

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LETICIA ANTUNES RESENDE FIGUEIREDO

ESTUDO TÉRMICO DO MATERIAL POLIMÉRICO NO REVESTIMENTO
DE EMBALAGEM PARA O TRANSPORTE DE MATERIAL BIOLÓGICO
CATEGORIA B – UN3373

BELO HORIZONTE

2019

LETICIA ANTUNES RESENDE FIGUEIREDO

**ESTUDO TÉRMICO DO MATERIAL POLIMÉRICO NO REVESTIMENTO
DE EMBALAGEM PARA O TRANSPORTE DE MATERIAL BIOLÓGICO
CATEGORIA B – UN3373**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Ferreira Santos

BELO HORIZONTE

2019

LETICIA ANTUNES RESENDE FIGUEIREDO

**ESTUDO TÉRMICO DO MATERIAL POLIMÉRICO NO REVESTIMENTO
DE EMBALAGEM PARA O TRANSPORTE DE MATERIAL BIOLÓGICO
CATEGORIA B – UN3373.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título em Bacharel em Engenharia de Materiais.

Apresentado em:

BANCA EXAMINADORA

.....
Prof. Dr. João Paulo Ferreira Santos

.....
Prof. Dr. André Guimarães Ferreira

.....
Prof. Dr. Breno Rocha Barrioni

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por ter me dado suporte e incentivo durante todos estes anos, principalmente nas situações de desânimo e cansaço. Luiz Fernando, Cláudia e Vitor, obrigada.

Agradeço ao Rafael Starling, por ter me apoiado e me motivado a seguir em frente, sem me permitir olhar para trás. Foi muito importante tê-lo como exemplo de esforço e foco.

Agradeço as minhas amigas, por estarem comigo sempre, me dando forças para seguir e concluir esta etapa.

Agradeço ao CEFET, por toda a estrutura e bons tutores que ofereceram durante todo este curso. Além disso, agradeço ao suporte dos coordenadores, principalmente ao atual coordenador Ernane, que tanta paciência teve comigo nesta reta final.

Agradeço ao João Paulo Ferreira Santos, meu orientador, e ao professor André Guimarães Ferreira, que também me auxiliou muito neste trabalho. Vocês foram muito importantes para a conclusão desta etapa.

Agradeço à Aline Silva, que sempre me orientou da forma mais sincera e simplificada de como escrever um bom trabalho.

Agradeço aos amigos do CEFET, por tanta parceria ao longo dos anos e pelas boas lembranças.

RESUMO

Os polímeros são uma classe de materiais com aplicações muito amplas devido à sua versatilidade, adaptabilidade e características competitivas. Tais materiais atuam indiretamente no transporte de materiais biológicos da categoria B UN3373, garantindo o isolamento térmico das embalagens no transporte de amostras, certificando a estabilidade das mesmas. O presente trabalho retrata o estudo do polímero com as características térmicas mais adequadas para revestimento da embalagem em estudo. Foi realizado o estudo térmico específico do poliestireno expandido, polímero escolhido como melhor candidato para a aplicação em questão, avaliado através do ensaio de condutividade térmica e a caracterização por DSC. Também foi feita a avaliação numérica da transferência de calor na embalagem de estudo a partir do software TransCal, simulando duas situações: com e sem revestimento polimérico. Os resultados obtidos confirmaram a capacidade de isolamento térmico do poliestireno expandido. A partir do software TranCal, verificou-se que o poliestireno expandido cumpre bem o seu papel enquanto isolante térmico, fazendo com que a condução do calor demore mais tempo para acontecer em relação ao sistema sem revestimento. O ensaio de DSC confirmou a estabilidade do poliestireno expandido na faixa de temperatura relevante para a aplicação em questão. Dessa forma, o poliestireno expandido pode ser aplicado para o revestimento de embalagens de papelão para o transporte de material biológico categoria B UN3373, assegurando a estabilidade térmica e integridade das amostras.

Palavras-chave: polímero, poliestireno expandido, condução de calor, condutividade térmica, isolamento térmico, material biológico.

ABSTRACT

Polymers are a class of materials with very wide applications due to their versatility, adaptability and competitive characteristics. These materials act indirectly in the transport of biological materials of category B UN3373, ensuring the thermal insulation of packaging in the transportation of samples, certifying their stability. The present work portrays the study of the polymer with the most appropriate thermal characteristics for coating the studied packaging. The thermal study of expanded polystyrene, the polymer chosen as the best candidate for the application in question, was done and was evaluated by the thermal conductivity test and characterization by DSC. A numerical evaluation of heat transfer of the studied packaging was also done by using the TransCal software, simulating two situations: with and without coating. The results confirmed the thermal isolation capacity of expanded polystyrene. From the TranCal software, was confirmed that the expanded polystyrene meets the requirement as a thermal insulator, delaying the heat conduction compared to the uncoated system. The DSC test confirmed the stability of expanded polystyrene in the relevant range temperature to the application in question. Thus, expanded polystyrene can be applied to the coating of the cardboard packaging for the transport of biological material of category B UN3373, ensuring thermal stability and the integrity of the samples.

Keywords: polymer, expanded polystyrene, heat conduction, thermal conductivity, thermal insulation, biological material.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Embalagem utilizada no transporte de material biológico tipo B.....	11
Figura 2 – Segmentação do mercado de plástico no Brasil em 2003	13
Figura 3 – Representação dos polímeros e valor agregado	15
Figura 4 – Faixa de condutividade térmica para diferentes materiais	17
Figura 5 – Condições de contorno para a equação do calor na superfície ($x = 0$)...	20
Figura 6 - Espuma de poliuretano.	23
Figura 7 - Poliestireno expandido.....	25
Figura 8 – Fluxograma da reciclagem do poliestireno expandido.....	26
Figura 9 – Rolo de lã de vidro	28
Figura 10 – Rolo de lã de rocha.	29
Figura 11 – Amostra de poliestireno expandido utilizada.....	30
Figura 12 – Amostra de poliestireno expandido sendo cortado em quatro partes.	31
Figura 13 – Amostra de poliestireno expandido sendo furada.	31
Figura 14 – Estrutura da montagem do experimento	33
Figura 15 – Fluxograma dos procedimentos adotados no trabalho.	34
Figura 16 – Modelo da caixa adotada para a simulação	35
Figura 17 – Malha de simulação do sistema caixa de papelão e ar atmosférico	36
Figura 18 – Malha de simulação do sistema caixa de papelão, isopor e ar.....	38
Figura 19 – Gráfico temperatura (°C) x tempo (min) para o primeiro ensaio.....	41
Figura 20 – Gráfico temperatura (°C) x tempo (min) para o primeiro ensaio.....	42
Figura 21 – Gráfico temperatura (°C) x tempo (min) para o terceiro ensaio	43
Figura 22 - Condução do calor na caixa na primeira simulação	47
Figura 23 - Condução do calor na caixa na segunda simulação	49
Figura 24 – Curva de DSC em função da temperatura.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Materiais poliméricos e propriedades térmicas.	21
Tabela 2 – Características do poliuretano.	24
Tabela 3 – Características do poliestireno expandido.	25
Tabela 4 – Características da lã de vidro.....	28
Tabela 5 – Características da lã de rocha.	29
Tabela 6 – Parâmetros considerados pelo TransCal.	37
Tabela 7 – Medida das temperaturas no primeiro ensaio.....	40
Tabela 8 – Medida das temperaturas no segundo ensaio.	42
Tabela 9– Medida das temperaturas no terceiro ensaio.....	43
Tabela 10 - Dimensões do corpo de prova e resistor.....	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo Geral	12
2.2	Objetivo Específico	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Materiais Poliméricos.....	13
3.1.1	<i>Indústria de polímeros</i>	<i>13</i>
3.1.2	<i>Polímeros e valor agregado</i>	<i>14</i>
3.2	Transferência de calor.....	15
3.2.1	<i>Condução.....</i>	<i>15</i>
3.2.2	<i>Propriedades térmicas.....</i>	<i>16</i>
3.2.3	<i>Condutividade térmica</i>	<i>16</i>
3.2.4	<i>Sistemas radiais.....</i>	<i>17</i>
3.2.5	<i>Equação do calor</i>	<i>18</i>
3.3	Isolantes térmicos	20
3.3.1	<i>Custo geral de polímeros aplicados em isolamento térmico.....</i>	<i>21</i>
3.3.2	<i>Classificação dos isolantes térmicos.....</i>	<i>21</i>
3.4	Poliuretano	23
3.4.1	<i>Descrição geral do poliuretano.....</i>	<i>23</i>
3.4.2	<i>Especificações do poliuretano</i>	<i>24</i>
3.5	Poliestireno expandido	24
3.5.1	<i>Descrição geral do poliestireno expandido</i>	<i>24</i>
3.5.2	<i>Indústria do poliestireno expandido.....</i>	<i>25</i>
3.5.3	<i>Especificação do poliestireno expandido</i>	<i>25</i>
3.5.4	<i>Reciclagem do poliestireno expandido</i>	<i>26</i>
3.5.5	<i>Processo de espumação do poliestireno expandido</i>	<i>27</i>
3.6	Lã de vidro	27
3.6.1	<i>Descrição geral da lã de vidro</i>	<i>27</i>

3.6.2	<i>Especificação da lã de vidro</i>	28
3.7	Lã de rocha	28
3.7.1	<i>Descrição geral da lã de rocha</i>	28
3.7.2	<i>Especificação da lã de rocha</i>	29
4	MATERIAL E MÉTODOS	30
4.1	Material	30
4.2	Métodos	30
4.2.1	<i>Preparação do corpo de prova</i>	30
4.2.2	<i>Realização do procedimento</i>	32
4.2.3	<i>Simulação com o software TransCal</i>	35
4.2.4	<i>Ensaio de DSC</i>	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1	Medição da condutividade térmica	40
5.1.1	<i>Primeiro ensaio</i>	40
5.1.2	<i>Segundo ensaio</i>	41
5.1.3	<i>Terceiro ensaio</i>	43
5.2	Cálculo da condutividade térmica (k)	44
5.3	Resultados de simulação pelo TransCal	46
5.3.1	<i>Primeira simulação</i>	46
5.3.2	<i>Segunda simulação</i>	48
5.4	Resultados da caracterização por DSC	51
6	CONCLUSÕES	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Os polímeros são uma classe de materiais que estão presentes no dia a dia das pessoas, nos mais variados ambientes e situações. No cenário atual, o setor de polímeros experimenta crescimento contínuo. A indústria de polímeros tem alavancado pelo fato de os polímeros serem materiais versáteis, que possuem características as quais lhe conferem vantagens competitivas, de modo a cumprir de forma eficaz os requisitos pretendidos para o mercado atual.

Uma das atuações indiretas dos polímeros é no transporte de materiais biológicos, uma vez que esta classe de materiais pode se comportar como isolantes térmicos, contribuindo para manter a estabilidade das amostras refrigeradas ou congeladas. Por isso, os polímeros tem grande relevância na logística de materiais biológicos, uma vez que o transporte de amostras clínicas faz parte da fase pré-analítica do processo operacional de realização de exames laboratoriais.

Estima-se que um grande laboratório transporte cerca de 20 mil amostras biológicas diariamente. Portanto, para que possa oferecer resultados confiáveis, é necessário que se utilize uma amostra biológica devidamente conservada, utilizando embalagens feitas com os materiais mais apropriados. Pode-se dizer que uma amostra biológica adequada é aquela obtida em quantidade suficiente, em recipiente adequado, identificada e transportada de forma a manter a integridade do material a ser analisado (ANVISA, 2015).

Para o estudo deste trabalho, será tratado o material biológico classificado na categoria B, na qual estão incluídas as amostras para diagnóstico clínico que se sabe ou se suspeita que contenham agentes infecciosos causadores de doenças em humanos, como amostras de pacientes com suspeita de estarem infectados com microrganismos patogênicos ou amostras conhecidamente positivas. Esse material biológico classificado nesta categoria B recebe a marcação UN 3373 (ANVISA, 2015).

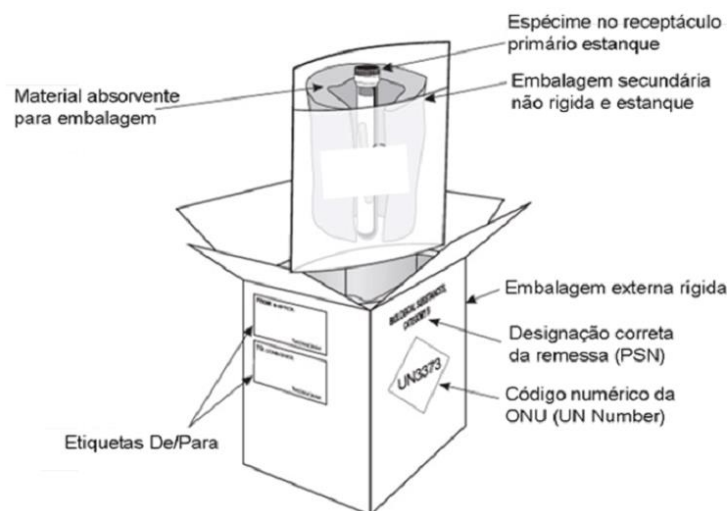
A ANVISA normatiza as instruções para a embalagem do material biológico da categoria B, na qual prevê que as mostras biológicas para diagnóstico devem ser acondicionadas em embalagens de boa qualidade. Isso inclui que devem ser suficientemente resistentes para suportar os impactos e os carregamentos normalmente enfrentados durante o transporte, incluindo transbordo e armazenamento, bem como a subsequente movimentação manual ou mecânica (ANVISA, 2015).

O sistema de embalagens deve ser constituído por três componentes:

- a) Embalagem primária: recipientes que entram em contato direto com o material biológico; podem ser fabricados com vidro, plástico, metal e outros. Ex.: tubos de coleta;
- b) Embalagem secundária, que deverá envolver e conter a embalagem primária. Pode ser constituída por saco plástico, saco plástico tipo bag, caixa de PVC, metal e outros;
- c) Embalagem terciária: recipientes com rigidez adequada. Pode ser constituída por papelão, PVC, metal e outros. No transporte terrestre, uma das embalagens – secundária ou externa – deve ser rígida. Já para o transporte aéreo, a embalagem externa deve ser obrigatoriamente rígida (ANVISA, 2015).

Existe uma particularidade do transporte de material refrigerado, na qual o material refrigerante, tal como gelo, gelo reciclável, gelo seco ou o nitrogênio líquido, deverá ser capaz de manter o material biológico a uma faixa de temperatura especificada durante o transporte. O material refrigerante deve ser colocado em torno da embalagem secundária ou em uma sobre embalagem. Os materiais que formam as embalagens deverão suportar as temperaturas relacionadas (ANVISA, 2015).

Figura 1 – Embalagem utilizada no transporte de material biológico tipo B



Fonte: ANVISA, 2015.

A relevância do trabalho em questão é discutir o material polimérico mais adequado para revestimento da embalagem terciária que propicie manter a temperatura refrigerada ideal por tempo suficiente. Assim, serão abordados os materiais poliméricos atualmente mais utilizados para a função de isolante térmico, analisando suas características principais e desempenho para tal aplicação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é definir e estudar o material polimérico que tenha as características térmicas mais adequadas para revestir a embalagem terciária e assegurar a estabilidade térmica no transporte de material biológico que necessite ser refrigerado ou congelado.

2.2 Objetivo Específico

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Definir o material polimérico que teoricamente melhor se adequa à aplicação proposta;
- Avaliar as propriedades térmicas do poliestireno expandido, utilizando a caracterização por DSC e o ensaio de condutividade térmica;
- Fazer a avaliação numérica da transferência de calor na embalagem em estudo através do software TransCal para condições revestidas com o poliestireno expandido e sem revestimento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Materiais Poliméricos

De acordo com Canevarolo (2006), materiais poliméricos são definidos como uma macromolécula composta por muito meros, ou seja, muitas unidades de repetição. Já o monômero, corresponde a uma unidade de repetição, é a matéria prima do polímero. Dessa forma, dependendo do monômero, do mero e da ligação covalente, os polímeros serão divididos em três classes gerais:

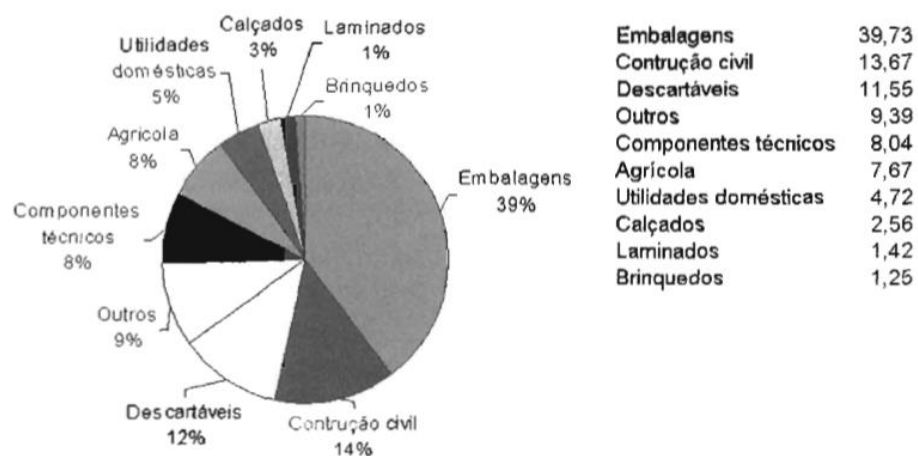
- a) Plásticos – que ainda podem ser subdivididos em termoplásticos e termo fixos;
- b) Borrachas ou Elastômeros;
- c) Fibras;

3.1.1 Indústria de polímeros

De acordo com Canevarolo (2006), o consumo de plástico per capita, ou seja, em kg por habitante, tem sido utilizado como indicador do grau de desenvolvimento de um país. De acordo com dados de 2002, o Brasil ocupava o lugar de oitavo maior consumidor de plástico, perdendo por grandes países como Estados Unidos, Alemanha e Japão.

Em 2002, existiam quase 8.000 empresas no setor de transformação de plástico, na qual o setor de embalagens é o que mais utiliza plásticos, correspondendo a quase um terço de todo consumo brasileiro de 2003, conforme ilustra a Figura 2 (CANEVAROLO, 2006).

Figura 2 – Segmentação do mercado de plástico no Brasil em 2003



Fonte: CANEVAROLO 2006.

Os polímeros são muito utilizados no mercado atualmente e vem ganhando cada vez mais espaço no cenário industrial devido ao seu baixo custo, baixa densidade, à facilidade em adaptar propriedades específicas através de aditivos e também devido à sua versatilidade, podendo assumir as mais diversas aplicações. Portanto, o material polimérico será pauta do estudo em questão e será especificado e apresentado nos próximos tópicos.

3.1.2 Polímeros e valor agregado

No mercado, os polímeros podem ser diferenciados pelo seu valor agregado. De forma geral, os materiais poliméricos podem ser classificados em três grandes grupos: commodities, quasi-commodities e especialidades, de acordo com a Figura 3 (HEMAIS, 2003)

Polímeros tipo commodities são produzidos em grande escala, têm baixo valor agregado, não apresentam diferenciação, são utilizados para finalidades gerais e são consumidos em grandes quantidades (HEMAIS, 2003)

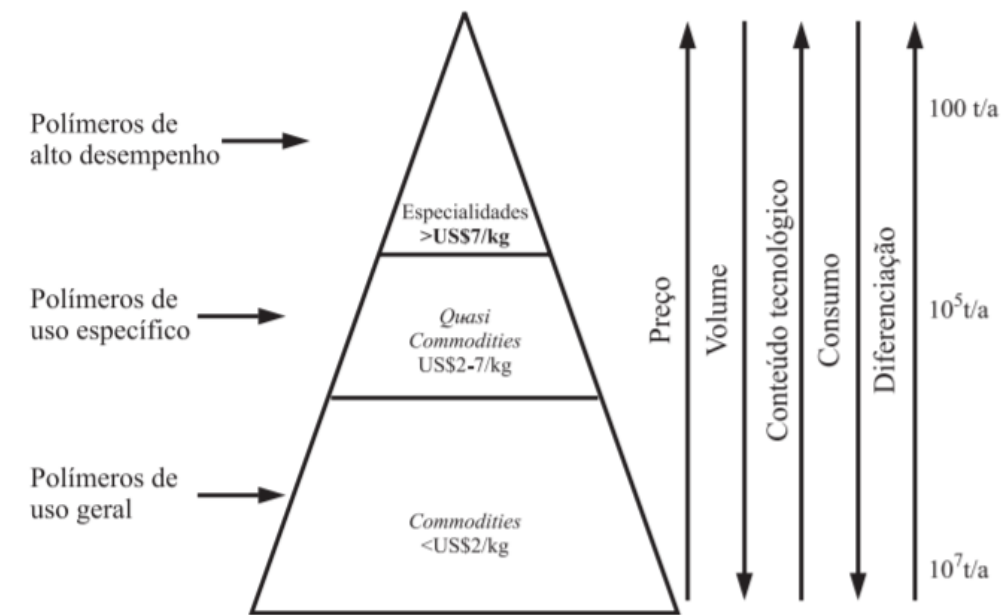
Os polímeros quasi-commodities também são produzidos em grande escala, porém em nível mais baixo do que as commodities. Entretanto, quasi-commodities apresentam desempenhos diferenciados e propriedades que os fazem ideais para determinadas aplicações. O típico polímero dessa categoria é o PET, que tem características específicas de plásticos de engenharia e mercado bem direcionado, porém é produzido em grande escala. Poliamidas, ABS, SAN, poliuretanos e policarbonato também podem ser classificados desta forma (HEMAIS, 2003).

Já os polímeros de especialidades apresentam alto desempenho, são produtos específicos, com propriedades bem definidas e incomuns, tem alto valor agregado e são produzidos em escalas de pequeno porte. Podem ser citados o poli(óxido de metileno) (POM), politetrafluoroetileno (PTFE), poli(tereftalato de butileno) (PBT), poli(sulfeto de fenileno) (PPS) e polímeros líquido-cristalinos (HEMAIS, 2003)

Os polímeros classificados no topo do triângulo são os que apresentam maior preço, diferenciação e conteúdo tecnológico, porém são produzidos e consumidos em menor escala e têm disponibilidade limitada a poucos produtores mundiais (HEMAIS, 2003)

De acordo com Hemaís (2013), verifica-se que quanto maior o volume de produção, maior é o consumo e menor é o grau de diferenciação, o preço e o conteúdo tecnológico.

Figura 3 – Representação dos polímeros e valor agregado



Fonte: HEMAIS, 2003.

3.2 Transferência de calor

“A transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço” (INCROPERA *et al.*, 2008). Existem diferentes tipos de transferência de calor, que podem ser referidos por modos de transferência de calor, sendo eles condução, convecção e radiação.

3.2.1 Condução

De acordo com Incropera *et al.* (2008), condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância, ocasionado pela interação que ocorre entre as partículas.

Em se tratando de sistemas radiais, como os cilíndricos e esféricos, os problemas podem ser analisados como se fossem unidimensionais, uma vez que, normalmente, o gradiente de temperatura segue apenas na direção radial. Em um sistema radial, as perdas de calor se darão igualmente apenas em uma direção, que é a direção radial. Esta é uma vantagem de se trabalhar com um sistema dessa forma (INCROPERA *et al.*, 2008).

3.2.2 *Propriedades térmicas*

As propriedades térmicas dos materiais são muito importantes quando se deseja avaliar o potencial térmico para fins específicos. De acordo com Callister, propriedade térmica é a resposta de um material à aplicação de calor (CALLISTER, 2002).

Neste trabalho, as propriedades térmicas dos materiais estudados serão de grande relevância para se determinar o melhor isolante térmico para a aplicação em questão: revestimento de embalagem para transporte refrigerado ou congelado de material biológico UN3373.

Segundo Callister (2002), podem ser definidos alguns parâmetros essenciais para determinar um material que possa ser qualificado com isolante térmico, tais como:

a) Condutividade térmica: expressa a quantidade de calor transmitida através de um corpo homogêneo. Os polímeros amplamente utilizados com isolantes térmicos, como poliestireno expandido e poliuretano, possuem condutividade térmica na ordem de 0,40 W/mK.

b) Capacidade calorífica: é a capacidade de o material absorver calor a partir das vizinhanças externas. Ela representa a energia necessária para produzir uma elevação unitária de temperatura.

c) Difusividade térmica: determina a relação entre a capacidade que o material tem de conduzir e capacidade que tem de armazenar energia. Quanto maior for a difusividade, mais rápido o material responde as variações térmicas, ou seja, implica em menor capacidade de manter uma temperatura por maior intervalo de tempo.

3.2.3 *Condutividade térmica*

De acordo com Incropera *et al.* (2008), a condutividade térmica pode ser definida como uma propriedade de transporte que “fornece uma indicação da taxa na qual a energia é transferida pelo processo de difusão” em um meio material.

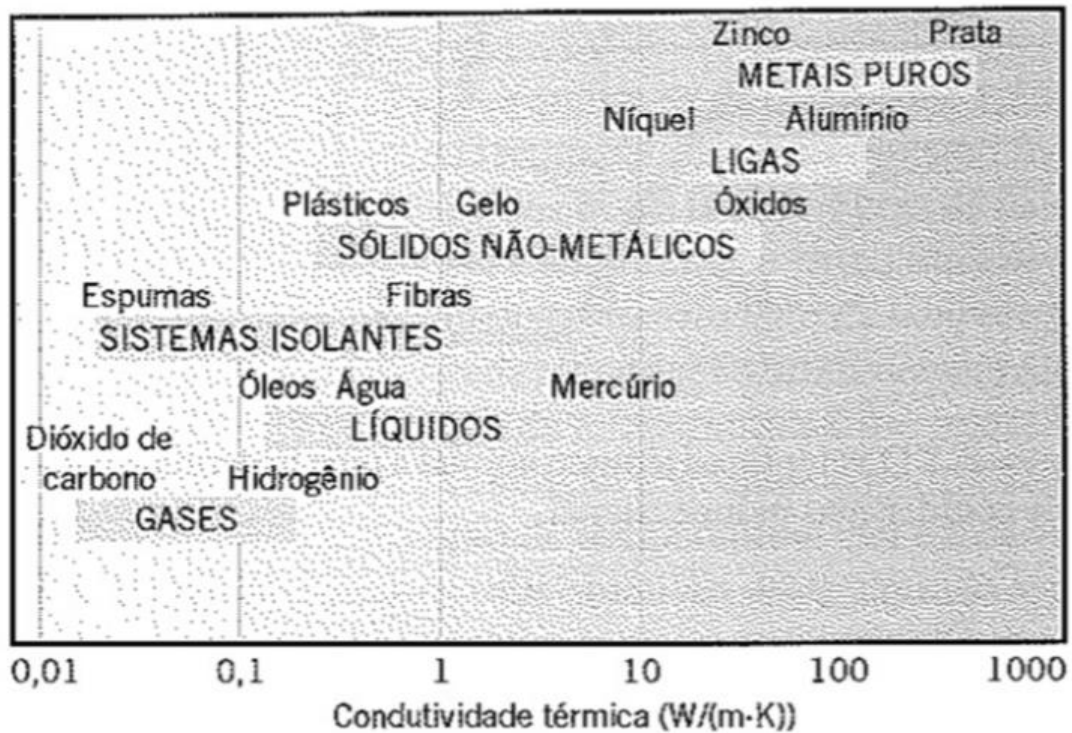
Fazendo uma análise de como esta propriedade é representada matematicamente, a condutividade térmica associada à direção x, pode ser definida a partir da Lei de Fourier pela Equação 1.

$$k_x = \frac{(q''_x)}{\frac{\partial T}{\partial x}} \quad (1)$$

Na equação 1, q''_x é o fluxo térmico por condução na direção x e a razão no denominador corresponde ao gradiente de temperaturas que o meio é submetido (INCROPERA *et al.*, 2008).

De acordo com a Figura 4, pode-se verificar as faixas de condutividade térmica para diferentes tipos de materiais, observando com enfoque os materiais isolantes, que estão na faixa de condutividade térmica de 0,01 a 1,0 W/m.K.

Figura 4 – Faixa de condutividade térmica para diferentes materiais



Fonte: INCROPERA *et al* 2008.

3.2.4 Sistemas radiais

A condução, quando tratada em sistemas radiais, possibilita a sua avaliação em uma única dimensão (INCROPERA *et al.*, 2008).

Fazendo a análise de um corpo cilíndrico, pode-se usar a Lei de Fourier para expressar a taxa de transferência de calor, como demonstra a Equação 2:

$$q_r = \frac{(T_i - T_e)}{R_t} \quad (2)$$

onde T representa a temperatura em Kelvin, R_t representa o somatório das resistências térmicas em K/W e q_r representa a taxa de transferência de calor em W.

Considerando que a resistência térmica tem a forma da Equação 3, é possível chegar à Equação 4 e, assim, obter a condutividade rearranjando os termos, que resultam na Equação 5.

$$R_{cond} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi Lk} \quad (3)$$

$$q_r = \frac{2\pi Lk (T_i - T_e)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4)$$

$$k = \frac{q_r \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi L(T_i - T_e)} \quad (5)$$

Na Equação 5, L refere-se ao comprimento do cilindro (m), r_1 e r_2 aos raios interno e externo do cilindro (m), respectivamente, q_r refere-se à taxa de calor radial e T_i e T_e as temperaturas interna e externa (K) do cilindro durante o processo de transferência de calor (INCROPERA *et al.*, 2008).

3.2.5 Equação do calor

Um dos objetivos da análise da condução do calor é determinar o campo de temperaturas em um meio, a partir de condições de fronteiras estabelecidas. Dessa forma, a partir de conhecida esta distribuição, o fluxo de calor em qualquer ponto do meio ou na sua superfície pode ser determinado pela Lei de Fourier. Esta é uma equação diferencial, cuja solução, para conduções de contorno especificadas, nos fornece a distribuição de temperaturas de um meio (INCROPERA *et al.*, 2008).

A equação do calor pode ser descrita, de acordo com as coordenadas cartesianas, conforme a Equação 6 a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

A Equação 6 define que em qualquer ponto do meio, a taxa líquida de transferência de energia por condução no interior de um volume unitário somada à taxa volumétrica de geração de energia térmica deve ser igual à taxa de variação da energia térmica armazenada no interior deste volume. O termo k corresponde à condutividade térmica do material (W/mK), enquanto que o termo T se refere à temperatura (K). O termo ρC_P corresponde à capacitância térmica, que é o produto entre a densidade e o calor específico, sendo essa propriedade uma medida da capacidade do material em armazenar energia térmica (INCROPERA *et al.*, 2008).

De acordo com Incropera *et al.* (2008), para a condução bidimensional em um meio, sem geração e com propriedades constantes, a Equação 6 se reduz à Equação 7 a seguir:

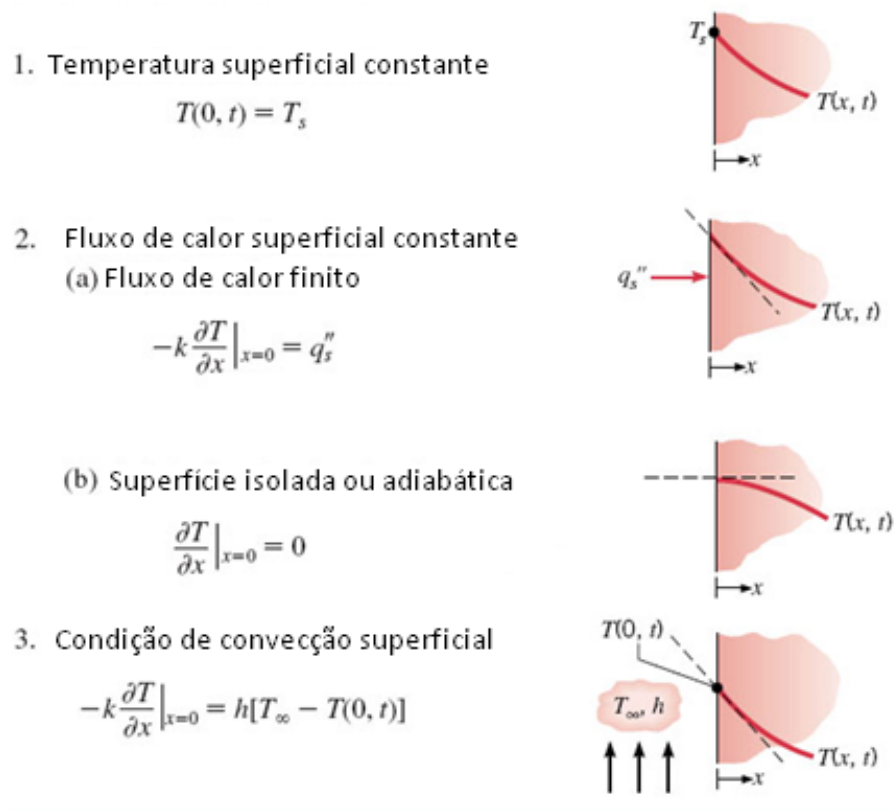
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

A solução da equação do calor depende das condições físicas existentes nas fronteiras do meio, e, se a situação variar com o tempo, caracterizando um processo transiente, a solução também depende das condições existentes no meio em algum instante inicial (INCROPERA *et al.*, 2008).

Para a determinação da condição inicial, como a Equação do Calor é de primeira ordem em relação ao tempo, apenas uma condição deve ser especificada. Já para a determinação das condições de fronteira, como a Equação do Calor é de segunda ordem em relação às coordenadas espaciais, duas condições de contorno devem ser fornecidas para cada coordenada espacial necessária para descrever o problema (INCROPERA *et al.*, 2008).

Na Figura 5 são apresentadas as condições de contorno para a equação do calor na superfície.

Figura 5 – Condições de contorno para a equação do calor na superfície ($x = 0$).



Fonte: INCROPERA et al, 2008.

3.3 Isolantes térmicos

Os isolantes térmicos têm como função reduzir ou eliminar as trocas de calor indesejáveis no interior de um ambiente, fazendo com que essa se mantenha constante. Isso significa que um bom isolante térmico tem a menor condutividade térmica possível (VILAR, 2002).

O ar é um bom isolante térmico, portanto, materiais porosos são bons isolantes devido aos espaços de ar contido em sua estrutura. Por isso, materiais como poliestireno expandido e espumas de poliuretano são amplamente utilizados como isolantes térmicos em diversas aplicações (VILAR, 2002).

Na Tabela 1, são apresentadas algumas propriedades térmicas dos materiais isolantes mais usados.

Tabela 1- Materiais poliméricos e propriedades térmicas.

MATERIAL	DENSIDADE (kg/m ³)	CONDUTIVIDADE TÉRMICA A 24°C (W/m. K)	ESPESSURA NECESSÁRIA (mm)
Espuma rígida de PU	32	0,02	20
Poliestireno expandido	16	0,04	44
Lã-de-vidro	50-150	0,04	49
Lã-de-rocha	100-300	0,05	46-51
Cortiça	220	0,05	61
Madeira (pinho branco)	350-550	0,11	>140

Fonte: Adaptada de VILAR, 2002.

3.3.1 Custo geral de polímeros aplicados em isolamento térmico

O custo de um material constitui um fator importante na escolha de um isolante térmico. Portanto, para a escolha de um isolante térmico, deverá ser considerado o custo de mercado do material.

De acordo com pesquisa de mercado realizada a partir de fornecedores brasileiros para os polímeros com menor condutividade térmica, foi possível verificar que o preço do poliestireno expandido é em torno de R\$50,00/kg. Já o valor encontrado para a espuma de poliuretano foi de aproximadamente R\$75,00/kg.

Dessa forma, o custo de mercado do poliestireno expandido é consideravelmente inferior ao custo da espuma de poliuretano, característica que tem fortalecido a sua presença no mercado consumidor.

3.3.2 Classificação dos isolantes térmicos

Para Silva (1996), isolantes térmicos podem ser classificados de acordo com várias tipologias, como por exemplo, quanto ao modo de produção, quanto à estrutura, quanto à apresentação e à natureza das matérias primas. A classificação em relação às matérias primas tem relevância ao presente trabalho, podendo ser subdividido como materiais de natureza mineral, sintética e vegetal.

3.3.2.1 Materiais isolantes de natureza mineral

Estes materiais são feitos a partir de matérias primas naturais, tais como areia, rocha vulcânica e vidro reciclado. Geralmente apresentam boa resistência ao fogo. Pode-se citar como exemplos:

- Lã de rocha;
- Vidro celular;
- Vermiculite;
- Perlite;
- Argila expandida.

3.3.2.2 Materiais isolantes de natureza sintética

Geralmente, estes materiais são produzidos através de hidrocarbonetos e são impermeáveis ao vapor de água. Em alguns casos, a queima de isolantes sintéticos pode originar gases tóxicos. São eles:

- Poliestireno expandido;
- Poliuretano.

3.3.2.3 Materiais isolantes de natureza vegetal

Os isolantes de origem vegetal são aqueles que são produzidos a partir de fibras vegetais. Por serem orgânicos, costumam gerar menos impacto ambiental que os demais citados anteriormente, dentre eles:

- Lã de madeira;
- Lã de Linho;
- Fibra de madeira;
- Cortiça;
- Palha.

3.4 Poliuretano

3.4.1 Descrição geral do poliuretano

Os poliuretanos (PU's) são uma classe versátil de polímeros. A reação principal deste polímero é através da reação entre o isocianato e uma hidroxila. Dependendo da composição inicial de isocianato e hidroxila, o produto final terá diferentes propriedades físicas e químicas (VILAR, 2002).

Reações paralelas também podem acontecer, como por exemplo, para a formação de PU na forma de expansão. A reação se dá a partir de um isocianato e um glicol, na qual a água presente no glicol reage com o isocianato e produz CO₂, primeira forma de expansão usada para produzir espumas de poliuretano (CANEVAROLO, 2006).

Os poliuretanos são muito comercializados sob a forma de espumas flexíveis ou rígidas e elastômeros. O maior consumo de espumas rígidas de poliuretano é em isolamento térmico, uma vez que as espumas possuem baixa densidade e condutividade térmica, sendo muito usadas no isolamento térmico em frigoríficos, refrigeradores, tubulações e painéis divisórios (VILAR, 2002).

Figura 6 - Espuma de poliuretano.



Fonte: Próprio autor.

3.4.2 Especificações do poliuretano

Tabela 2 – Características do poliuretano.

Tipo	Correspondente
Densidade	32 kg/m ³
Condutividade térmica	0,02 W/m. K
Reação ao fogo	Inflamável
Reciclagem	Não renovável

Fonte: Adaptada de SILVA, 2013.

3.5 Poliestireno expandido

3.5.1 Descrição geral do poliestireno expandido

O poliestireno expandido, que é reconhecido pela sigla internacional EPS, é também chamado de Isopor, sendo esta uma marca registrada. O EPS é um polímero obtido a partir do petróleo. É resultante da polimerização do estireno, que é um derivado do petróleo, em água, pertencendo ao grupo dos termoplásticos. É composto, majoritariamente, por ar, e cerca de apenas 2% do composto é a matéria prima propriamente dita (GROTE; SILVEIRA, 2002).

Além de ser leve e apresentar baixo custo, apresenta boa resistência mecânica, fácil aplicação e alta impermeabilidade ao vapor de água. Entretanto, como pontos negativos, podemos citar a característica inflamável deste material e a liberação de gases tóxicos na queima (SILVA, 2013).

Estudos indicam que o EPS é um material inerte quimicamente, não é biodegradável, isto é, não se decompõe, não se desintegra, não desaparece no ambiente e não contém CFC; com isso, não contamina quimicamente o solo, a água ou o ar, mas constitui um problema ambiental se não reciclado, pois é um material considerado eterno e ocupa muito espaço devido à sua baixa densidade, causando problemas nos lixões ou aterros sanitários municipais (GROTE; SILVEIRA, 2002).

3.5.2 Indústria do poliestireno expandido

O EPS tem sido amplamente aplicado em vários setores, como embalagens industriais, conservação de produtos alimentícios, proteção de equipamentos, artigos de consumo, materiais para construção civil, isolante térmico, aplicação em processos de fundição de blocos de motores na indústria automobilística, etc (GROTE; SILVEIRA, 2001).

A produção mundial de poliestireno expandido é de aproximadamente 2 milhões de toneladas anuais sendo que, no Brasil, o segmento que mais o consome é o de embalagens, representando 50% da produção total, seguido da construção civil, com 35%, e utilidades domésticas, com 15% (GROTE; SILVEIRA, 2002).

Figura 7 - Poliestireno expandido.



Fonte: TERMOTÉCNICA, 2019.

3.5.3 Especificação do poliestireno expandido

Tabela 3 – Características do poliestireno expandido.

Tipo	Correspondente
Densidade	16 kg/m ³
Condutividade térmica	0,04 W/m. K
Reação ao fogo	Inflamável
Reciclagem	Reciclável

Fonte: Adaptada de SILVA, 2013.

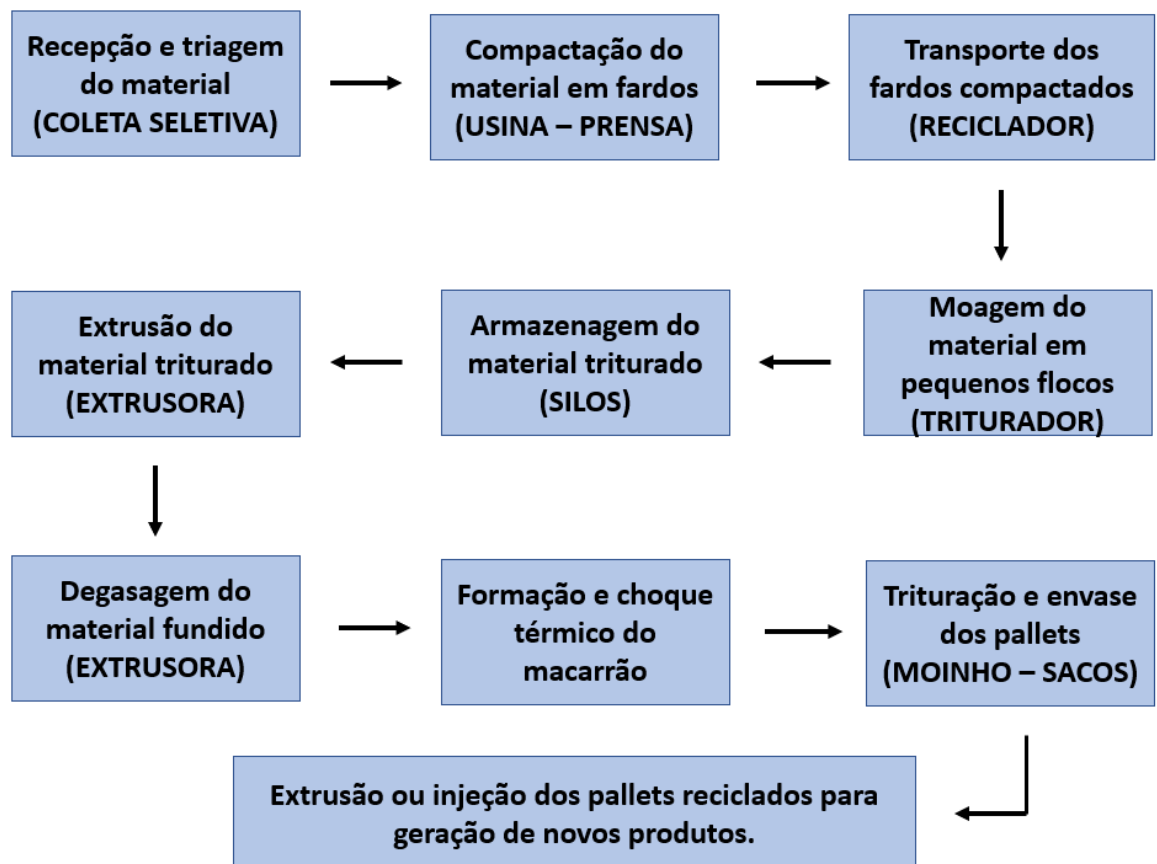
3.5.4 Reciclagem do poliestireno expandido

De acordo com Grote e Silveira (2001), o EPS é um material inerte quimicamente, mas não é biodegradável, uma vez que este não se decompõe e não se desintegra no ambiente. Sendo assim, este material não contamina quimicamente o solo, a água ou o ar, mas pode ser um problema ambiental se não reciclado, pois é um material considerado eterno e ocupa muito espaço devido à sua baixa densidade, causando problemas nos lixões ou aterros sanitários.

Os produtos finais deste material são inodoros, são reaproveitados, reciclados, podendo até voltar às condições de matéria prima. Ao contrário da crença espalhada no país, o poliestireno expandido é totalmente reciclável e já existem algumas empresas no Brasil que o reutilizam (OLIVEIRA, 2013)

A figura a seguir retrata os principais processos envolvidos na reciclagem do poliestireno expandido.

Figura 8 – Fluxograma da reciclagem do poliestireno expandido



Fonte: Adaptada de MILED, 2007.

3.5.5 Processo de espumação do poliestireno expandido

De acordo com Canevarolo (2006), a espumação é um processo de transformação físico de um polímero. Na produção de espumas, é adicionado ao polímero um agente de expansão que, por gerar subprodutos gasosos, expande a massa reduzindo a densidade do mesmo. O agente de expansão gera gases através de sua evaporação, como, no caso da formação do poliestireno expandido, líquidos voláteis como o n-heptano.

O hidrocarboneto Pentano (C_5H_{12}) é o agente expensor empregado no poliestireno. Outros aditivos também são acrescentados neste processo para que haja melhora das propriedades do EPS, como é o caso do retardantes de chama, permitindo assim que este material tenha resistência ao fogo (OLIVEIRA, 2013)

Tal processo está diretamente relacionado à baixa condutividade térmica deste material, propiciada pela estrutura de células fechadas e cheias de ar que dificultam a passagem do calor, conferindo ao EPS um grande poder isolante (CANEVAROLO, 2006).

3.6 Lã de vidro

3.6.1 Descrição geral da lã de vidro

A lã de vidro é um material formado a partir da sílica e sódio aglomerados por resinas sintéticas em alto forno. Além de serem muito leves e de fácil manuseio, este material também propicia o isolamento térmico e acústico, não propaga chamas e não se deteriora. São encontradas para venda na forma de manta, podendo ser aluminizada, encascadas, dentre outras variedades (SOUZA, 2018)

Em contextos que utilizam de temperatura elevada, a lã de vidro do tipo manta de fibro-cerâmica é a mais utilizada por suportar temperaturas até 450°C, com uma condutividade térmica de aproximadamente 0,040-0,045 W/(m.K) (SOUZA, 2018).

3.6.2 Especificação da lã de vidro

Tabela 4 – Características da lã de vidro.

Tipo	Correspondente
Densidade	50 à 150 kg/m ³
Condutividade térmica	0,04 W/m.K
Reação ao fogo	Inflamável
Reciclagem	Não renovável

Fonte: Adaptada de SILVA, 2013.

Figura 9 – Rolo de lã de vidro



Fonte: CASA E CONSTRUÇÃO, 2018.

3.7 Lã de rocha

3.7.1 Descrição geral da lã de rocha

A lã de rocha é obtida através de rochas vulcânicas pelo processo chamado de fusão. É um material permeável ao ar e água, ou seja, na presença de umidade, não é indicado. Além disso, tem alta compressibilidade e baixo custo, mas possui baixa resistência ao corte e é material inflamável. Ela é geralmente comercializada em forma de rolos ou painéis (SILVA, 2013).

3.7.2 Especificação da lã de rocha

Tabela 5 – Características da lã de rocha.

Tipo	Correspondente
Densidade	100 à 300 kg/m ³
Condutividade térmica	0,05 W/m.K
Reação ao fogo	Inflamável
Reciclagem	Não renovável

Fonte: Adaptada de SILVA, 2013.

Figura 10 – Rolo de lã de rocha.



Fonte: ISAR, 2019.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

O material escolhido e utilizado para realização dos procedimentos foi o poliestireno expandido, que chegou ao CEFET-MG conforme a Figura 11, apresentando as seguintes dimensões: 50 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro.

Figura 11 – Amostra de poliestireno expandido utilizada.



Fonte: Próprio autor.

4.2 Métodos

Com o intuito de avaliar as propriedades térmicas do poliestireno expandido, especificamente a condutividade térmica deste, foi realizado o procedimento que será descrito a seguir. Para isso, foi realizada a compra de três corpos de prova cilíndricos do material em questão em loja especializada.

Além da metodologia prática para determinação da condutividade térmica do poliestireno, foi realizada a caracterização por DSC e também foi utilizado o software TransCal para verificação da influência do isopor na transferência de calor transiente, simulando uma situação hipotética que será descrita na metodologia.

4.2.1 Preparação do corpo de prova

O corpo de prova adquirido tinha 50 cm de comprimento e foi cortado longitudinalmente utilizando equipamento específico, de forma que este obtivesse medida semelhante à do resistor, de 40 cm, para medição da condutividade térmica. Após o corte, foi obtido corpo de

prova cilíndrico de, aproximadamente, 40 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro. Além disso, corpo de prova foi cortado em quatro partes iguais, para facilitar o procedimento de furação para a introdução do resistor, conforme mostra a Figura 12.

Figura 12 – Amostra de poliestireno expandido sendo cortado em quatro partes.



Fonte: Próprio autor.

Em seguida, foi feito furo interno central de 8 mm ao longo da seção transversal para introdução do resistor, conforme Figura 13.

Figura 13 – Amostra de poliestireno expandido sendo furada.



Fonte: Próprio autor.

Também foram feitos dois furos radiais no corpo de prova, um no centro e o outro na periferia, para que fossem aferidas as temperaturas nestas duas regiões.

4.2.2 Realização do procedimento

Após preparado o corpo de prova, para o aquecimento do mesmo foi acoplado um resistor tubular de inox de 40cm de comprimento e 0,826mm de diâmetro. Este resistor tem resistência elétrica de $224\ \Omega$ e foi ligado em uma fonte de tensão variável, modelo FJS-0680.

O resistor foi ligado diretamente à fonte. A tensão elétrica foi ajustada durante o procedimento para que a temperatura não atingisse a temperatura máxima suportada pelo material, sem mudanças estruturais.

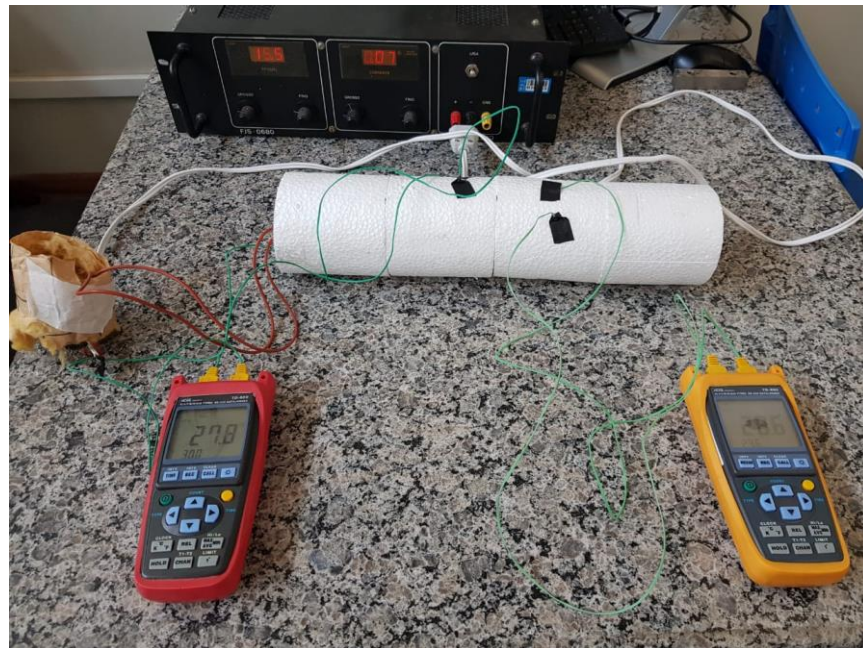
Se fosse necessário, poderia ser utilizada uma pasta térmica, para recobrir a superfície do resistor, a fim de minimizar as perdas térmicas no contato entre o resistor e o corpo de prova polimérico. Como o resistor ficou bem acoplado ao polímero, sem espaços de ar entre eles, não foi necessário o uso da pasta térmica.

Para medir as temperaturas no corpo de prova, foram utilizados dois pares de termopares tipo K, que foram fixados no isopor com fitas isolantes. Cada par de termopares mediu duas temperaturas, central e periférica, totalizando quatro temperaturas ao todo. Cada dois termopares foram acoplados em um sistema de medição ICEL TD-880.

Para assegurar segurança ao experimento, foi considerada a temperatura de fusão do isopor de aproximadamente 100°C , e assim, trabalhou-se com a temperatura máxima de 70°C , realizando o ajuste da tensão elétrica.

A montagem do experimento pode ser visualizada na Figura 14. Todos os procedimentos foram realizados em laboratório no CEFET-MG e estão descritos e resumidos esquematicamente no fluxograma da Figura 15.

Figura 14 – Estrutura da montagem do experimento



Fonte: Próprio autor.

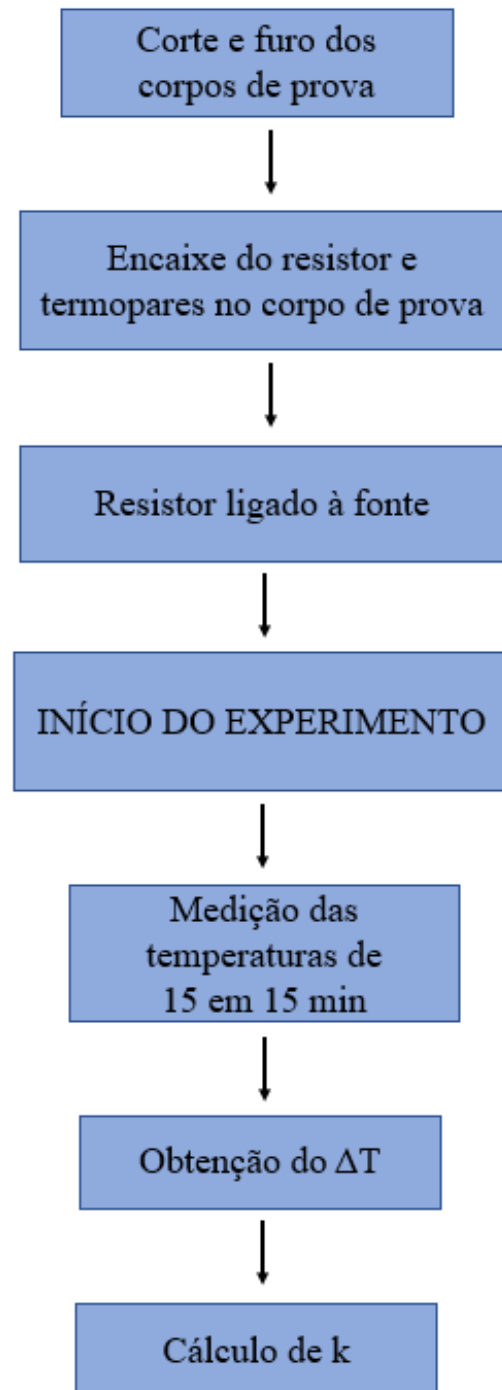
O corpo de prova e o resistor elétrico foram avaliados com paquímetro para que as medidas de comprimento e diâmetro, que serão utilizadas posteriormente no cálculo da condutividade térmica, possam ser mais exatas, minimizando os erros.

As temperaturas centrais e periféricas de cada amostra foram aferidas pelos dois termopares utilizados de 15 em 15 minutos, controlando a diferença de potencial para não ultrapassar a temperatura de segurança estipulada, que foi de 70°C. O ensaio foi interrompido quando se atingiu o regime permanente de transferência de calor.

O objetivo desta metodologia foi obter duas medições de variação de temperatura entre os dois pontos de medição: centro e periferia. A partir da média entre as variações de temperatura obtidas, foi possível chegar a uma variação de temperatura final. Assim, com este dado, foi possível o cálculo da condutividade térmica para o material em teste, a partir da Equação 5.

O procedimento foi realizado em triplicata, com três diferentes corpos de provas de poliestireno expandido de mesma composição. Todos os ensaios seguiram todas as etapas descritas anteriormente, de forma que os resultados obtidos fossem possíveis de comparação.

Figura 15 – Fluxograma dos procedimentos adotados no trabalho.



Fonte: Próprio autor.

4.2.3 Simulação com o software TransCal

O TransCal é um software que permite resolver problemas de condução de calor em malhas bidimensionais, através do método dos volumes finitos, a partir da discretização da equação de condução do calor. A solução da equação diferencial permite determinar o campo de temperaturas em um meio estacionário (MALISKA et al, 1998)

Considerando a Equação 7, que representa a condução bidimensional transiente em um meio, sem geração e com propriedades constantes, a equação de calor requer distribuição inicial de temperaturas (MALISKA, 2004). Como a equação da energia é de primeira ordem no tempo, uma condição inicial deve ser estabelecida para esta coordenada, que foi $T_i = 10^\circ\text{C}$.

Duas condições de contorno devem ser estabelecidas para as coordenadas x e y, pois a equação é de segunda ordem no espaço. Para o problema bidimensional, são necessárias condições de contorno para as fronteiras norte, sul, leste e oeste. Para a simulação em questão, as condições de contorno adotadas foram: norte: fluxo zero; sul: fluxo zero; leste: condição de convecção, na qual $h = 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $T = 25^\circ\text{C}$; oeste: fluxo zero (condição de simetria).

Para a simulação em questão, foi definida a geometria retangular, conforme Figura 16. A simulação foi feita considerando metade da caixa, de forma que fosse estudado o comportamento da condução do calor da extremidade da caixa para o centro da mesma.

Além disso, foram feitas duas simulações transientes e bidimensionais, sendo uma delas não considerando o revestimento com o isopor e a outra, considerando. Assim, foi possível observar a influência do isopor na condução do calor dentro da caixa.

Figura 16 – Modelo da caixa adotada para a simulação



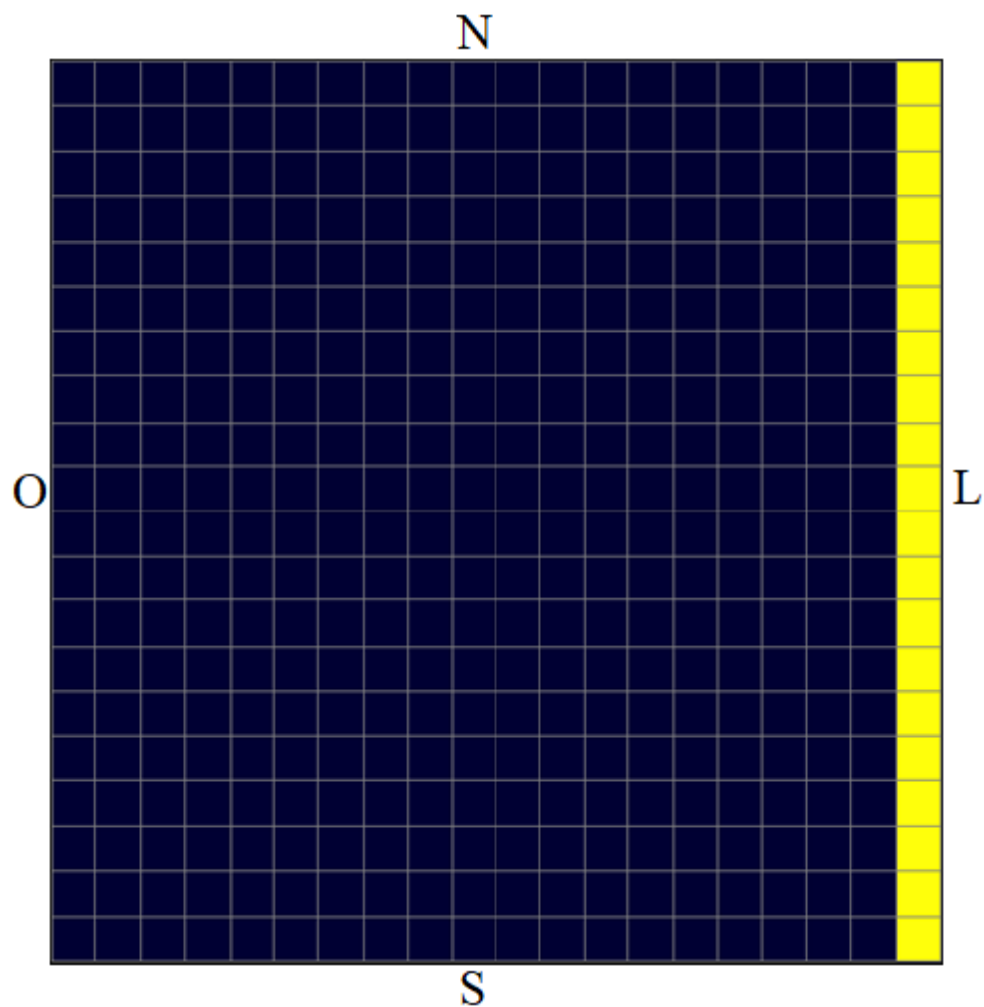
Fonte: Próprio autor.

Para o primeiro ensaio, considerou-se o sistema caixa de papelão e ar atmosférico, sem o revestimento de poliestireno expandido.

Para realização da simulação, a dimensão da caixa considerada foi de 0,1 m de comprimento e 0,1 m de altura. Foi considerada a espessura de papelão de 5 mm, sendo que os 95 mm restantes foram considerados preenchidos por ar atmosférico.

No software, tal dimensionamento foi discretizado por 400 volumes de controle, sendo 19 colunas de ar e 1 coluna de papel, o que pode ser observado de acordo com a Figura 17.

Figura 17 – Malha de simulação do sistema caixa de papelão e ar atmosférico



Fonte: Próprio autor.

Além disso, foi considerado o isolamento das fronteiras N, S e W. Já para a fronteira leste, foi considerada a seguinte condição de convecção: $h=2\text{W/m.K}$ e $T = 25^\circ\text{C}$. A Condição inicial de temperatura foi $T = 10^\circ\text{C}$.

Para a simulação de 600s, o incremento de tempo para a simulação transiente foi de 1s. Para a solução do sistema linear descritivo das equações diferenciais integradas para cada volume de controle, a tolerância máxima admitida para o final de cada iteração foi de 1×10^{-6} °C, permitindo um número máximo de 10000 iterações.

Os valores de densidade, condutividade térmica e calor específicos que o software considera para o ar, papelão e o poliestireno expandido estão representados de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros considerados pelo TransCal

Material	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/Kg. K)	Condutividade térmica (W/m. K)
Ar	1,2	1013	0,03
Papelão	300	1340	0,18
Poliestireno expandido	55	1210	0,06

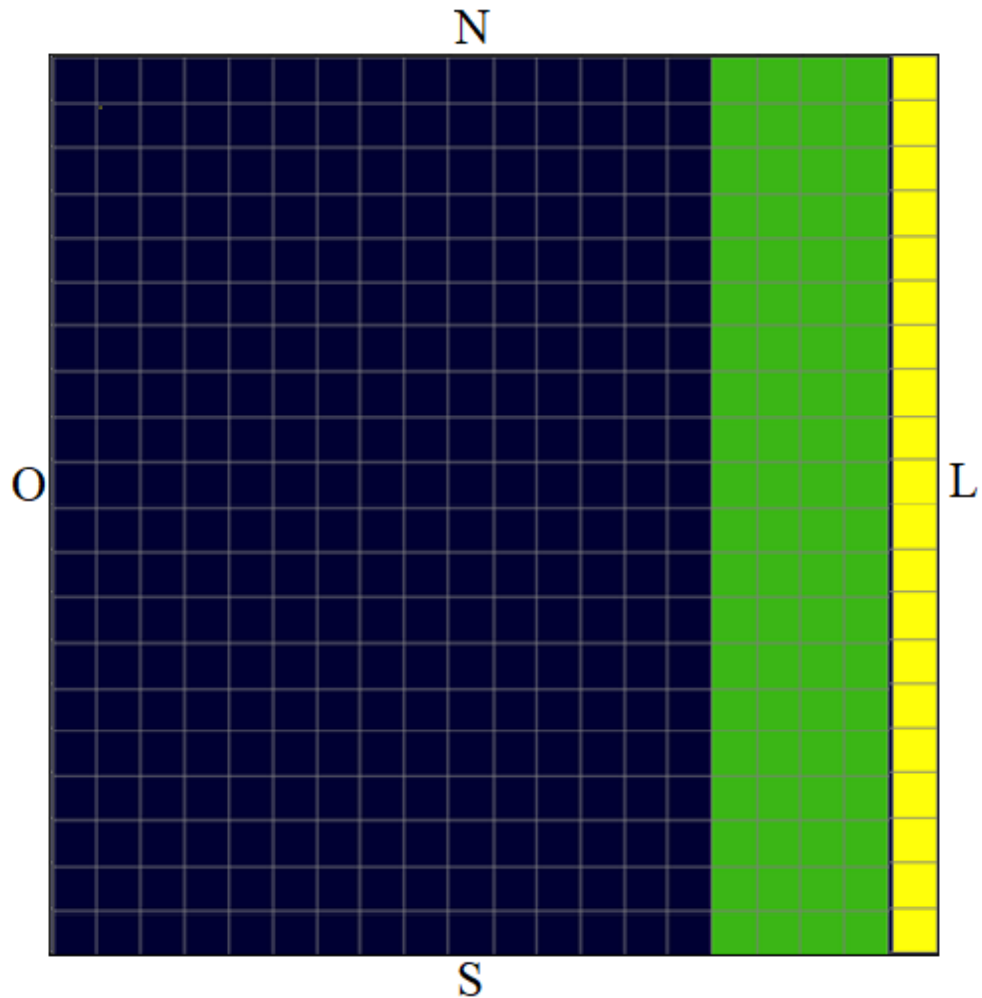
Fonte: Próprio autor.

Na simulação em questão, foram registradas as temperaturas ao longo da dimensão da caixa em quatro intervalos de tempo diferentes, sendo o primeiro registro aos 60 segundos, o segundo em 600 segundos, o terceiro em 1200 segundos e o quarto em 1500 segundos.

Na segunda simulação realizada, considerou-se o sistema caixa de papelão, poliestireno expandido e ar atmosférico. Para realização da simulação, a dimensão da caixa considerada foi de 0,1 m de comprimento e 0,1 m de altura. Foi considerado a espessura de papelão de 5 mm e a espessura do isopor sendo igual a 20 mm.

No software, tal dimensionamento foi representado por 20 x 20 elementos, sendo 9 colunas de ar, 10 colunas isopor, 1 coluna de papelão, que pode ser observado de acordo com a figura 18. As demais condições foram mantidas, de acordo com aquelas expostas na primeira simulação.

Figura 18 – Malha de simulação do sistema caixa de papelão, isopor e ar



Fonte: Próprio autor.

Na simulação em questão, foram registradas as temperaturas ao longo da dimensão da caixa em quatro intervalos de tempo diferentes, sendo o primeiro registro aos 60 segundos, o segundo em 600 segundos, o terceiro em 1200 segundos e o quarto em 1500 segundos.

Além disso, foi feita uma estimativa do tempo ao qual o sistema atingiria a temperatura de aproximadamente 20°C. Sabendo-se que, no primeiro sistema, tal temperatura foi atingida aos 1500 segundos, é possível fazer uma comparação do tempo que cada sistema leva para atingir a referida temperatura.

4.2.4 Ensaio de DSC

Com o intuito de avaliar as temperaturas de transição do poliestireno expandido, bem como a estabilidade térmica do material, foi realizada a caracterização através do DSC. Para tanto, foi utilizado o equipamento DSC-60 da marca Shimadzu.

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) é uma técnica de análise térmica em que mede as temperaturas e o fluxo de calor associado. O método é comumente utilizado, principalmente devido à sua velocidade, simplicidade e disponibilidade (JESUS, 2014)

O DSC permite determinações quantitativas, na qual a área dos picos está relacionada com a energia envolvida no processo, sendo utilizados padrões para calibração do equipamento. Estes padrões apresentam variação de entalpia conhecida, normalmente de fusão, e a área do pico é comparada com a área do processo apresentado pela amostra (BERNAL et al., 2002)

Para a realização do procedimento, primeiramente, com o auxílio de uma balança analítica, foi pesado o cadinho de alumínio e, em seguida, o cadinho de alumínio com a amostra do polímero dentro. Assim, foi possível obter o peso apenas da amostra de poliestireno expandido, obtendo-se o valor de 0,0021 g. A taxa de aquecimento definida foi de 10°C por minuto e a temperatura inicial estabelecida foi de 30°C. O aquecimento foi feito até que o polímero atingisse 70°C. Para o resfriamento, determinou-se que seria de tal forma que o polímero atingisse 30°C.

A temperatura máxima de 70°C foi determinada por segurança, a partir do ponto de fusão do poliestireno expandido que inicia em, aproximadamente, 100°C. Como o equipamento é sensível, a temperatura máxima deveria ser inferior à de fusão do polímero, para evitar qualquer possível dano ao equipamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Medição da condutividade térmica

Para o cálculo da condutividade térmica, as temperaturas centrais e periféricas dos corpos de prova foram analisadas durante intervalos de 15 em 15 minutos, a partir do tempo 0, inicialmente à temperatura ambiente, até atingir 60 minutos. Ou seja, foram obtidos dados de temperatura em 5 momentos diferentes no total. Para os cálculos, as temperaturas consideradas foram aquelas observadas no ultimo intervalo de tempo, quando foi alcançado o regime permanente de transferência de calor, ou seja, quando as diferenças de temperatura começaram a se tornar constantes. Assim, foi possível realizar o cálculo da condutividade térmica.

Como foram utilizados dois pares de termopares, as temperaturas centrais e periféricas aferidas pelo primeiro par, foram denominadas de T1, enquanto que as aferidas pelo segundo par, de T2.

5.1.1 Primeiro ensaio

Os resultados obtidos para o primeiro ensaio podem ser observados na Tabela 7 abaixo:

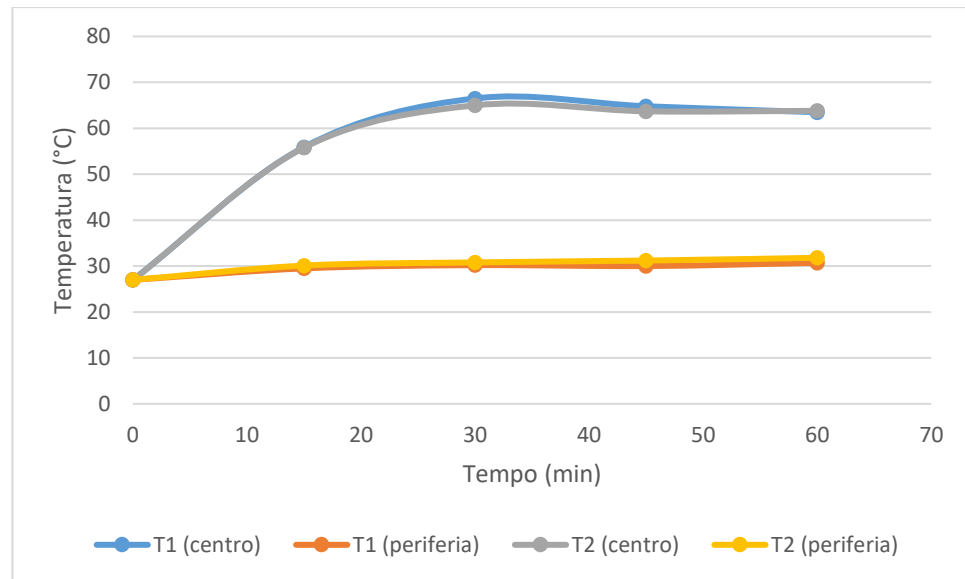
Tabela 7 – Medida das temperaturas no primeiro ensaio

Tempo (min)	T1 (centro)	T1 (periferia)	T2 (centro)	T2 (periferia)
0	27	27	27	27
15	55,9	29,5	55,8	30,1
30	66,5	30,2	65,0	30,8
45	64,8	30,0	63,7	31,2
60	63,5	30,7	65,8	31,8

Fonte: Próprio autor.

A partir dos dados da Tabela 7, foi feito o gráfico das temperaturas em relação ao tempo, conforme Figura 19.

Figura 19 – Gráfico temperatura (°C) x tempo (min) para o primeiro ensaio



Fonte: Próprio autor.

A partir da Figura 19, pode-se verificar que, assim como descrito por Souza (2018), a temperatura aumentou de forma gradual ao longo do tempo. As temperaturas periféricas variaram pouco em relação às temperaturas centrais, uma vez que a transferência de calor ocorre do centro para a periferia, ocasionando esta diferença de temperatura atingida nas duas regiões. As temperaturas variaram até que o sistema atingiu, com cerca de 60 minutos de ensaio, o regime permanente de transferência de calor, caracterizado pela estabilização das curvas e proximidade destas à uma reta.

Além disso, da mesma forma que Souza (2018) constatou, pode-se observar que a sobreposição das retas das temperaturas centrais e periféricas, indicam resultados mais satisfatórios para o cálculo da condutividade térmica.

5.1.2 Segundo ensaio

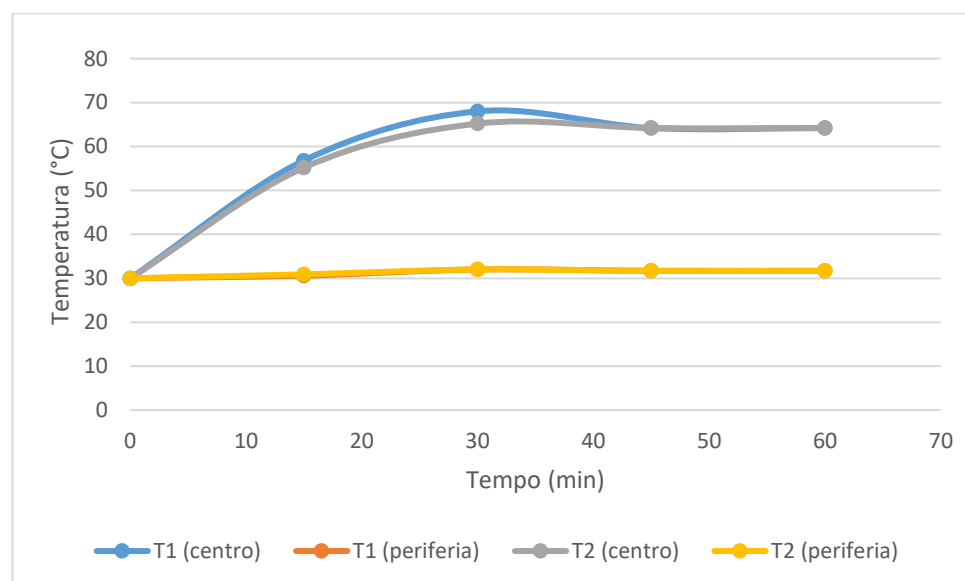
Em seguida, foi realizado o segundo ensaio, cujo resultados obtidos podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 – Medida das temperaturas no segundo ensaio

Tempo (min)	T1 (centro)	T1 (periferia)	T2 (centro)	T2 (periferia)
0	30	30	30	30
15	56,8	30,6	55,2	30,9
30	68,0	32,0	65,2	32,0
45	64,2	31,7	64,2	31,7
60	64,2	31,7	64,2	31,7

Fonte: Próprio autor.

A partir dos dados da Tabela 8, foi possível esboçar o gráfico das temperaturas em relação ao tempo, representado na Figura 20.

Figura 20 – Gráfico temperatura (°C) x tempo (min) para o primeiro ensaio

Fonte: Próprio autor.

A partir do gráfico acima, assim como observado por Souza (2018) e já era esperado, novamente houve o aumento gradual da temperatura ao longo do tempo. As temperaturas variaram até que o sistema atingiu, com cerca de 60 minutos de ensaio, o regime permanente de transferência de calor, caracterizado pela estabilização das curvas e proximidade destas à uma reta.

5.1.3 Terceiro ensaio

Por fim, foi realizado o terceiro ensaio, para confirmar os resultados obtidos nos ensaios anteriores. Novamente, foram aferidas as temperaturas centrais e periféricas, em intervalos de 15 em 15 minutos, do tempo 0 até 60 minutos. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 9.

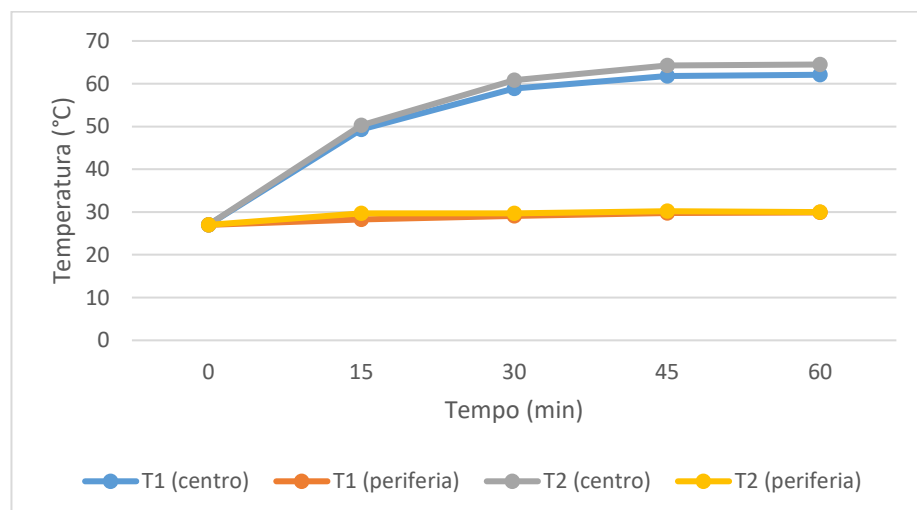
Tabela 9– Medida das temperaturas no terceiro ensaio

Tempo	T1 (centro)	T1 (periferia)	T2 (centro)	T2 (periferia)
0	27	27	27	27
15	49,3	28,3	50,3	29,7
30	58,9	29,1	60,8	29,7
45	61,8	29,8	64,3	30,2
60	62,1	29,9	64,5	30,0

Fonte: Próprio autor.

A partir dos dados da Tabela 9, foi produzido o gráfico representado pela Figura 21.

Figura 21 – Gráfico temperatura (°C) x tempo (min) para o terceiro ensaio



Fonte: Próprio autor.

A partir da Figura 21, confirmou-se mais uma vez o esperado, o aumento gradual da temperatura, de forma mais intensa no centro.

Com cerca de 60 minutos de ensaio, atingiu-se o regime permanente de transferência de calor, caracterizado pela estabilização das curvas e proximidade destas à uma reta.

5.2 Cálculo da condutividade térmica (k)

O cálculo da condutividade térmica foi realizado para os três ensaios, a partir da equação 5, ao qual foram obtidos três valores de k.

Para o cálculo, foram aferidas as dimensões do resistor e do corpo de prova, conforme está representado na tabela 10.

Tabela 10 - Dimensões do corpo de prova e resistor

Comprimento do corpo de prova (m)	Diâmetro do corpo de prova (m)	Diâmetro do resistor (m)
0,40	0,10	0,00824

Fonte: Próprio autor.

Para o primeiro ensaio, o valor médio encontrado de ΔT foi de $33,4^{\circ}\text{C}$ e a diferença de potencial da fonte era de 20,3 V. Dessa forma, o valor encontrado q_r foi:

$$q_r = \frac{(20,3V)^2}{224\Omega} = 1,8396 \text{ W}$$

Assim, é possível calcular k:

$$k = \frac{1,8396 \ln \frac{0,05}{0,00412}}{2\pi 0,4(33,4)}$$

$$k = 0,05 \text{ W/m.k}$$

Para o segundo ensaio, o valor médio encontrado de ΔT foi de $32,5^\circ\text{C}$ e a diferença de potencial da fonte era de $21,6\text{ V}$. Dessa forma, o valor encontrado de q_r foi:

$$q_r = \frac{(21,6\text{V})^2}{224\Omega} = 2,0829\text{ W}$$

Assim, é possível calcular k :

$$k = \frac{2,0829 \ln \frac{0,05}{0,00412}}{2\pi 0,4(32,5)}$$

$$k = 0,06\text{ W/m.k}$$

Para o terceiro ensaio, o valor médio encontrado de ΔT foi de $33,4^\circ\text{C}$ e a diferença de potencial da fonte era de $21,0\text{ V}$. Dessa forma, o valor encontrado de q_r foi:

$$q_r = \frac{(21,0\text{V})^2}{224\Omega} = 1,9687\text{ W}$$

Assim, é possível calcular k :

$$k = \frac{1,9687 \ln \frac{0,05}{0,00412}}{2\pi 0,4(33,4)}$$

$$k = 0,06\text{ W/m.k}$$

Com o valor de k encontrado nos três ensaios, foi possível obter um $k_{\text{médio}}$ para a condutividade térmica do poliestireno expandido:

$$k_{\text{médio}} = \frac{0,05 + 0,06 + 0,06\text{ W/m.k}}{3}$$

$$k_{\text{médio}} = 0,06\text{ W/m.k}$$

De acordo com Silva (2013), o valor da condutividade térmica do poliestireno expandido é de 0,04 W/m.K. A partir do valor encontrado experimentalmente, 0,06 W/m.K, pode-se confirmar que o resultado foi satisfatório, visto que o erro foi de aproximadamente 0,02 W/m.K, ou seja, representa valor aceitável.

Como a densidade do poliestireno expandido é variável em função da utilização de diferentes aditivos em sua composição, tal variação de densidade está diretamente associada à variação da condutividade térmica do material. Portanto, tal fato pode explicar a diferença entre o valor da condutividade térmica apresentada pela literatura e o verificado experimentalmente.

5.3 Resultados de simulação pelo TransCal

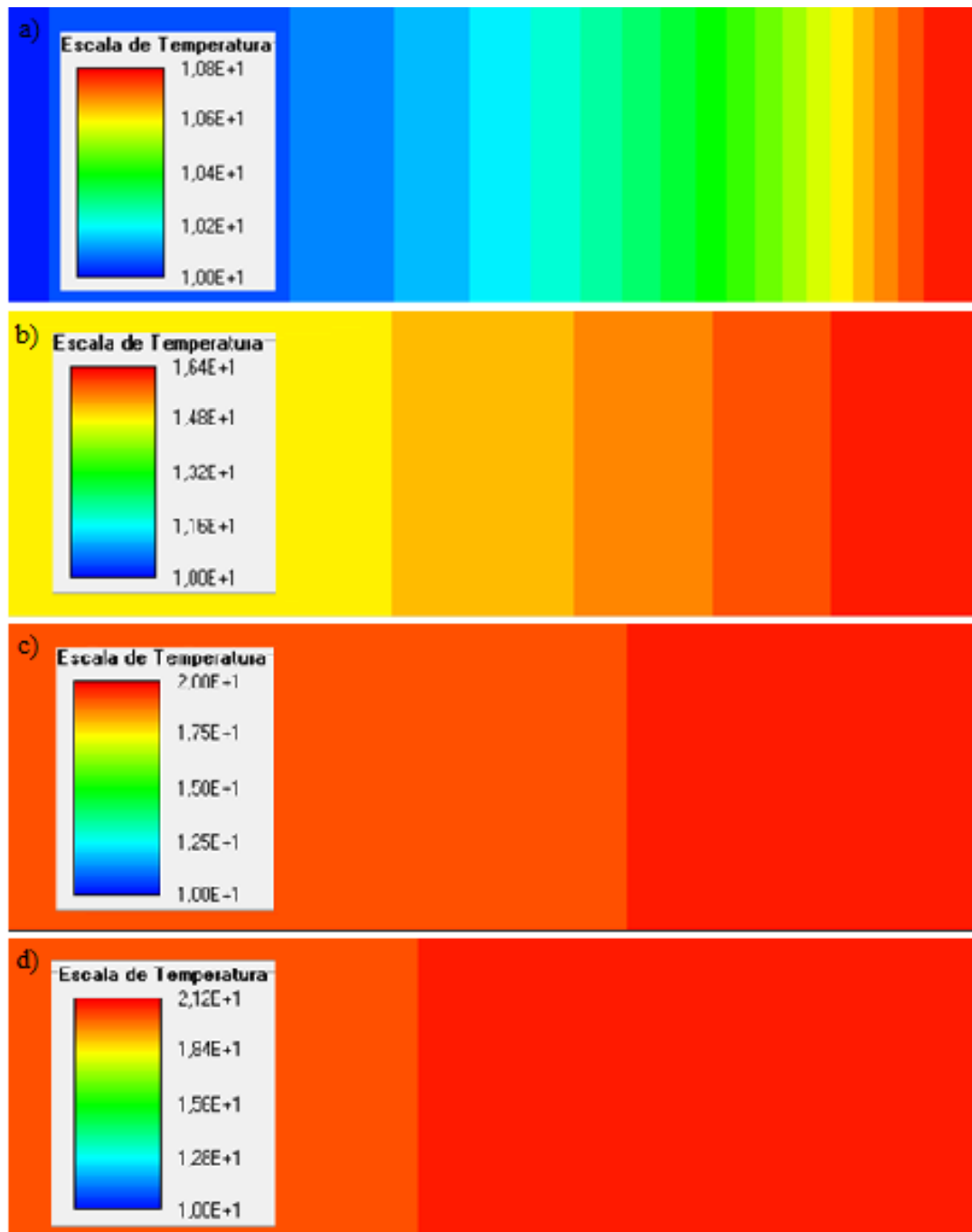
5.3.1 Primeira simulação

Na primeira simulação realizada, considerou-se o sistema caixa de papelão e ar atmosférico, sem o revestimento de poliestireno expandido.

Na simulação em questão, foram registradas as temperaturas ao longo da dimensão da caixa em quatro intervalos de tempo diferentes, sendo o primeiro registro aos 60 segundos, o segundo em 600 segundos, o terceiro em 1200 segundos e o quarto em 1500 segundos.

De acordo com a Figura 22, pode-se perceber que a condução ocorreu de leste para oeste, visto que a extrema esquerda representa o centro da caixa, onde é desejável obter o menor aumento de temperatura possível.

Figura 22 - Condução do calor na caixa na primeira simulação



- a) Condução do calor em $t = 60s$.
- b) Condução do calor em $t = 600s$.
- c) Condução do calor em $t = 1200s$.
- d) Condução do calor em $t = 1500s$.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 22-a, verifica-se que, aos 60 segundos, a temperatura no centro foi de 10°C, enquanto que na extremidade, atingiu 10,8°C. Na Figura 22-b, aos 600 segundos, a temperatura no centro foi de 14,7°C, enquanto que na extremidade, atingiu 16,4°C. Na Figura 22-c, observa-se que, aos 1200 segundos, a temperatura no centro foi de 19°C, enquanto que na extremidade, atingiu 19,9°C, ou seja, praticamente uniformizaram as temperaturas. Já a Figura 22-d, aos 1500 segundos, a temperatura no centro foi de 20,5°C, enquanto que na extremidade, atingiu 21,2°C, confirmando a estabilização da temperatura.

Portanto, no sistema ar e papelão, a temperatura uniformizou aos 25 minutos, de forma que todo o sistema atingisse aproximadamente 20°C.

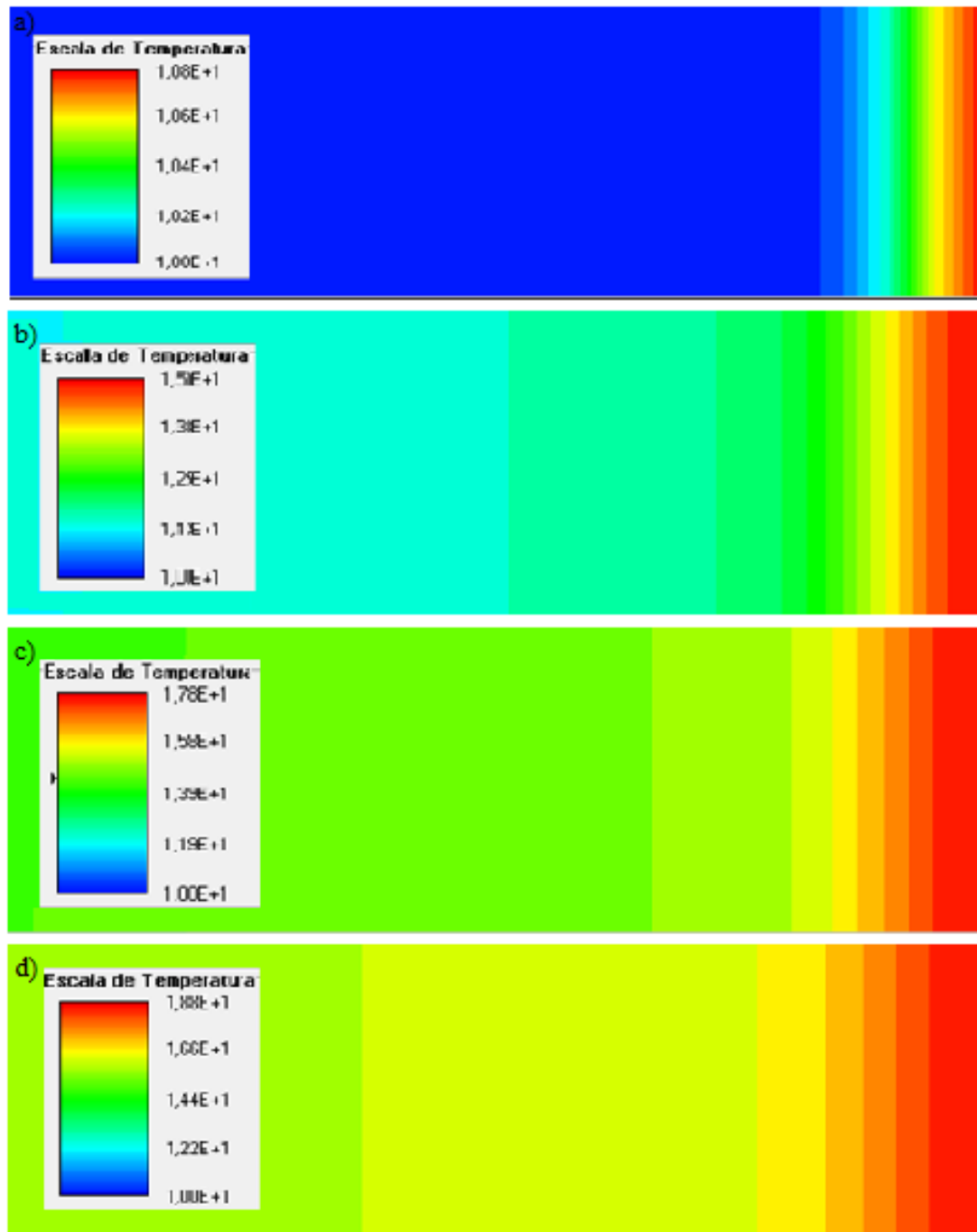
5.3.2 Segunda simulação

Na segunda simulação realizada, considerou-se o sistema caixa de papelão, poliestireno expandido e ar atmosférico.

Na simulação em questão, foram registradas as temperaturas ao longo da dimensão da caixa em quatro intervalos de tempo diferentes, sendo o primeiro registro aos 60 segundos, o segundo em 600 segundos, o terceiro em 1200 segundos e o quarto em 1500 segundos.

A Figura 23 evidencia como se deu a condução do calor com o tempo dentro da caixa revestida com poliestireno expandido, ficando claro de observar a influência do polímero no processo.

Figura 23 - Condução do calor na caixa na segunda simulação



- a) Condução do calor em $t = 60s$.
- b) Condução do calor em $t = 600s$.
- c) Condução do calor em $t = 1200s$.
- d) Condução do calor em $t = 1500s$.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 23-a, verifica-se que, aos 60 segundos, a temperatura no centro foi de 10°C, enquanto que na extremidade, atingiu 10,7°C. Na Figura 23-b, aos 600 segundos, a temperatura no centro foi de 11,3°C, enquanto que na extremidade, atingiu 15,0°C. Na Figura 23-c, observa-se que, aos 1200 segundos, a temperatura no centro foi de 14,8°C, enquanto que na extremidade, atingiu 17,8°C. Já Figura 23-d, aos 1500 segundos, a temperatura no centro foi de 15,9°C, enquanto que na extremidade, atingiu 18,8°C. Ou seja, aos 1500 segundos, a temperatura ainda não havia atingido 20°C.

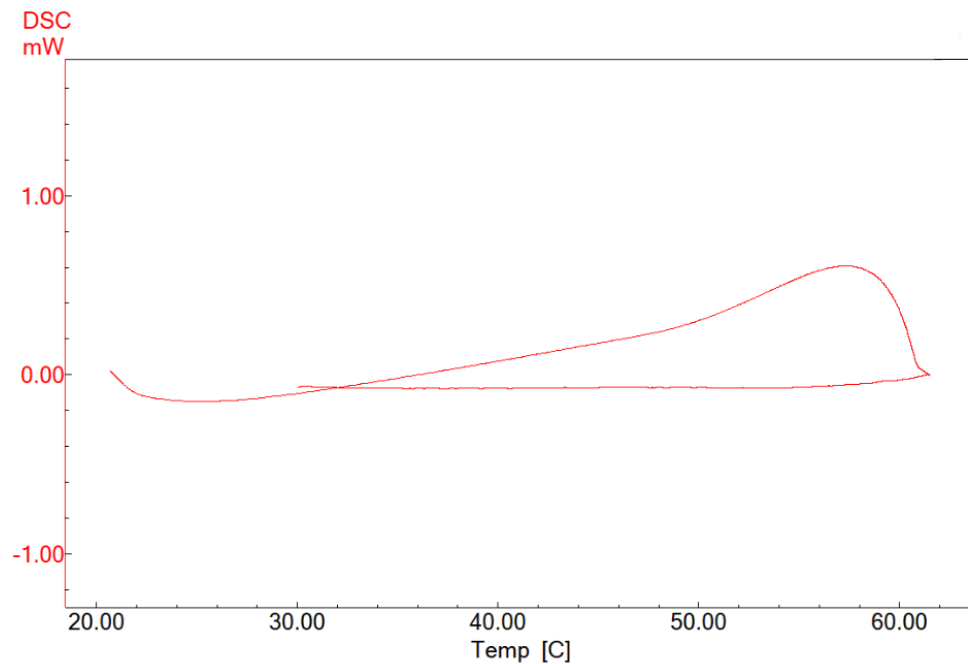
Continuando a simulação, por meio de tentativas, até atingir a temperatura central de 20°C, foi possível verificar que, aos 2700 segundos, o sistema atingiu 20,1°C no centro e 21,7°C na extremidade. Ou seja, enquanto o sistema ar e papelão atinge os 20°C no centro aos 25 minutos, o sistema ar, papelão e poliestireno expandido, atingiu a mesma temperatura aos 45 minutos, evidenciando que o poliestireno cumpre bem o seu papel enquanto isolante térmico, fazendo com que a condução do calor até o centro demore mais tempo para acontecer.

De acordo com a Tabela 6, observa-se que a condutividade térmica do ar é menor que a condutividade térmica do poliestireno expandido. Entretanto, os efeitos de isolamento térmico são mais eficientes ao se utilizar o revestimento de isopor. Tal fato pode parecer contraditório, mas a capacitância térmica (produto entre a densidade e o calor específico) é uma propriedade que está diretamente relacionada à capacidade do material em armazenar calor. Maiores capacitâncias térmicas retardam a transferência de calor ao longo do tempo. Como a capacitância térmica do poliestireno expandido é bem maior que a do ar, a transferência de calor ocorre mais lentamente e, assim, o isolamento térmico é melhor (INCROPERA *et al.*, 2008)

5.4 Resultados da caracterização por DSC

A partir da análise de DSC, foi possível obter a curva apresentada pela Figura 24.

Figura 24 – Curva de DSC em função da temperatura



Fonte: Próprio autor.

A partir da curva acima, pode-se verificar que a curva verificada entre 50°C e 60°C indica a temperatura de transição vítrea do poliestireno expandido, na qual o polímero deixa de ter comportamento rígido e passa a ter comportamento borrachoso, sendo facilmente deformável (BEHL; LENDLEI, 2007).

Como o poliestireno expandido é uma espuma e, no processo de espumação são adicionados ao polímero agentes de expansão que expandem a massa reduzindo a densidade do mesmo, pode-se associar o comportamento incomum da curva exibida à presença de aditivos no material (CANEVAROLO, 2006).

Como para o estudo em questão o interesse é que o poliestireno expandido se mantenha estável termicamente durante o transporte de amostras biológicas, pelo ensaio verifica-se que este material se mantém estável na faixa de operação desejada, entre 0 e 30°C.

6 CONCLUSÕES

A partir das características apresentadas entre os polímeros mais conhecidos por isolamento térmico, o poliestireno expandido foi escolhido como o melhor candidato para a aplicação em questão pelo fato de, além de exibir baixa condutividade térmica, apresentar baixa densidade, boa resistência mecânica, fácil aplicação e baixo custo.

O ensaio de condutividade térmica permitiu chegar ao valor numérico da condutividade térmica do poliestireno expandido de 0,06 W/m.K, que foi um valor próximo daquele encontrado na literatura, de 0,04 W/m.K. Assim, confirmou-se experimentalmente a baixa condutividade térmica do material em estudo.

Através do software TranCal, ficou nítido que o poliestireno cumpre bem o seu papel enquanto isolante térmico, fazendo com que a condução do calor demorasse mais tempo para acontecer em relação ao sistema sem o revestimento. Enquanto o sistema ar e papelão atingiu 20°C no centro da embalagem aos 25 minutos, o sistema ar, papelão e poliestireno expandido, atingiu a mesma temperatura aos 45 minutos. Ou seja, o poliestireno retardou a condução de calor por tempo considerável.

Apesar da condutividade térmica do ar ser menor que a condutividade térmica do poliestireno expandido, os efeitos de isolamento térmico são mais eficientes ao se utilizar o revestimento de isopor. Tal fato está relacionado à capacitância térmica do material, na qual maiores capacitâncias térmicas retardam a transferência de calor ao longo do tempo. Como a capacitância térmica do poliestireno expandido é bem maior que a do ar, a transferência de calor ocorre mais lentamente e, assim, o isolamento térmico é mais eficaz.

Através do ensaio de DSC realizado, confirmou-se a estabilidade do poliestireno expandido na faixa de temperatura relevante para o trabalho em questão, entre 0°C e 30°C (temperatura ambiente). Por isso, a aplicação do material como revestimento para a embalagem proposta pode ser adequada.

Dessa forma, o poliestireno expandido pode ser aplicado para o revestimento de embalagens de papelão para o transporte de material biológico categoria B UN3373, assegurando a estabilidade térmica e integridade das amostras, sendo de suma importância para a fase pré-analítica do processo operacional laboratorial.

REFERÊNCIAS

ANVISA. **Manual de Vigilância Sanitária sobre o transporte de material biológico humano para fins de diagnóstico clínico**. 2015

BERNAL, Cláudia; COUTO, Andrea Boldarini; BREVIGLIERI, Susete Trazzi; CAVALHEIRO, Éder Tadeu Gomes. **Influência de alguns parâmetros experimentais nos resultados de análises calorimétricas diferenciais - DSC**. Química Nova, [S. l.], p. 1-10, 10 out. 2002.

BEHL, Marc; LENDLEI, Andreas. **Shape Memory Polymers**. *Materials today*, [S. l.], p. 1-10, 1 abr. 2007.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5ª edição. São Paulo, LTC, 2002.

CANEVAROLO, S.V.C. **Ciência dos polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª edição. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2006.

CASA E CONSTRUÇÃO. **Lã de Vidro: O que é? Usos, vantagens, preço e tudo sobre!** 2018. Disponível em: < <https://casaconstrucao.org/materiais/la-de-vidro/> > Acesso em: 03/12/2019.

GROTE, Z. V.; SILVEIRA, J. L. **Análise energética e exergética de um processo de reciclagem de poliestireno expandido (isopor)**. Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, [S. l.], p. 9-27, 15 jan. 2002.

GROTE, Z. V.; SILVEIRA, J. L. **Termodinâmica de um processo de reciclagem de poliestireno expandido (isopor): um estudo de caso**. In: Proceedings of Jornada de Iniciação Científica e Pós Graduação. Guaratinguetá, SP, 2001.

HEMAIS, Carlos A. **Polímeros e a Indústria Automobilística**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, [S. l.], p. 107-114, 1 jan. 2003.

JESUS, L.C.C. **Obtenção e Caracterização de Compósitos de Poliestireno Expandido Pós-consumo Reforçados com Celulose de Bagaço de Cana-de-açúcar**. Dissertação de mestrado em integridade de materiais da engenharia. Universidade de Brasília. Brasília, Gama, 2014.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Tradução e revisão técnica: Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2012. Tradução de: Fundamentals of heat and mass transfer, 6th ed.

ISAR – **Isolamentos térmicos e acústicos**. 2019. Disponível em: < <https://www.isar.com.br/blog/> >. Acesso em: 02/12/2019.

MALISKA, C. R. et al. **Transcal V 1.1**, 1998. Disponível em: <<http://www.sinmec.ufsc.br/site/softwares.php?id=2>> Acesso em: 01/12/2019.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro: LTC Editora S. A., 2004

MILED, K; SAB, K.; LE ROY, R. **Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: experimental investigation and modeling**, *Mechanics of Materials*, 39 (2007) 222 – 240

NOGUEIRA, A. C. S et al. **Isolamento Acústico por lã de vidro**. Centro Universitário UNA. Trabalho Interdisciplinar Dirigido II. p. 4, 2013. Disponível em: <<http://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/Isolamento-Acustico-Por-La-De-Vidro/32456014.html>> Acesso em: 11 de junho de 2019.

OLIVEIRA, L.S. **Reaproveitamento de resíduos de poliestireno expandido (isopor) em compósitos cimentícios**. Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação da Universidade Federal de São João del-Rei. Minas Gerais, São João Del Rei, 2013.

SILVA, M. A. P et at. **Metodologia para a definição exigencial de isolantes térmicos**. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em construção de edifícios. Universidade do Porto. Porto, Portugal, 1996.

SILVA, F. M. F et al. **Estudo de materiais de isolamento térmico inovadores**. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em engenharia civil. Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2013.

SOUZA, N. S. L. **Desenvolvimento de sistema de medição de condutividade térmica de materiais cerâmicos**. Relatório de Iniciação Científica em Engenharia de Materiais. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

TERMOTÉCNICA, 2019. **EPS – POLIESTIRENO EXPANDIDO**. Disponível em:<<http://www.termotecnica.ind.br/eps-poliestireno-expandido/>> Acesso em: 03/12/2019.

VILAR, W. D. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. 3ª edição. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2002.