



Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo

Luciane Cristina Mayumi Murata

**Análise das Propriedades Térmicas de Novos Materiais  
Construtivos: O caso da poliuretana.**

Campinas  
2019



Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

Luciane Cristina Mayumi Murata

## **Análise das Propriedades Térmicas de Novos Materiais Construtivos: O caso da poliuretana.**

Trabalho Final de Curso apresentado  
como requisito parcial para obtenção do  
título de **Bacharel em Engenharia Civil** à  
Faculdade de Engenharia Civil,  
Arquitetura e Urbanismo da Universidade  
Estadual de Campinas.

Orientadora: Leticia de Oliveira Neves

Campinas  
2019



# **Análise das Propriedades Térmicas de Novos Materiais Construtivos: O caso da poliuretana.**

Luciane Cristina Mayumi Murata

## **BANCA EXAMINADORA**

*Leticia de O. Neves*

.....  
Profª Drª Leticia de Oliveira Neves  
Orientadora

.....  
Prof(a). Nome

.....  
Prof(a). Nome

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

M932a Murata, Luciane Cristina Mayumi, 1994-  
Análise das propriedades térmicas de novos materiais construtivos : o caso da poliuretana / Luciane Cristina Mayumi Murata. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Leticia de Oliveira Neves.  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Poliuretana. 2. Propriedades térmicas. 3. Sistemas construtivos. 4. Materiais de construção. I. Neves, Leticia de Oliveira, 1980-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações adicionais, complementares

**Título em outro idioma:** Analysis of thermal properties of new building materials: the case of polyurethane

**Titulação:** Engenheiro Civil

**Banca examinadora:**

Leticia de Oliveira Neves [Orientador]

**Data de entrega do trabalho definitivo:** 12-12-2019



## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Marta e Hélio, por sempre me apoiarem em todas as escolhas da minha vida. A todos que me incentivaram nesse caminho acadêmico. E aos que utilizarem esta obra como fonte de estudo.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais e família que me apoiaram e acompanharam em todas as etapas da minha vida. Aos amigos, da minha cidade natal, dos companheiros de softball e baseball e amigos de curso, que sempre me deram suporte, de longe ou de perto, no decorrer desse trabalho. E meu muito obrigada para a Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leticia por todo o ensinamento durante esses quase 3 anos de pesquisa, aos técnicos Obadias e Daniel por me ajudarem na parte prática do projeto e à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Stelamaris, à Iris Loche e ao Dr. Victor Baldan pelo auxílio na última etapa da minha graduação.



## RESUMO

Diante da necessidade de compreender melhor as propriedades térmicas de novos materiais de construção, esta pesquisa tem por objetivo avaliar o desempenho térmico da poliuretana, quando aplicados na envoltória de uma edificação. O referido material foi desenvolvido pelo aluno de doutorado Victor Baldan, no Laboratório de Construção Civil (LCC) do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP). O método consistiu em medições experimentais com duas células-teste, sendo uma delas constituída pelo material a ser analisado (poliuretana) e outra a ser utilizada como referência (compensado naval). A pesquisa teve como resultados uma análise detalhada da resposta térmica do material estudado. O desempenho térmico do material mostrou elevada transmitância térmica, baixa resistência térmica, ausência de amortecimento e inércia térmica. Além disso, os resultados mostram a relevância da absorvância no desempenho térmico do material. Dado isso, é recomendável estudos futuros desse material em conjunto com outros materiais para melhorar a inércia térmica numa edificação. Tais dados poderão ser utilizados tanto para um possível aprimoramento do material quanto para divulgação de suas características de desempenho térmico, de forma a contribuir para as pesquisas em desenvolvimento.

Palavras-chave: desempenho térmico, novos materiais construtivos, poliuretana.



## **ABSTRACT**

Through the need of understanding the thermal proprieties of new construction materials, the aim of this research was to evaluate the thermal performance of the composite of polyurethane, when it is applied in the envelope of a building. This material was developed by Victor Baldan, a doctorate degree student, in the Civil Construction Laboratory (LCC) of Institute of Architecture and Urban Design of the University of São Paulo. The method measured experiments in two test cells, one of them were built with the studied material (polyurethane) and the other one were used as reference (naval plywood). The results for this research are a detailed analysis of the thermal performance of the studied material. The thermal performance of this material showed high thermal transmittance, low thermal resistance, absence of thermal damping and low thermal inertia. Also, the results showed relevance of the absorptance in the thermal performance. It is recommended future studies about this material together to others to improve the thermal inertia in a building. The data can be useful to a future enhancement of the materials and to present its thermal performance proprieties, as a way to contribute.

Key words: thermal performance, construction materials, polyurethane



UNICAMP

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
1.2.1. Objetivo específico .....	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1. Poliuretana .....	6
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>8</b>
3.1. Cálculo da condutividade térmica.....	8
3.2. Ensaio experimental.....	10
<b>4. ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>14</b>
4.1. Temperaturas superficiais .....	14
4.2. Temperaturas internas à caixa .....	18
4.3. Atraso térmico e amortecimento térmico.....	19
4.4. Fluxo de calor.....	23
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>24</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>26</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A NBR 15575-1 (ABNT, 2013) define que desempenho é o comportamento de uma edificação em uso e de seus sistemas; seus critérios podem ser expressos em termos de quantidades mensuráveis, podendo assim, ser objetivamente determinados. Desse modo, observa-se a necessidade de analisar as propriedades térmicas dos materiais construtivos e a sua direta relação com desempenho térmico.

Os valores das propriedades térmicas de materiais, como a condutividade térmica, por exemplo, são necessários como dados de entrada para o cálculo do desempenho térmico de materiais e componentes construtivos. Os dados disponíveis na literatura restringem-se a alguns tipos e composições de materiais, sendo a fonte bibliográfica mais utilizada para consulta, no Brasil, a parte 2 da NBR 15220 (ABNT, 2005), que apresenta uma tabela com valores médios de condutividade térmica, densidade e calor específico para diversos materiais de construção. Entretanto, estes valores são apenas indicativos, sendo que a própria Norma recomenda utilizar, sempre que possível, valores medidos em laboratório.

Segundo a ABNT (2005), a avaliação de desempenho térmico de uma edificação pode ser realizada tanto após a construção quanto na fase de projeto. Na fase após a construção medições são feitas in loco de variáveis características do desempenho. Enquanto na fase de projeto, simulações computacionais ou verificação do cumprimento das diretrizes construtivas, podem ser feitas.

Mostra-se, a partir das referências acima mencionadas, a importância da análise de desempenho térmico de novos materiais de construção. Em vista disso, essa pesquisa tem como proposta avaliar o desempenho térmico de um novo material de construção, por meio de uma análise empírica em célula-teste. O material de construção a ser investigado será a poliuretana, cuja formulação foi proposta pelo aluno de doutorado Victor Baldan, sob orientação do prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos, do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP) (BALDAN, 2015).



Os benefícios da poliuretana são a alta rigidez, melhores respostas à fadiga sob cargas cíclicas, leveza e resistência mecânica. Além disso, em sua composição pode ser incorporada resíduos, auxiliando nos problemas com descartes irregulares. Sua aplicação pode ser na aeronáutica, nos esportes, nas indústrias bélica e, principalmente, na construção civil (BALDAN, 2015).

### **1.1. JUSTIFICATIVA**

Atualmente, com o rápido desenvolvimento de novos materiais de construção, não se sabe ao certo como esses materiais se comportam diante da exposição climática, tendo em vista que suas propriedades térmicas ainda não foram tabeladas. Moura (1993) e Nicolau, Güths e Silva (2002) observam a necessidade do desenvolvimento de equipamentos e métodos de medição para análise de desempenho térmico de novos materiais. Adicionalmente, Mahanta e Abramson (2010) ressaltam a importância do conhecimento de tais propriedades para o desenvolvimento de novos materiais.

### **1.2. OBJETIVOS**

Este trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho térmico da poliuretana, quando aplicado na envoltória de uma edificação. Espera-se, dessa maneira, incentivar o aprimoramento do material e ajudar na divulgação de suas características de desempenho térmico, de forma a contribuir para pesquisas em desenvolvimento.

#### **1.2.1. Objetivo específico**

- Comparar o desempenho térmico de uma célula-teste de referência (compensado naval) com uma célula-teste do novo material de construção (poliuretana).



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos estudos foram realizados com o propósito de compreender melhor as propriedades térmicas de novos materiais. Exemplo disso é o estudo de Jeong et al. (2009), que testou diferentes composições de poliestireno expandido (EPS), polipropileno expandido (PEE), copolímero de acetato etileno-vinil (EVA), polietileno (PE) e espuma de poliuretano. No estudo, misturou-se estes compostos com outros materiais resilientes, chegando-se à conclusão que a composição proposta melhora o isolamento térmico e acústico do componente, além de melhorar suas propriedades elásticas e estruturais. Moretti, Belloni e Agosti (2016) analisaram a correlação direta entre a resistência térmica e o isolamento acústico em painéis com adição de fibras de basalto. Nesta pesquisa, os autores mediram a condutividade térmica do material por meio do método do fluxo de calor. Kosny et. al. (2012) realizaram testes de fibras isolantes contendo material de mudança de fase (Phase Change Material - PCM) micro encapsulado em paredes de wood-frame, utilizando-se dos métodos de ensaios de fluxo de calor e simulação computacional. Ramanaiah, Prasad e Reddy (2013) utilizaram fibra de lança de São Jorge (*sansevieria*) para reforçar compostos poliméricos. Seus resultados mostraram uma melhoria no desempenho energético do material, ou melhor, um aumento no isolamento térmico, uma vez que a condutividade térmica diminuiu com o aumento do volume de fibra na composição. Tal melhoria teria um significativo uso na construção civil, em partes de interior de automóveis e em materiais esportivos. Fenoglio et. al. (2018) analisaram materiais destinados ao retrofit de edifícios históricos, visando melhorar sua eficiência energética. Os autores analisaram um isolante de gesso à base de perlita, concluindo que sua aplicação diminuiu em 50% a transmitância térmica do componente construtivo, encontrando uma relação direta de porcentagem de perlita com a transmitância térmica. Isso significa que a adição de perlita no gesso pode ser uma boa alternativa para um novo material na construção civil. Os autores também encontraram uma relação entre a condutividade térmica e a umidade do material, isto é, quanto maior a umidade, maior a absorção de calor.



A partir de uma busca realizada na literatura especializada, nota-se a escassez de publicações sobre esse assunto, visto que os resultados das buscas na base de dados *Science Direct* foram baixos, conforme mostra a Tabela 1, abaixo.

Tabela 1: Mapeamento sistemático da literatura pela base de dados da *Science Direct*

<b>Strings de busca (title, abstract, keywords)</b>	<b>Quantidade encontrada</b>	<b>Quantidade encontrada (últimos 10 anos)</b>
"Heat Flow Meter" AND "Thermal Conductivity"	27	25
"Heat flow meter" AND Construction	7	7
"Heat flow meter" AND Material	37	29

Do total de 71 artigos encontrados, 13 coincidiam em, ao menos, duas *strings* de busca, e foram selecionados por serem os mais adequados ao assunto. Os demais artigos foram excluídos por análise do título.

Estudos relacionados com o fluxo de calor em blocos de alvenaria com EVA foram realizados por Gomes e Melo (2018). O projeto foi desenvolvido a partir da simulação de uma parede com dimensões 1,0 x 0,15 x 1,2 m. Tal amostra foi introduzida em uma edificação, separando-a em dois ambientes, um quente e outro frio. As paredes internas da edificação foram revestidas com placas de isopor para evitar a perda de calor para o meio externo. Os resultados desse estudo demonstraram que o uso de EVA diminui o fluxo de calor e o volume de câmaras de ar internas e aumentam a resistência térmica do componente construtivo. Isso se mostra relevante para a indústria da construção, tendo em vista a melhoria do desempenho de materiais, e auxilia na redução de impactos ambientais, já que o EVA usado nos blocos era oriundo de retalhos da fabricação de calçados.

Biasi e Krüger (2019) observaram as diferenças de temperatura de células-teste enterradas e semienterradas, realizando uma análise da inércia térmica. Nesse projeto, foram montadas três células-teste: uma como referência, apenas em contato com o solo; uma semienterrada, com uma das faces laterais



em contato com o solo; e uma enterrada, com todas as faces, exceto a superior em contato com o solo. Todas as células-teste foram submetidas a fatores não controlados, como clima e intempéries. O monitoramento foi realizado por um período de 10 dias. Concluiu-se que a célula-teste enterrada pode ser aplicada para redução de gastos com energia, dado que seu desempenho térmico foi superior aos demais casos, porque obteve um maior amortecimento térmico e as temperaturas internas foram mais altas no inverno, em comparação com as outras células-teste.

Outros estudos apontam o calor absorvido pelas superfícies estão relacionadas diretamente não só com as cores, mas também com a rugosidade das superfícies (DORNELLES, 2008). Esse estudo visa mostrar que apenas a cor não é um fator determinante da absorção de superfícies opacas, para tanto são apresentados dados de absorção solar para diferentes cores e tipos de tintas utilizadas em superfícies opacas de edificações no Brasil. Os valores das absorções foram medidos através de refletância em espectrofotômetros.

A temperatura do ar externa e a umidade relativa do ar também tem uma relação direta que influenciam na temperatura medida internamente à uma edificação. Thomanizi (2015) estudou sobre o comportamento da temperatura e umidade relativa no interior de um secador solar misto de ventilação natural. Afirma em sua pesquisa, que o aumento da temperatura do ar faz diminuir a umidade relativa do ar e vice-versa. E conclui-se que nem sempre a alta incidência solar significa temperaturas elevadas.

Baldan (2015) estudou uma composição alternativa de compósito que contém bagaço de laranja no reforço e poliuretano na matriz. O bagaço de laranja apresenta-se em larga escala no cenário brasileiro, que é um grande cultivador de laranja e, conseqüentemente, produtor de suco de laranja. A quantidade de resíduo de laranja chega a ser um problema para o país. Para tanto, alternativas têm sido estudadas para o uso, como, por exemplo, em matéria-prima para confecção de material para construção civil (GALVÃO, SILVA e GAIOSO, 2017).



## 2.1. Poliuretana

A poliuretana é composta por várias unidades uretênicas, substância sintetizada em laboratório. Sua estrutura pode apresentar variações, o que pode conferir diferentes características para o material, como alta resistência à abrasão, adesão, dureza e resistência química. Além disso, a poliuretana pode ser baseada em substâncias termofixas, termoplásticas, espumas rígidas ou adesivas. (BALDAN, 2015).

Poliuretanos (PU) são polímeros muito utilizados na produção de espumas rígidas, pois sua estrutura confere elevada capacidade de absorção de energia e baixa condutividade térmica, além de alta durabilidade e versatilidade (SERVES, 2007). Os polímeros requerem, em sua maioria, longos períodos para degradação, o que não é benéfico para o meio ambiente, por ter efeito acumulativo no sistema (SAINT-MICHEL, CHAZEAU e CAVAILLÉ, 2006).

Aplicações comuns da poliuretana são na indústria de colchões, assentos automotivos, resina para impermeabilização, isolantes térmicos, próteses médicas, produção de tintas para revestimentos e solados de calçados. A grande variedade da utilização desse material, faz-se gerar uma grande quantidade de resíduos oriundos das indústrias de poliuretana. Desse modo, uma alternativa viável é a reciclagem.

O estudo desenvolvido por Baldan (2015) fez parte de sua pesquisa de doutorado, desenvolvida no Laboratório de Construção Civil (LCC) do IAU-USP, em que se propõe realizar uma análise das propriedades térmicas e físicas do composto.

De acordo com Baldan (2015), para a fabricação das placas de poliuretana, primeiramente se conheceu a fonte geradora de resíduo (INPOL Indústria de Poliuretana – Novo Hamburgo/RS). A transformação do resíduo em agregado reciclado é dada pela moagem, cujo produto foi separado através do peneiramento.

Em seguida, as etapas foram: definição do traço do material; pesagem da quantidade de agregado, de pré-polímero e de polípol; adição do pré-polímero, de forma a obter a resina vegetal de mamona; adição da resina ao agregado



reciclado; formação do colchão sobre a forma metálica; prensagem térmica e por fim, a desforma e cura (Figura 1).



Figura 1: Etapa da fabricação das placas.



### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

Esse projeto será fundamentado por estudos empíricos com células-teste, o qual é detalhado a seguir. A pesquisa consiste em uma continuidade de pesquisa de iniciação científica desenvolvida pela aluna (projeto FAPESP nº 2017/14991-0), sob orientação da Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leticia de Oliveira Neves.

Murata et. al. (2018) desenvolveram um dispositivo para medir a condutividade térmica de materiais, no intuito de contribuir para gerar dados de condutividade térmica de novos materiais de construção, como o gesso reciclado, o cimento magnésiano, materiais álcali-ativado e compósito de poliuretano e bagaço de laranja (MURATA, 2019). Esse equipamento constitui-se de duas placas de cobre com 30cm x30cm. Uma delas é quente, devido à proximidade com uma resistência de alumínio; a outra é fria, onde se passa uma serpentina com água corrente. Cinco termopares foram colocados em cada placa para controle e medição da temperatura. Os ensaios foram realizados com a resistência aquecedora a uma voltagem de 20 V, de forma a atingir uma temperatura em torno de 50 °C na placa quente. Aguardou-se a placa quente entrar em regime permanente (cerca de três horas) para então realizar a conexão da placa fria e fechar a caixa, isolando assim o sistema. A medição da condutividade térmica do material ocorreu por meio do fluxo de calor e a duração foi de aproximadamente três horas cada ensaio. Os resultados encontrados nessa pesquisa foram os valores de condutividade térmica dos materiais: gesso reciclado (0,23 W/(m.K)); material álcali-ativado (0,38 W/(m.K)); compósito de poliuretano e bagaço de laranja (0,14 W/(m.K)); cimento magnésiano (0,13 W/(m.K)); e gesso comum (0,25 W/(m.K)).

#### **3.1. Cálculo da condutividade térmica**

Durante a pesquisa de iniciação científica, foi construído um condutímetro junto ao Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada (LaCAF) da FEC-UNICAMP. O equipamento foi elaborado parte pelo método da placa quente protegida, parte pelo método fluximétrico (ABNT, 2005), uma vez que o equipamento proposto não se comporta completamente pelo método

fluximétrico, pois não há um fluxímetro na configuração; e não se aplica também o método da placa quente, pois não há anel de guarda.

O dispositivo é composto por duas placas de cobre, uma placa quente, aquecida por uma resistência, e uma placa fria, resfriada por uma serpentina que percorre água corrente. Entre as placas é colocado o material a ser analisado. Todo o sistema é isolado através de lã de cerâmica, para minimizar trocas térmicas com o ambiente (Figura 2 e 3).

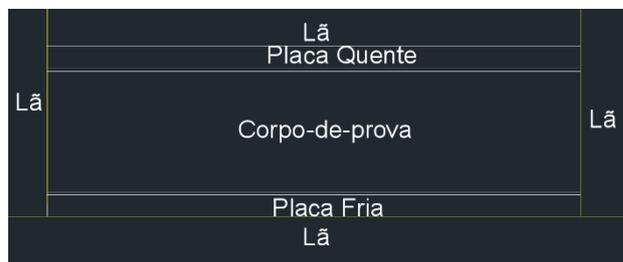


Figura 2: Esquema de montagem proposto para do condutivímetro.

Fonte: Elaborada pela autora



Figura 3: Condutivímetro.

Fonte: Elaborada pela autora

A diferença de temperatura entre essas placas gera uma diferença de temperatura entre as superfícies do material. Essa diferença de temperatura é parte fundamental para o cálculo da condutividade térmica. Assim, com esses dados experimentais e as características físicas da placa, encontra-se o valor a partir da lei de Fourier (Equação 1).

$$\lambda = \frac{q/A}{\Delta T/e} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde,  $\lambda$  é a condutividade térmica (W/m.K),  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre as duas faces da amostra (K),  $q$  é a densidade de fluxo de calor (W/m<sup>2</sup>),  $A$  é a área da amostra (m<sup>2</sup>), e “e” é a espessura da amostra (m).

### 3.2. Ensaio experimental

Para o ensaio experimental, foram confeccionadas duas células-teste, sendo elas: uma a ser utilizada como referência para o estudo, cujo fechamento foi constituído por compensado naval, e a segunda com fechamento constituído pelo material a ser aqui avaliado, a poliuretana. A utilização do compensado naval como referência é explicado por ser um material de fácil manuseio que pode ser exposto às intempéries.

As células-teste tinham as mesmas dimensões, conforme as Figuras 4 e 5. Vale ressaltar que as dimensões das células-testes foram baseadas em pesquisa na literatura (BIASI e KRÜGER, 2019). As paredes das células-teste foram isoladas internamente por placas de isopor na espessura de 4,5 cm. A condutividade térmica do compensado naval é de  $0,14 \text{ W/(m.K)}$  (UCHOA, 1989) e do compósito de poliuretano e bagaço de laranja é de  $0,14 \text{ W/(m.K)}$  (MURATA, 2019).

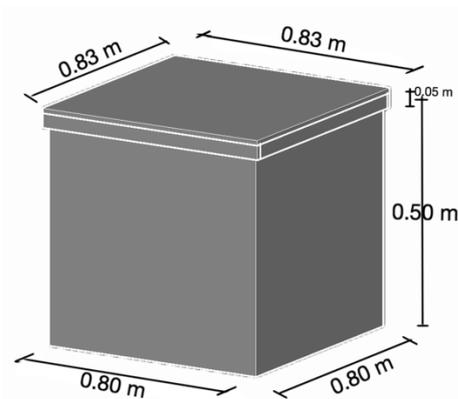


Figura 4: Dimensões externas das células-teste.

Fonte: elaborada pela autora.

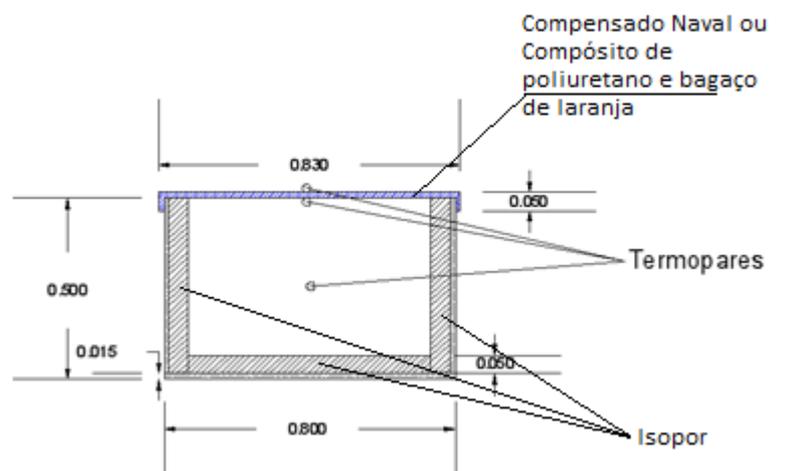


Figura 5: Dimensões internas das células-teste.

Fonte: elaborada pela autora.

Para análise comparativa entre as células-teste, foi modificado apenas o material da face superior. A placa de compensado naval tinha uma espessura de 1,5 cm e a poliuretana, 1 cm. Para a coleta de dados foi instalado um termopar nas faces externa e interna do material analisado, de forma a monitorar as



temperaturas superficiais. Um registrador de temperatura e umidade relativa do ar foi posicionado no centro da caixa, internamente, conforme indicado na Figura 4. Além disso, foram coletados dados de temperatura e umidade relativa do ar fora da caixa, de modo a servir como base para comparação com os dados internos. Os dados técnicos dos equipamentos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Especificação técnica dos instrumentos utilizados em campo.

Equipamento	Intervalo de medição	Precisão
Registrador Temperatura Testo 175 T2	-40 a +120 °C	± 0.3 °C (-25 a +70 °C)
Registrador Temperatura Umidade Testo 125 H1	-10 a +50 °C	±0.5 °C
Sonda Superficial Testo 0628 7507	-50a +80 °C	± 0.2°C (-25 a +80 °C) ± 0.5 °C (-40 a -25.1 °C)

O ensaio teve duração de cinco dias (de 26 a 30 de agosto de 2019) e as informações foram registradas em intervalos de quinze minutos. As células-teste foram expostas ao clima e intempéries, em local completamente aberto, sem sombra durante nenhum horário do dia (Figura 5). Todos os dias foram dias ensolarados.

Além dos dados climáticos obtidos *in loco*, foram adquiridos os dados climáticos lidos pelo CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura) e pela base de estação automática da ESALQ-USP (Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Universidade Estadual de São Paulo) a fim de estabelecer comparações de dados do microclima com macroclima da região.

Os dados de radiação solar foram adquiridos pela Base de Estação Automática da ESALQ-USP, porque os dados climáticos referentes à radiação solar oriundos do CEPAGRI não eram radiação incidente, mas refletida, apresentando inconsistências.

A comparação entre materiais se deu pelas variáveis de temperatura superficial, temperatura e umidade relativa do ar internas da caixa e pelos dados

climáticos externos cedidos pelo CEPAGRI e pela ESALQ. A configuração do experimento e localização é mostrada nas Figuras 6 e 7.



Figura 6: Configuração do experimento no local das medições.

Fonte: elaborada pela autora.



Figura 7: Localização do experimento.

Fonte: elaborada pela autora.

A face superior da célula-teste de poliuretana foi composta por quatro placas menores coladas com super cola (Figura 8) a fim de impedir qualquer abertura que pudesse comprometer a coleta de dados. Entretanto, as quatro placas não foram o suficiente para preencher todo o espaço da face superior, sendo completada pelo próprio compensado naval (Figura 9). Desse modo, a área superficial do material de poliuretana foi inferior à área superficial da célula-teste de compensado naval. O monitoramento foi feito diariamente e os resultados analisados comparativamente as temperaturas superficiais entre as caixas, as temperaturas internas às caixas, o atraso térmico, o amortecimento térmico e o fluxo de calor.



Figura 8: Placas de poliuretana coladas.  
Fonte: elaborada pela autora.

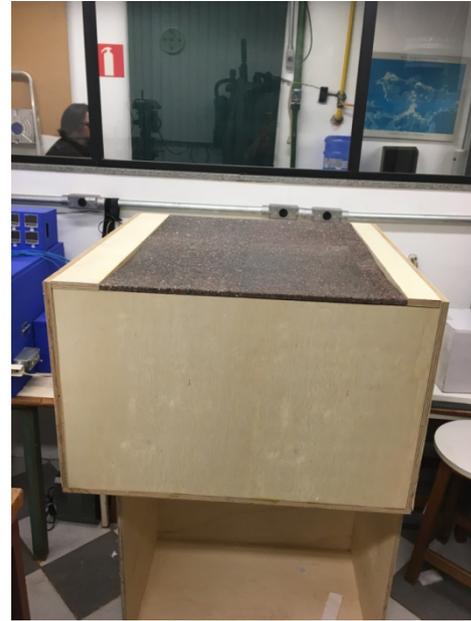


Figura 9: Composição de compensando naval e poliuretana para a face superior da célula-teste.  
Fonte: elaborada pela autora.

Os valores de atraso térmico foram obtidos a partir da análise gráfica. O mesmo método foi utilizado para os outros dias.

Pode-se calcular o amortecimento térmico a partir da Equação 2.

$$\mu = \frac{A_{int}}{A_{ext}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde  $A_{int}$  é a amplitude térmica interna e  $A_{ext}$  é a amplitude térmica externa.

Para o cálculo do fluxo de calor, utilizou-se os dados obtidos e a Equação 3.

$$\Delta q = \frac{-A (T_2 - T_1)}{\sum \frac{L}{\lambda}} \quad (\text{Eq. 3})$$



Onde  $\Delta q$  é o fluxo de calor (W), A é área ( $m^2$ ), T é temperatura (K), L é espessura (m) e  $\lambda$  é a condutividade térmica do material (W/(m.K)).

## **4. ANÁLISE DE RESULTADOS**

### **4.1. Temperaturas superficiais**

Por meio da Figura 11, observa-se a direta relação entre radiação solar e temperatura superficial, isto é, quanto maior a radiação incidente na superfície, maior sua temperatura.

O valor da absorvância tem grande impacto na temperatura superficial do material. Absorvância solar é o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície (DORNELLES, 2008). É possível notar que o material de poliuretana tinha uma cor mais escura, próximo à cor tabaco (absorvância 78,1%), enquanto o compensado naval tem uma cor similar a areia (absorvância 33,6%) (Figura 8). É possível visualizar os valores das absorvâncias (DORNELLES, 2008) pela Figura 10. Desse modo, é perceptível a relação direta da absorvância com a temperatura superficial. Notadamente, a placa feita de poliuretana absorve mais calor e suas temperaturas são superiores, principalmente, no período do dia em que as temperaturas são mais altas. A diferença entre as máximas diárias entre a poliuretana e o compensado naval é próxima a 20 °C.

### DADOS DE ABSORTÂNCIA E REFLETÂNCIA SOLAR - TINTAS

Absortâncias médias por faixa do espectro (%), medidas em espectrofotômetro e ajustadas ao espectro solar padrão (ASTM G173-2003).

Tipo	Cor	Nome Comercial	UV	VIS	IV	TOT
Metalatex Acrílica Fosca	Amarelo Antigo	Amarelo Antigo	95,6	53,5	46,8	51,4
	Amarelo Terra	Amarelo Terra	96,5	68,9	57,2	64,3
	Areia	Areia	94,8	44,5	42,8	44,9
	Azul	Azul	94,7	87,0	56,4	73,3
	Azul Imperial	Azul Imperial	93,8	62,7	70,4	66,9
	Branco	Branco	94,4	11,6	16,7	15,8
	Branco Gelo	Branco Gelo	94,5	34,8	37,2	37,2
	Camurça	Camurça	94,5	59,3	53,3	57,4
	Concreto	Concreto	95,0	73,4	74,8	74,5
	Flamingo	Flamingo	95,7	54,3	41,5	49,5
	Jade	Jade	94,0	49,5	53,5	52,3
	Marfim	Marfim	93,9	32,8	31,5	33,6
	Palha	Palha	94,2	35,0	35,8	36,7
	Pérola	Pérola	94,5	32,3	30,8	33,0
Pêssego	Pêssego	94,6	42,5	40,6	42,8	
Tabaco	Tabaco	94,7	79,1	76,2	78,1	
Terracota	Terracota	95,7	69,9	56,9	64,6	
Metalatex Acrílica Semi-brilho	Amarelo Antigo	Amarelo Antigo	95,1	52,4	44,2	49,7
	Amarelo Terra	Amarelo Terra	95,6	71,0	64,5	68,6
	Azul	Azul	95,0	87,6	70,1	79,9
	Branco Gelo	Branco Gelo	93,7	31,2	39,1	36,2
	Cinza	Cinza	94,6	84,5	88,2	86,4
	Cinza BR	Cinza BR	93,9	55,2	66,3	61,1
	Crepúsculo	Crepúsculo	93,6	66,7	63,7	66,0
	Flamingo	Flamingo	94,5	51,9	39,5	47,3
	Marfim	Marfim	93,9	33,1	31,8	33,9
	Palha	Palha	93,4	35,8	41,3	39,6
	Pérola	Pérola	93,7	31,8	33,4	33,9
	Preto	Preto	96,1	96,7	97,6	97,1
	Telha	Telha	95,2	78,5	57,9	69,6
	Terracota	Terracota	95,6	72,6	62,2	68,4
Verde Quadra	Verde Quadra	94,0	88,4	59,7	75,5	
Vermelho	Vermelho	93,1	71,1	54,7	64,2	
Novacor Látex PVA Fosca	Amarelo Canário	Amarelo Canário	93,7	34,3	20,2	29,3
	Amarelo Terra	Amarelo Terra	95,7	65,7	54,7	61,4
	Areia	Areia	93,4	41,5	33,4	39,0
	Azul angra	Azul angra	92,4	33,6	27,8	32,3
	Bianco Sereno	Bianco Sereno	91,8	26,0	24,1	26,6
	Branco	Branco	92,0	8,7	9,9	11,1
Novacor Látex PVA Fosca	Branco Gelo	Branco Gelo	92,3	32,4	33,1	34,0
	Erva doce	Erva doce	92,0	23,6	16,3	21,9
	Flamingo	Flamingo	94,6	52,8	37,4	46,8
	Laranja	Laranja	94,7	48,6	27,0	39,9
	Marfim	Marfim	93,4	30,4	25,6	29,7
	Palha	Palha	93,6	30,9	22,5	28,5
	Pérola	Pérola	93,0	24,9	23,2	25,7
	Pêssego	Pêssego	94,2	42,2	33,6	39,5
	Alecrim	Alecrim	95,2	63,3	63,3	64,0
	Azul bali	Azul bali	95,3	59,8	34,0	48,9
	Branco Neve	Branco Neve	91,7	7,6	9,0	10,2
	Branco Gelo	Branco Gelo	91,4	26,8	30,0	29,7
	Camurça	Camurça	94,6	56,3	53,2	55,8
	Concreto	Concreto	94,1	70,9	70,9	71,5
Marfim	Marfim	91,5	27,4	22,5	26,7	
Marrocos	Marrocos	95,5	60,7	45,7	54,7	
Mel	Mel	95,6	46,4	33,8	41,8	
Palha	Palha	92,5	26,6	24,6	27,2	
Pérola	Pérola	91,3	22,6	18,1	22,1	
Pêssego	Pêssego	93,4	37,1	29,7	35,0	
Telha	Telha	95,8	76,7	62,7	70,8	
Vanila	Vanila	92,1	27,3	16,7	23,9	
Suvinil Látex PVA Fosca	Amarelo Canário	Amarelo Canário	92,8	30,5	15,6	25,2
	Areia	Areia	91,1	37,8	30,4	35,7
	Azul Profundo	Azul Profundo	95,7	83,2	66,7	76,0
	Branco Neve	Branco Neve	92,3	11,8	17,5	16,2
	Branco Gelo	Branco Gelo	91,5	26,8	26,3	28,1
	Camurça	Camurça	93,6	55,9	47,9	53,2
	Cerâmica	Cerâmica	96,4	73,4	54,4	65,3
	Concreto	Concreto	95,3	71,1	71,0	71,6
	Flamingo	Flamingo	93,8	50,8	34,6	44,4
	Marfim	Marfim	92,9	26,0	19,2	24,5
	Palha	Palha	90,8	26,8	22,7	26,4
	Pérola	Pérola	91,9	23,6	18,6	22,9
	Pêssego	Pêssego	92,0	33,9	22,0	29,8
	Preto	Preto	97,1	97,1	97,7	97,4
Vanila	Vanila	92,5	30,8	20,9	27,7	
Verde Musgo	Verde Musgo	96,4	83,0	75,4	79,8	
Vermelho Cardinal	Vermelho Cardinal	96,2	72,4	51,2	63,3	

\* As imagens das cores aqui apresentadas podem não representar com exatidão a cor da tinta quando aplicada sobre as superfícies construtivas.

\* As tintas Metalatex e Novacor são produzidas pela Sherwin Williams.

\* UV: 300 a 380 nm / VIS: 380 a 780 nm / IV: 780 a 2500 nm / TOT: 300 a 2500 nm (Espectro solar total).

Figura 10: Valores de absortâncias conforme a cor.

Fonte: Kelen Almeida Dornelles, 2008

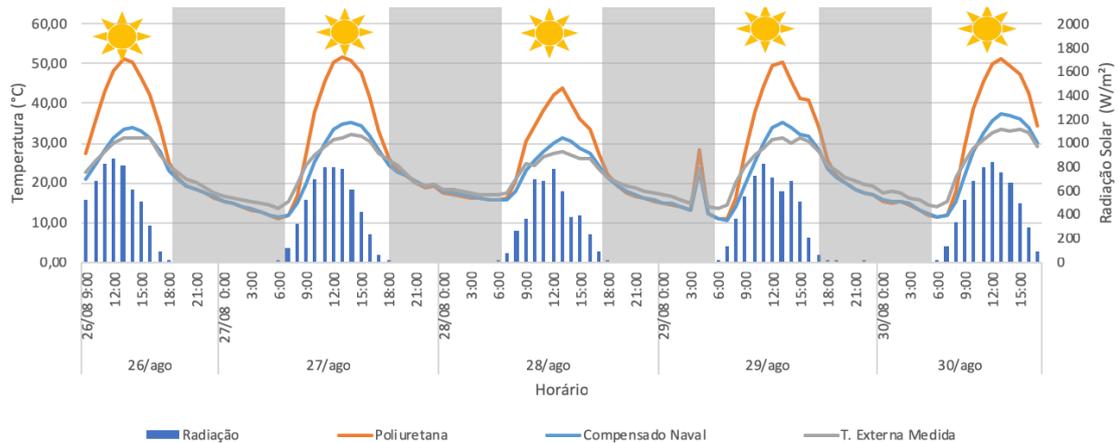


Figura 11: Gráfico das temperaturas superficiais externas e radiação solar por horário da medição.

Fonte: Elaborada pela autora

A diferença entre a temperatura interna das duas caixas e externa medida pelo CEPAGRI é mostrada na Figura 12. A diferença de temperaturas entre os dois materiais chega a aproximadamente 16°C. O material mais escuro (poliuretana) retém mais calor em seu interior no período mais quente do dia, por isso os valores positivos nas diferenças de temperaturas entres os horários das 9:00 e 16:00. Enquanto o material mais claro (compensado naval) tem um fluxo de calor sempre de fora para dentro, ou seja, a temperatura superficial externa é sempre maior que a temperatura interna, por isso todos os valores de delta são negativos.

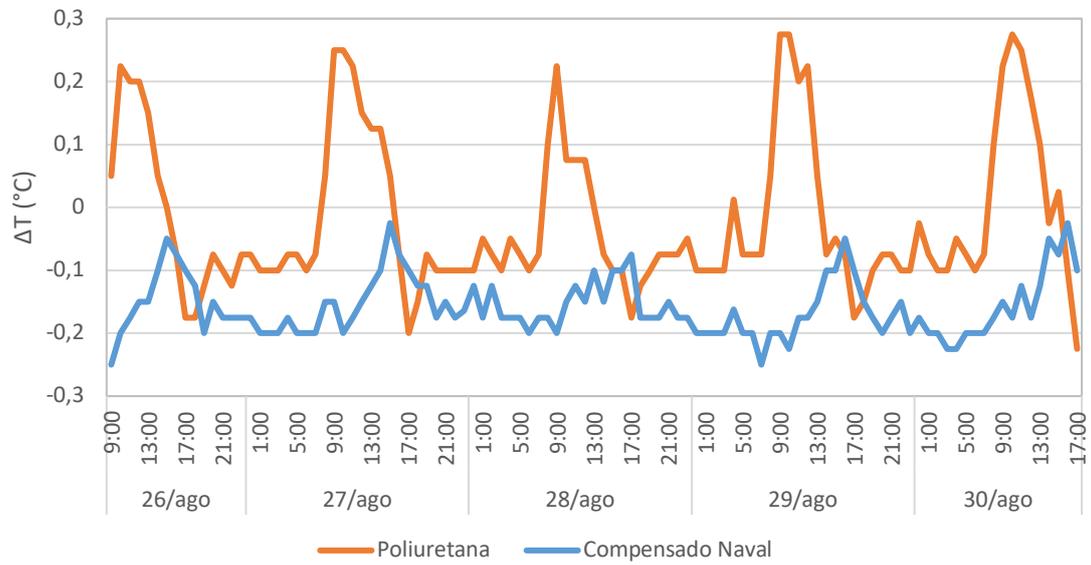


Figura 12: Gráfico de diferença de temperatura por horário da medição.

Fonte: Elaborada pela autora

## 4.2. Temperaturas internas à caixa

As medições das temperaturas e umidade relativa no centro da caixa foram comparadas com as temperaturas e umidade relativa externas medidas pelo CEPAGRI (Figura 13).

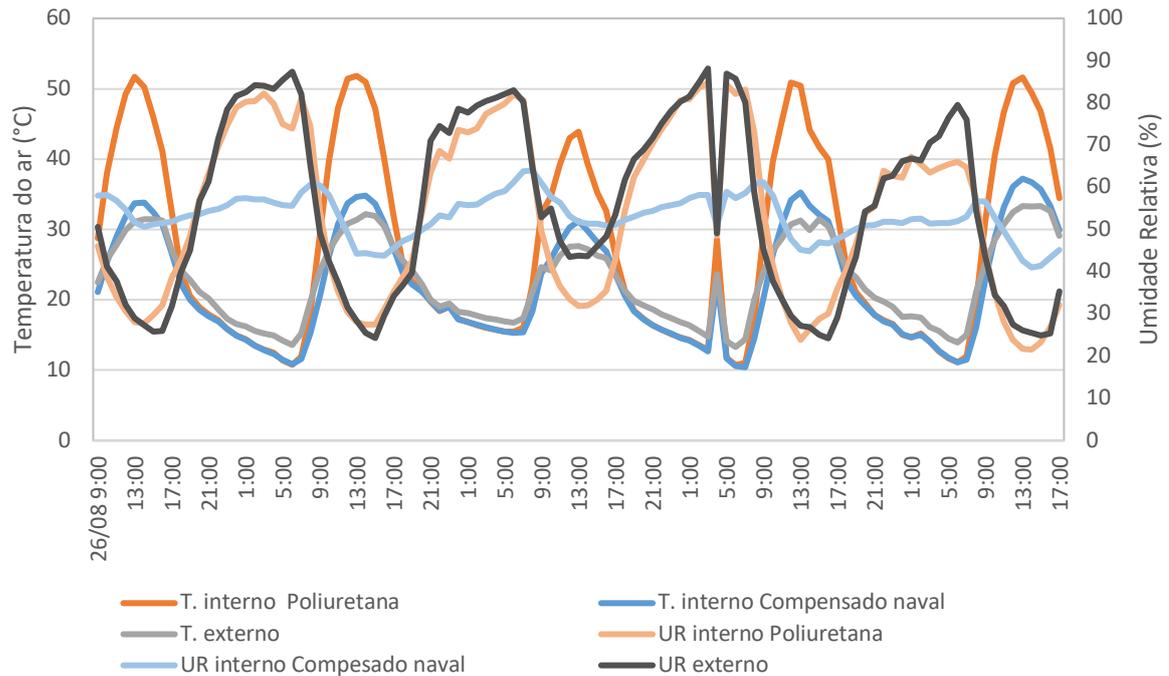


Figura 13: Gráfico de temperaturas e umidade relativas internas e externas por horário da medição.

Fonte: Elaborada pela autora

Verifica-se que a curva de temperatura interna do ar da caixa de compensado naval é muito próxima à da temperatura externa, entretanto está sempre menor nas horas em que as temperaturas estão mais altas e maior nas horas em que as temperaturas estão mais baixas do dia. Disso, infere-se a aparente alta resistência térmica do material e baixa transmitância térmica.

Já para a poliuretana é notória a diferença entre as duas curvas, principalmente nos horários mais quentes do dia. Isso acontece devido à quantidade de calor absorvido pelo material, em virtude da sua coloração mais escura (alto valor de absorvância). Como o material absorveu mais radiação, mais calor ficou armazenado no interior da caixa, especialmente devido ao isolamento térmico proporcionado pelo isopor no interior da caixa. No entanto,



pode-se atentar que, nos horários noturnos, a temperatura externa e interna eram praticamente as mesmas, o que evidencia a elevada transmitância térmica do material e a baixa resistência térmica.

A umidade relativa é a relação entre a pressão de vapor d'água e a pressão de vapor d'água saturado (Figura 12). O aumento da temperatura do ar atmosférico eleva o valor da pressão de vapor d'água saturado, resultando no aumento da temperatura do ar e na diminuição da umidade relativa do ar (THOMAZINI, 2015).

As umidades relativas da poliuretana foram muito próximas, variando pouco durante o dia. O ar interno à caixa com compensado naval apresenta uma umidade relativa mais constante, cerca de 50%.

#### **4.3. Atraso térmico e amortecimento térmico**

O atraso térmico é definido como o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor (ABNT, 2005). A Figura 14, mostra as temperaturas internas obtidas nas medições realizadas e as temperaturas externas disponibilizadas pelo CEPAGRI. A partir desses dados, o atraso térmico diário foi calculado (Figura 15 e Tabela 3).

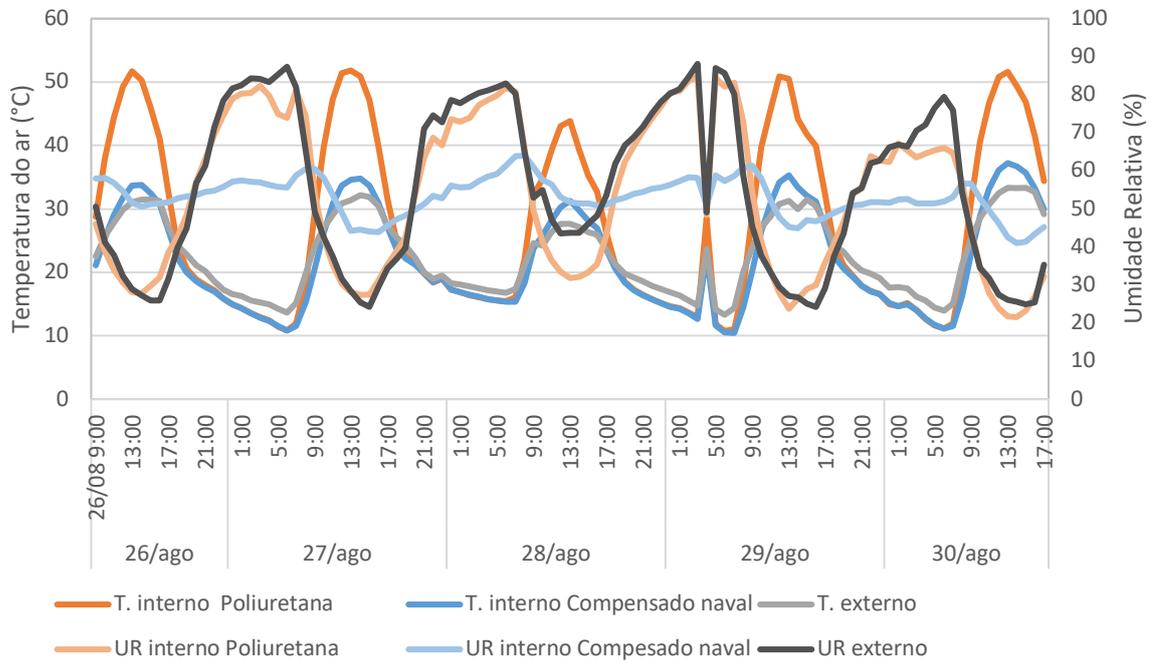


Figura 14: Gráfico de temperatura externa e temperatura interna pelas horas de medição.

Fonte: Elaborada pela autora

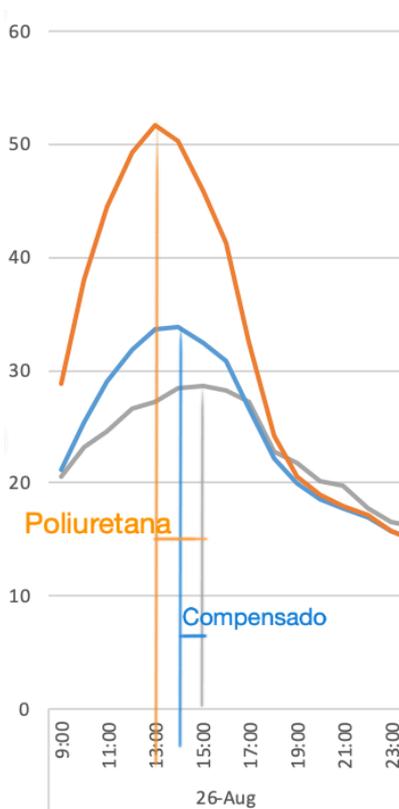




Figura 15: Cálculo do atraso térmico dos materiais no dia 26 de agosto.

Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 3: Atraso térmico referente ao dia de medição e média final

Atraso térmico	Poliuretana (h)	Compensado naval (h)
26/ago.	-2,0	-1,0
27/ago.	-2,0	-1,0
28/ago.	0,0	0,0
29/ago.	-2,0	-2,0
30/ago.	-2,0	-2,0
Média	-1,6	-1,2

Constata-se que o atraso térmico do compensado naval é em média de -1,2 horas, enquanto o do poliuretana é de -1,6 horas. Infere-se que ambos os materiais não apresentam atraso térmico. Entretanto, o compensado naval tem maior inércia térmica, tendo uma tendência maior de resistir à mudança de temperatura com a variação da temperatura externa.

Amortecimento térmico é a relação entre as amplitudes térmicas da temperatura interna e externa a uma edificação. A Figura 16, mostra as amplitudes térmicas diárias dos materiais. A partir desses dados, o atraso térmico diário foi calculado (Figura 17).

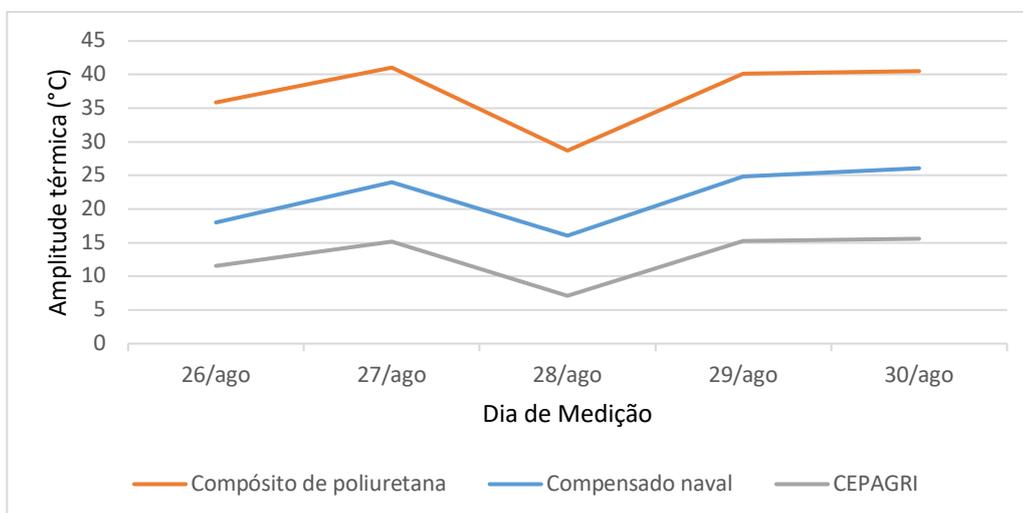


Figura 16: Amplitude térmica dos materiais por dia de medição

Fonte: Elaborada pela autora

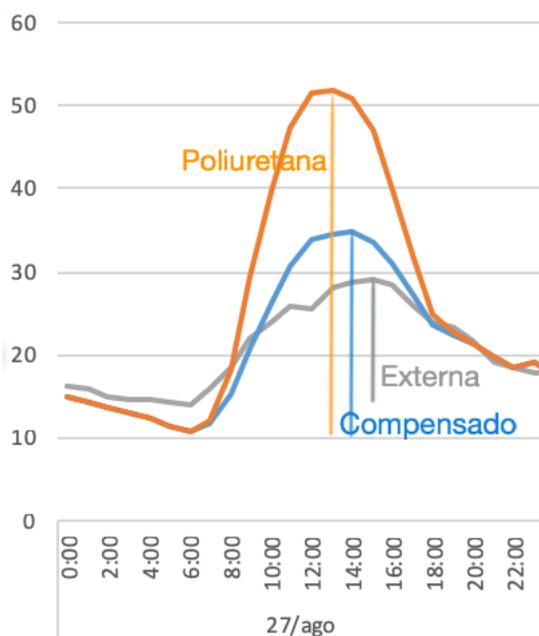


Figura 17: Cálculo do amortecimento térmico dos materiais no dia 27 de agosto.

Fonte: Elaborada pela autora.

O amortecimento térmico do compensado naval foi de  $\mu = 1,58$  e o da poliuretana foi de  $\mu = 2,70$ . Como o valor do amortecimento térmico é maior que 1 ( $\mu > 1,0$ ), isto é, a amplitude térmica do material é mais elevada que a amplitude térmica da temperatura externa, os materiais de fechamento não apresentam amortecimento térmico. Uma das razões para isso ter acontecido pode ser a presença do isopor como isolante térmico no interior das células-teste, impedindo a saída de calor da caixa e resultando em temperaturas internas superiores às externas.

Desse modo, nota-se que a inércia térmica de ambos os materiais é baixa. Em uma edificação, a inércia térmica auxilia na diminuição da amplitude térmica interior em relação ao exterior, evitando os picos, o que pode ser favorável ao conforto térmico no ambiente interno.

#### 4.4. Fluxo de calor

Fluxo de calor é o quociente da quantidade de calor que atravessa uma superfície durante um intervalo de tempo pela duração desse intervalo (ABNT, 2005). O resultado é mostrado na Figura 18.

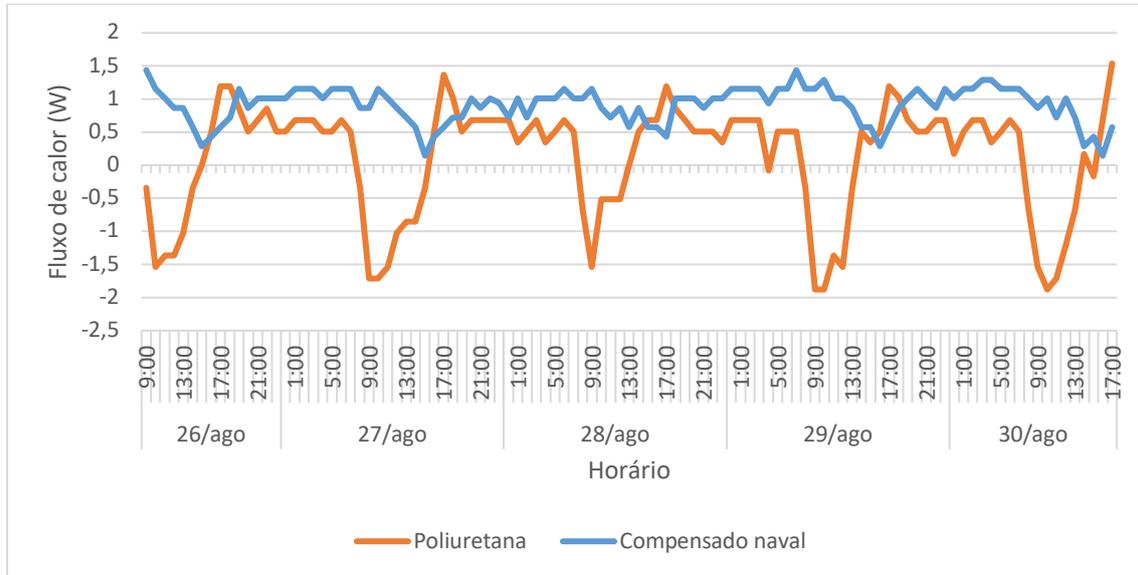


Figura 18: Gráfico da taxa de fluxo de calor pelas horas de medição.

Fonte: Elaborada pela autora

No início do dia a taxa de fluxo de calor decresce, ou seja, o fluxo de calor está no sentido de dentro para fora da célula teste. Isso se deve ao isolamento térmico da caixa causada pelo revestimento interno de isopor. O fluxo de calor de fora para dentro começa a aumentar a partir da hora mais quente do dia, aproximadamente às 15h.

A taxa de fluxo de calor do material (poliuretana) é maior comparada à referência (compensado naval). Apesar dos dois materiais apresentarem a mesma condutividade térmica, a diferença nos fluxos ocorre devido à cor do material, que tem influência direta na absorção de calor. A diferença também se deve à espessura dos materiais, já que a poliuretana tem uma espessura menor (1,0 cm) que o compensado naval (1,5 cm), apresentando, portanto, um fluxo de calor maior.

Por meio das Equações 4 e 5 pode-se inferir que o fluxo de calor é diretamente proporcional à transmitância térmica e inversamente proporcional à



resistência térmica. Em vista disso, o compósito tem uma transmitância térmica mais elevada e uma resistência térmica menor que o compensado naval, uma vez que sua taxa de fluxo de calor (troca de calor com o ambiente) é maior.

$$q = U \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 4})$$

$$q = \frac{\Delta T}{RT} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde  $q$  é o fluxo de calor ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $U$  é a transmitância térmica ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ),  $\Delta T$  é a diferença de temperatura (K) e  $RT$  é a resistência térmica ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ).

## 5. CONCLUSÃO

Conclui-se que, apesar materiais apresentarem valores iguais de condutividade térmica, o desempenho térmico deles é diferente, pois o desempenho térmico de um material não está relacionado apenas à propriedade da condutividade térmica, mas também de outras variáveis, como a absorvância solar, o fluxo de calor, a transmitância térmica (que é função da condutividade térmica e da espessura), a resistência térmica (inversamente proporcional à transmitância térmica) e a inércia térmica.

Os resultados deste estudo mostram a importância da absorvância solar e da espessura do material investigado para composição da envoltória de uma edificação. Quanto maior a taxa de radiação solar absorvida por uma superfície, maior será sua temperatura superficial. A cor natural da placa de poliuretano, de tom escuro, não apresentou resultados eficientes para o uso em uma edificação localizada em clima quente como o de Campinas. A espessura da placa usada na célula teste, por sua vez, demonstrou elevada transmitância térmica e baixa resistência térmica. Além disso, o material demonstrou nenhum amortecimento térmico e baixa inércia térmica.

Para tanto, tendo em conta os benefícios do uso desse material - alta rigidez, melhores respostas à fadiga sob cargas cíclicas, leveza e resistência mecânica - é aconselhável o estudo desse material juntamente com outras camadas de materiais para a composição da envoltória de uma edificação, tendo em vista um melhor desempenho térmico do conjunto. Alternativamente, recomenda-se utilizar placas de maior espessura e com pintura em cor clara na face externa. Além disso, a fim de melhores comparações quanto ao



desempenho térmico, seriam necessários experimentos com duração mais longa e em materiais cujas condutividades fossem distintas. Também se indica, como pesquisa futura, o desenvolvimento de trabalhos futuros sobre o potencial acústico da poliuretana.

Com esses resultados, busca-se incentivar a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais construtivos e auxiliar na divulgação das propriedades térmicas de novos materiais.



## 6. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

BALDAN, V. J. S. **Desenvolvimento e caracterização de placas poliméricas produzidas a partir da reciclagem do resíduo industrial de poliuretana termofixa**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2015

BIASI J. A., KRÜGER E. L. **Estudos do desempenho térmico de células-teste enterrada e semienterrada**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, vol. 10, p. e019023, 30 maio 2019.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex, acrílica e PVA**. 2008. 160p. Tese (Doutorado) -Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas,Campinas, 2008.

FENOGLIO E., et. al. Hygrothermal and environmental performance of a perlite-based insulation plaster for the energy retrofit of buildings. **Energy and Buildings**, Italia, vol. 179, p. 26-38, 2018.

GALVÃO L., SILVA M., GAIOSO J. **Desenvolvimento da telha ecológica de baixo custo à base do bagaço de laranja e a caracterização do seu potencial de aplicação em habitações de interesse social**. Feira de Ciências das Escolas Estaduais, 2016/2017.

GOMES. E. G. S., MELO, A. B. **Caracterização do fluxo de calor em alvenaria com blocos EVA**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 9, n. 4, p. 290-304, dez. 2018.

JEONG, Y.-S. et al. A study on the thermal conductivity of resilient materials. **Thermochimica Acta**, Korea. v. 490, p. 47–50, 2009.

KOSNY J, et. Al. Dynamic thermal performance analysis of fiber insulations containing bio-based phase change materials (PCMs). **Energy and Buildings**, Estados Unidos. v. 52, p. 122-131, 2012.

MAHANTA N. K., ABRAMSON A. R. The dual-model heat flow meter technique: A versatile method for characterizing thermal conductivity. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, p. 5581-5586, 2010.



MORETTI E., BELLONI E., AGOSTI F. Innovative mineral fiber insulation panels for buildings: Thermal and acoustic characterization. **Applied Energy**. V. 169, p. 421-432, 2016.

MOURA, L. M. **Desenvolvimento de um protótipo de equipamento de placa quente protegida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica: Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.

MURATA, L. C. M. **Determinação de condutividade térmica de novos materiais por meio de ensaios em condutímetro**. Relatório (Iniciação Científica) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2019.

MURATA, L. C. M.; SILVA JR, O. P.; NEVES, L. O. Construção e teste de um dispositivo para ensaio de condutividade térmica de novos materiais de construção. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

NICOLAU, V. P.; GÜTHS, S.; SILVA, M. G. Medição da condutividade térmica e do calor específico de materiais isolantes. **Anais...** In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, IX. ENCIT, 2002.

RAMANAIAH, K.; PRASAD, A. V. R.; REDDY, K. H. C. Mechanical, thermophysical and fire properties of sansevieria fiber-reinforced polyester composites. **Material and Design**, Índia. v. 49, p. 986–991, 2013.

SAINT-MICHEL, F., CHAZEAU, L., CAVAILLÉ J. Mechanical properties of high density polyurethane foams: II Effect of the filler size. **Composites Science and Technology**, v.66, n.15, p.2709-2718, 2006.

SERVES, V. **Espumas flexíveis de poliuretano à base de polióis de óleo de mamona etoxilado**. 72f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

THOMAZINI, L. F. V. **Estudo do comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar no interior de um secador solar misto de ventilação natural**. 51p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

UCHOA, S.B.B. **Condutividade térmica da madeira**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 1989. São Carlos, 1989.