programação no microcontrolador, sendo o setpoint atribuído ao sistema, o máximo valor desejado de temperatura fornecida ao material ( $50^\circ\text{C}$ ).

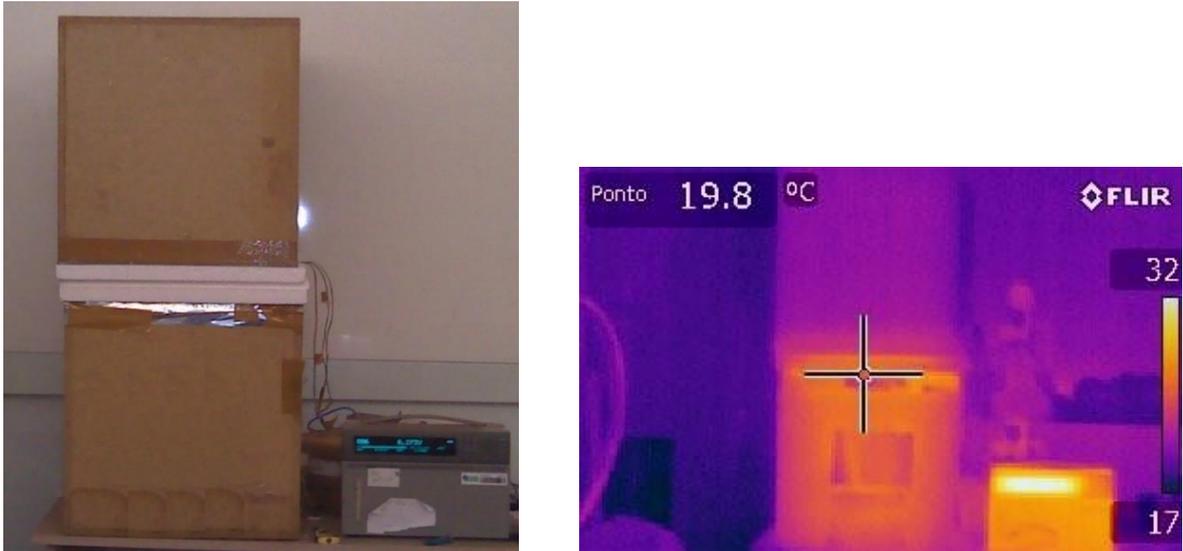
De acordo com o algoritmo de controle PID, e os valores definidos para setpoint e medido para a variável do processo (*feedback*) através do sensor LM35, o Arduino controla a fonte de tensão da lâmpada, fazendo com que a mesma ascenda ou apague de acordo com a diferença encontrada entre o setpoint e o feedback do sistema. Dessa forma, a temperatura que atinge a parte inferior da amostra se mantém a mais constante possível devido à atuação do PID.

## 2.4 Aquisição dos dados

O sistema de aquisição de dados foi programado antes de iniciar cada uma das coletas. Foram definidos o nome do arquivo, o intervalo entre as aquisições (12s) e o número de aquisições (1000 leituras), totalizando assim, 200 minutos para cada um dos ensaios. Após a programação do sistema, a lâmpada foi ligada, o painel em seu respectivo porta-amostra e os sensores de temperatura foram posicionados e iniciou-se as leituras dos sensores. No fim de cada ensaio, os dados coletados foram recolhidos para análise posterior.

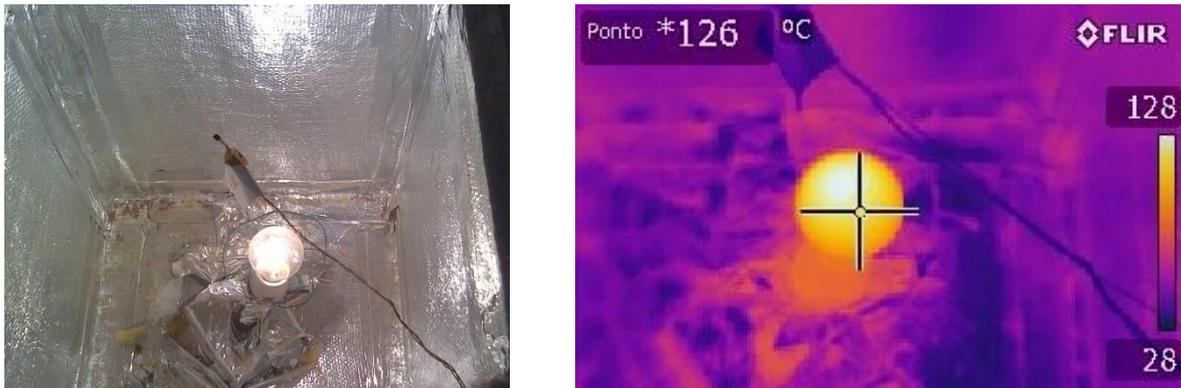
Utilizando uma câmera termográfica da marca FLIR, foram feitas imagens do conjunto para verificar possível dissipação de calor por outros locais, que não seja a amostra.

Figura 4 - Conjunto da câmara térmica.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 5 - Lâmpada no interior do módulo inferior.



Fonte: Do autor (2019).

De acordo com a Figura 4, na imagem termográfica nota-se que o conjunto estava com um bom isolamento para a realização dos ensaios. A temperatura média no exterior do porta-amostra era de 19,8°C. Já a Figura 5, apresenta a temperatura média da lâmpada instalada no interior do módulo inferior do conjunto.

## 2.5 Determinação de propriedades térmicas

Os painéis foram analisados quanto à diferença de temperatura entre as faces inferior e superior, quanto à sua condutividade térmica e resistência térmica.

A diferença de temperatura entre as faces foi obtida pela medição dos sensores de temperatura, e essa diferença foi utilizada para a determinação da condutividade térmica do material.

O fluxo de calor  $Q$  por condução através de um corpo de prova de espessura  $e$  e área  $A$ , em regime permanente, sujeita a uma diferença de temperatura  $\Delta T$  entre as faces, é calculado segundo a NBR 15220-4 (ABNT, 2005c) pela expressão:

$$Q = \frac{\lambda A}{e} \Delta T \quad (W) \quad (1)$$

Onde  $\lambda$  é a condutividade térmica do material.

Portanto, reescrevendo a equação tem-se que a condutividade térmica do material é:

$$\lambda = \frac{Q/A}{\Delta T/e} \quad (W/(m \cdot K)) \quad (2)$$

De acordo com o estudo feito por Eugênio (2016), o termo  $Q/A$ , pode ser representado como radiação por medida de área [ $W/m^2$ ], valor cuja face inferior do material foi exposta devido à presença da lâmpada no módulo de ensaio. Esse valor foi obtido por um medidor de radiação (Figura 10). Portanto, a condutividade térmica foi calculada utilizando a equação 3.

$$\lambda = \frac{P \cdot e}{\Delta T} \quad (W/(m \cdot ^\circ C)) \quad (3)$$

Em que:

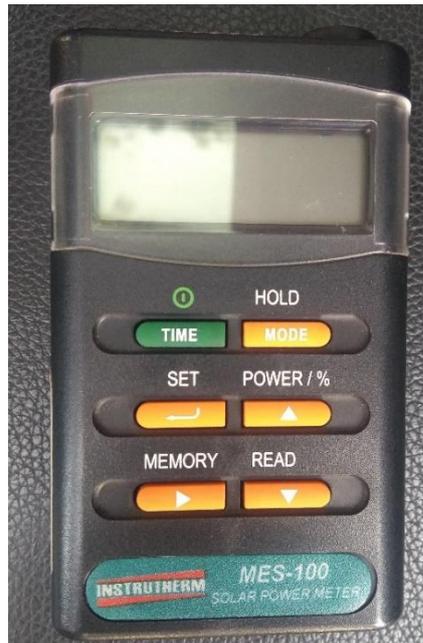
$\lambda$  – Condutividade térmica [ $W/m \cdot ^\circ C$ ];

$P$  – Radiação por medida de área [ $W/m^2$ ];

$e$  – Espessura do corpo de prova [m];

$\Delta T$  – Variação de temperatura [ $^\circ C$ ];

Figura 6 - Medidor de radiação.



Fonte: Do autor (2019).

Outra característica importante é a resistência térmica do material, que indica a resistência da parede contra a condução de calor. Segundo a NBR 15220-1 (ABNT, 2005a, p. 2), a resistência térmica é: “O quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário”. Sendo a densidade de fluxo de calor  $q$ , expressa pelo quociente do fluxo de calor  $Q$  pela área da superfície  $A$ .

$$R = \frac{\Delta T}{Q/A} \quad ((m^2 \cdot ^\circ C)/W) \quad (4)$$

Manipulando as equações (2) e (4), tem-se resistência térmica como:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad ((m^2 \cdot ^\circ C)/W) \quad (5)$$

Assim, se o material for um bom isolante, ou seja, possuir baixa condutividade térmica, a resistência contra a condução de calor será elevada.

## 2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os painéis foram submetidos à microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural (LME), situado no Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras.

## 2.7 Análise estatística

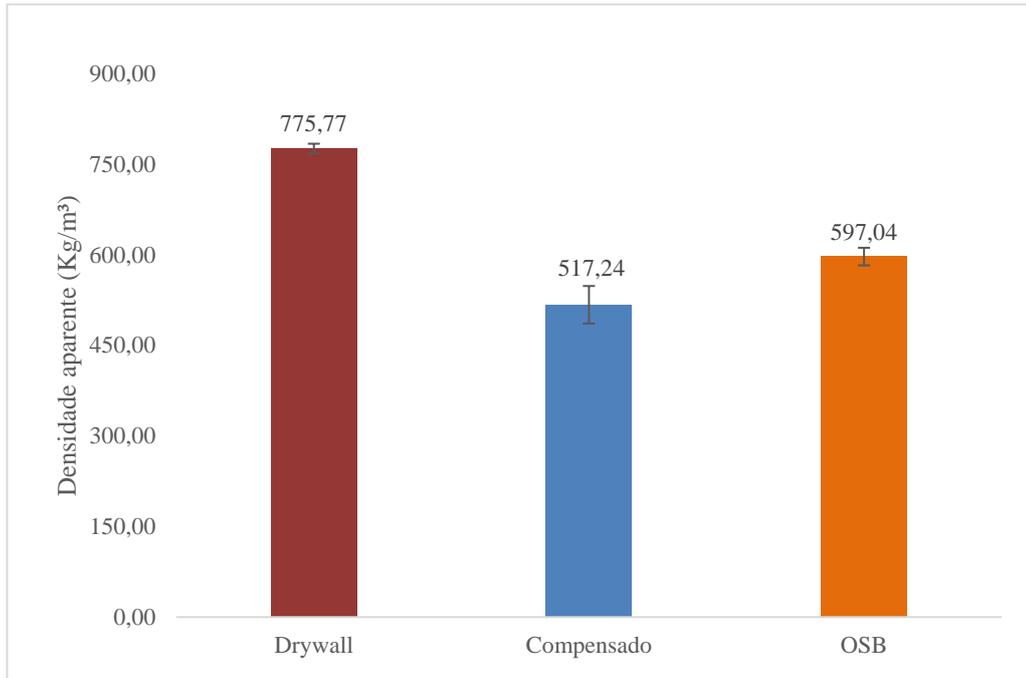
O delineamento experimental foi inteiramente casualizado. Utilizou-se a estatística de Modelos Lineares Generalizados (Generalized Linear Model – GLM) para a variável condutividade, na qual a melhor distribuição de probabilidade que se ajustou a essa variável foi a distribuição gama com função de ligação inversa (*inverse*) (CORDEIRO; DEMÉTRIO, 2008; TURKMAN; SILVA, 2019). Foi realizada a análise de *deviance* da variável em esquema fatorial 3x4 (três materiais e quatro tamanhos).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização física dos painéis – Densidade aparente dos painéis

No Gráfico 1 observam-se as médias de densidade aparente dos painéis utilizados no estudo.

Gráfico 1 – Densidade média aparente dos painéis.



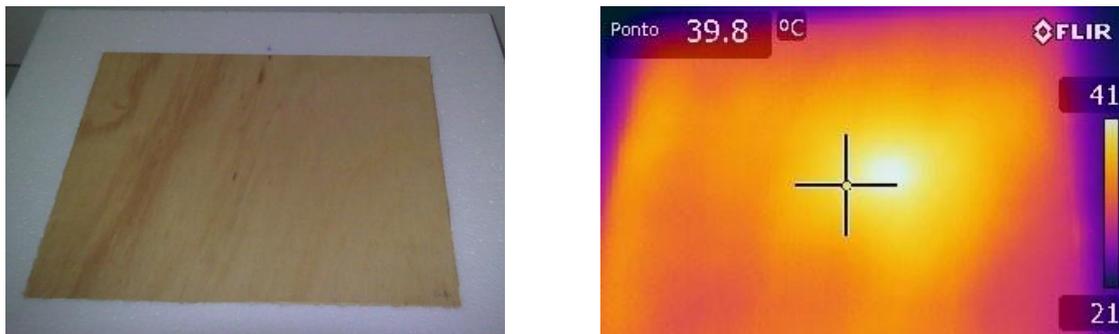
Fonte: Do autor (2019).

Observou-se que a densidade média para os painéis de gesso acartonado (*Drywall*) foi de 775,77Kg/m<sup>3</sup>, valor dentro do intervalo fornecido pela norma NBR 14715-1 (ABNT, 2010a). Segundo a mesma, a densidade superficial de massa para os painéis de 12,5mm de espessura varia de 8,0 a 12,0 Kg/m<sup>2</sup> (640-960 Kg/m<sup>3</sup>). O painel compensado apresentou densidade média de 517,24Kg/m<sup>3</sup> enquadrando-se na faixa de 450-550 Kg/m<sup>3</sup> encontrada na NBR 15220-2 (ABNT, 2005b). Já o painel OSB, que se enquadra nos painéis de média densidade, pode apresentar massa específica entre 590-800 Kg/m<sup>3</sup>, segundo Iwakiri (2005). Sendo assim, o valor médio de 597,04Kg/m<sup>3</sup>, pode ser considerado satisfatório para o respectivo painel.

### 3.2 Caracterização térmica dos painéis

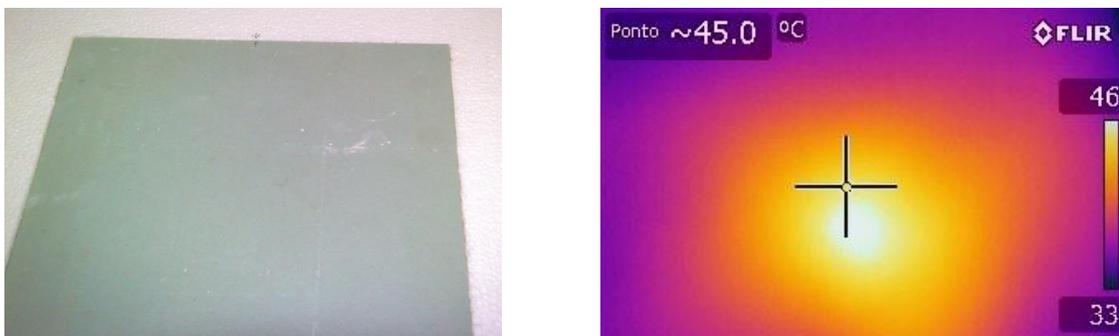
Os painéis submetidos ao ensaio térmico foram verificados quanto à distribuição de calor na superfície superior. Para isso, contou-se com o auxílio de uma câmera termográfica. As Figuras 7, 8 e 9 apresentam as imagens termográficas dessa distribuição de calor nas amostras.

Figura 7 – Imagem real e termográfica do painel compensado 30x30cm.



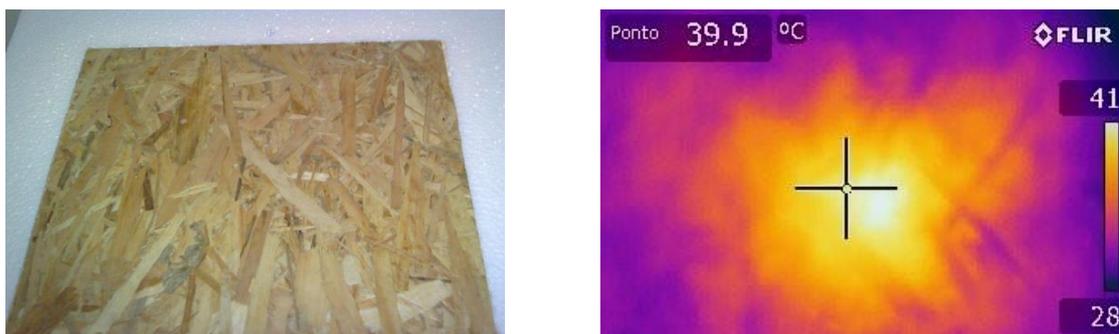
Fonte: Do autor (2019).

Figura 8 - Imagem real e termográfica do painel de gesso acartonado (*Drywall*) 30x30cm.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 9 - Imagem real e termográfica do painel OSB 30x30cm.



Fonte: Do autor (2019).

A distribuição de calor em todos os painéis submetidos ao ensaio deu-se do centro para as bordas, conforme observado nas imagens termográficas acima. Infere-se, portanto, que houve homogeneidade no comportamento de distribuição de calor através das amostras, independentemente do tipo de material constituinte dos painéis.

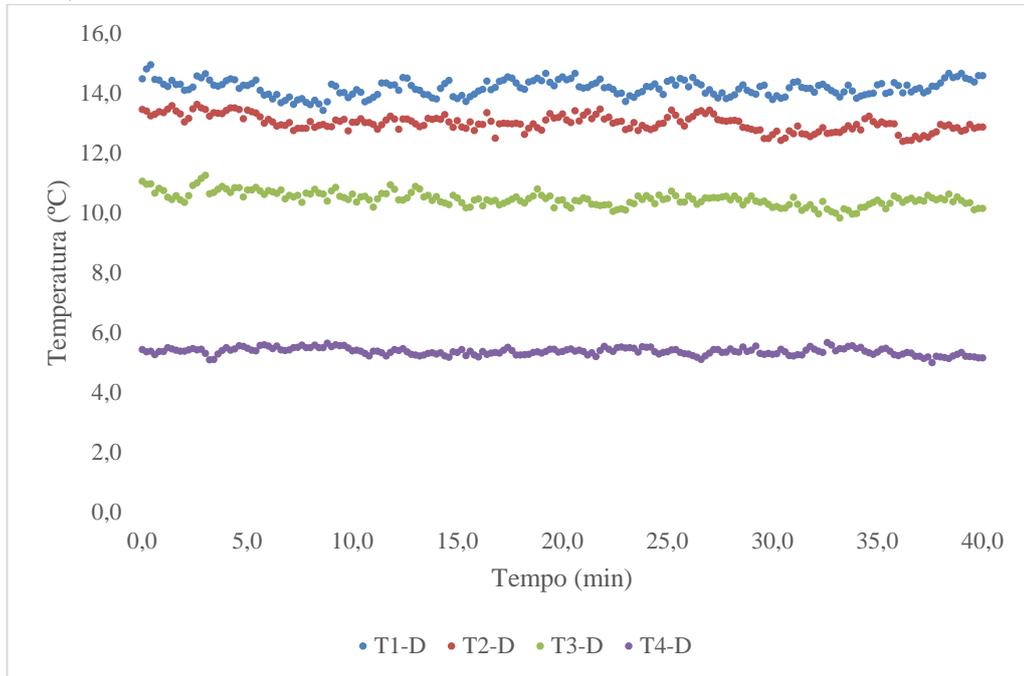
### 3.2.1 Mensuração das temperaturas

Para o cálculo das propriedades térmicas dos painéis foram utilizadas as temperaturas após a estabilização dos valores medidos pelos sensores no módulo superior, desta maneira, foram utilizadas as últimas 200 leituras de cada ensaio.

Para todos os tratamentos, a temperatura média do módulo inferior ficou próxima a 50°C, valor pré-definido para *setpoint*.

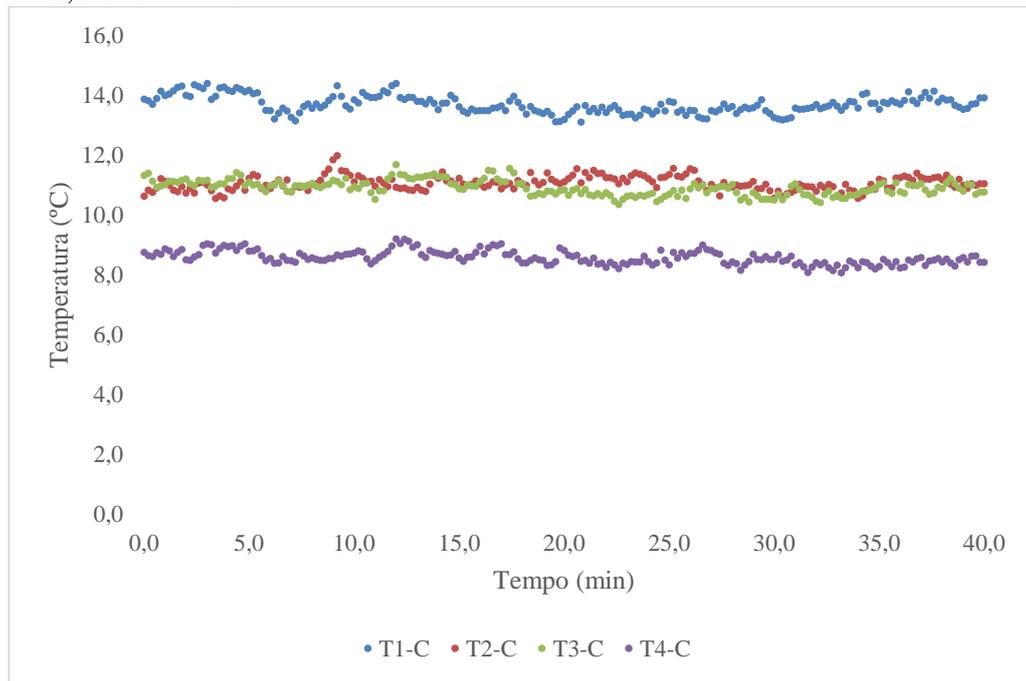
Nos Gráficos 2 a 4 estão apresentadas as curvas de diferença de temperatura entre as faces inferior e superior dos painéis em função do tempo de ensaio.

Gráfico 2 – Curva de variação de temperatura em função do tempo para os tratamentos T1-D, T2-D, T3-D e T4-D.



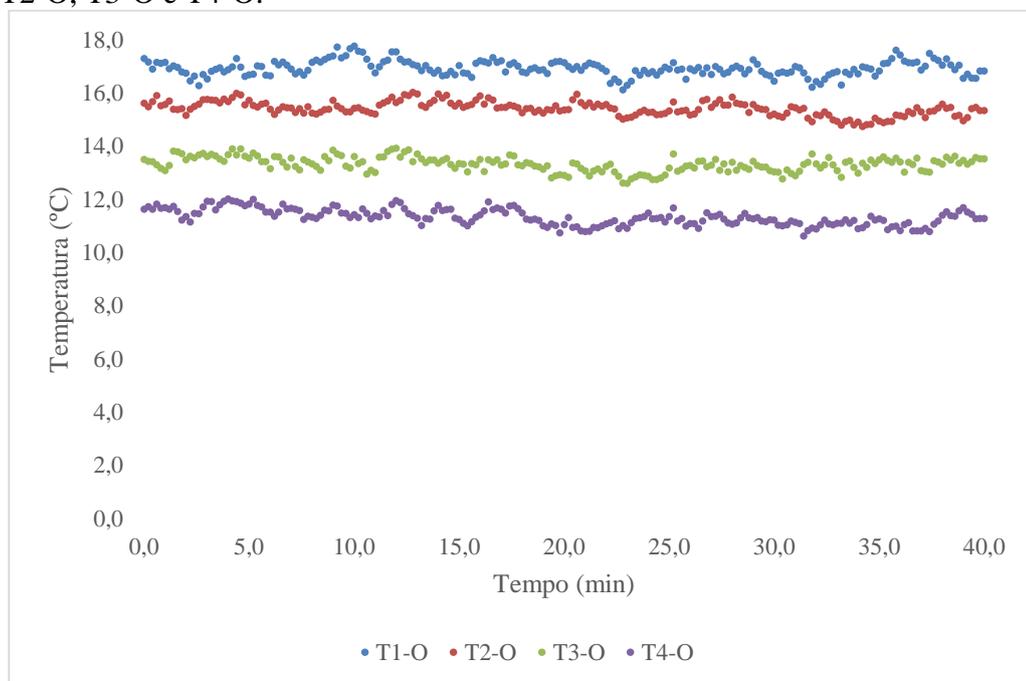
Fonte: Do autor (2019).

Gráfico 3 – Curva de variação de temperatura em função do tempo para os tratamentos T1-C, T2-C, T3-C e T4-C.



Fonte: Do autor (2019).

Gráfico 4 – Curva de variação de temperatura em função do tempo para os tratamentos T1-O, T2-O, T3-O e T4-O.



Fonte: Do autor (2019).

Com o valor obtido pelos sensores posicionados na face superior das amostras, foi calculada a diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) entre a face superior e inferior (valor de *setpoint*) de cada amostra ensaiada, obtendo assim, a quantidade de calor retida por cada material (QUADRO 2).

Quadro 2 – Quantidade média de calor retido nas amostras.

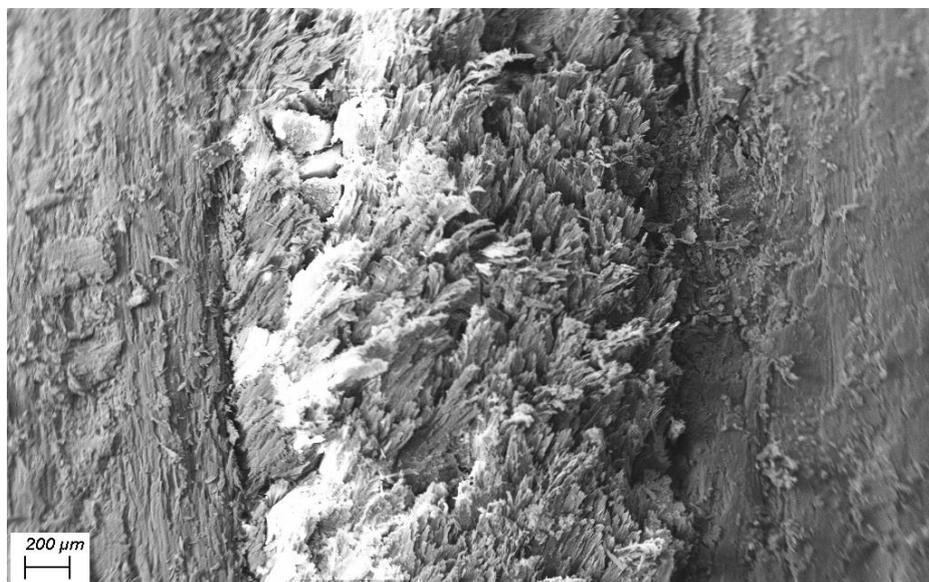
Tipo de painel	Tratamento			
	T1	T2	T3	T4
Gesso acartonado ( <i>Drywall</i> )	14,2°C	13,0°C	10,5°C	5,4°C
Compensado	13,7°C	11,1°C	10,9°C	8,6°C
OSB	16,9°C	15,4°C	13,3°C	11,3°C

Fonte: Do autor (2019).

Notou-se que o painel OSB reteve uma quantidade de calor maior que os demais tipos de painéis, para todos os tratamentos. Segundo Carvalho (2012), uma maior resistência à passagem do calor condiz com a característica de baixa condutividade térmica do material.

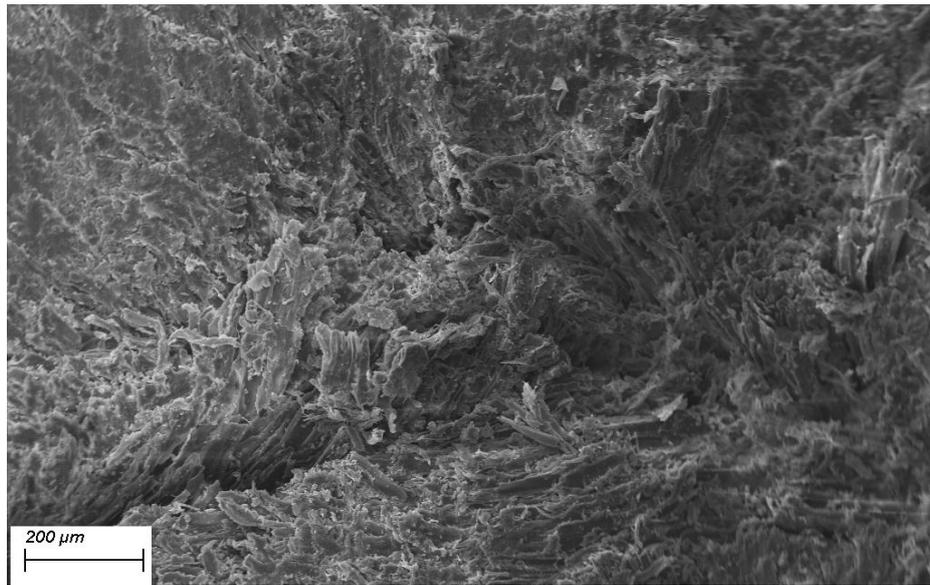
Nas Figuras 10, 11 e 12 estão imagens das microscopias eletrônicas de varredura (MEV) para os painéis compensado, OSB e gesso acartonado (*Drywall*), respectivamente. De acordo com as imagens, nota-se que o painel de gesso acartonado possui uma superfície mais homogênea que os demais painéis.

Figura 10 – Microscopia eletrônica de varredura painel compensado.



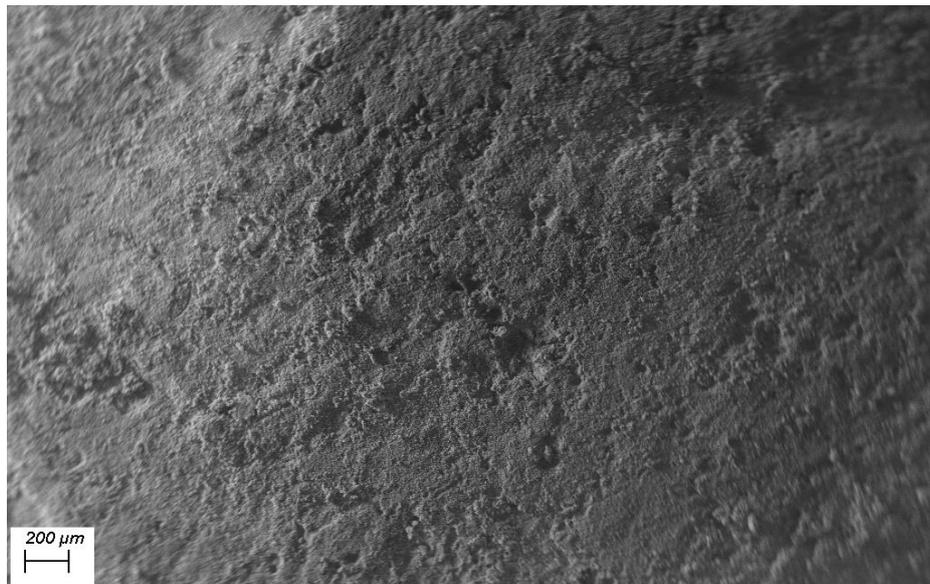
Fonte: Do autor (2019).

Figura 11 – Microscopia eletrônica de varredura painel OSB.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 12 – Microscopia eletrônica de varredura painel de gesso acartonado.



Fonte: Do autor (2019).

Segundo Alves, Pietrobon e Pietrobon (1999, p. 7) “a condutividade térmica diminui com o aumento da quantidade de ar presente no material. Por esta razão, quanto menor a massa específica aparente do material menor a sua condutividade térmica”. Desta forma, observando-se as variações de temperatura, a densidade média aparente de cada material, bem como as imagens fornecidas pela microscopia eletrônica de varredura, é possível inferir que o

painel de gesso acartonado (*Drywall*) possuirá uma condutividade térmica maior dentre os três analisados.

### 3.2.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica dos painéis foi calculada de acordo com a Equação 3, e após sua determinação, foi realizada a análise dos resíduos *deviance* para avaliar o efeito da inclusão de cada termo sobre a redução da *deviance* residual do modelo para a variável condutividade, utilizando-se o programa estatístico R (R CORE TEAM, 2019). Para tanto, utilizou-se a Análise de *Deviance* (ANODEV), com resultados apresentados no APÊNDICE A.

#### 3.2.2.1 Análise da média e do intervalo de confiança

Foram estimados a média e o intervalo de confiança da condutividade térmica para cada tratamento: T1-D, T2-D, T3-D, T4-D; T1-C, T2-C, T3-C, T4-C; T1-O, T2-O, T3-O, T4-O, a 5% de significância.

Os valores de condutividade média para cada tratamento, bem como os limites inferior e superior estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Médias e Intervalo de Confiança para a variável condutividade para as três repetições. (Continua)

Repetição	Tratamento	Condutividade (W/m°C)		
		Média***	Limite Inferior***	Limite Superior***
1	T1-C	0,1202	0,1196	0,1207
	T2-C	0,1353	0,1347	0,1359
	T3-C	0,1356	0,1351	0,1361
	T4-C	0,1687	0,1678	0,1696
	T1-D	0,2865	0,2851	0,2881
	T2-D	0,2917	0,2905	0,2929
	T3-D	0,3435	0,3423	0,3447
	T4-D	0,4131	0,4109	0,4154
	T1-O	0,1284	0,1280	0,1288
	T2-O	0,1309	0,1305	0,1313
	T3-O	0,1415	0,1410	0,1421
	T4-O	0,2060	0,2052	0,2068
2	T1-C	0,0916	0,0913	0,0918
	T2-C	0,1199	0,1195	0,1203
	T3-C	0,1224	0,1220	0,1228
	T4-C	0,1567	0,1561	0,1573

Tabela 2 – Médias e Intervalo de Confiança para a variável condutividade para as três repetições. (Conclusão)

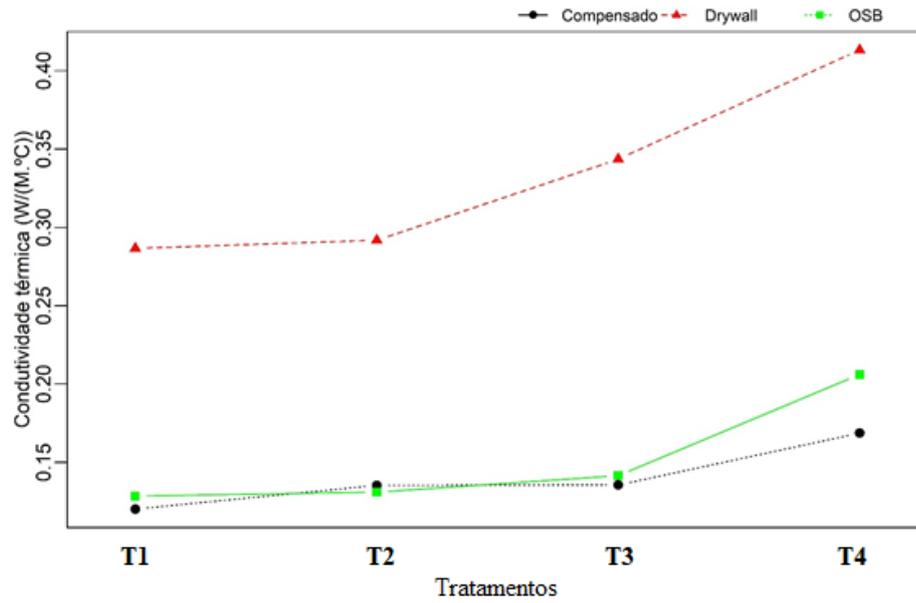
Repetição	Tratamento	Condutividade (W/m°C)		
		Média***	Limite Inferior***	Limite Superior***
2	T1-D	0,2248	0,2243	0,2253
	T2-D	0,2515	0,2507	0,2523
	T3-D	0,3186	0,3176	0,3195
	T4-D	0,3984	0,3966	0,4001
	T1-O	0,1162	0,1159	0,1164
	T2-O	0,1320	0,1316	0,1323
	T3-O	0,1578	0,1574	0,1582
	T4-O	0,1671	0,1665	0,1677
3	T1-C	0,0964	0,0960	0,0968
	T2-C	0,1250	0,1244	0,1256
	T3-C	0,1279	0,1271	0,1287
	T4-C	0,1658	0,1645	0,1671
	T1-D	0,2326	0,4211	0,4251
	T2-D	0,2614	0,2316	0,2336
	T3-D	0,3346	0,2599	0,2629
	T4-D	0,4231	0,3326	0,3367
	T1-O	0,1201	0,1195	0,1205
	T2-O	0,1370	0,1364	0,1376
	T3-O	0,1652	0,1642	0,1662
	T4-O	0,1754	0,1742	0,1766

Obs.: \*\*\*: significativo a 5%; Médias (Norma): 0,15, 0,14 e 0,35 para compensado, osb e drywall, respectivamente; Intervalos de Confiança (Norma): 0,1425-0,1575, 0,1330-0,1470 e 0,3325-0,3675, para compensado, osb e drywall, respectivamente;

Fonte: Do autor (2019).

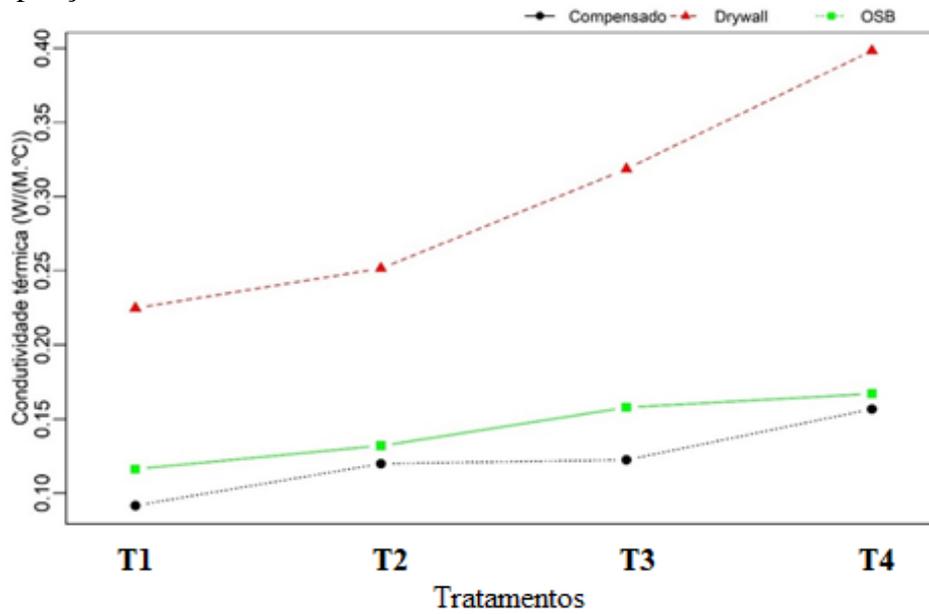
Os Gráficos 9, 10 e 11 apresentam as médias de condutividade térmica dos materiais para as três repetições.

Gráfico 5 – Médias da condutividade térmica dos painéis compensado, OSB e *Drywall* para a 1ª repetição.



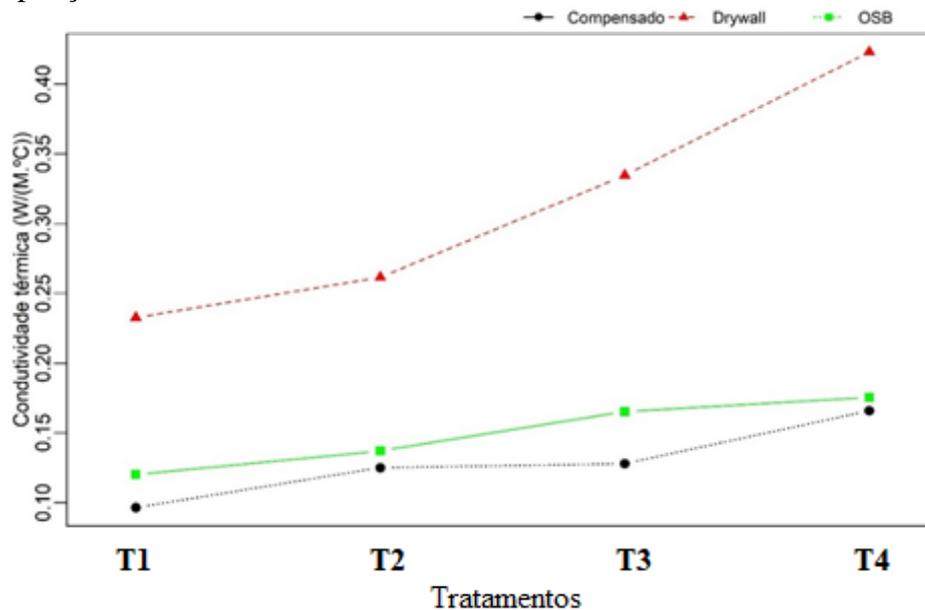
Fonte: Do autor (2019).

Gráfico 6 – Médias da condutividade térmica dos painéis compensado, OSB e *Drywall* para a 2ª repetição.



Fonte: Do autor (2019).

Gráfico 7 – Médias da condutividade térmica dos painéis compensado, OSB e Drywall para a 3ª repetição.



Fonte: Do autor (2019).

Através da análise da Tabela 3 e dos Gráficos 9, 10 e 11, nota-se que uma amostra de tamanho entre 20x20cm e 30x30cm conseguiria representar de maneira confiável a condutividade térmica dos painéis compensados, levando em consideração o valor de 0,15W/m°C fornecido pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005b). Estudos realizados por Demirkir e Colakoglu (2015) e Demirkir et al. (2016), indicam que fatores como densidade da madeira utilizada na produção dos painéis compensados, bem como a temperatura de secagem e o processo de envelhecimento ao qual os painéis são submetidos, causam variações na condutividade térmica destes. De acordo com Demirkir e Colakoglu (2015), o valor médio da condutividade dos painéis compensados produzidos com três tipos diferentes de *Pinus* variou de 0,145W/mK a 0,168W/mK, valores próximos aos obtidos para o painel comercial utilizado nesse estudo.

Assim como os painéis compensados, para os painéis de gesso acartonado (*Drywall*), o tamanho de amostra que conseguiria representar a condutividade de 0,35W/m°C segundo a NBR 15220-2 (ABNT, 2005b), estaria entre 20x20cm e 30x30cm. De acordo com Correia e Souza (2009), que produziram placas de gesso com fibras de celulose através de um novo processo denominado “novogesso”, com o aumento da concentração de fibras de celulose, a densidade e a condutividade térmica das placas diminuíram. As placas foram produzidas nos tamanhos de 20x20cm com 1,5 cm de espessura, de acordo com os resultados, as placas com

adição de 30% de celulose obtiveram o valor de condutividade de 0,40W/m°C, estando próximo aos 0,35W/m°C das placas produzidas pelo método convencional.

Já para os painéis OSB, o tamanho que melhor representaria o material em relação à condutividade térmica de 0,14W/m°C fornecida pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005b) estaria entre 10x10cm e 20x20cm. Existem alguns fatores que podem influenciar na condutividade térmica dos painéis OSB, como porcentagem de adesivo, pressão e tempo de prensagem. Segundo pesquisa realizada por Yapici, Gündüz e Özçifçi (2010), à medida com que esses fatores foram aumentados, a condutividade térmica das amostras também aumentou, obtendo-se valores entre 0,129W/mK e 0,170W/mK.

Visto isso, é importante salientar que as características dos materiais e as variáveis de processo para a produção dos painéis influenciam consideravelmente na condutividade térmica dos mesmos. Para painéis comerciais, acredita-se que não há grande variabilidade no processo produtivo e na densidade dos painéis obtidos, o que indica a possibilidade de obtenção de resultados semelhantes na reprodução de novas pesquisas.

### 3.2.3 Resistência térmica

Com os valores médios das condutividades térmicas foram calculadas as resistências térmicas de cada painel, e seus valores estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 – Resistência térmica média dos painéis. (Continua)

Repetição	Tratamento	Resistência térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)
		Média
1	T1-C	0,0874
	T2-C	0,0776
	T3-C	0,0774
	T4-C	0,0622
	T1-D	0,0436
	T2-D	0,0429
	T3-D	0,0364
	T4-D	0,0303
	T1-O	0,1012
	T2-O	0,0993
	T3-O	0,0919
	T4-O	0,0631
2	T1-C	0,1146
	T2-C	0,0876
	T3-C	0,0858
	T1-C	0,0670

Tabela 3 – Resistência térmica média dos painéis. (Conclusão)

Repetição	Tratamento	Resistência térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)
		Média
2	T1-D	0,0556
	T2-D	0,0497
	T3-D	0,0392
	T4-D	0,0314
	T1-O	0,1119
	T2-O	0,0985
	T3-O	0,0824
	T4-O	0,0778
3	T1-C	0,1089
	T2-C	0,0840
	T3-C	0,0821
	T4-C	0,0633
	T1-D	0,0537
	T2-D	0,0478
	T3-D	0,0374
	T4-D	0,0295
	T1-O	0,1082
	T2-O	0,0949
	T3-O	0,0787
	T4-O	0,0741

Fonte: Do autor (2019).

A resistência térmica indica a eficiência de um material em reduzir a troca de calor entre ambientes com temperaturas diferentes (VALOR-R..., 2019). Conforme observado na Tabela 3, o OSB e o compensado são os painéis que possuem maior resistência térmica, reduzindo assim, de maneira mais efetiva a troca de calor entre os ambientes. Tal fato, pode ser confirmado no Quadro 2, onde é possível notar que a quantidade de calor retido para esses dois tipos de painéis foi maior quando comparada à quantidade de calor retida pelo painel de gesso acartonado.

## 4 CONCLUSÃO

Analisando as diferenças de temperatura entre as faces inferior e superior dos materiais estudados, pôde-se perceber que a maior variação, ou seja, o material que reteve melhor o calor transmitido do módulo inferior para o módulo superior foi o OSB, seguido do compensado e gesso acartonado (*drywall*). Em relação à condutividade térmica calculada para cada tipo de painel, notou-se que para atender de maneira confiável os valores de  $0,14\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ ,  $0,15\text{W/m}^{\circ}\text{C}$  e  $0,35\text{W/m}^{\circ}\text{C}$  fornecido pela norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005b), para os painéis OSB, compensado e gesso acartonado, respectivamente, os tamanhos dos corpos de prova devem ficar entre  $10\times 10\text{cm}$  e  $20\times 20\text{cm}$  para os painéis OSB e entre  $20\times 20\text{cm}$  e  $30\times 30\text{cm}$  para os compensados e gesso acartonado (*drywall*). Como era esperado, aos valores de resistência térmica para os painéis OSB e compensado mostraram que esses são termicamente mais eficientes que o gesso acartonado quanto à função de isolante.

Infere-se, portanto, que através das análises dos resultados não foi possível estipular um tamanho de amostra que contemple todos os materiais. Uma vez que houve variação entre os intervalos de tamanho para cada tipo de painel.

Sendo assim, pesquisas futuras com outros tipos de materiais ainda são necessárias para fornecer maiores informações em relação a determinação do tamanho mínimo das amostras para ensaio das propriedades térmicas.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos às entidades de fomento CNPq, FAPEMIG e CAPES; à Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, S. M.; PIETROBON, C. L. R.; PIETROBON, C. E. Determinação da condutividade térmica de materiais da construção civil e sua variação com umidade e densidade. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., 1999, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 1999. 1 CD-ROM.
- ARDUINO E CIA. **Como usar o Sensor de Temperatura LM35 com Arduino**. 2013. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/pt-br/2013/02/sensor-de-temperatura-lm35-com-arduino.html>>. Acesso em: 10 nov. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9485**: compensado: determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14715-1**: chapas de gesso para drywall, parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, 2010a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14715-2**: chapas de gesso para drywall, parte 2: métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2010b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1**: desempenho térmico de edificações, parte 1: definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: desempenho térmico de edificações, parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-4**: desempenho térmico de edificações, parte 4: medição da resistênciatérmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de Janeiro, 2005c.
- BRITISH STANDARD. **EN 323**: wood-based panels: determination of density. Bruxelas: CEN, 1993.
- BROOKS, A. L.; ZHOU, H.; HANNA, D. Comparative study of the mechanical and thermal properties of lightweight cementitious composites. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 159, p. 316-328, 2018.
- CARVALHO, S. T. M. **Propriedades térmicas do painel aglomerado de bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L)**. 2012. 73 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.
- CORDEIRO, G. M.; DEMÉTRIO, C. G. B. **Modelos lineares generalizados e extensões**. 2008. Disponível em: <[http://www.ufjf.br/elecio\\_ferreira/files/2013/05/Livro-Gauss-e-Clarice.pdf](http://www.ufjf.br/elecio_ferreira/files/2013/05/Livro-Gauss-e-Clarice.pdf)>. Acesso em: 10 nov. 2018.
- CORREIA, C. M. P.; SOUZA, M. F. de. Mechanical strength and thermal conductivity of low-porosity gypsum plates. **Materials Research**, Pittsburgh, v. 12, n. 1, p. 95-99, 2009.

DEMIRKIR, C.; COLAKOGLU, G. The effect of grain direction on lateral nail strength and thermal conductivity of structural plywood panels. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, Concepcion, v. 17, n. 3, p. 469-478, 2015.

DEMIRKIR, C. et al. Influence of aging procedure on bonding strength and thermal conductivity of plywood panels. **Acta Physica Polonica A**, Warszawa, v. 129, n. 6, p. 1230-1234, June 2016.

DJAMILA, H. Indoor thermal comfort predictions: selected issues and trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 74, p. 569-580, 2017.

EUGÊNIO, T. M. C. **Propriedades físicas, mecânicas e térmicas de argamassas de revestimento com utilização de resíduos de pneu**. 2016. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

FU, L. et al. A calcium chloride hexahydrate/expanded perlite composite with good heat storage and insulation properties for building energy conservation. **Renewable Energy**, Oxford, v. 114, p. 733-743, 2017.

GORI, V.; ELWELL, C. A. Characterization of the thermal structure of different building constructions using in-situ measurements and Bayesian analysis. **Energy Procedia**, New York, v. 132, p. 537-542, 2017.

GRACIA, A. et al. Dynamic thermal performance of alveolar brick construction system. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 52, p. 2495-2500, 2011.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: Ed. FUPEF, 2005. 254 p.

OLIVIERI, H. et al. A utilização de novos sistemas construtivos para a redução no uso de insumos nos canteiros de obras: Light Steel Framing. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 45-60, out./dez. 2017.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2019. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

SANTOS, A. F. dos et al. **Estudo de implantação de projeto sustentável utilizando Wood Frame**. Disponível em: <[http://revista.facear.edu.br/artigo/\\$/estudo-de-implantacao-de-projeto-sustentavel-utilizando-wood-frame](http://revista.facear.edu.br/artigo/$/estudo-de-implantacao-de-projeto-sustentavel-utilizando-wood-frame)>. Acesso em: 10 ago. 2018.

TURKMAN, M. A. A.; SILVA, G. L. **Modelos Lineares Generalizados: da teoria à prática**. Disponível em: <<https://docs.ufpr.br/~taconeli/CE22517/LivPortugal.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

VALOR-R: resistência térmica de isolantes. Disponível em: <<https://www.aviculturaindustrial.com.br/imprensa/valor-r-resistencia-termica-de-isolantes/20141110-094020-o003>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

YAPICI, F.; GÜNDÜZ, G.; ÖZÇİFÇİ, A. The effects of some production factors on thermal conductivity of oriented strand board. **Technology**, Cambridge, v. 13, n. 2, p. 65-70, 2010.

## APÊNDICE A

Tabela 1A – Análise de *deviance* (ANODEV) para a variável condutividade para cada repetição.

	G.L.	Redução da deviance	G.L. restante	Resíduo da deviance	Valor-p
<b>1ª Repetição</b>					
MODELO NULO			2399	456,46	
DIMENSÕES	3	55,99	2396	400,47	< 2.2e-16 ***
MATERIAL	2	384,12	2394	16,35	< 2.2e-16 ***
DIMENSÕES:MATERIAL	6	14,11	2388	2,24	< 2.2e-16 ***
<b>2ª Repetição</b>					
MODELO NULO			2399	467,07	
DIMENSÕES	3	88,27	2396	378,80	< 2.2e-16 ***
MATERIAL	2	368,59	2394	10,21	< 2.2e-16 ***
DIMENSÕES:MATERIAL	6	9,01	2388	1,20	< 2.2e-16 ***
<b>3ª Repetição</b>					
MODELO NULO			2399	477,24	
DIMENSÕES	3	95,39	2396	381,85	< 2.2e-16 ***
MATERIAL	2	369,22	2394	12,64	< 2.2e-16 ***
DIMENSÕES:MATERIAL	6	8,83	2388	3,81	< 2.2e-16 ***

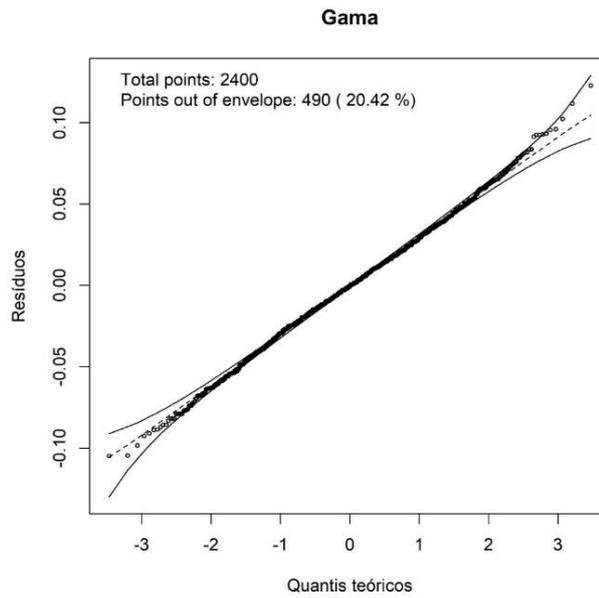
\*\*\*: significativo a 5 e 1%.

Fonte: Do autor (2019).

Com os resultados da análise de *deviance* têm-se que os diferentes tratamentos (dimensões – 5x5, 10x10, 20x20 e 30x30), material (compensado, OSB e *drywall*) e material *versus* tratamentos foram significativos. Na Tabela 1A observa-se que a *deviance* (desvio) residual do modelo para a 1ª repetição é 2,24 com 2388 graus de liberdade. Ao se comparar esse resultado com a distribuição qui-quadrado com 2388 graus de liberdade ao nível de significância de 5% ( $\chi^2_{(2388;0,05)} = 2502,799$ ), constata-se que o modelo é adequado. O mesmo ocorre para a 2ª e 3ª repetições.

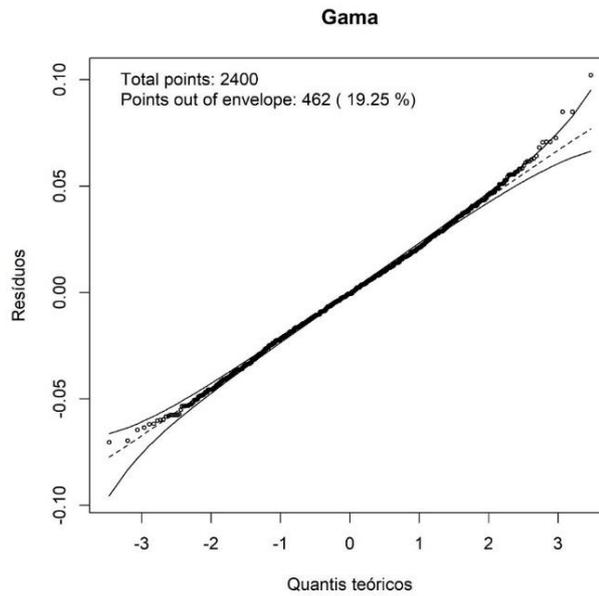
Os Gráficos 1A, 2A e 3A apresentam a análise de resíduos do modelo gama com uma função de ligação inversa para a variável condutividade.

Gráfico 1A – Análise de resíduos para o modelo gama da variável condutividade (1ª repetição).



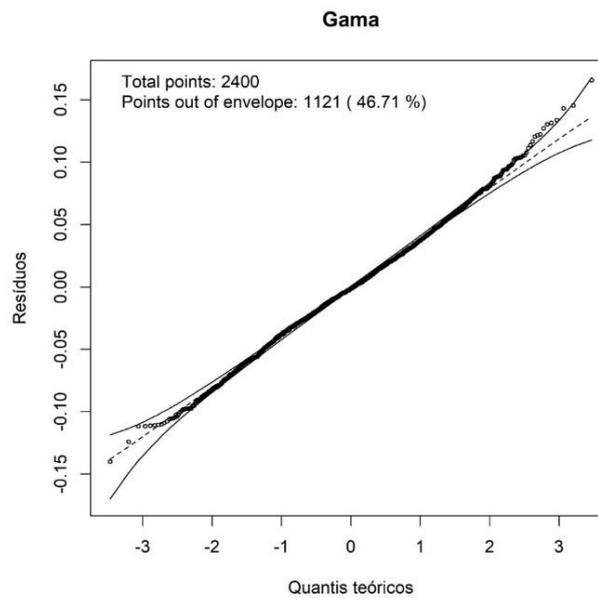
Fonte: Do autor (2019).

Gráfico 2A – Análise de resíduos para o modelo gama da variável condutividade (2ª repetição).



Fonte: Do autor (2019).

Gráfico 3A – Análise de resíduos para o modelo gama da variável condutividade (3ª repetição).



Fonte: Do autor (2019).

Nos gráficos foram observados pontos fora do envelope de 490, 462 e 1121, respectivamente. E não foram observados pontos muito fora do alinhamento. Por conseguinte, não há indicação de observações atípicas, então o modelo gama é adequado para a variável condutividade.