

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

PRYSILA VAZ CONEJO

**MONTAGEM E TESTE DE DISPOSITIVO PARA DETERMINAÇÃO DO
FATOR K DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM ESPUMAS RÍGIDAS
DE POLIURETANA**

TRBALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2020

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”.

PRYSCILA VAZ CONEJO

**MONTAGEM E TESTE DE DISPOSITIVO PARA DETERMINAÇÃO DO
FATOR K DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM ESPUMAS RÍGIDAS
DE POLIURETANA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr Fabiano Moreno Peres

Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Cava

LONDRINA

2020

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”.



TERMO DE APROVAÇÃO

PRYSCILA VAZ CONEJO

MONTAGEM E TESTE DE DISPOSITIVO PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR K DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ESPUMAS RÍGIDAS DE POLIURETANA

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 30 de novembro de 2020 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Fabio Cezar Ferreira
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Química)

Prof. Dr. Marcio Florian
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marcia Leme Vaz e Marcio Aparecido Conejo por todo o apoio e suporte durante a graduação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres que me orientou e me guiou em todas as etapas desse projeto de trabalho de conclusão de curso.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Cava que também me orientou e possibilitou a utilização do laboratório e os equipamentos para a execução dos experimentos.

Ao técnico de laboratório Fillipe Bernadino que auxiliou nas etapas da preparação das amostras.

Aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado durante todas as etapas desse trabalho.

RESUMO

CONEJO, P. V. **Montagem e teste de dispositivo para determinação do fator k de condutividade térmica em espumas rígidas de poliuretano.** 2020. 47f. Trabalho de conclusão de curso - Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2020.

As espumas rígidas de poliuretano são materiais que são utilizados como isolantes térmicos. Elas possuem várias aplicações em diversos setores da indústria, sendo muito utilizadas em caminhões frigoríficos e em refrigeradores de uso doméstico, comercial e industrial. A condutividade térmica do material é um parâmetro decisivo no projeto e dimensionamento das barreiras térmicas dos equipamentos. A medição da condutividade térmica pelas técnicas convencionais não são práticas, na maioria dos casos. Portanto, este trabalho teve o objetivo de verificar a viabilidade de se determinar a condutividade térmica de espumas rígidas de poliuretano destinadas ao isolamento térmico utilizando a técnica do fio quente. Este método oferece vantagens significativas, principalmente em termos de simplicidade, economia e flexibilidade sobre os sistemas utilizados atualmente. Dois tipos de espuma foram analisados, um tipo destinado à montagem de carrocerias de caminhões frigoríficos, produzida por métodos industriais, e outro tipo fabricada e produzida no laboratório de polímeros da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Os resultados indicam que a técnica é viável, entretanto, a precisão e a reprodutibilidade das medidas são muito afetadas pela preparação da amostra e pela corrente elétrica no fio.

Palavras-chaves: espuma rígida de poliuretano, condutividade térmica, medição, fio quente.

ABSTRACT

CONEJO, P. V. **Assembling and testing of an device for determination the k factor in thermal conductivity in rigid polyurethane foams.** 2020. 47p. Graduation final work – Departament of Materials Engineering, Federal Technological University of Paraná, 2020.

Rigid polyurethane foams are materials that are used as thermal insulators. They have several applications in various sectors of the industry, being widely used in refrigerated trucks and in refrigerators for domestic, commercial and industrial use. The thermal conductivity of the material is a decisive parameter in the design and dimensioning of the thermal barriers of the equipment. The measurement of thermal conductivity by conventional techniques is not practical in most cases. Therefore, this work aimed to verify the feasibility of determining the thermal conductivity of rigid polyurethane foams for thermal insulation using the hot wire technique. This method offers significant advantages, mainly in terms of simplicity, economy and flexibility over the systems currently used. Two types of foam were analyzed, one type intended for the assembly of refrigerated truck bodies, produced by industrial methods, and another type manufactured and produced in the polymer laboratory of the Federal Technological University of Paraná. The results indicate that the technique is feasible, however, the precision and reproducibility of the measurements are greatly affected by the sample preparation and the electric current in the wire.

Keywords: Polyurethane rigid foam, thermal conductivity, measurement, hot wire.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.....	13
Figura 2: (a) Fluxo de calor dissipado na amostra; (b) Esquema experimental da técnica do fio quente.....	15
Figura 3: Temperatura versus \ln do tempo: (a) curva teórica , (b) curva experimental.	17
Figura 4: Instalação experimental para medição de condutividade térmica de uma amostra.	18
Figura 5: Comparação da eficiência no isolamento térmico proporcionado por diferentes materiais.....	20
Figura 6: Ligação Uretana.....	21
Figura 7: Desenvolvimento da estrutura celular durante a formação de uma espuma rígida de poliuretano.	22
Figura 8: Dispositivo para medição de k da espuma de poliuretano pela técnica do fio quente paralelo.	26
Figura 9: Superfícies das amostras, sem aumento, da (a) espuma industrial; (b) espuma de laboratório; com aumento de 20X, da (c) espuma industrial; (d) espuma de laboratório, com aumento de 30X, da (e) espuma industrial; (f) espuma de laboratório, com aumento de espuma de laboratório, com aumento de 40X, da (g) espuma industrial; (h) espuma de laboratório.....	29
Figura 10: Exemplos de curvas $\ln(t)$ vs ΔT obtidas.	33
Figura 11: Amostra da espuma rígida de poliuretano queimada na região em contato com o fio quente.....	34
Figura 12: Variação de temperatura versus $\ln t$ com tensão aplicada de 1,5 V para espuma de laboratório. (a) amostra 1; (b) amostra 2.....	41
Figura 13: Variação de temperatura versus $\ln t$ com tensão aplicada de 2 V para espuma industrial. (a) amostra 3; (b) amostra 4.	42
Figura 14: Variação de temperatura versus $\ln t$ com tensão aplicada de 1 V para espuma industrial. (a) amostra 5; (b) amostra 6.	43
Figura 15: Variação de temperatura versus $\ln t$ com tensão aplicada de 1 V para espuma industrial. (a) amostra 7; (b) amostra 8.	44
Figura 16: Variação de temperatura versus $\ln t$ com tensão aplicada de 1,5 V para espuma industrial. (a) amostra 9; (b) amostra 10.	45
Figura 17: Variação de temperatura versus $\ln t$ com tensão aplicada de 1,5 V para espuma industrial. (a) amostra 11; (b) amostra 12.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Densidade e condutividade térmica de alguns materiais tradicionalmente utilizados como isolantes térmicos.	19
Tabela 2: Densidade das espumas industrializadas.....	31
Tabela 3: Valores obtidos para a densidade das espumas de laboratório.....	32
Tabela 4: Condutividades térmicas da espuma industrializada obtidas com a técnica do fio quente.	33
Tabela 5: Condutividades térmicas da espuma industrializada obtidas com a técnica do fio quente.	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 JUSTIFICATIVA.....	11
2 OBJETIVO.....	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
3.1 FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	13
3.1.1 Condutividade Térmica.....	13
3.2 TÉCNICAS CONVENCIONAIS PARA MEDIÇÃO DE k.....	14
3.2.1 A Técnica do Fio Quente.....	15
3.3 MATERIAIS CONVENCIONAIS PARA ISOLAMENTO TÉRMICO.....	18
3.4 ESPUMAS RÍGIDAS DE POLIURETANO.....	20
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1 MATERIAIS.....	25
4.2 MÉTODOS.....	25
4.2.1 Preparação das Amostras.....	25
4.2.2 Montagem do Aparato Experimental.....	26
4.2.3 Desenvolvimento dos Testes.....	27
4.2.4 Tratamento dos Dados.....	27
4.2.5 Cálculo de Densidade.....	27
4.2.6 Observação da Estrutura Celular.....	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5.1 ESTRUTURA CELULAR.....	29
5.2 DENSIDADE.....	31
5.3 CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	32
6 CONCLUSÃO.....	36
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	37
REFERÊNCIAS.....	38
APÊNDICE A – Curvas obtidas com a técnica do fio quente.....	41
APÊNDICE B – Tabela de resultados.....	47

1 INTRODUÇÃO

Os polímeros de poliuretano (PU) são materiais versáteis e muito utilizados em diversas aplicações. As poliuretanas são usadas principalmente na forma espumas rígidas e flexíveis, elastômeros, adesivos e revestimentos. Dentre os polímeros de poliuretano, as espumas rígidas de PU apresentam a maior taxa de crescimento, sendo o consumo maior em isolamento térmico de equipamentos e tubulações (PERES, 2018, VILAR, 2018).

Atualmente, o principal isolante térmico utilizado na indústria de refrigeradores é a espuma rígida de poliuretano (PUR), que além da função principal de isolamento térmico promove a estrutura mecânica e rigidez ao produto (MONDARDO FILHO, 2012).

Os caminhões frigoríficos também utilizam o PU como isolamento térmico, visto que as cargas transportadas necessitam ser refrigeradas ou congeladas. Como o Brasil é o 5º país em extensão territorial do mundo e o transporte de mercadorias é realizado através da grande malha rodoviária, as cargas transportadas são submetidas a diversas situações de variações térmicas (SCHMITZ, 2016).

A condutividade térmica da espuma é o parâmetro que controla a eficiência do isolamento térmico proporcionado pela espuma, desta forma o controle da condutividade térmica do material é importante para garantir um isolamento térmico eficiente. (HARIKRISHNAN et al, 2008), e

As técnicas tradicionais usadas para medir a condutividade térmica dos sistemas de isolamento se baseiam na taxa de transferência de calor em estado estacionários, sendo que os equipamentos utilizados geralmente são caros e de difícil acesso. O conhecimento da condutividade térmica é estratégico e fundamental para o projeto e a avaliação do desempenho dos refrigeradores e caminhões frigoríficos, tomando interessante o desenvolvimento de métodos mais práticos para realizar a medição da condutividade. Neste trabalho a técnica do fio quente é testada como um método expedito para conferir a condutividade térmica na prática operacional industrial. Entretanto, a técnica pode também apoiar trabalhos de projeto e desenvolvimento de produtos, como exemplo, a substituição de agentes de expansão por substâncias menos agressivas ao meio ambiente.

1.1 JUSTIFICATIVA

As espumas rígidas de poliuretano são muito utilizadas como o núcleo das paredes isolantes de refrigeradores, *freezer* e também em caminhões frigoríficos. O que torna seu emprego muito atraente é a sua baixa condutividade térmica, quando comparada a outros materiais concorrentes, como exemplo a lã de vidro, o que favorece especialmente a redução da espessura das paredes. Dessa forma, o controle da condutividade térmica do material é importante para garantir que o isolamento térmico seja efetivo e eficiente. Por outro lado, as técnicas de medição de condutividade térmica convencionais requerem o uso de equipamentos especiais que tornam-se pouco práticas para o uso regular nas operações industriais, além de serem caras. É interessante o desenvolvimento de métodos alternativos, que possam ser usados para estimar e monitorar a condutividade térmica nas situações operacionais comuns. Por exemplo, num único dia, a temperatura do ambiente industrial pode variar, causando variações na estrutura celular e, conseqüentemente, nas propriedades da espuma, como a condutividade térmica. Outra possibilidade é de apoio a trabalhos de desenvolvimento de produtos, e substituição de matérias-primas e fornecedores. Nesse sentido, justifica-se a o desenvolvimento de uma técnica para a realização de medidas rápidas e corriqueiras de condutividade térmica de espumas rígidas de poliuretanas.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Testar a técnica do fio quente como um método prático para estimação da condutividade térmica de espumas rígidas de poliuretano.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Determinar experimentalmente valor da condutividade térmica de amostras de espumas rígidas, com diferentes processos de fabricação, pela técnica do fio quente;

b) Analisar valores de condutividade térmica (k) obtidos experimentalmente e compará-los com os valores disponíveis na literatura;

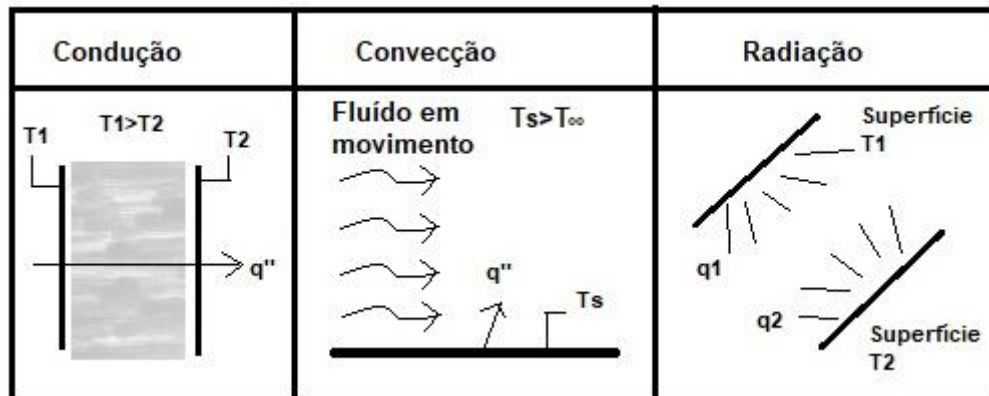
c) Comparar os valores de condutividade térmica de diferentes processos de obtenção da espuma.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Segundo Incropera et al (2008), transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Então, sempre que existir uma diferença de temperatura haverá transferência de calor. Existem três formas da transferência de calor ocorrer: condução, convecção e radiação como visto na Figura 1.

Figura 1: Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.



Fonte: Adaptado INCROPERA (2008)

A condução é quando a transferência de energia ocorre das partículas mais energéticas para as menos energéticas, havendo um processo de difusão de calor ou energia. A convecção refere-se à transferência de calor que ocorrerá entre uma superfície e um fluido em movimento e ocorre por dois mecanismos: pelo movimento aleatório (difusão) e através do movimento global ou macroscópico do fluido. A radiação térmica é a energia emitida por qualquer matéria que se encontra a uma temperatura não nula (INCROPERA ET AL, 2008, SCHMITZ, 2016).

3.1.1 Condutividade Térmica

Condutividade térmica de um material é definida como a taxa em que calor é trocado através de uma área unitária do material, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário (CANEVAROLO, 2007). A condutividade térmica é classificada

como uma propriedade de transporte, expressa pela Equação 1 e geralmente expressa em Watts por metro por Kelvin (W/m.K) (INCROPERA ET AL, 2008).

$$k = -\frac{q}{A \cdot \Delta T} \quad (1)$$

onde q é a transferência de calor (W), A é a área de transferência de calor perpendicular à direção da troca de calor (m^2) e ΔT é a variação de temperatura (K) (CANEVAROLO, 2007).

A condutividade térmica é uma propriedade de transporte específica de cada material e depende da estrutura física da matéria, atômica e molecular. Materiais com alta condutividade térmica conduzem energia térmica de forma mais rápida e eficiente do que materiais com baixa condutividade térmica.

Isolantes térmicos são constituídos por materiais de baixa condutividade térmica convenientemente combinados de forma a se obter uma condutividade térmica do sistema ainda menor. A finalidade de isolantes térmicos é reduzir as trocas térmicas indesejáveis entre o ambiente externo e interno (INCROPERA ET AL, 2008).

O aprisionamento de algum gás dentro de pequenas cavidades em uma superfície sólida, ou até com o preenchimento de espaços vazios com partículas sólidas e aprisionando o ar entre elas, diminuiu o coeficiente de condutividade. A qualidade do isolamento é mensurável por meio do coeficiente de condutividade térmica (k) (INCROPERA ET AL, 2008).

3.2 TÉCNICAS CONVENCIONAIS PARA MEDIÇÃO DE k

Cada tipo de material tem um método mais indicado para medir a condutividade térmica de acordo com sua natureza, e essas técnicas podem ser divididos basicamente entre duas classes: método de estado estacionário e transiente ou método não estacionário (YÜKSEL, 2016).

A técnica do estado estacionário realiza a medida quando o material atinge o equilíbrio térmico, ou seja, quando a temperatura em cada ponto da amostra é constante e não varia com o tempo. Uma desvantagem desta técnica, no entanto, é que geralmente leva muito tempo para alcançar o equilíbrio necessário. Nesse

método, a lei de Fourier é aplicada para medir a condutividade térmica e o calor é tratado como um fluxo unidimensional, simplificando os cálculos. (YÜKSEL, 2016).

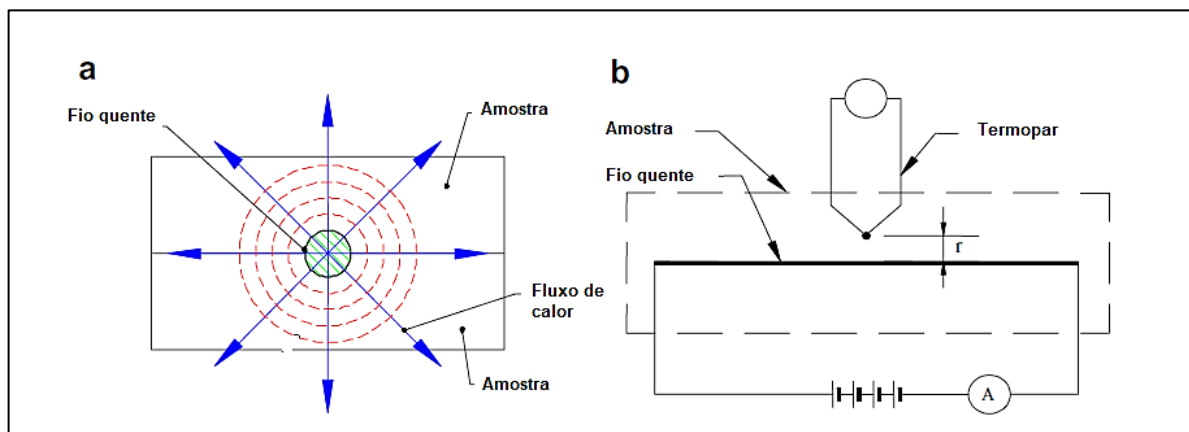
O método transiente ou não estacionário registra uma medição durante o processo de aquecimento, e determina as propriedades de condutividade térmica por meio de sensores, sendo um processo relativamente rápido (YÜKSEL, 2016).

Existem quatro tipos principais de configurações para a medição da condutividade térmica: a placa quente protegida e o medidor de fluxo de calor (HFM), métodos estacionários, e os métodos de fio quente e da difusividade do laser, métodos transientes. Cada método difere em tipo de material, tamanho da amostra, tempo de medição, capacidade e a metodologia. (YÜKSEL, 2016).

3.2.1 A Técnica do Fio Quente

A técnica do fio quente é considerada uma técnica absoluta, direta, não estacionária e precisa na determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos e poliméricos (CANEVAROLO, 2007). Este método é baseado na idealização do fluxo de calor radial unidimensional; na qual a Figura 2 mostra uma representação do fluxo de calor radial.

Figura 2: (a) Fluxo de calor dissipado na amostra; (b) Esquema experimental da técnica do fio quente.



Fonte: adaptado FRANCO (2007).

No método do fio quente, a fonte de calor é linear, constituída por um fio metálico. Uma corrente elétrica constante passa pelo fio, causando a elevação da temperatura por efeito Joule. A condutividade térmica pode ser estimada a partir da

mudança de temperatura resultante durante um intervalo de tempo conhecido (CANEVAROLO, 2007, FRANCO, 2007).

O modelo matemático ideal é baseado na suposição que o fio quente seja uma fonte de calor infinita, fina e longa que produz calor por um tempo infinito com potencia de aquecimento constante (FRANCO, 2007), ou seja, ao passar uma corrente elétrica constante através do fio, uma quantidade constante de calor, por unidade de tempo e por unidade de comprimento, é liberada pelo fio e vai se propagar através do material. Essa propagação de calor num meio infinito gera, no material, um campo transiente de temperaturas. (SANTOS, 2005)

A variação de temperatura, por um longo tempo desde o início da geração de calor, pode ser expressa com boa aproximação pela Equação 2:

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha \cdot t}{r^2}\right) + \frac{r^2}{4\alpha \cdot t} - \frac{1}{4}\left(\frac{r^2}{4\alpha \cdot t}\right) - \dots \gamma \right] \quad (2)$$

Onde,

λ é a condutividade térmica (W/m K);

Q é a quantidade de energia por unidade de medida (W/m);

α é a difusividade térmica da amostra (m²/s);

r é a posição radial de onde a temperatura é medida;

$\gamma = 0,5772156$ é a constante de Euler;

Como o termo entre parênteses é insignificante para valores muito altos para o tempo;

$$\left(\frac{r^2}{4\alpha \cdot t}\right) \ll 1 \quad (3)$$

A temperatura pode ter boa aproximação da seguinte forma:

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha \cdot t}{r^2}\right) - \gamma \right] \quad (4)$$

A temperatura também pode ser expressa por:

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left[\ln t + \ln \left(\frac{4\alpha}{r^2} \right) - \gamma \right] \quad (5)$$

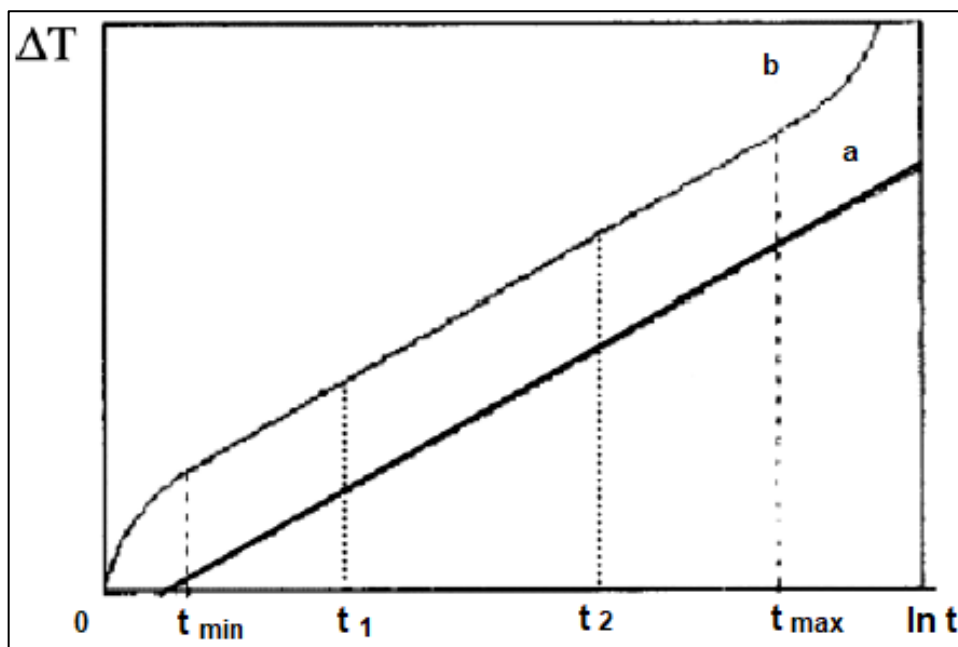
Se as temperaturas forem medidas nos tempos t_1 e t_2 dentro do intervalo válido da equação 2 , o aumento da temperatura em um ponto médio é dada por:

$$\Delta T = T(t_2) - T t_1 = \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (6)$$

Então para que a condutividade térmica (k) possa ser calculada a partir da diferença T_2-T_1 em função do tempo, é necessário calcular a inclinação da porção linear do aumento de temperatura ΔT versus logaritmo natural do tempo.

O trecho inicial da curva não é linear, como visto na Figura 3, e deve ser desconsiderado nos cálculos, pois sofre os efeitos indesejáveis de certos fatores, como a fonte de calor (fio quente) não ideal e a resistência de contato entre o fio e a amostra (CANEVAROLO, 2007; FRANCO, 2007).

Figura 3: Temperatura versus ln do tempo: (a) curva teórica , (b) curva experimental.

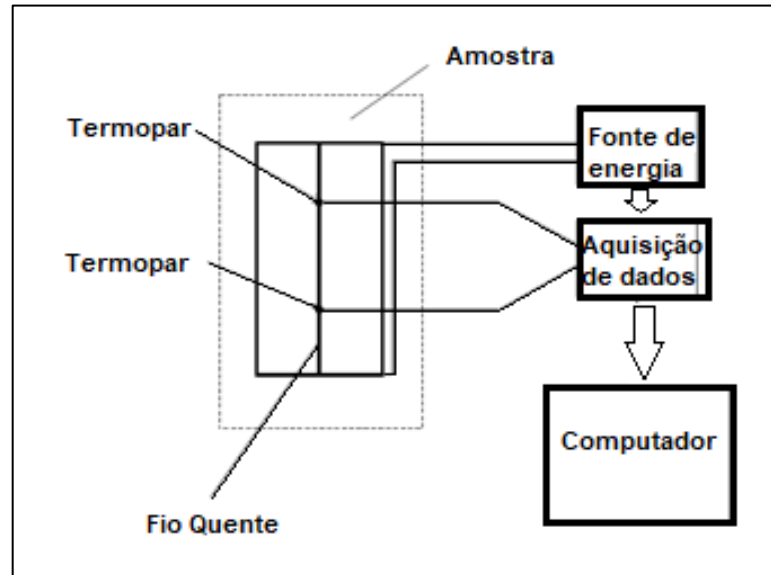


Fonte: FRANCO (2007).

O circuito de medição é montado como visto na Figura 4, em que se utiliza uma fonte de alimentação, que aquece o fio quente a uma tensão e corrente conhecida, o fio quente, que transfere o calor para a amostra, um termopar que

capta as variações de temperatura e um computador para aquisição e processamento de dados (CANEVALORO, 2007; FRANCO, 2007, YÜKSEL. 2016).

Figura 4: Instalação experimental para medição de condutividade térmica de uma amostra.



Fonte: Adaptado FRANCO (2007)

A análise da Equação 6 sugere um método atraente para medir a condutividade térmica com vantagens, como baixo custo e pequeno intervalo de tempo de medida, além de simplificar a preparação das amostras.

3.3 MATERIAIS CONVENCIONAIS PARA ISOLAMENTO TÉRMICO

Um isolante térmico é um material que dificulta a dissipação de calor, ou seja, ele prejudica a passagem de calor entre dois meios com temperaturas diferentes e que naturalmente tenderiam a igualá-las. Os isolantes térmicos convencionais estão disponíveis em composições e formatos bastante variados e sua escolha depende basicamente da eficiência de isolamento térmico (SILVA, 2013).

Atualmente alguns dos materiais isolantes mais utilizados são a lã de vidro, lã de rocha, poliestireno expandido, cortiça e a espuma rígida de poliuretano. A condutividade térmica e a densidade de cada material esta representada na Tabela

Tabela 1: Densidade e condutividade térmica de alguns materiais tradicionalmente utilizados como isolantes térmicos.

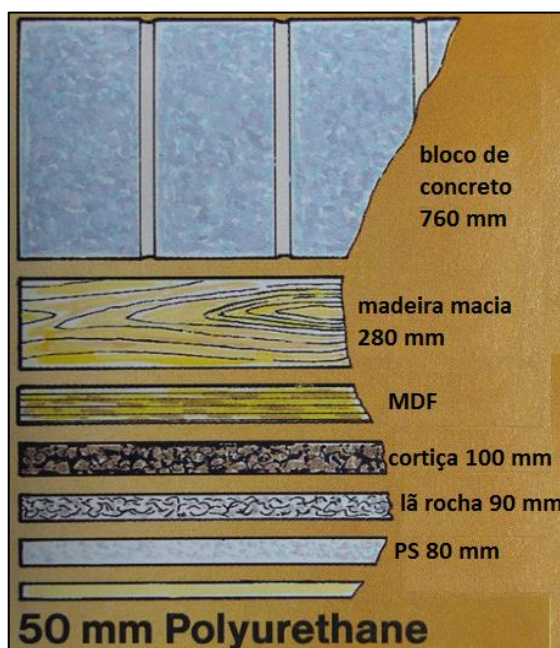
Material	Densidade (Kg/m ³)	Condutividade Térmica a 24°C (W/mK)
Espuma rígida de poliuretano	40	0,021
Poliestireno expandido	16	0,035
Lã de vidro	65 – 160	0,037
Lã de rocha	100 – 300	0,046
Cortiça	220	0,049
Madeira (pinho)	350 – 500	0,112

Fonte: Adaptado de BOLSONI (2010)

A espuma rígida de poliuretano é impermeável ao vapor de água, possui boa capacidade de isolamento, é um material muito leve e tem boa resistência a compressão. As desvantagens da espuma de poliuretano estão relacionadas aos métodos de fabricação, que podem trazer riscos ao meio ambiente, e à liberação de gases tóxicos em casos de incêndio, requerendo a associação a um revestimento a prova de fogo. (SILVA, 2013)

É crescente a busca por materiais com alto desempenho em isolamento térmico. Como não existe um isolante térmico perfeito, o ideal é utilizar um material que tenha o melhor compromisso entre eficiência no isolamento e custo, entre outros requisitos. A Figura 5 apresenta um esquema comparando o desempenho de uma placa de espuma rígida de poliuretano com a espessura equivalente de materiais isolantes térmicos concorrentes (PERES, 2018).

Figura 5: Comparação da eficiência no isolamento térmico proporcionado por diferentes materiais.



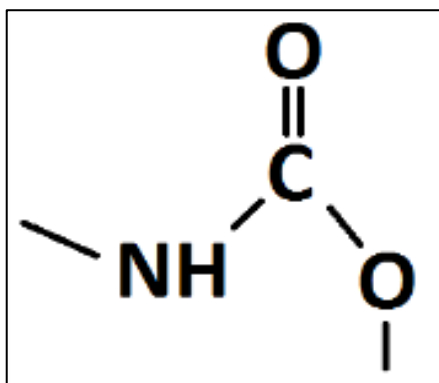
Fonte: PERES (2018)

A espuma rígida de PU possui menor condutividade térmica (k) que os demais materiais utilizados para isolamento térmico, possibilitando o uso de menor espessura, sendo atualmente utilizada, com vantagens, em praticamente todos os refrigeradores e freezer domésticos, comerciais e câmaras frias de armazenamento (MORRIS, FOGG, 1979; PERES, 2018).

3.4 ESPUMAS RÍGIDAS DE POLIURETANO

As poliuretanas (PU) são polímeros caracterizados pela presença da ligação uretana (Figura 6) na estrutura molecular, os quais são obtidas a partir da reação exotérmica de poliisocianatos com polióis, geralmente na presença de extensores de cadeia, catalisadores, surfactantes e outros aditivos. Com frequência, grupos éster, éter, ureia e aromáticos podem estar presentes na cadeia polimérica. As poliuretanas, dependendo da estrutura molecular, podem ser flexíveis, semirígidas ou rígidas, expandidas (espumas) ou sólidas (PERES, 2018).

Figura 6: Ligação Uretana.



Fonte: PERES (2018)

Na indústria das poliuretanas, o grupo uretana resulta da reação de adição entre um grupo hidroxila e um grupo isocianato, sendo que o polímero de uretana se forma quando reagem compostos hidroxilados com funcionalidade igual ou maior a 2 (dióis ou polióis) e isocianatos com funcionalidade igual ou superior a 2 (diisocianatos ou polisocianatos (PERES, 2018; SONNENSCHNEIN, 2015).

Os principais tipos de polióis utilizados na indústria das poliuretanas são do tipo poliéter (especialmente para as espumas comuns) e poliéster, enquanto que os principais tipos de isocianato são os diisocianatos tolueno (TDI), o difenilmetano diisocianato (MDI) e o MDI polimérico, este último principalmente empregado obtenção de espumas rígidas (PERES, 2018). Estas matérias-primas são normalmente empregadas no estado líquido.

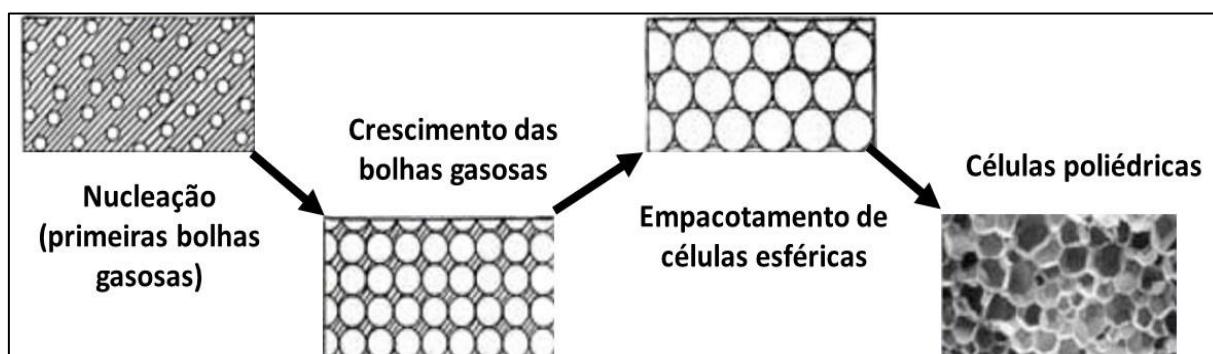
As espumas de poliuretana são ordinariamente obtidas quando as reações de polimerização ocorrem simultaneamente com a vaporização no meio reativo de uma substância de baixo ponto de ebulição (agente de expansão física), previamente adicionada formulação, e/ou liberação de gás carbônico, a partir da reação do isocianato com a água (expansão química) (PERES, 2018). As reações iniciam-se rapidamente após a rápida mistura do poliál e do isocianato, aumentando a viscosidade e elevando a temperatura do sistema, tornando mais efetivos tanto o processo de polimerização como o de expansão. As quantidades de cada componente da formulação da espuma, particularmente aqueles envolvidos nos processos de expansão, são determinantes da densidade aparente final da espuma (PERES, 2018).

Para obtenção das espumas rígidas de poliuretana são utilizados principalmente polióis de alta funcionalidade e MDI polimérico, cuja funcionalidade

média é maior que 2, de forma que se desenvolve uma estrutura tridimensional com ligações cruzadas que confere rigidez à estrutura molecular (PERES, 2018).

As espumas rígidas de poliuretano são utilizadas em diversos segmentos industriais, comerciais e doméstico, devido a excelente característica de isolamento térmico, elevada resistência mecânica, boa estabilidade dimensional e pela sua facilidade de produção. Quando comparado com isolantes utilizados como cortiça, lã de vidro, lã de rocha, poliestireno expandido e madeira, a espuma rígida de poliuretano (PUR) apresenta menor coeficiente de condutividade térmica (k), ou seja, possui a melhor propriedade de isolamento térmico (BOLSONI, 2010). A Figura 7 ilustra o desenvolvimento da estrutura celular de uma espuma rígida de poliuretano.

Figura 7: Desenvolvimento da estrutura celular durante a formação de uma espuma rígida de poliuretano.



Fonte: PERES (2018)

Os sistemas de fabricação das PUR podem ser por vazamento, injeção, *spray*, sistema de alta ou baixa pressão. Uma técnica muito utilizada atualmente é o sistema “*one shot*”, que permite a mistura dos componentes em uma só etapa dispensando o uso de pré-polímeros (ALIMENA, 2009).

O agente de expansão ideal deve ter baixo ponto de ebulição (no caso da expansão física), dissolver-se bem nos componentes do sistema e na mistura reacional, ficar retido nas células fechadas da espuma como um gás, possuir baixa condutividade térmica, ser insolúvel em poliuretano, não agir como plastificante de poliuretano, ser toxicologicamente e ecologicamente seguro e deve representar baixo risco operacional (PERES, 2018).

Na indústria das espumas rígidas de poliuretano para fins de isolamento térmico, os agentes de expansão desempenham papel fundamental, devido sua

baixa condutividade térmica. Eles são vaporizados pelo calor desprendido da reação, ou liberados a partir da reação com a água, e retidos nas células fechadas da espuma (VILLAR, 2018). O clorofluorcarbono monofluotriclorometano (CFC-11), também conhecido como freon 11, satisfaz a maioria das exigências, porém, por razões ecológicas e ambientais foi banido (prejudica a camada de ozônio da atmosfera).

Recentemente, as regulamentações ambientais vêm se tornando cada vez mais restritivas em relação ao uso dos agentes de expansão com potencial para causar danos à camada de ozônio da atmosfera, que filtra os raios solares. Em 1987 foi assinado um tratado internacional para proteger a camada de ozônio, atualmente ratificado e mantido por quase todas as nações (SONNENSCHNEIN, 2015). Alternativamente, surgiram outras substâncias como alguns hidrocarbonetos (pentano), clorofluorcarbonos hidrogenados (HCFCs) e fluorcarbonos hidrogenados (HFCs), igualmente com baixo ponto de ebulição. Entretanto, embora representem riscos ambientais menores, nenhum deles tem os mesmos méritos globais que o freon 11, de forma que os sistemas tiveram que ser adaptados (PERES, 2018).

Por outro lado, a expansão química, por meio da reação do isocianato com a água, libera gás carbônico, apresenta algumas desvantagens. Primeiramente, a condutividade térmica do CO₂ é maior que a dos tradicionais fluorcarbonos hidrogenados. Além disso, o CO₂ é suscetível de se dissolver no polímero de uretana, passar por difusão pelas paredes das células e ser substituído pelo ar, prejudicando o isolamento térmico desejado (PERES, 2018).

Aproximadamente 75% da capacidade de isolamento da espuma depende do gás retido nas células fechadas. Por outro lado, o tamanho a forma e a distribuição das células também são determinantes para a condutividade térmica, sendo que a estrutura e a morfologia celular da espuma é fortemente afetada pela eficiência da mistura dos reagentes, pelo tipo de surfactante utilizado, pelo tipo de agente de expansão, pela estequiometria do sistema, pela densidade aparente, pela temperatura e pela pressão, entre outros fatores (GIUFFRÍA, 1962; KIM et al, 2008a; KIM et al, 2008b; LIM et al, 2008; MONDAL, KHAKHAR, 2004; PERES, 2018, THIRUMAL et al, 2008).

É crescente o uso das espumas rígidas de poliuretano para aplicações de isolamento térmico. Em vista das restrições surgidas em relação ao uso de substâncias, significativo esforço de pesquisa e desenvolvimento tem sido

empregado na busca de sistemas poliuretânicos que preservem as propriedades isolantes do material (CHOI et al, 2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para o desenvolvimento do trabalho foram:

- Sistema bi-componente (Polióis e MDI polimérico) para espuma rígida de poliuretano aplicada por injeção;
- Bloco de espuma rígida de poliuretano, utilizada na produção de carrocerias de caminhões frigoríficos;
- Serra de fita;
- Fio metálico extraído de uma resistência elétrica de chuveiro convencional;
- Termopar do tipo k (Cromo/Alumel); fonte de energia modelo KEITHLEY 2231^a;
- Registrador datalogger modelo NI USB TC01;
- Computador e Software para aquisição de dados;
- Microscópio estereoscópio marca Physis modelo
- Balança analítica UniBloc marca Shimadzu modelo AUY 220;
- Utensílios de laboratório comuns.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Preparação das Amostras

A partir dos blocos de espumas rígidas foram cortados corpos de prova, na forma de paralelepípedos com dimensões 230 mm x 80 mm x 30 mm, com auxílio de uma serra de fita.

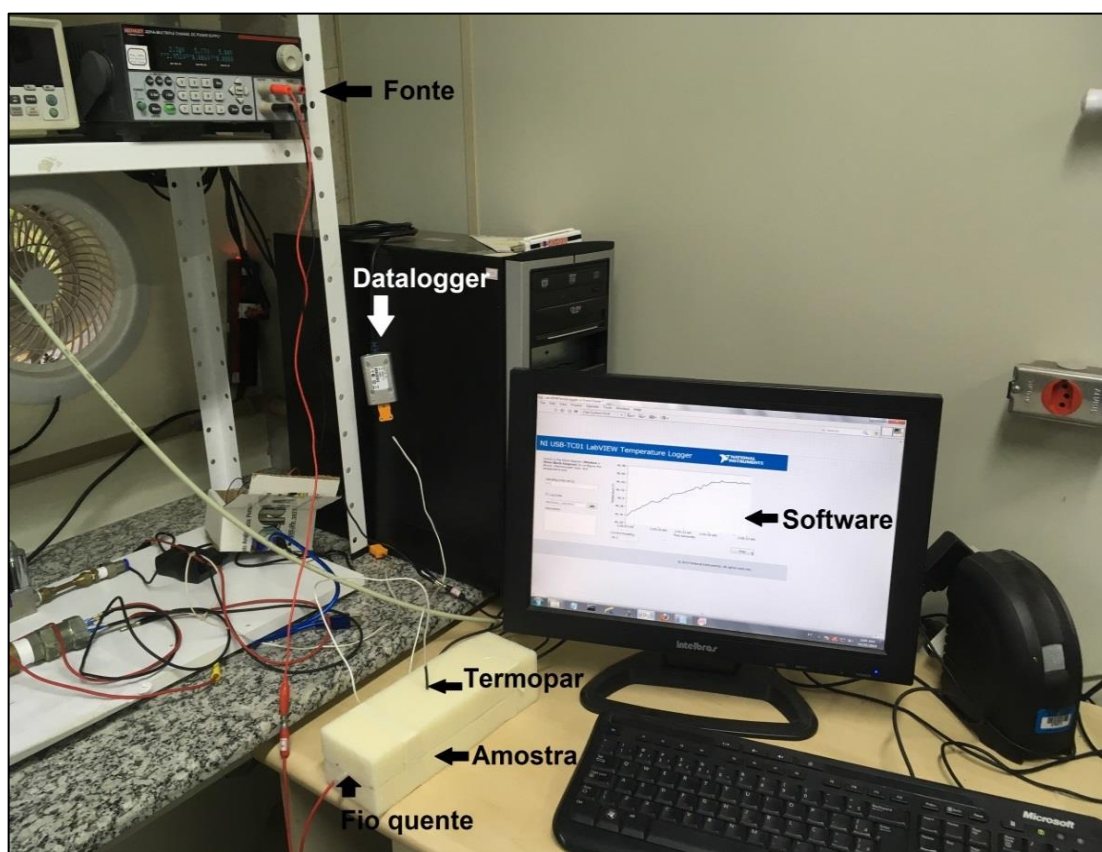
A segunda amostra foi obtida a partir de uma espuma produzida em livre expansão no laboratório de polímeros B001 da UTFPR. O sistema utilizado foi do tipo “one shot” bicomponente para espuma rígida para fins de isolamento térmico. Conforme instrução do fabricante, utilizou-se a relação 1:1 em volume entre polioli e isocianato, e o sistema reacional foi agitado manualmente. A espuma produzida,

designada por espuma de laboratório, foi deixada em descanso por uma semana. A partir do bloco de espuma produzido foram cortados corpos de provas, na forma de paralelepípedos com dimensões de 200mm x 75 mm x 30 mm, com auxílio de uma serra de fita.

4.2.2 Montagem do Aparato Experimental

Para a preparação da amostra efetiva, o fio quente foi posicionado entre dois corpos-de-prova, firmemente comprimidos com auxílio de fita crepe, na qual a Figura 8 ilustra o aparato experimental. O termopar foi simplesmente espetado nas amostras a uma profundidade de 10 mm, ou seja, a 20 mm do fio quente.

Figura 8: Dispositivo para medição de k da espuma de poliuretana pela técnica do fio quente paralelo.



Fonte: Autoria Própria.

4.2.3 Desenvolvimento dos Testes

Os testes consistiram basicamente na aplicação de uma diferença de potencial elétrico ao fio metálico, que causava o aquecimento do mesmo por efeito Joule, e na medição da temperatura em certo ponto da amostra, com o tempo. Os valores de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e tempo (s) foram adquiridas pelo datalogger e registradas no sistema computacional de aquisição e registro dos dados.

Inicialmente foram testadas duas amostras da espuma de laboratório aplicando-se uma tensão de 1,5 volts. Como havia maior disponibilidade de amostras das espumas industrializadas, foram medidas duas amostras com uma tensão de 2 volts, duas com tensão de 1 volt e seis amostras com tensão de 1,5 volts.

Apesar da técnica escolhida para a medição da condutividade térmica seja uma proposta de medição rápida é importante lembrar que existe um tempo mínimo e máximo onde o comportamento é linear em função do tempo. As amostras foram ensaiadas até que a temperatura permanecesse constante ou que a variação de temperatura fosse muito pequena.

4.2.4 Tratamento dos Dados

A partir dos dados de cada amostra realizou-se o respectivo tratamento gráfico a partir do qual foram extraídos os parâmetros do modelo proposto por Franco (2007) – equação 6. A inclinação da curva $\ln(t)$ vs ΔT foi determinada por análise de regressão linear simples, pelo método dos mínimos quadrados, com auxílio do programa computacional.

4.2.5 Cálculo de Densidade

A densidade aparente das amostras foi calculada pela pesagem em uma balança analítica de dez corpos de provas cortados em cubos de aproximadamente 3 cm medidos com o auxílio do paquímetro, sendo cinco amostras da espuma industrializada e cinco amostras das espumas de laboratório.

4.2.6 Observação da Estrutura Celular

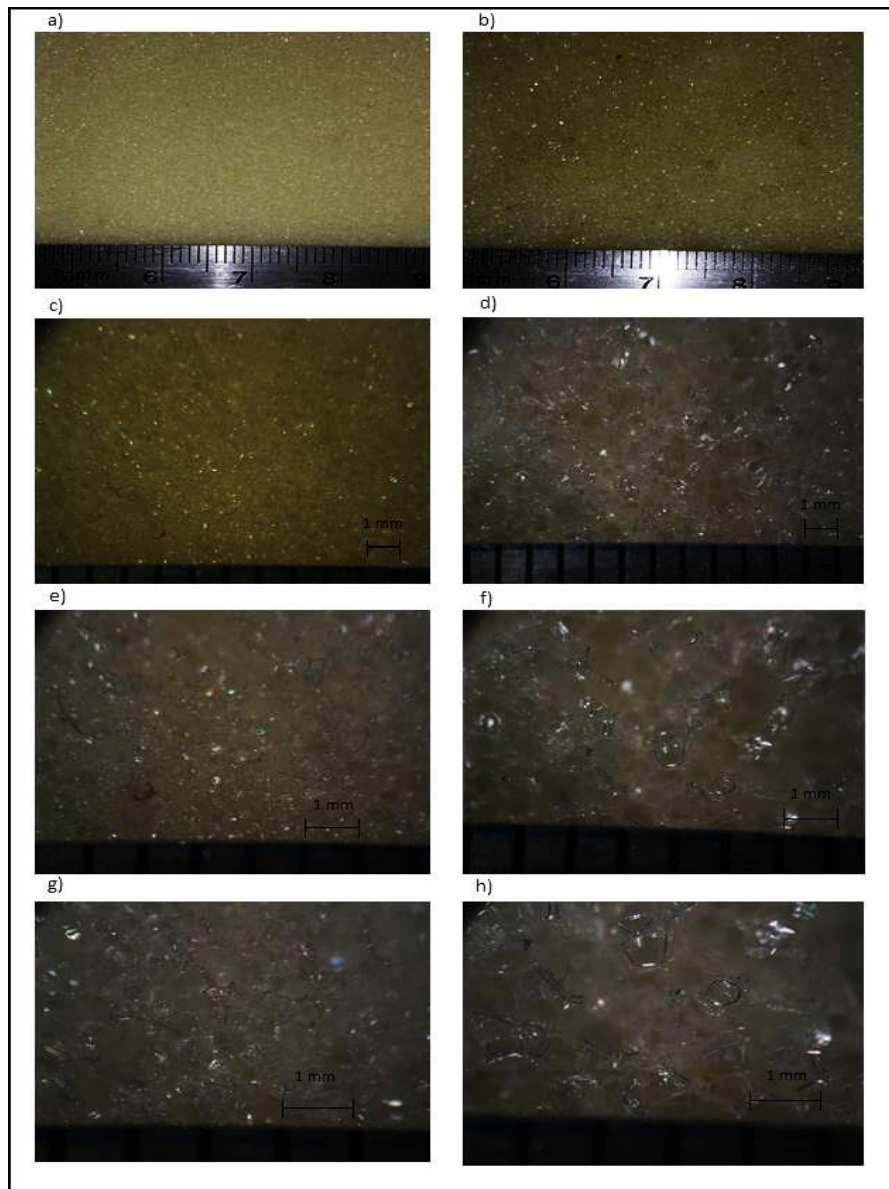
A estrutura celular das espumas testadas foi observada em um microscópio estereoscópio, a partir da superfície planas dos corpos de prova.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ESTRUTURA CELULAR

As estruturas celulares das espumas são apresentadas na figura 9, sem aumento e com aumentos de 20x, 30x e 40x.

Figura 9: Superfícies das amostras, sem aumento, da (a) espuma industrial; (b) espuma de laboratório; com aumento de 20X, da (c) espuma industrial; (d) espuma de laboratório, com aumento de 30X, da (e) espuma industrial; (f) espuma de laboratório, com aumento de espuma de laboratório, com aumento de 40X, da (g) espuma industrial; (h) espuma de laboratório.



Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que a espuma de laboratório apresenta uma estrutura celular mais grosseira, além de menor uniformidade nos tamanhos e distribuição das células fechadas, enquanto que a espuma industrial, produzida em máquinas com alta capacidade de homogeneização da mistura reativa, apresenta estrutura celular mais refinada. Este fato está associado ao menor grau de agitação mecânica na fabricação da espuma de laboratório, pois o número e o tamanho dos núcleos de ar retidos na mistura são determinados pela energia mecânica fornecida no processo da mistura (REIGNIER et al, 2019). O processo de nucleação das células é um dos mais importantes na determinação da morfologia da espuma, sendo que o número e a distribuição dos núcleos afetam significativamente as propriedades da espuma (GAMA et al, 2018).

As características da estrutura celular da espuma são fundamentais para o desempenho como isolante térmico. Células menores proporcionam menor condutividade térmica porque a mesma quantidade de gás é aprisionada em um número maior de células, de forma que as diferenças de concentração de gás entre células adjacentes são reduzidas, o que causa também a redução da taxa de difusividade térmica (HARIKRISHNAN et al, 2008).

Tipicamente, a condutividade térmica de uma espuma rígida de PU depende das contribuições do calor transferido por condução através do gás retido nas células (40 a 50 %), do calor transferido por condução através do polímero (20 a 30 %) e do calor radiante (20 a 30 %) (BIEDERMAN et al, 2001; GAMA et al, 2018). Entretanto, a contribuição da radiação diminui com o aumento da quantidade de células por unidade de volume (VILAR, 2020). Dessa forma, a melhor estratégia para reduzir a contribuição da radiação, diminuindo o valor do fator K de condutividade térmica do material, é a redução do tamanho das células. De forma inversa, estruturas celulares mais grosseiras tendem a tornar mais efetiva a condução do calor por radiação, aumentando o valor do fator K.

Outra questão que deve ser considerada é a retenção do gás nas células. Tipicamente, uma espuma para isolamento térmico com densidade de 32 kg/m³ de densidade contém 3% de polímero e 97% de gás (% em volume) retido nas células fechadas (VILAR, 2020). Entretanto, isso depende da estabilização das células que, por sua vez, depende do processo de polimerização, o qual se desenvolve ao mesmo tempo em que a espuma se forma (processo *one shot*). Os isocianatos são espécies reativas e hidrofóbicas (SONNENSCHNEIN, 2015; VILAR, 2020), entretanto,

à temperatura ambiente, o isocianato reage lentamente com grupos hidroxila. Por outro lado, para a obtenção de espumas de células fechadas, requer-se que as membranas das células sejam suficientemente fortes para resistir à ruptura durante o processo de espumação e que o módulo do polímero aumente rapidamente, de forma que as células sejam dimensionalmente estáveis, mesmo que se desenvolva um vácuo parcial dentro delas (MINOGUE, 2000). A agitação vigorosa favorece muito a reação de polimerização. Assim, considerando que a energia mecânica aplicada ao sistema reativo para obtenção da espuma de laboratório foi muito inferior àquela empregada em processos industriais, é razoável supor que a retenção de parte do gás de expansão tenha sido prejudicada e o gás tenha sido perdido para a atmosfera, sendo substituído pelo ar (que é um isolante térmico menos eficiente)

Como resultado destes diferentes efeitos, espera-se que a espuma de laboratório seja mais densa e com maior fator k de condutividade térmica, como será visto nos tópicos seguintes.

5.2 DENSIDADE

A tabela 2 e 3 apresentam respectivamente os valores de densidades das espumas industrializadas e das espumas de laboratório.

Tabela 2: Densidade das espumas industrializadas.

Amostra	Peso (g)	cm ³	g/cm ³	Kg/m ³	Média (Kg/m ³)	Desvio Padrão
1	1,060	30,323	0,035	34,958	34,108	0,890
2	1,084	32,026	0,034	33,847		
3	1,035	29,484	0,035	35,117		
4	0,978	29,531	0,033	33,104		
5	0,990	29,542	0,034	33,512		

Fonte: autoria própria.

Tabela 3: Valores obtidos para a densidade das espumas de laboratório.

Amostra	Peso (g)	cm ³	g/cm ³	Kg/m ³	Média (Kg/m ³)	Desvio Padrão
6	1,352	30,681	0,044	44,066	44,137	3,413
7	1,310	27,406	0,048	47,810		
8	1,399	29,591	0,047	47,268		
9	1,188	29,528	0,040	40,216		
10	1,377	33,332	0,041	41,324		

Fonte: Autoria própria.

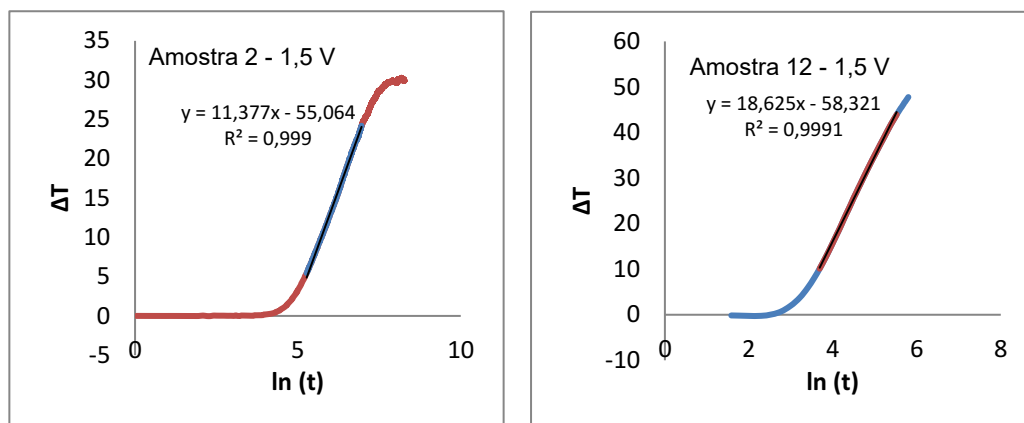
Como se esperava, comparando-se os resultados da Tabela 2 com a Tabela 3, Pode-se observar que a densidade da espuma obtida no laboratório é cerca de 30% maior que a densidade da espuma de origem industrial.

Como discutido no item 5.1, pode-se supor que o método de agitação do sistema reacional para obtenção a espuma de laboratório e a estrutura celular mais grosseira da espuma produzida no laboratório tenham favorecido a liberação de gases que, de outra forma, teriam ficado aprisionados no interior das células fechadas. As propriedades isolantes da espuma dependem de sua densidade, sendo que, em densidades mais elevadas, a condutividade térmica da espuma tende a ser maior, porque a transmissão de calor através da fase sólida torna-se mais efetiva. (PERES, 2018; VILAR, 2020).

5.3 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A Figura 10 apresenta curvas típicas $\ln(t)$ vs ΔT obtidas para a espuma de laboratório (a) e a espuma industrial (b), com 1,5 V. Em cada caso, são identificadas as regiões das curvas utilizadas para a análise de regressão linear. No apêndice A são apresentadas as curvas de todas as amostras.

Figura 10: Exemplos de curvas $\ln(t)$ vs ΔT obtidas.



Fonte: Autoria Própria.

Pode-se observar que o comportamento das curvas da Figura 10 é como o esperado, conforme a Figura 3.

Os valores de condutividade térmica obtidos a partir da Equação 6 são apresentados na Tabela 4, onde n é o número de amostras.

Tabela 4: Condutividades térmicas da espuma industrializada obtidas com a técnica do fio quente.

Espuma	Voltagem (V)	n	Condutividade térmica (W/mK)	
			Média	Desvio padrão
Laboratório	1,5	2	0,222	0,086
Industrial	2,0	2	0,325	0,095
Industrial	1,0	4	0,120	0,02
Industrial	1,5	4	0,046	0,021

Fonte: Autoria própria.

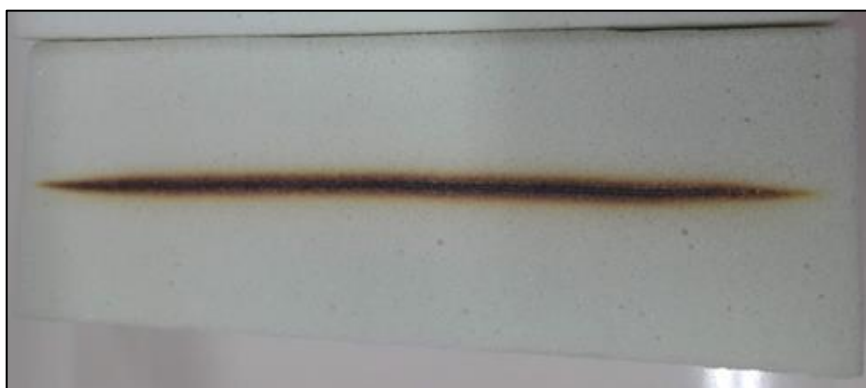
A condutividade térmica das espumas rígidas de PU utilizadas para isolamento térmico situa-se na faixa de 0,020 a 0,030 W/mK, conforme resultados publicados por diversos autores, os quais foram obtidos por diferentes técnicas, tanto em regime permanente como em regime transiente (TSENG, 1997; WU et al, 1999; DEMHARTER, 1998; HARIKRSHAN et al, 2008; ZHANG et al, 2017).

Esperava-se que os resultados de condutividade térmica das amostras extraídas da espuma produzida no laboratório fossem maiores, pelas razões discutidas no item 5.1. Entretanto, para fins de controle de qualidade, o método do fio quente demonstra sensibilidade para acusar variações dos valores de

condutividade térmica decorrentes de mudanças na estrutura celular da espuma, sendo esta justamente uma das utilidades de um método expedito.

Nas amostras de espuma industrializada, com ddp de 2,0 V, observou-se a queima do material em torno do fio metálico, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11: Amostra da espuma rígida de poliuretana queimada na região em contato com o fio quente.



Fonte: autoria própria

A ligação uretana é reversível, causando a degradação das poliuretanas quando estas são aquecidas a altas temperaturas. Os grupos uretânicos do polímero começam a se dissociar em segmentos de isocianato e segmentos de polioli em torno de 200°C (JIAO et al, 2013; LEE et al, 2019), entretanto, o material carbonizado mostrado na Figura 11 sugere que a temperatura local foi muito mais elevada (AMADO, 2019). Não foi possível neste trabalho avaliar a extensão da degradação do polímero, mas pode-se supor que ela tenha atingido camadas mais internas. O material orgânico degradado e carbonizado tende a apresentar condutividade térmica mais elevada, mais próxima dos polímeros sólidos (RAMAZONOVA et al, 2018; ZHU et al, 2018; YANG et al, 2018), o que parece explicar a grande diferença entre os valores de condutividade da amostra industrializada, quando se utilizou uma corrente mais elevada.

É provável que o material tenha sofrido degradação mesmo nas voltagens mais baixas, afetando os resultados das medições. Ainda assim, alguns resultados se aproximam bastante dos valores publicados de condutividade térmica de espumas rígidas de poliuretano para isolamento térmico, sugerindo que o método do

fio quente é promissor, desde que a corrente do fio seja tal que não provoque a degradação do polímero.

Outro fator interessante a se observar é que os resultados apresentam maior dispersão quando comparados com trabalhos publicados – os resultados de Harishkrshan (2008), em um procedimento alternativo, também em regime transiente, apresentaram coeficiente de variação em torno de 1%. É provável que fatores como o posicionamento do termopar e do fio aquecido, assim como variações na montagem da amostra tenham prejudicado a reprodutibilidade do teste e também afetado os resultados.

6 CONCLUSÃO

- O método do fio quente é uma alternativa prática e simples para o controle da condutividade térmica de espumas rígidas de poliuretano.
- A corrente elétrica que atravessa o fio deve ser controlada, de forma a não causar a degradação do polímero e afetar os resultados.
- A reprodutibilidade do método é sensível a detalhes como o posicionamento do fio metálico e do termopar, sendo recomendado ainda a confecção de um gabarito para a montagem da amostra.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1 Avaliar a técnica do fio quente em espumas rígidas de poliuretana com diferentes agentes de expansão.

2 Comparar as condutividades térmicas das espumas com diferentes agentes de expansão a fim de avaliar se as novas espumas que serão fabricadas possuem uma eficiência no isolamento térmico.

3 Avaliar a técnica do fio quente em outros materiais não condutores para testar a confiabilidade da técnica.

4. Estudar os efeitos da intensidade da corrente elétrica no fio e refinar os procedimentos de ensaio.

REFERÊNCIAS

- AMADO, J.C.Q. **Thermal Resistance Properties of Polyurethanes and Its Composites**. IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.87039. Disponível em < <https://www.intechopen.com/books/thermosoftening-plastics/thermal-resistance-properties-of-polyurethanes-and-its-composites>>, acesso em 13/11/2020.
- BIEDERMAN, A., MERTEN, A., MINOGUE, E., ROTERMUND, U., EBERT, H. P., HEINEMANN, U., FRICKE, J., SIEFERT, H. **Analysis of heat transfer mechanisms in polyurethane rigid foam**. Journal of Cellular Plastics; 37; 467, 2001.
- BOLSONI, Elisandra. **Estudo do aproveitamento e reutilização das espumas rígidas de poliuretano pós-consumo**. 2010. 22f. Trabalho Final da Disciplina de Medições Térmicas – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- CANEVAROLO Jr, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros** – Artliber Editora Ltda – São Paulo, 2007
- CHOI, S.W.; JUNG, J.M.; YOO, H.M.; KIM, S.H.; LEE, W.I. **Analysis of thermal properties and heat transfer mechanisms for polyurethane foams blown with water**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 132, nº 2, pp 1253-1262
- DEMHARTER, A. Polyurethane rigid foam, a proven thermal insulating material for applications between +130°C and -196°C. Cryogenics, 38, pp. 113-117, 1998.
- FRANCO, A. **An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method**. Applied Thermal Engineering 27 (2007), 2495-2504, março 2007.
- GAMA, N.V.; FERREIRA, A.; BARROS-TIMMONS, A. Polyurethane foams: past, present and future. Materials, vol. 11, 1841, 2018.
- GIUFFRÍA, R, **The microscopic structure of rigid polyurethane foam**. Journal of Polymer Science, vol. 60, pp 91-98, 1962.
- HARIKRISHNAN, G.; MACOSKO, W.; CHOI, J.H.; BISHOP, J.C.; SINGH, S.N. **A simple transient method for measurement of thermal conductivity of rigid polyurethane foams**. Journal of Cellular plastics, Vol. 44, pp. 481-491, 2008.
- INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Tradução e revisão de EDUARDO MACH QUEIROZ e FERNANDO LUIZ PELLEGRINI PESSOA. 6ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- JIAO, L. XIAO, H.; WANG, Q.; SUN, J. Thermal degradation characteristics of rigid polyurethane foam and the volatile products analysis with TG-FTIR-MS. Polymer Degradation and Stability, vol. 98, nº 12, pp. 2687-2696, 2013.

KIM, H.K.; LIM, H.; SONG, J.C.; KIM, B.K. **Effect of blowing agent type in rigid polyurethane foam.** *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 45, pp 323-327, 2008a.

KIM, S.H.; KIM, B.K.; LIM, H. **Effect of isocyanate index on the properties of rigid polyurethane foams blown by HFC 365 mfc.** *Macromolecular Research*, Vol. 16, n° 5; pp 467-472, 2008b.

LEE, D-W; KIM, H-N; LEE, D-S. Introduction of Reversible Urethane Bonds Based on Vanillyl Alcohol for Efficient Self-Healing of Polyurethane Elastomers. *Molecules*, 24, 2201, 2019.

LIM, H.; KIM, S.H.; KIM, B.K. **Effects of silicon surfactant in rigid polyurethane foams.** *Express Polymer Letters*, Vol. 2, n° 3, pp 194-200, 2008.

MINOGUE, Edel. **An In-situ Study of the Nucleation Process of Polyurethane Rigid Foam Formation.** Tese. Department of Chemical Sciences, Dublin City University. Dublin, 2000.

MONDAL, P.; KHAKHAR, D.V. **Regulation of cell structure in water blown rigid polyurethane foam.** *Macromolecular Symposia*, 216, pp 241-254, 2004.

MORRIS, D.B.; FOGG, B. **Rigid polyurethane foam: refrigerator cabinet design and construction.** *International Journal of Refrigeration*, Vol. 2; n° 2, pp 105-112, 1979.

MONDARDO FILHO, M. **IMMETRO: Painei Setorial – Isolamento para a Linha Branca – refrigeradores e fogões.** Palestra Immetro. Xerém, 2012. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/painelsetorial/palestras/perspectivas_sobre_o_isolamento_termico_para Equipamentos_eletroeletronicos_da_linha_branca_fogoes_e_refrigeradores_milton_mondardo.pdf> Acesso em 08 de outubro 2018

PERES, F. M. **Tecnologia de poliuretanas.** Apostila. UTFPR, 2018.

RAMAZONOVA, A.E.; ABDULAGATOV, I.M.; RANJITH, P.G. **Temperature effect on the thermal conductivity of black coal.** *Journal of Chemical Engineering Data*, Vol. 63, n° 5; pp. 1534-1545, 2018.

REIGNIER, J.; ALCOUFFE, P.; MECHIN, F.; FENOUILLOT, F. The morphology of rigid polyurethane foam matrix and its evolution with time during foaming – new insight by cryogenic scanning electron microscopy. *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 552, pp. 153-165, 2019.

SANTOS, W. N. **O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície.** *Cerâmica* 48 (306), Abr/Mai/Jun 2002.

SILVA, F. M. F. **Estudo de materiais de isolamento térmico inovadores.** 2013. 211 f. Dissertação de Mestrado- Faculdade de engenharia da universidade do porto. Porto, Portugal, 2013.

SCHMITZ, Maico Ismael. **Determinação de parâmetros termodinâmicos para projetos de equipamentos de refrigeração para carrocerias frigoríficas**. 2016.94 f. Trabalho de conclusão de curso. Centro de Ciência Exatas e Tecnologias (CETEC), 2016.

SONNENSCHNEIN, M. F. **Polyurethanes: science, technology, Markets, and Trends**. New Jersey: John Wiley, 2015

THIRUMAL, M.; KHASTGIR, D.; SINGHA, N.K.; MANJUNATH, B.S.; NAIK, Y.P. **Effect of foam density on properties of water blown rigid polyurethane foam**. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 108, pp 1810-1817, 2008.

TSENG, C.; MASAHITO, Y.; OHMORIT, T. **Thermal conductivity of polyurethane foams from room temperature to 20 K**. *Cryogenics*, vol. 37, pp. 305-312, 1997.

VILAR, Walter. **Química e tecnologia de poliuretanos**. Disponível em: <www.Poliuretanos.com.br> Acesso em: novembro de 2020.

WU, J-W.; SUNG, W-F.; CHU, H-S. **Thermal conductivity of polyurethane foams**. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 2211-2217, 1999.

YANG et al. **Low-cost, three-dimension, high thermal conductivity, carbonized wood-based composite phase change materials for thermal energy storage**. *Energy*, Vol. 159, pp. 929-936, 2018.

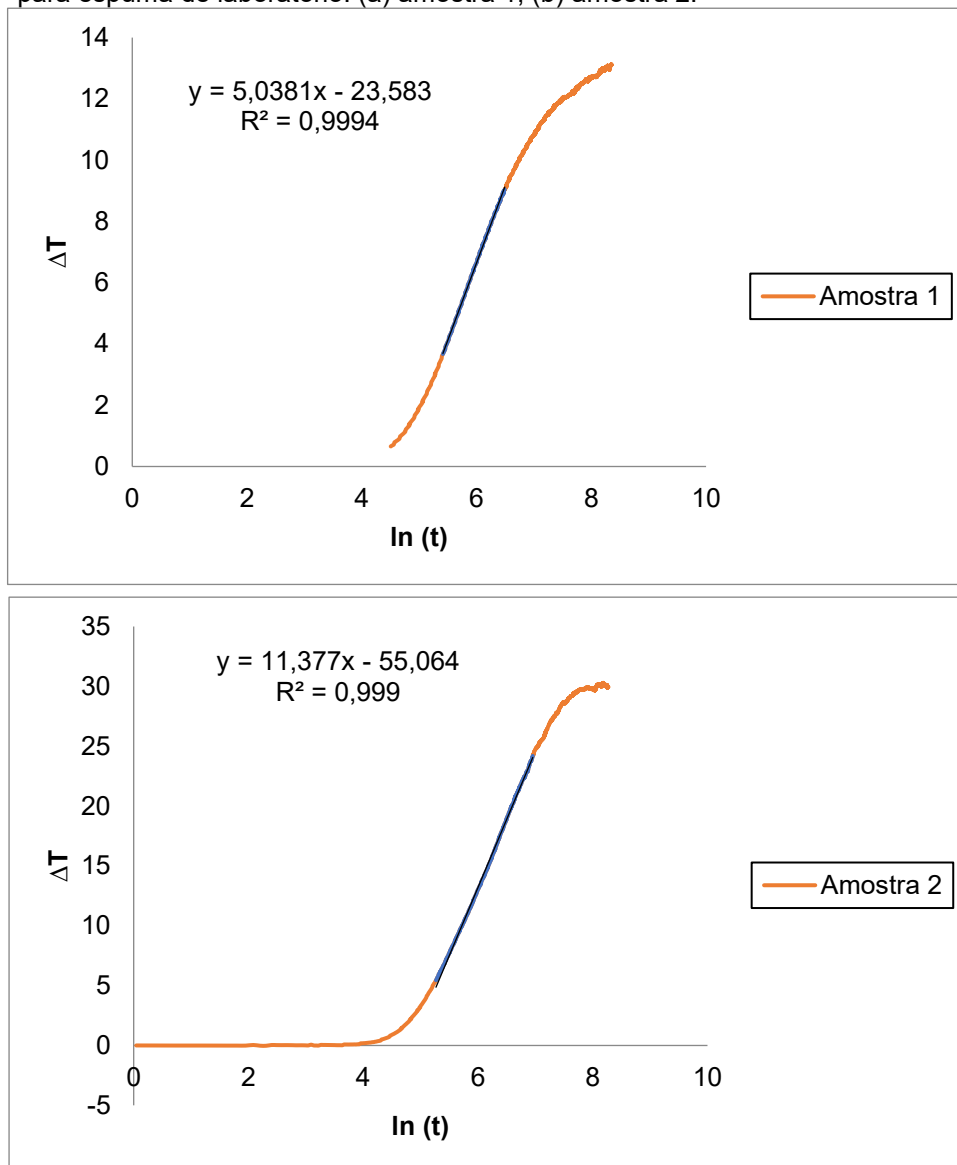
YÜKSEL, N. **The review of some commonly used methods and techniques to measure the thermal conductivity of insulation materials**. In **ALMUSAED, A. Insulation Materials in Context of Sustainability**. (Ch 6). London: IntechOpen Science, pp 113-140, 2016.

ZHANG, H.; FANG, W-Z.; LI, Y-M.; TAO, W-Q. **Experimental study of the thermal conductivity of polyurethane foams**. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 115, pp. 528-538, 2017.

APÊNDICE A – Curvas obtidas com a técnica do fio quente.

Tensão aplicada de 1,5 V para espuma de laboratório.

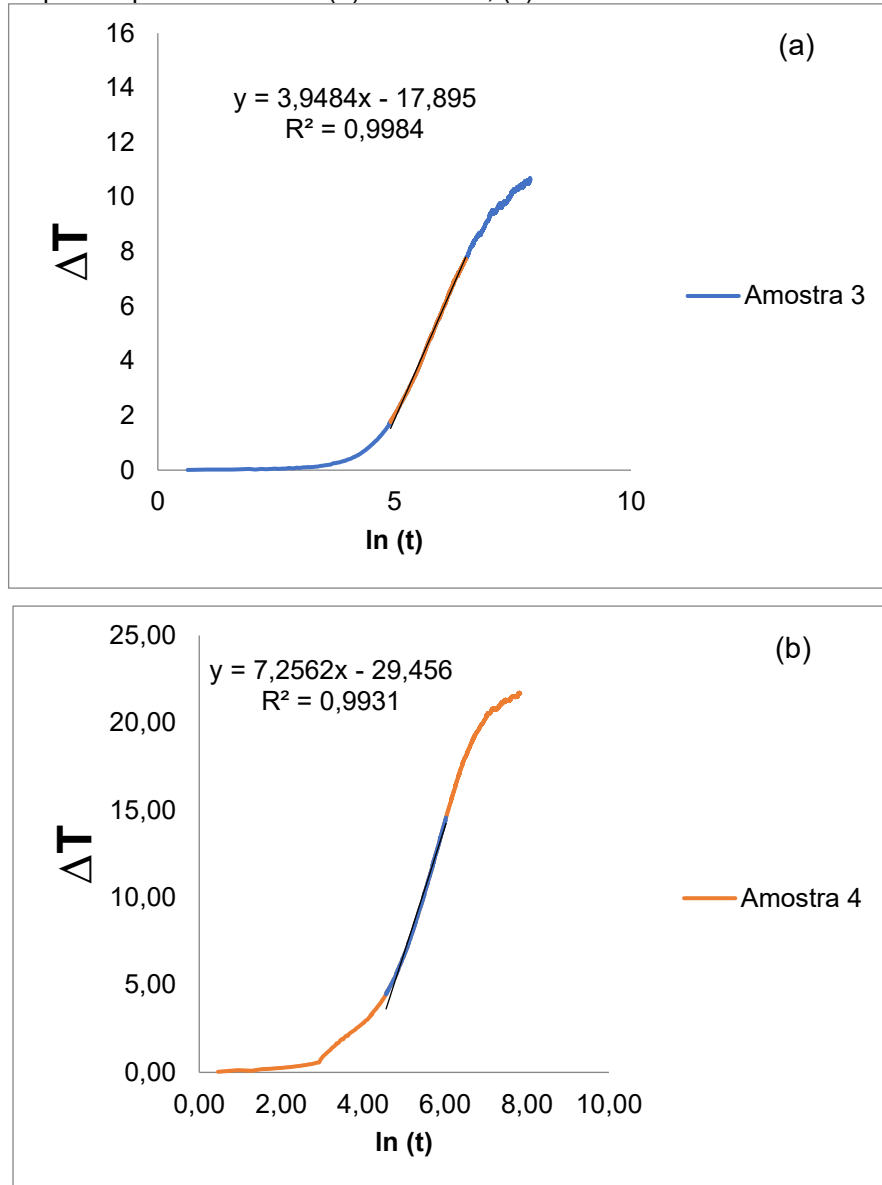
Figura 12: Variação de temperatura versus $\ln t$ com tensão aplicada de 1,5 V para espuma de laboratório. (a) amostra 1; (b) amostra 2.



Fonte: Autoria Própria.

Tensão aplicada de 2 V para espuma industrial.

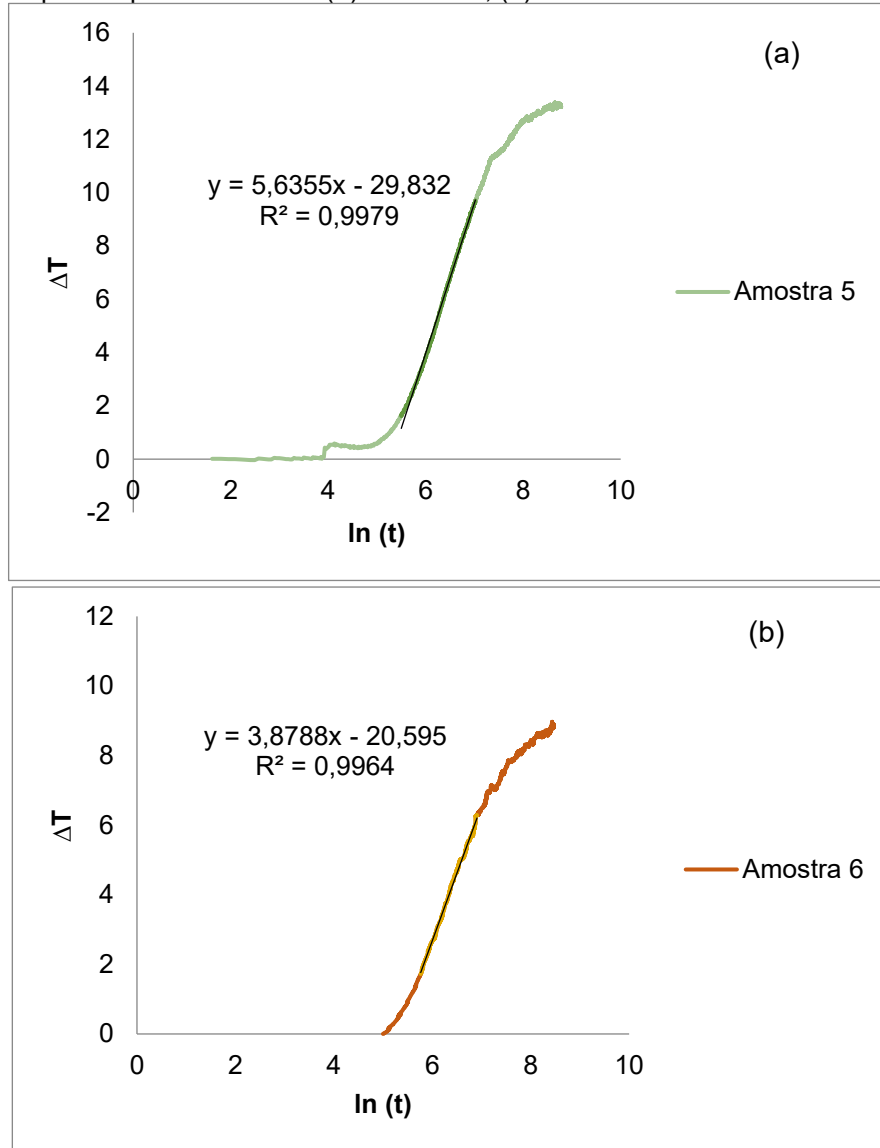
Figura 13: Variação de temperatura versus $\ln t$ com tensão aplicada de 2 V para espuma industrial. (a) amostra 3; (b) amostra 4.



Fonte: Autoria Própria.

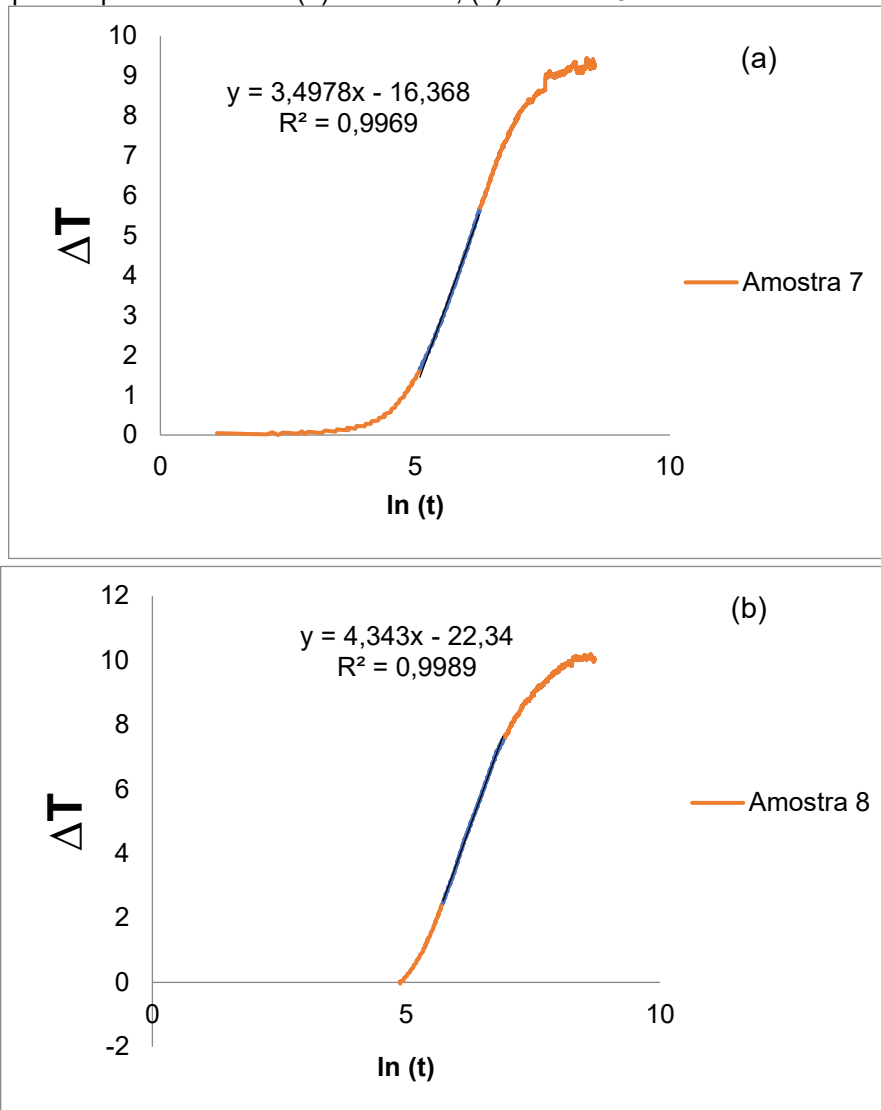
Tensão aplicada de 1 V para espuma industrial.

Figura 14: Variação de temperatura versus $\ln t$ com tensão aplicada de 1 V para espuma industrial. (a) amostra 5; (b) amostra 6.



Fonte: Autoria Própria.

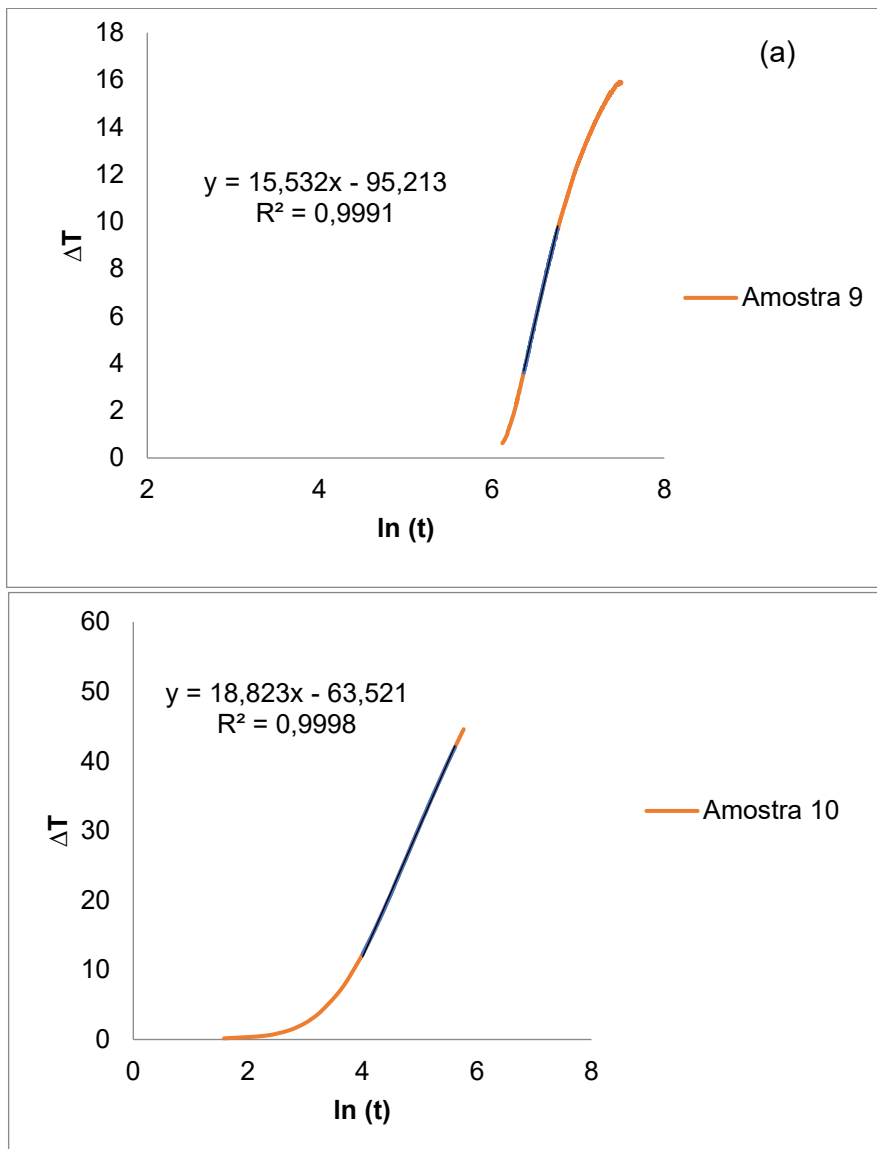
Figura 15: Variação de temperatura versus $\ln t$ com tensão aplicada de 1 V para espuma industrial. (a) amostra 7; (b) amostra 8.



Fonte: Autoria Própria.

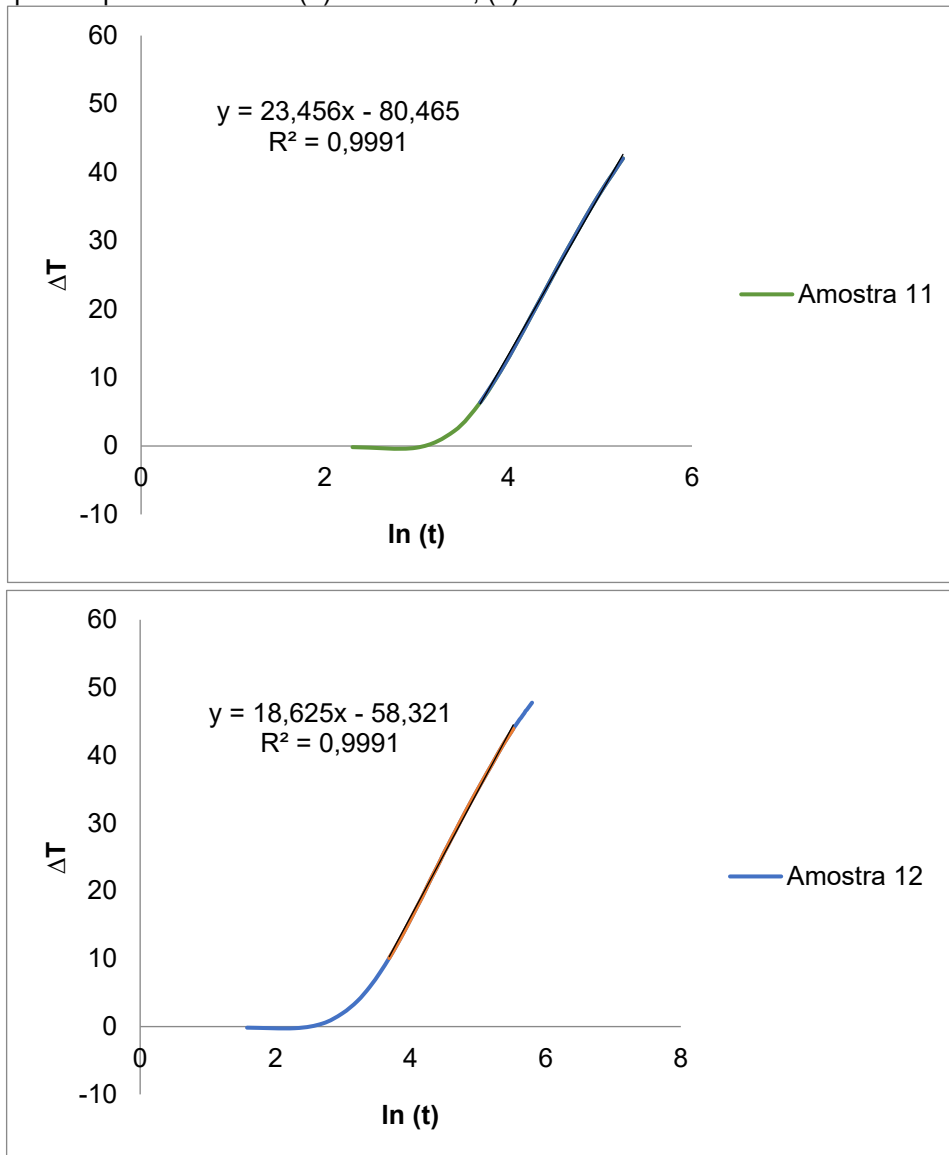
Tensão aplicada de 1,5 V para espuma industrial.

1Figura 16: Variação de temperatura versus $\ln t$ com tensão aplicada de 1,5 V para espuma industrial. (a) amostra 9; (b) amostra 10.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 17: Variação de temperatura versus $\ln t$ com tensão aplicada de 1,5 V para espuma industrial. (a) amostra 11; (b) amostra 12.



Fonte: Autoria Própria.

APÊNDICE B – Tabela de resultados.

Tabela 5: Condutividades térmicas da espuma industrializada obtidas com a técnica do fio quente.

Amostra	Tensão (V)	Condutividade Térmica (W/mK)
1	1,5	0,308
2	1,5	0,136
3	2	0,420
4	2	0,229
5	1	0,089
6	1	0,129
7	1	0,143
8	1	0,118
9	1,5	0,061
10	1,5	0,051
11	1,5	0,062
12	1,5	0,011

Fonte: Autoria Própria.