

Problemas de medición de temperatura en la determinación de propiedades termofísicas

V. Martínez Fuentes
CENAM. Laboratorio de propiedades termofísicas
Km 4.5 carretera a los Cues el Marqués, Qro.
Tel. (442) 2110500, fax 2110548, vmartine@cenam.mx

Resumen: Existen problemas para la medición de temperatura en la determinación de propiedades termofísicas que tienen que ver con la instalación y con los sensores mismos. Este trabajo presenta lo que se ha hecho para minimizar estos problemas en la determinación de la conductividad térmica de aislantes térmicos con el aparato de placa caliente con guarda. Se muestra el desarrollo de actividades llevadas a cabo para la medición de temperatura para el aparato de placa caliente con guarda con fuentes de calor lineal. A partir de un modelo de distribución de temperatura en la placa caliente del aparato se seleccionan los sensores más convenientes para ello. Se prueba su homogeneidad, se instalan y se prueban experimentalmente dentro del sistema para determinar la incertidumbre en la diferencia de temperatura que mueve el flujo de calor a través de los especímenes.

INTRODUCCION

La medición de temperatura en la determinación de propiedades termofísicas tales como calor específico y conductividad y difusividad térmicas tiene una mayor importancia si se considera el hecho de que la incertidumbre en temperatura es una de las mayores contribuciones en la incertidumbre de las propiedades termofísicas a determinar.

Además de evaluar y en su caso, minimizar, la incertidumbre en las mediciones de temperatura, la trazabilidad de la temperatura es otro problema importante. Porque a pesar que de se tengan termómetros calibrados, y que se evalúen las incertidumbres, los problemas reales de medición llevan a errores que son mayores que las incertidumbres declaradas. Estos errores de medición se vuelven efectos sistemáticos que no permiten a la medición a ser completamente trazable a los patrones de temperatura.

Normalmente en la calibración de termómetros se emplean medios de temperatura estable y uniforme con el fin de establecer un equilibrio térmico entre los sensores a calibrar y el patrón de temperatura. A diferencia de ello, la medición de temperatura en la determinación de propiedades termofísicas tiene que considerar las condiciones de instalación y las características de los termómetros.

En la determinación de temperatura cuando el sensor se coloca en un medio donde existe transferencia de calor se tiene que se producen errores derivados principalmente por la resistencia térmica de contacto entre el sensor y el medio y la fuga o ganancia de calor a través de los alambres. El primer caso es ilustrado en la figura 1 en donde se tiene un error de

temperatura ΔT que depende directamente de la resistencia térmica de contacto y del flujo de calor. Para el segundo caso la figura 2, muestra el efecto combinado de la fuga de calor y la resistencia térmica de contacto. La disminución del error se logra haciendo que el flujo de calor, q sea pequeño y para ello la resistencia térmica de los alambres debe ser grande o el gradiente de temperatura por el que atraviesan los cables debe ser mínimo.

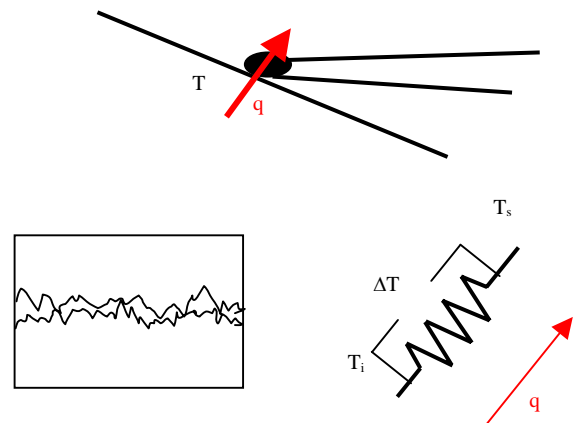


Figura 1. Efecto de la resistencia térmica de contacto en la determinación de temperatura. En la parte inferior se muestra el contacto entre la superficie del medio y el sensor de temperatura y el circuito eléctrico equivalente.

Estos efectos se consideran en la selección del sensor y la instalación del mismo en el aparato de placa caliente con guarda.

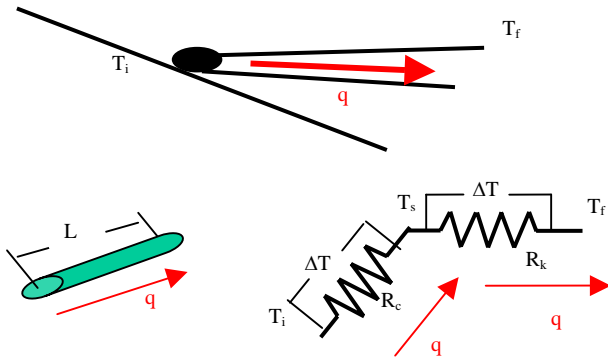


Figura 2. Efecto combinado de resistencia térmica de contacto y fuga de calor en los cables del sensor en la determinación de temperatura. En la parte inferior se muestra el flujo de calor a través del conductor y el circuito eléctrico equivalente.

MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN EL APARATO DE PLACA CALIENTE CON GUARDA.

El método de aparato caliente con guarda es un método primario para la determinación de la conductividad térmica de aislantes térmicos.

Para un aparato de placa caliente aislada con dos especímenes y dos diferencias de temperatura de la placa caliente con respecto a las placas frías y con espesores del espécimen muy parecidos (dentro del 1% de su valor, como puede ser el caso de los materiales de referencia), se tiene:

$$\lambda = \frac{QL_{promedio}}{2A\Delta T_{promedio}} \quad (1)$$

Donde:

Q es el flujo de calor unidimensional a través del área de medición;

$L_{promedio} = (L_1 + L_2)/2$ es la media aritmética del espesor de los dos especímenes L_1 y L_2 ;

A es el área a través de la cual se transmite el calor: El factor 2 considera el hecho de que Q sale a través de las dos caras del plato caliente; y

$\Delta T_{promedio}$ es la media aritmética $(\Delta T_1 + \Delta T_2)/2$, donde ΔT_1 y ΔT_2 son las diferencias de temperaturas entre una placa fría y la placa caliente y entre la otra placa fría y la placa caliente, respectivamente.

La medición de temperatura sirve para determinar las diferencias de temperatura entre la placa caliente y

las placas frías ΔT_1 y ΔT_2 . Arreglando términos $\Delta T_{promedio}$ puede expresarse de la siguiente manera:

$$\Delta T = \frac{T_h - T_{c1} + T_h - T_{c2}}{2}$$

Donde T_h es la temperatura de la placa caliente y T_{c1} y T_{c2} las temperaturas de las placas frías.

1. Temperatura de la placa caliente

Para la medición de la temperatura de la placa caliente en su sección de medición se hace uso del modelo de placa caliente con fuente de calor lineal que propuso Hahn y otros [1]. En este modelo la posición del calefactor lineal dentro de la placa se puede seleccionar de tal manera que la temperatura en $r = b$ (Ver figura 3) sea igual a la temperatura promedio de la sección de medición. De esta manera se facilita la medición de temperatura en la placa caliente sección de medición.

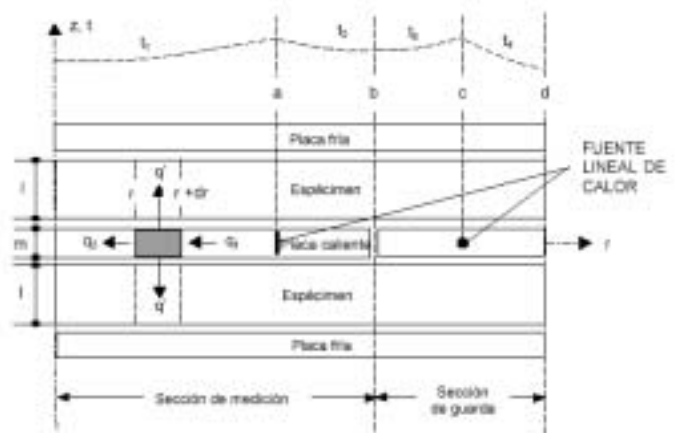


Figura 3. Vista simétrica transversal del aparato de placa caliente con guarda. Los sensores de temperatura se colocan en $r = b$ para facilidad de medición.

El problema de medición es ahora saber que tipo de sensor se puede utilizar. La tabla 1 muestra las ventajas y desventajas de cuatro posibles candidatos.

Tabla 1. Cuatro tipos de sensor para la medición de temperatura en la sección de medición.

Tipo de sensor	Ventajas	Desventajas
Termopar	Facilidad de manejo, temperatura diferencial, sensores de un mismo lote, respuesta rápida.	Calibración, inhomogeneidades, junta de referencia.

RTD	Mayor exactitud, mayor estabilidad.	Autocalentamiento, cuatro hilos, sensibilidad a la humedad, mayor masa
Termistor	Mayor sensibilidad, pequeñas dimensiones	Deriva, problemas eléctricos de aislamiento, no intercambiables,
Fibra óptica	Medición de contacto o sin contacto, baja conductividad térmica	Falta de instrumentación y técnica.

Finalmente se seleccionan termopares para la medición de temperatura en la placa caliente debido a que se pueden realizar fácilmente mediciones de diferencia de temperatura entre las secciones de guarda y medición en la placa caliente y además que los alambres delgados tienen una alta resistencia térmica. Sin embargo, la homogeneidad de un termopar es una característica importante y es por ello que los alambres utilizados se les hace atravesar por un gradiente de temperatura de 200 °C en toda su longitud con el fin de encontrar alguna posible variación de fem debida a inhomogeneidades en los alambres. Estas inhomogeneidades agregan un error que depende de la variación del coeficiente Seebeck y de la diferencia de temperatura en una sección del alambre.

La medición de temperatura se realiza en varios puntos en la placa caliente a lo largo de la separación entre secciones de medición y guarda. Ver figura 4. Los alambres de termopar que van de un punto a otro tienen al menos 15 cm de largo par minimizar el flujo de calor a través de ellos.

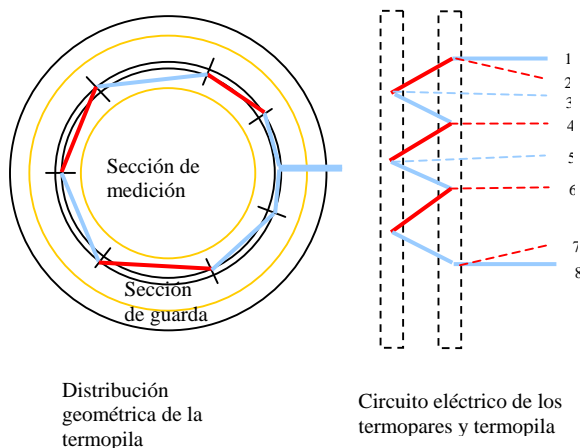


Figura 4. Arreglo de termopares para la medición de siete temperaturas en la placa caliente y la diferencia de temperatura entre secciones.

Para una diferencia de temperatura de 5 mK entre las secciones de guarda y medición y con un termopar de alambre cobre y constantán de 76 μm de diámetro y 15 cm de longitud se tiene una fuga de calor de 3×10^{-7} W.

Existe un sensor de temperatura resistivo que se coloca en la placa caliente para el control de temperatura de la misma. El sensor RTD aporta una potencia de sólo 0,00011 W por efecto de autocalentamiento.

2. Temperatura de las placas frías.

Las placas frías son de cobre y consisten en pasadizos de doble espiral por donde circula un fluido con temperatura constante. La medición de la temperatura en cada placa se hace con un solo sensor de termopar, tal como se aprecia en la figura 5.

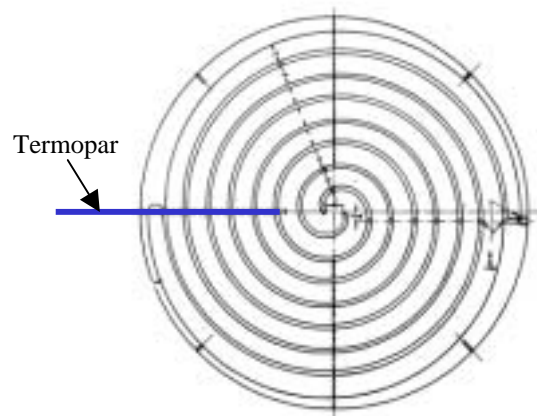


Figura 5. Sección transversal de la placa fría y localización del sensor de temperatura.

RESULTADOS

Sin embargo los modelos teóricos para la determinación de la temperatura en las placas no toman en cuenta efectos tales como los contactos térmicos de calefactores y sensores de temperatura con la placa, las asimetrías, las limitaciones de exactitud en la medición de temperatura con los sensores, etc. Es por ello que se realizan pruebas para asignar un valor de incertidumbre a la determinación de temperatura.

En las mediciones de conductividad rutinarias se ha observado que las desviaciones de temperatura máximas con respecto a la media llegan a ser de $\pm 0,1$ °C en altas temperaturas (70 y 60 °C) aunque en otras temperaturas los valores típicos son de aproximadamente $\pm 0,03$ °C. Tomando el valor

extremo como un límite y una distribución triangular, la incertidumbre en la determinación de la temperatura media es de 0,04 °C

La uniformidad de temperatura en las placas frías se estima ser mejor de 0,10 °C según experimentos realizados con las placas frías y la caliente en contacto térmico a una misma temperatura y sin aplicar potencia a la placa caliente. Así con una distribución rectangular la incertidumbre estándar es 0,058 °C.

La incertidumbre combinada de la temperatura de la placa fría nos da una incertidumbre de 0,081 °C.

La incertidumbre total de la diferencia de temperatura $u(\Delta T)$ es de 0,091 °C tomando en cuenta la incertidumbre de los instrumentos de medición de fem. El factor de sensibilidad es de $-0,00169628 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$ que multiplicado por la incertidumbre en unidades de temperatura da $1,54 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ en unidades de conductividad. Tiene 82 grados de libertad.

Aunque el patrón de conductividad térmica es competitivo en el ámbito internacional por su alcance e incertidumbre, la incertidumbre en ΔT contribuye con un 77% al total de incertidumbre en la determinación de conductividad térmica. Por ello es que en el trabajo de mantenimiento y mejora del patrón de conductividad térmica conviene que se tenga en mente la reducción de esta incertidumbre.

Algunas de las acciones para mejora la medición de temperatura incluyen:

Mejora en el servicio de calibración de termopares que es uno de los factores de mayor peso en la incertidumbre de medición de temperatura. En esto ya se ha trabajado y se ha reducido la incertidumbre tipo A en la calibración de termopares con una mejor metodología en la toma de datos.

Rediseño del circuito de medición para que se mida directamente ΔT . Esto tendría que tomar en cuenta la correcta determinación del coeficiente Seebeck promedio y su incertidumbre.

Re-evaluación de la homogeneidad de los termopares. Diseñar un método para la determinación de la homogeneidad entre puntos muy alejados en los alambres.

Aplicar técnicas de elemento finito para conocer la distribución de temperatura en las placas de una manera mejor aproximada.

CONCLUSIONES

Se tiene un patrón de conductividad térmica competitivo en el ámbito internacional tanto en alcance como en incertidumbre.

Se ha trabajado sobre el diseño de los sensores de temperatura y su mejor instalación para evitar efectos sistemáticos en la medición de temperatura.

La medición de temperatura es el primer factor a mejorar para reducir la incertidumbre.

Los nuevos diseños de placas requerirán un análisis que considere el mayor número de efectos en la distribución de temperatura

REFERENCIAS

¹ Hahn, M. H., Robinson, H. E. , and Flynn, D. R., in **Thermal Insulations**, ASTM STP 544, American Society for Testing and Materials, 1974, pp. 167-192