



**13º POSMEC - Simpósio do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica**

**Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica**



MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAIS SÓLIDOS NÃO CONDUTORES

Leonardo Correa Ribeiro

leobutica@yahoo.com.br

Valério Luiz Borges

vlborges@mecanica.ufu.br

Gilmar Guimarães

gguima@mecanica.ufu.br

Sandro Metrevelle M. de Lima e Silva

Laboratório de Transferência de Calor e Massa e Dinâmica dos Fluidos - LTCM

Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia - UFU

Av. João Naves de Ávila s /nº, CEP 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil

metrevel@mecanica.ufu.br

Resumo: *A medição da condutividade térmica dos diversos materiais se dá através da construção de experimentos que simulam as soluções da equação da difusão de calor. Um destes métodos é a técnica da placa quente compensada. Neste dispositivo, uma amostra em forma de placa plana é colocada em sanduíche entre uma placa quente e uma placa fria em condições tais que o fluxo de calor que atravessa a área central da amostra seja unidirecional. Assim, nas condições de regime permanente, a condutividade térmica pode ser calculada pela medição do fluxo de calor e do gradiente médio de temperatura na amostra. O objetivo deste trabalho é a otimização da bancada experimental de medição de condutividade térmica, através da confecção de uma nova placa quente e uma nova placa fria. Com isso pretende-se reduzir significativamente o tempo de obtenção do regime permanente. As novas placas foram confeccionadas em alumínio que apresenta baixa inércia térmica, alta resistência à corrosão e baixa densidade. Para a construção da placa fria foram usadas outras duas placas de dimensões 305 x 305 x 9,5 mm, onde cada placa foi usinada com uma fresa abaulada de 10 mm de diâmetro e 5 mm de raio de ponta. Os rasgos foram feitos em uma máquina operatriz automática Discovery 760 em forma espiral de forma a ter uma superfície mais isotérmica possível. A placa quente foi construída com outras duas placas de 305 x 305 x 5 mm, onde cada placa foi usinada com uma fresa 2,5 mm de diâmetro. Os rasgos foram feitos tendo uma profundidade de 3,5 mm. Este novo aparato de medição pode fornecer resultados mais confiáveis para a condutividade térmica, além de reduzir bastante o tempo de espera para o experimento atingir o regime quando comparado com outras placas. Também facilita reparos e locomoção do dispositivo. Para validação da técnica fez-se uma comparação do valor obtido para o PVC (polyvinyl chloride) com uma técnica transiente no domínio da frequência*

Palavras-chave: *condutividade térmica, equação de Fourier, regime permanente, condução de calor.*

1. INTRODUÇÃO

Como o desenvolvimento de novos materiais, principalmente os polímeros que são isolantes, tornaram-se necessárias o aprimoramento de novas técnicas para a determinação das propriedades térmicas destes materiais. Um isolante térmico é usado tipicamente para limitar a transferência de calor entre dois ambientes que estão a temperaturas diferentes. Para sua adequada utilização, é imprescindível o conhecimento de sua condutividade térmica.

A medição de condutividade térmica, k , pode ser realizada em regime permanente ou transiente. métodos dinâmicos são mais rápidos. Entretanto, estes métodos de medição são muito difíceis. O método em regime permanente pode ser modelado mais facilmente, porém exige várias horas para obtenção do regime permanente. Os métodos padrões adotados para a determinação das propriedades térmicas de materiais isolantes tentam manter as condições de testes tão próximas quanto possível das situações em que se utiliza o isolante. Medições são usualmente realizadas estabelecendo-se um fluxo de calor unidirecional na amostra (placa plana) de faces paralelas. O método da placa quente compensada (ASTM, 1997) é adequado para a determinação da condutividade térmica, em regime permanente, de materiais isolantes de baixa densidade, podendo estes serem sólidos, fibrosos, celulares ou granulares. Neste método a amostra em forma de placa plana, homogênea, isotrópica é colocada em sanduíche entre uma placa quente e uma placa fria em condições tais que o fluxo de calor que atravessa a área central da amostra é unidirecional. Nas condições de regime permanente, a condutividade térmica é calculada pela medição do fluxo de calor e do gradiente médio de temperatura na amostra. O fluxo de calor através da amostra é obtido a partir da quantidade de energia fornecida para manter constante a temperatura da placa quente. A temperatura é medida a partir de termopares. A obtenção da condutividade térmica se faz-se através da solução da equação de Fourier que simula o modo de transferência de calor por condução (meio sólido) em regime permanente neste caso. A lei de Fourier define que o calor que atravessa unidirecionalmente um material sólido é proporcional a diferença de temperatura entre as faces medidas e também em relação à área perpendicular a direção do calor, sendo inversamente proporcional à espessura da amostra. Apesar da simplicidade do modelo térmico usado no método da placa quente compensada, algumas restrições podem ser citadas. Por exemplo, o tempo demorado para atingir o regime permanente, a variação de paralelismo e planicidade que possibilita a falta de contato entre as placas, ocasionando a fuga de calor lateral que compromete a condição de fluxo de calor unidirecional. Buscando-se minimizar estes problemas, uma nova montagem da bancada experimental do método da placa quente compensada do LTCM é apresentada neste trabalho. Neste sentido, novas placas quente e frias com baixa inércia térmica, superfícies mais isotérmicas e possibilidade de manutenção (fios de resistência, limpeza de resíduos e da corrosão) são desenvolvidas.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Condutividade térmica

A condutividade térmica representa a capacidade de um material conduzir uma maior ou menor quantidade de calor. Esta relação é descrita pela lei de Fourier (Incropera & DeWitt, 1998). A equação de Fourier de forma genérica é descrita pela eq. (1) :

$$q = k.A \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

onde q é a taxa de transferência de calor, k é a condutividade térmica, A é área perpendicular ao fluxo, $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente térmico.

Em uma situação hipotética, tem-se uma parede plana de espessura L , cujas dimensões transversais são muito maiores que a espessura. Submete-se uma de suas faces a temperatura T_1 e sobre a outra face uma temperatura T_2 . Nestas condições os planos de cada seção são isotérmicos e o meio pode ser considerado como unidimensional. Se T_1 e T_2 não variam no tempo, estabelece-se nesta parede um fluxo de calor constante, ou seja, condição de regime permanente. O vetor fluxo de calor é dirigido para a face mais fria da parede. Então a partir da equação de Fourier, obtém-se a condutividade térmica representada pela Eq. (2):

$$k = \frac{q \cdot L}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad (2)$$

A Figura (1) ilustra o esquema da parede plana com a distribuição de temperatura em sua superfície. Um corpo é considerado homogêneo quando o valor de sua condutividade térmica não é afetado pelas variações de espessuras ou áreas das amostras. Pela definição de condutividade térmica, não se pode descrever esta propriedade em um material que apresente um modo de transferência de calor que não seja condução. É necessário que a razão do fluxo de calor pelo gradiente de temperatura no material sejam independentes da área, espessura e gradiente de temperatura.

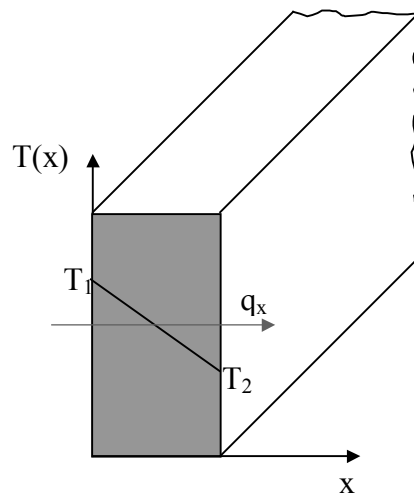


Figura 1- Campo térmico em uma parede plana com temperaturas T_1 e T_2 em suas superfícies.

2.2. Placa quente

A placa quente que é a unidade de aquecimento do sistema, dividi-se em duas partes: núcleo e anel de guarda. Esta placa possui elementos aquecedores localizados entres duas placas de metal de alta condutividade térmica (cobre ou alumínio). A placa também deve ter uma alta condutividade térmica, comparada aos valores dos materiais medidos, para assegurar que sejam suficientemente isotérmicas. As resistências de aquecimento devem ser construídas de forma a obter um fluxo de calor homogêneo na amostra, devem ser simetricamente centradas na direção axial da placa quente, obtendo-se temperaturas iguais em suas duas faces. Monitora-se o desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda através de sensores instalados em ambos os lados. Utiliza-se freqüentemente termopares de pequeno diâmetro, montados de forma individual ou como termopilha. O núcleo e o anel possuem aquecedores independentes. Através do controle da voltagem de alimentação em cada resistência, determina-se o calor gerado em cada parte. As temperaturas da superfície da amostra nas regiões de contato com o anel e com o núcleo, devem ser iguais. A igualdade de temperatura assim estabelecida, evita a perda de calor lateral pelo núcleo e garante o fluxo de calor unidimensional nessa região. O calor gerado é dividido em duas partes iguais e o fluxo de calor pode ser calculado por:

$$q = \frac{V.I}{2.A} \quad (3)$$

onde, V é tensão e I é a corrente.

As resistências de aquecimento devem ser isoladas eletricamente ($R > 1 \text{ M}\Omega$), evitando fugas de corrente. Este isolamento pode ser feito com verniz isolante ou tubo de silicone passando pelo canal que aloja a resistência. Algumas placas podem ser confeccionadas com rasgos para a colocação de termopares.

2.3. Placa Fria

Estas unidades de refrigeração têm como objetivo retirar o calor gerado na unidade aquecedora. Devem ser construídas com as mesmas dimensões, planicidade, paralelismo e condutividade térmica da placa quente. São refrigeradas constantemente por um líquido com temperatura constante monitorada por um banho termostático. Assim a temperatura se mantém constante na sua superfície. Recomenda-se que a circulação do líquido no interior da placa fria seja feito em forma de espiras (caracol), reduzindo os efeitos de gradiente térmico que possam ocorrer. As placas frias possuem canais internos com passagem de água para refrigeração, sendo que a distribuição simétrica da temperatura é conseguida através do controle da vazão de líquido.

2.4. Montagem do experimento

A montagem do equipamento utilizado é feito de forma simétrica, com uma placa de aquecimento central, duas amostras e placas frias dispostas simetricamente conforme a Fig (2).

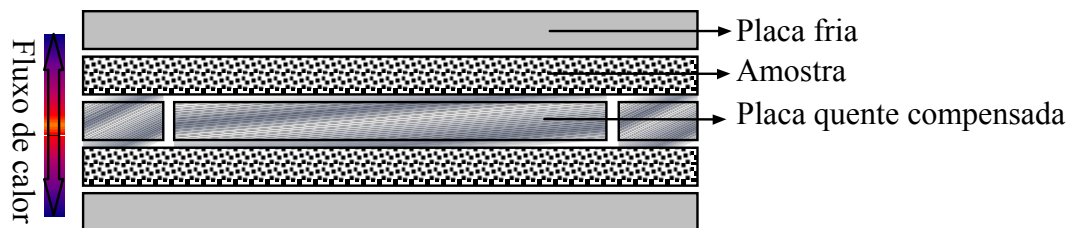


Figura 2: Montagem das placas.

3. PROCEDIMENTO DE CONSTRUÇÃO

3.1. Confeção da placa quente

O material selecionado para a construção tanto da placa quente, como da placa fria, é o alumínio(dura-alumínio). Pois este material apresenta baixa inércia térmica, alta resistência a corrosão e baixa densidade volumétrica. Estas propriedades tornam o alumínio mais apropriado para esta utilização do que outros materiais como o cobre que possui maior densidade. Utilizou-se duas placas inteiriças de dimensões 300 x 300 x 5 mm. Os desenhos dos canais para a fixação das resistências foram feitos em CAD. Tomou-se o cuidado para que as placas tivessem uma boa planicidade. Posteriormente as placas foram usinadas utilizando-se de uma máquina operatriz automática Discovery 760 da marca Romi. Os rasgos têm 2,5 mm de largura e 3,5 mm de profundidade. Usou-se fios de resistência Nicrothal 80 de níquel-cromo com diâmetro 0,287 mm e resistência linear de 16,85 ohms/m. Para isolar o contato do fio de resistência com a placa, evitando a fuga de corrente, os fios foram encapados com tubo de silicone de 1 mm diâmetro interno e 2,5 mm de diâmetro externo. As placa também foram pintadas com um verniz isolante Epoxi Weg Primer. Os fios foram fixados nas duas partes de forma a obter uma distribuição simétrica do calor

gerado. As Figuras (3) e (4) mostram, respectivamente, a placa sendo usinada e a placa montada com os fios de resistência e os termopares.



Figura 4: Placa quente sendo usinada



Figura 3: Placa quente montada

3.2. Confeção das placas frias

As placas frias também foram feitas em alumínio com dimensões de 305 x 305 x 9,5 mm. Os desenhos dos canais para circulação de líquido foram feitos em CAD. Preferiu-se fazer os canais na própria placa para melhorar a troca de calor entre o fluido refrigerante e a placa, conseqüentemente baixando a inércia térmica da mesma. Ressalta-se que as placas antigas foram montadas com serpentinas, blindadas com placas de espessura pequena tangentes, onde o contato é pequeno, dificultando a troca de calor. Os canais das novas placas foram usinados com uma fresa de aço-rápido com diâmetro de 10mm e raio de ponta 5mm, o que possibilitou a obtenção de uma seção circular que facilitasse o escoamento do fluido. Os rasgos foram feitos em espiral para conseguir uma superfície mais isotérmica possível. Durante a montagem das placas frias, utilizou-se uma borracha com 1,5 mm de espessura para vedação dos canais. Fez-se roscas na entrada e saída das placas para conexão das mangueiras. A Figura (4) mostra uma das placas antes da montagem.

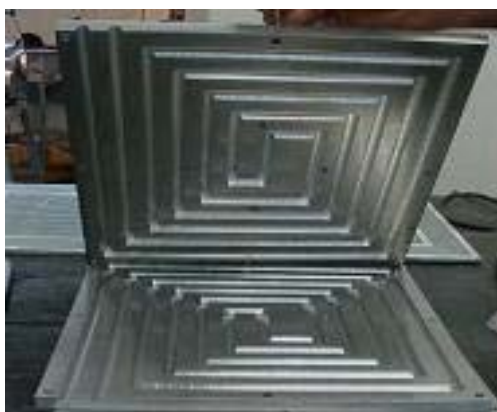


Figura 5: Placa fria depois de usinada

3.3. Bancada experimental do Método da Placa Quente Compensada

Após a confecção da placa quente e das placas frias, procedeu-se à montagem do aparato de medição. Entretanto, antes da montagem, a placa quente foi testada, submetendo-a a uma tensão de 80 V, chegando a uma temperatura de 65°C, para verificar a possibilidade de alguma fissura do tubo de silicone devido à dilatação, o que ocasionaria o contato do fio com a placa e conseqüente fuga de corrente. Também foi medida a resistência do conjunto que foi de 373 Ω sendo simetricamente

dividida para cada lado da placa. As placas frias também foram testadas com um fluxo constante de água a uma temperatura de 50 °C, não havendo vazamento significativo. Foram montados também termopares na placa quente para controle das temperaturas no núcleo, anel, para verificação de fluxo unidirecional e simétrico.

Na Figura (6) apresenta-se a montagem experimental usada para a determinação da condutividade térmica. Duas amostras de Polyvinyl Chloride (PVC) com dimensões de 305 x 305 x 25 mm são usadas. O fluxo de calor que atravessa a amostra é gerado por uma placa quente compensada de dimensões 305 x 305 x 10 mm, onde a placa quente pura tem dimensões de 196 x 194,9 mm. Esta placa é composta de duas placas distintas (placa quente e compensada) ambas as placas são alimentadas separadamente por fontes de alimentação de corrente contínua. Para melhor obter os valores da tensão e corrente gerados, são usados dois multímetros na fonte de alimentação da placa quente, um ligado em série para medir a corrente e outro em paralelo para medir a tensão. As placas frias de dimensões 305 x 305 x 20 mm são mantidas a uma temperatura constante por um banho regulador de temperatura modelo TCS 200-35, fabricado pela Ertco PRECISION. As evoluções de temperatura nas superfícies são medidas por termopares do tipo T, comandados por um sistema de aquisição HP 34970A com capacidade para três cartas multiplexadoras, com 20 canais cada. As leituras das temperaturas dos termopares (tipo K) da placa quente e compensada é feita separadamente por um termômetro digital modelo 692-8010, fabricado pela Barnant Co. Barrington.



Figura 6: Bancada experimental para realização do método

4-ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram realizados 6 experimentos em regime permanente com duração de média de 8 horas para cada experimentos. Para maior confiabilidade foram usados 20 termopares, 5 em cada face das amostras, onde as temperaturas das superfícies quentes e frias são calculadas a partir de temperaturas médias. Posteriormente mediu-se o gradiente de temperatura nas amostras para o cálculo de k e verificação de simetria do fluxo de calor. Utilizaram-se duas potências diferentes para comparação dos resultados obtidos. Na Figura (7) é mostrada a disposição dos termopares. A Tabela (1) mostra os parâmetro utilizados nas medições e os resultados obtidos. Nesta tabela ne é o número de experimentos para cada caso de potência; T_{mf} é a temperatura média da placa fria; T_{mq} é a temperatura média da placa quente; $I(A)$ é a corrente devido a tensão imposta ao núcleo; $V(V)$ é a tensão imposta ao núcleo; $\Delta T (^{\circ}C)$ é o gradiente de temperatura entre a placa fria e a quente; $A (m^2)$ é a área perpendicular ao fluxo de calor; $L (m)$ é espessura da amostra; $k_{médio} (W/mK)$ é condutividade média da amostra. Observa-se na Tab. (1) que os valores do k (casos 1 e 2) obtidos neste trabalho para o PVC apresentam, uma diferença de 1,28 % e 0,63 % quando comparados com o valor $k = 0,156 W/m.K$, obtido para o PVC por Lima e Silva & Guimarães (2000). Comparando-se também com o valor para o PVC fornecido por Borges et all, (2003), $k = 0,152 W/mK$, apresentam uma diferença de 3,80 % e 3,20 % respectivamente para cada caso. Observa-se assim,

uma grande confiança nos resultados obtidos para o k quando comparados com os valores de referência.

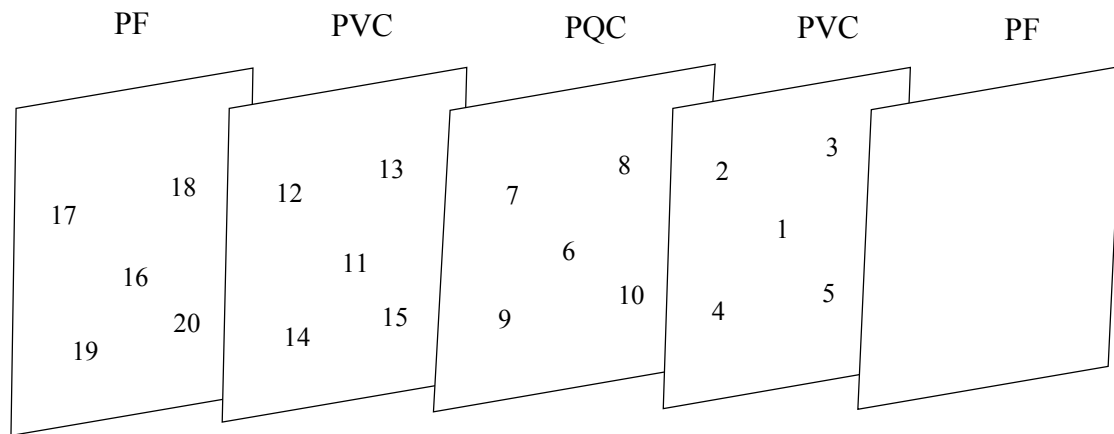


Figura 7: Disposição dos termopares.

Tabela 1: Caracterização dos experimentos para determinação de k

Caso	ne	I (A)	V (V)	$T_{mf}(^{\circ}\text{C})$	$T_{mq}(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T (^{\circ}\text{C})$	A (m^2)	L (m)	$k_{\text{médio}} (\text{W/mK})$
1	3	0,1065	39,7	20,114	28,960	8,85	0,0382	0,0253	0,158
2	3	0,0845	31,6	19,930	25,552	5,62	0,0382	0,0253	0,157

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho uma nova montagem da placa quente compensada desenvolvida no LTCM foi apresentada. O valor da condutividade térmica obtido apresentou um desvio menor que 4,00 % quando comparado com outros valores obtidos na literatura. Os próximos passos para a continuação deste trabalho serão a obtenção da condutividade térmica para mais valores de potência, a medição da planicidade das placas montadas, o cálculo da incerteza no valor obtido da condutividade térmica e o uso das técnicas transientes para a obtenção dos valores da condutividade para a mesma amostra de PVC usada neste trabalho.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento Capes, SESU/MEC, Fapemig e CNPq pelo apoio financeiro. Os autores gostariam de agradecer também aos Professores Evaldo Malaquias da Silva, Eder Silva Costa, Marcos Morais e ao Técnico Reginaldo Ferreira de Souza pelo apoio técnico e pessoal.

7. REFERÊNCIAS

- ASTM C177, 1997, “Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus”.
- Borges, V. L., Lima e Silva, S. M. M. & Guimarães, G., 2003, “Determinação Simultânea e Independente das Propriedades Termofísicas de Materiais Sólidos”. 13^o POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- Incropera F.P. & DeWitt D.P., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, John Wiley & Sons Inc., USA, 4th ed., 1996.

Moura, L. M., 1993, “Desenvolvimento de um Protótipo de Equipamento de Placa Quente Protegida”, Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina Brasil.

Lima e Silva, S. M. M. & Guimarães, G., 2000, “Determinação Simultânea de Propriedades Térmicas do PVC (Polychloroethylene) Usando Somente Uma Superfície de Acesso”, CDROM do ENCIT 2000, FIERGS Convention Center, Porto Alegre, Brasil.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

THERMAL CONDUCTIVITY MEASUREMENT OF INSULATING SOLID MATERIALS

Leonardo Correa Ribeiro

leobutica@yahoo.com.br

Valério Luiz Borges

vlborges@mecanica.ufu.br

Gilmar Guimarães

gguima@mecanica.ufu.br

Sandro Metrevelle M. de Lima e Silva

Heat and Mass Transfer and Fluid Dynamics Laboratory - LTCM
Federal University of Uberlândia, School of Mechanical Engineering,
Avenida João Naves de Ávila, S/N, 38400-902, Uberlândia, Brazil
metrevel@mecanica.ufu.br

***Abstract:** The thermal conductivity measurement of several materials is given by the construction of experiments which simulate the heat diffusion equation. One of these methods is the guarded hot plate method. In this apparatus a plane plate sample is placed in sandwich between a hot plate and a cold plate. In this case the heat flux that crosses the central area of the sample should be unidirectional. In steady state conditions, the thermal conductivity can be calculated by the measured heat flux and the medium gradient of temperature in the sample. The main objective of this work is the optimization of the thermal conductivity measurement experimental apparatus by making a new hot plate and new cold plates. The new plates were made of aluminum, that presents high resistance to corrosion, low thermal inertia and density. A 10 mm diameter ball nose mill was used to machine each plate. The grooves with a 5 mm depth were done in the spiral form by an automatic operational machine Discovery 760. The hot plate was constructed with two plates with dimensions of 305 x 305 x 5 mm. Each plate was machined by a 2.5 mm mill with of diameter and the grooves were made with a depth of 3.5 mm. This new device of measurement can supply more reliable results for determining the thermal conductivity. Besides reducing the time of waiting for the experiment to reach the steady state, when compared with other plates. In order to validate the method, a comparison with two different transient techniques for a PVC (Polyvinyl Chloride) sample is presented.*

***Keywords:** thermal conductivity, Fourier law, steady state conditions, heat conduction.*