

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE METALES

Leonel Lira Cortés, S. García Duarte, E. Méndez Lángo, E. González Durán
 Laboratorio de Propiedades Termofísicas, División de Termometría
 Área Eléctrica, Centro Nacional de Metrología
 km 4.5 Carretera a Los Cués, Municipio El Marqués, C.P. 76246 Querétaro, México.
lira@cenam.mx
 Tel. (01442) 2 11 05 00 ext. 3414 y 3416

Resumen: En el Centro Nacional de Metrología (CENAM) se desarrolló un sistema de medición de conductividad térmica de metales, que opera con el método secundario de barras cortadas [1,2]. El método consiste en establecer un flujo de calor en estado permanente que se conduce a través de un conjunto de 2 barras de cobre de alta pureza como material de referencia y en medio de ellas la barra bajo medición.

En este sistema se miden muestras metálicas de 19.1 mm de diámetro y longitud desde 20 mm hasta 100 mm en el intervalo de conductividad térmica de 5 a 400 W m⁻¹ K⁻¹ y en el intervalo de temperatura de 30 a 200 °C.

Se midieron distintos metales a diferentes temperaturas para validar el método de medición y sus alcances. En la sección 4 se muestran los valores de conductividad térmica y su incertidumbre.

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de las propiedades termofísicas de materiales es importante en todo proceso donde exista intercambio de energía, en particular calorífica. En el diseño, operación y mantenimiento de sistemas mecánicos y equipos (motores de automóvil, extracción de petróleo, procesos termoeléctricos, etc.) conocer el valor de la conductividad térmica con la incertidumbre adecuada es relevante.

La conductividad térmica es una propiedad de los materiales necesaria para calcular los campos de temperatura, controlar algunos procesos de manufactura y aplicaciones donde las propiedades térmicas determinan el resultado.

En el CENAM se mantiene un sistema de medición de conductividad térmica para materiales sólidos conductores que utiliza el método de barras cortadas [1], que se emplea para medir metales.

Se hace una breve descripción de los principios físicos del método y se describe la realización experimental de las mediciones.

Para probar la operación del sistema y validar el método de medición, se miden muestras de acero inoxidable, bronce, aluminio, latón y cobre. Los valores que se obtienen se comparan con los datos publicados en la literatura especializada.

2. MÉTODO DE MEDICIÓN

El método consiste en determinar la conductividad térmica de un material por comparación contra un material de referencia al establecer un estado permanente de flujo de calor en el sistema [2].

El sistema está compuesto por tres barras, dos de ellas son de referencia con conductividad térmica conocida y una barra bajo medición. Las tres barras están aisladas térmicamente del ambiente para evitar el flujo de calor en la dirección radial.

Una fuente de calor se coloca en un extremo de la barra compuesta y el otro extremo está colocado en un sumidero (o fuente fría) de calor a temperatura controlada. En la Figura 1 se muestra un diagrama del sistema.

En un trabajo previo [1] se encontró que la conductividad térmica de la muestra está dada por:

$$\lambda_M = \frac{Z_4 - Z_3}{T_4 - T_3} \left[\frac{\lambda_{R1}}{2} \left(\frac{T_2 - T_1}{Z_2 - Z_1} \right) + \frac{\lambda_{R2}}{2} \left(\frac{T_6 - T_5}{Z_6 - Z_5} \right) \right] \quad (1)$$

Donde, λ_M es la conductividad térmica de la muestra, λ_{R1} y λ_{R2} son la conductividad térmica de los materiales de referencia 1 y 2., T_i es la temperatura en cada una de las posiciones Z_i donde

están colocados los termopares. Los subíndices 1 y 2 se refieren a la primera barra de referencia, 3 y 4 a la muestra bajo medición y el 5 y 6 a la segunda barra de referencia.

Si las distancias entre los termopares de cada barra son iguales y el material de referencia es el mismo para las dos barras entonces, la Ecuación (1) se reduce a:

$$\lambda_M = \frac{\lambda_R}{2} \left(\frac{\Delta T_1 + \Delta T_3}{\Delta T_2} \right) \quad (2)$$

donde λ_R es la conductividad térmica del material de referencia y $\Delta T_1 = T_2 - T_1$, $\Delta T_2 = T_4 - T_3$ y $\Delta T_3 = T_6 - T_5$.

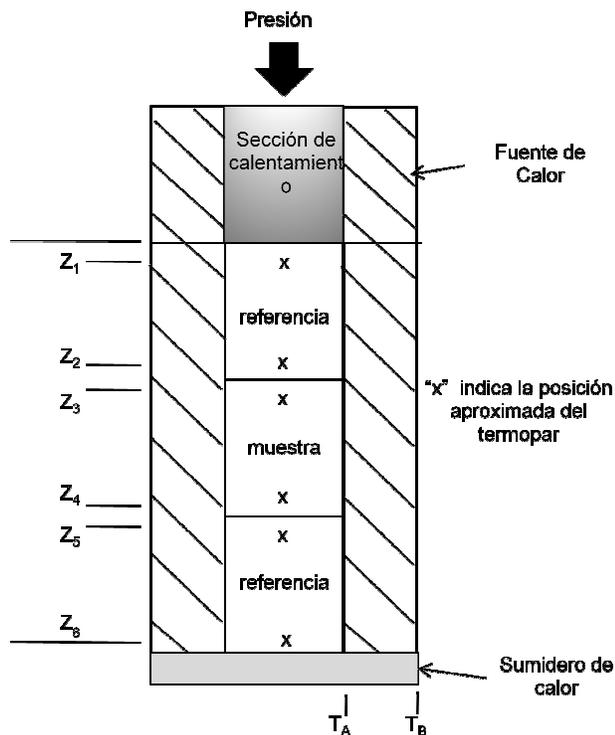


Figura 1. Sistema de medición de conductividad térmica de metales por el método de barras cortadas.

3. EXPERIMENTAL

3.1 Descripción del sistema

La fuente caliente del sistema es un calefactor que se fabricó a partir de una barra de aluminio de 19.1 mm de diámetro y una longitud de 60 mm, en el centro de la barra se maquinó a 16 mm de diámetro y se colocó un alambre de Inconel de 1.6 m de longitud y una resistencia eléctrica de 2.4 ohm. Un extremo del calefactor está dentro de un material aislante refractario y el otro extremo en contacto con el extremo de una de las barras del material de referencia.

La fuente fría o sumidero de calor está constituida por una placa de cobre de 10 cm de diámetro que tiene soldado un serpentín de tubo de cobre de 10 mm de diámetro exterior por el cual circula un fluido (etileno-glicol) que proviene de un baño de temperatura controlada. Una de las superficies está en contacto con un extremo de una barra de referencia y la otra parte en un recipiente aislado. El baño de recirculación mantiene la temperatura de la fuente fría entre -30 y 60 °C.

Las barras de material de referencia son barras de cobre de alta pureza 99.999 % con un diámetro de 19.1 mm y con longitud de 100 mm, 50 mm y 20 mm.

La barra compuesta está rodeada de un tubo de PVC de 100 mm de diámetro, cuyo interior contiene fibra de vidrio de 50.8 mm de espesor.

El sistema de medición tiene siete termopares tipo T calibrados. La fem de cada termopar se mide con un multímetro de alta exactitud (8 ½ dígitos) y auxiliados por un escáner de 8 canales. Se elaboró un programa de computadora para el control, la lectura y registro de los datos. La figura 3 muestra un esquema del sistema de medición [1].

3.2 Experimento

Se coloca la primera barra de referencia en contacto con la fuente caliente, posteriormente se coloca la muestra y finalmente la otra barra de referencia, se usa grasa de vacío para mejorar el contacto térmico.

Se colocan en las barras los termopares correspondientes y se cubre todo el sistema con material aislante, posteriormente se cierra el tubo de PVC.

Se coloca la fuente fría y se ajusta para que quede en contacto térmico todo el sistema.

Se enciende el calefactor, así como el baño termostático se ajusta el valor de temperatura de prueba que corresponde al promedio de la temperatura caliente y la temperatura fría y se inicia el registro de temperatura de los 6 termopares en las barras y uno adicional para la temperatura ambiente.

Se considera que el sistema está en estado permanente al observar que la temperatura de cada termopar es constante en el tiempo. En promedio el sistema se estabiliza después de seis horas de operación. Cuando se alcanza este estado, se continúa el registro por 30 minutos más, los valores almacenados se utilizan para determinar la conductividad térmica del material a través de la ecuación 1.

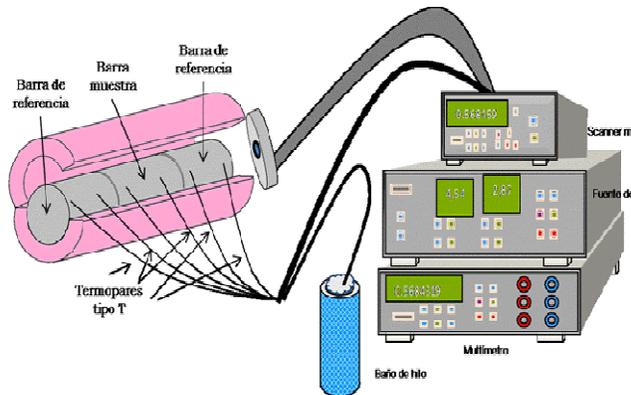


Figura 2. Sistema del método de barras cortadas.

4. RESULTADOS

Las tablas de la I a la V presentan los resultados para varios materiales, donde T representa la temperatura, λ representa la conductividad térmica y U la incertidumbre expandida ($k=2$). Todos los valores que se indican en el encabezado de las tablas corresponden a los publicados por Touloukian [3], una revista especializada en propiedades termofísicas a una temperatura de 23 °C.

TABLA I. Conductividad térmica del acero inoxidable AISI 304, su valor nominal es $15 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$

$T/^\circ\text{C}$	73	77.4	82.5
$\lambda/\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	15.2	15.5	15.5
U	1.1	2.4	2.0

TABLA II. Conductividad térmica del bronce comercial 10A1, su valor nominal es $52 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$

$T/^\circ\text{C}$	55	58.8	75
$\lambda/\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	52	53	52
U	0.3	0.6	0.3

TABLA III. Conductividad térmica del aluminio 1100, su valor nominal $209 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$

$T/^\circ\text{C}$	25	51	56
$\lambda/\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	207	206	209
$U/\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.6	0.4	1.1
$T/^\circ\text{C}$	99.9	149	197
$\lambda/\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	213	224	226
$U/\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.2	1.1	.4

TABLA IV. Conductividad térmica de dos muestras de cobre: uno puro cuyo valor nominal es 401 y el otro de pureza de 99.90 cuyo valor nominal es $386 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$

	1	2	99.9
$T/^\circ\text{C}$	54	80	61
$\lambda/\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	428.0	430.0	387.0
U	1.2	0.8	1.5

TABLA V. Conductividad térmica del latón comercial, su valor nominal es $111 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$

$T/^\circ\text{C}$	74.5	76.5	92
$\lambda/\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	119.0	116.0	119.0
U	1.4	6.6	10.8

En general los valores experimentales están de acuerdo con los valores de la literatura en la mayoría de los materiales analizados. Nuestros materiales no tienen certificado ni especificaciones, excepto el cobre de pureza 99.90.

La incertidumbre experimental para la mayoría de las pruebas es menor al 3% ($k=2$). Para confirmar las diferencias se harán dos procesos comprar materiales certificados o de calidad equivalente a los de la referencia bibliográfica y medir con otro conjunto de materiales de referencia de aluminio.

La principal fuente de incertidumbre es la correspondiente a la variación de la temperatura durante el experimento, ya que la conductividad térmica de las barras de referencia y la posición de los termopares contribuyen en forma poco significativa, el cálculo se realizó siguiendo la ley de propagación de las incertidumbres que aplicada a la Ecuación 2 es:

$$u\lambda_M = \sqrt{\left(\frac{\partial\lambda_M}{\partial\lambda_R}\right)^2 u\lambda_R^2 + \left(\frac{\partial\lambda_M}{\partial\Delta T_1}\right)^2 u\Delta T_1^2 + \left(\frac{\partial\lambda_M}{\partial\Delta T_2}\right)^2 u\Delta T_2^2 + \left(\frac{\partial\lambda_M}{\partial\Delta T_3}\right)^2 u\Delta T_3^2} \quad (3)$$

Las diferencias se deben a la falta de especificaciones de los materiales ya que existen en la literatura una gran dispersión de valores nominales para un mismo material, por ejemplo para el aluminio se encuentra en valores desde 237 hasta 168 W/K¹ m¹[4].

5. CONCLUSIONES

Se midió la conductividad térmica de materiales conductores con incertidumbre menores al 3%.

Se cumplió una etapa de la caracterización del sistema de medición de conductividad térmica por el método de barras cortadas.

Los valores experimentales de la conductividad térmica de varios metales coinciden dentro de la incertidumbre experimental con los valores de la literatura.

Las principales discrepancias se observan en aleaciones de metales que no pueden ser identificadas ya sea en la literatura o por el proveedor de materiales, como son los casos del aluminio y el cobre.

El sistema se operó desde temperatura ambiente hasta 200 °C y se encuentra en desarrollo su extensión hasta 500 °C.

REFERENCIAS

- [1] Lira, E. Méndez, O. González. "Medición de la Conductividad Térmica de Materiales Sólidos Conductores," Simposio de Metrología 2008, CENAM, Qro.
- [2] ASTM E1225-99 "Standard Test Method for thermal conductivity of solids by the guarded comparative longitudinal heat flow technique"
- [3] Touloukian, Y.S., Ho C. Y. Eds. Thermophysical Properties of Matter, 13 vols.,

Plenum Press, New York, 1977. Se continúan publicando apéndices.

- [4] Anthony F. Mills, "Trasferencia de Calor", Addison-Wesley Iberoamericana, 1995. España.