

# DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN

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.  
[llira@cenam.mx](mailto:llira@cenam.mx)

## 1. INTRODUCCIÓN

La conductividad térmica es una propiedad de los materiales que permite calcular la distribución de temperatura en diversos sistemas, las cargas térmicas en edificaciones; factores de diseño y de simulación en la industria de la construcción. Además contribuye a la operación eficiente en procesos, sistemas o plantas de procesos industriales que involucran transferencia de energía.

Debido a la aplicación de diversas normas de eficiencia energética, programas de apoyo al diseño bioclimático y al desarrollo sustentable de diversos sectores de la economía, existe demanda por determinar la conductividad térmica de materiales aislantes, materiales para la industria de la construcción que no son aislantes, así como la evaluación de muros, techos, sistemas de iluminación, ventanas, entre otros componentes en la edificación de viviendas. El espesor de estos materiales varía de entre 5 cm a 20 cm.

El Centro Nacional de Metrología (CENAM) cuenta con el patrón nacional de medición de conductividad térmica de materiales sólidos aislantes CNM-PNE-16 [1].

El patrón utiliza un método primario de medición con un aparato de placa caliente con guarda que opera en una condición de estado permanente de flujo de calor.

El aparato de placa caliente con guarda es una disposición de una placa caliente y dos placas frías que generan un gradiente sobre dos muestras colocadas entre la placa caliente y las placas frías. Las placas mantienen la temperatura constante y uniforme por lo que son de un material de alta conductividad térmica.

La conductividad térmica del material ( $\lambda$ ) se determina a partir de los valores de la diferencia de temperatura entre las placas caliente y fría ( $\Delta T$ ), el

espesor de la muestra ( $L$ ), el área de medición ( $A$ ) y la potencia eléctrica suministrada ( $Q$ ) cuando está en un estado permanente, por medio de la ecuación:

$$\lambda = \frac{Q_{PROMEDIO}}{2A\Delta T_{PROMEDIO}} \quad (1)$$

donde  $\lambda$  es la conductividad térmica en  $W m^{-1} K^{-1}$ ,  $Q$  es el flujo de calor en  $W$ ,  $L$  es el espesor promedio de la muestra en  $m$ ,  $A$  es el área de la sección transversal de la muestra en  $m^2$  y  $\Delta T_{promedio}$  es la diferencia de temperatura entre la placa caliente y las placas frías en  $K$ .

Las principales características del patrón son las siguientes:

- Intervalo de medición de conductividad térmica de materiales ( $\lambda$ ) de 0.03 a 0.17  $W m^{-1} K^{-1}$ .
- Espesor de la muestra ( $L$ ) menor a 47 mm.
- Intervalo de temperatura de medición ( $T_m$ ) de 283 a 335 K.
- Incertidumbre relativa con un nivel de confianza del 95 % ( $k=2$ ) entre 0.8 a 2% [1].

Para el diseño y construcción del patrón se realizaron diversos estudios entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- Estudio del efecto de borde para obtener criterios de diseño y parámetros para la evaluación teórica del error en cualquier aparato de placa caliente [2].
- Estudio de la distribución del campo de temperatura en el plato caliente y la guarda de forma teórica y experimental [3].
- Estudio de la transferencia de calor en el espacio anular, el cual muestra que la conducción es el principal proceso de transferencia de calor [4].

- Estudio del efecto sobre el valor de la conductividad térmica como función del material que se utilice en la guarda [5].

Para medir muestras con espesores mayores a 47 mm o de materiales no aislantes como los que se emplean en la industria de la construcción (ladrillos, block de arena-cemento, adobe, etc.), es necesario construir un Aparato de Placa Caliente con Guarda que permita medir dichos materiales y si es posible con la misma incertidumbre del patrón nacional de conductividad térmica en materiales sólidos aislantes.

Éste aparato se diseñó y se está construyendo sobre la base de los estudios previos realizados para el patrón nacional CNM-PNE-16 [2, 3, 4, 5], el cual permitirá medir muestras con espesores de hasta 20 cm y diámetro de hasta 60 cm, con una incertidumbre aproximadamente del 4 %.

Se muestran los detalles de diseño obtenidos de los resultados de [2] y los avances en la construcción del aparato; la ubicación de los termómetros de medición y control, la construcción e instalación del calefactor de la placa caliente, entre otros aspectos.

## 2. PRINCIPIO DEL MÉTODO

Si un material se coloca entre dos fuentes con temperaturas  $T_A$  y  $T_B$  y  $T_A > T_B$ , entonces se establece un flujo de calor a través del material.

Si la fuente de calor es uniforme (sin gradientes) el flujo de calor fluye solo a través del material (no hay pérdida de calor) y el material es uniforme, entonces el flujo de calor es uniforme en cualquier lugar dentro del material y la conductividad térmica del material se puede calcular por la ley de Fourier:

$$\lambda = \frac{qL}{A\Delta T} \quad (2)$$

donde  $q$ , es el flujo de calor a través de la muestra,  $\lambda$  es la conductividad térmica de la muestra,  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre las caras de la muestra,  $L$  es el espesor de la muestra y  $A$  es el área de la sección transversal de la muestra.

Experimentalmente existen gradientes en las fuentes de calor y pérdidas de calor en los

alrededores, lo que origina que el flujo de calor no sea uniforme.

Así, el diseño y construcción de un APCG se deben hacer tan cerca como sea posible a las condiciones ideales. El propósito de la guarda es prevenir la pérdida radial de calor para promover un campo de temperatura uniforme a través de la muestra.

## 3. APARATO

El principio de operación del APCG es la conducción de calor en estado permanente. (Figura 1).

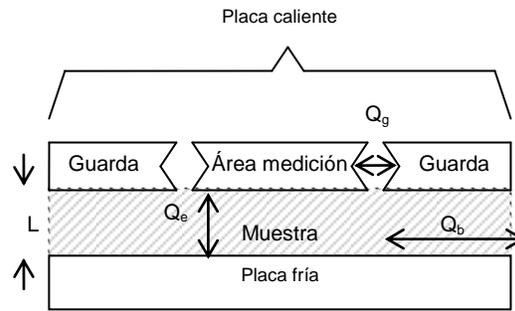


Figura 1. Esquema del aparato de placa caliente con guarda.

Cuando se establece una diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) entre la placa caliente y las frías, se genera un flujo de calor axial  $Q_e$  en la zona de medición, un flujo radial  $Q_b$  de la zona de medición a los alrededores, así como otro flujo de calor residual  $Q_g$  entre la zona de medición y la guarda.

La guarda reduce el flujo de calor radial de la superficie del área de medición a los alrededores, es decir se utiliza para mantener en un mínimo valor el flujo  $Q_g$ . En el espacio bajo la sección guarda se puede colocar un material del mismo tipo que la muestra o algún otro material aislante [5].

## 4. EFECTO DE BORDE

El principal resultado del estudio del efecto de borde [2] permite evaluar el límite de error de cualquier APCG como función de sus parámetros geométricos, sus dimensiones y las características de la muestra.

El calor proporcionado por la placa caliente  $q_i$  es el mismo calor a través de la muestra  $q_e$  si y solo si no existen pérdidas de calor a los alrededores, es decir  $q_g$  y  $q_b=0$ .

Experimentalmente se encuentra que  $q_b > 0$ . Se define el efecto de borde ( $EE$ ) como:

$$EE = \frac{(q_i - q_e)}{q_i} = \frac{q_b}{q_i} \quad (3)$$

$EE$  depende del diseño del aparato y de la diferencia de temperatura entre la zona de medición y la guarda. Aquí se presenta un análisis para conocer el error límite debido al diseño.

La ecuación de conducción de calor en dos dimensiones ( $r, z$ ) es:

$$\left(\frac{k_r}{r}\right)\left(\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)\right) + k_z\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = 0 \quad (4)$$

y su solución se puede escribir como:

$$T = V \left[ \frac{(V-U)z}{L} \right] + \left( \frac{2h}{Lk_r} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\left( \frac{V}{a_n} (-1)^n U \right) I_0(w_n r) \text{sen}(a_n z)}{w_n I_1(w_n d) + \left( \frac{h}{k_r} \right) I_0(w_n d)} \right\} \quad (5)$$

y el flujo de calor esta dado por:

$$Q_b = (\pi b^2 k_z)(V-U)/L + (4\pi b h/L) * \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^n U I_1(w_n b)}{(a_n^2) [I_1(w_n d) + (h/k_r) I_0(w_n d)]} \right\} \quad (6)$$

Si esta ecuación 6 se divide por el área y por el flujo ideal, se obtiene la Ecuación 3.

El efecto de borde se expresa con una ecuación paramétrica que permite diseñar o evaluar un instrumento dentro de ciertos límites de error. Los parámetros son  $x, L, b, d, h, k$ , donde  $x$ , es una temperatura,  $L$  es el espesor de la muestra,  $b$  es el radio de la placa caliente,  $d$  es el radio de la guarda,  $h$  es el coeficiente convectivo de calor y  $k$  es la conductividad térmica en la dirección correspondiente *radial* o *axial* ( $r, z$ ).

$$EE = EE\left(x, \frac{L}{b}, \frac{d}{b}, \frac{h}{k_z}, \frac{k_z}{k_r}\right) \quad (7)$$

donde

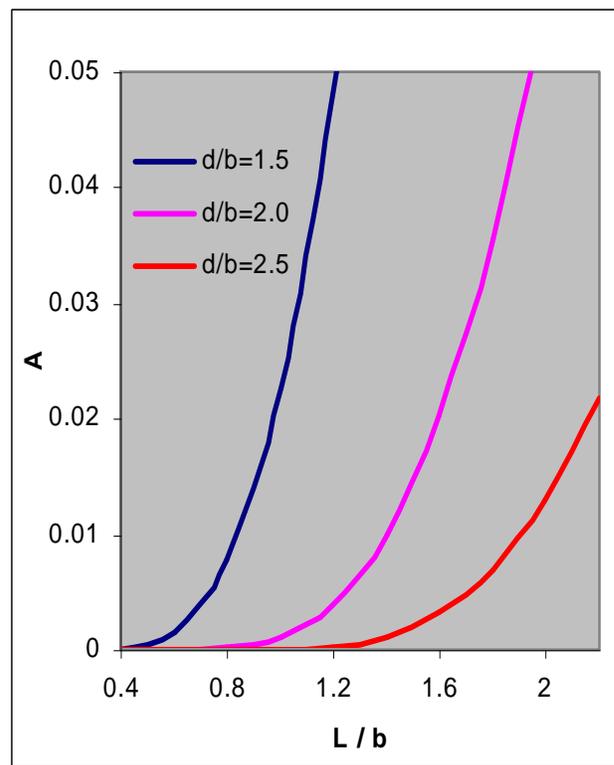
$$x = \frac{(T_H + T_C - 2T_A)}{T_H - T_C} \quad (8)$$

La cual, es función de la temperatura de la placa caliente ( $T_H$ ), de la placa fría ( $T_C$ ) y de la temperatura ambiente ( $T_A$ ).

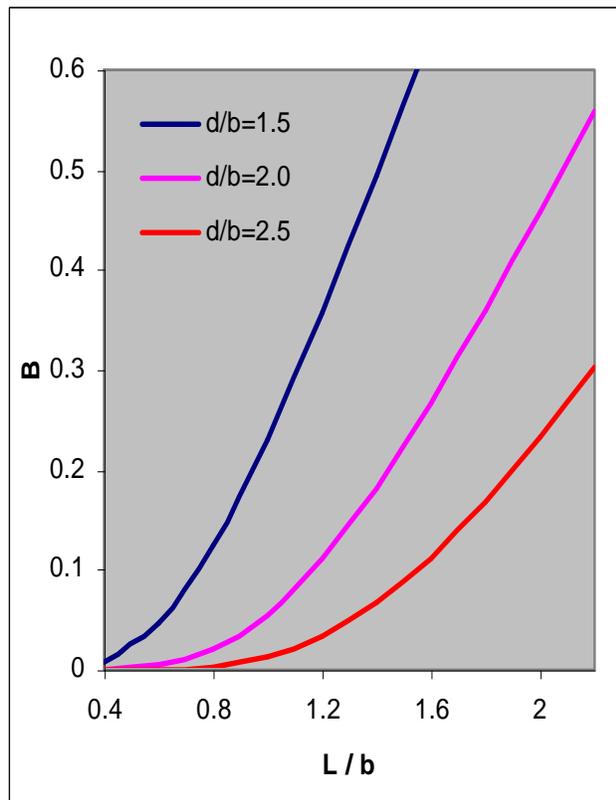
La Ecuación 7 se puede escribir como:

$$EE = A + Bx \quad (9)$$

Las Figuras 2a y 2b muestran el error en función de  $L/b$ .  $EE$  se calcula con ayuda de las figuras y las condiciones experimentales vía la Ecuación (9).



(2-a)



(2-b)

Figuras 2a y 2b. Muestran el error A y B como función de L/b.

El objetivo principal de éste estudio permite evaluar el límite de error de cualquier aparato de placa caliente con guarda en función de sus parámetros geométricos, sus dimensiones y las características de las muestras.

## 5. APCG-CENAM-610

### 5.1 Elección de los parámetros geométricos

Se eligió el valor de un parámetro; el espesor de la muestra ( $L$ ) de 150 mm. De las graficas 2a y 2b, para el valor de  $L/b$  menor o igual a uno, la ordenada es menor al 0.1 % para las curvas correspondientes a  $d/b$  mayor que 1.5. Por lo tanto si  $b$  es mayor o igual a 150 mm,  $d/b$  debe ser mayor o igual a 2, es decir  $d$  debe ser mayor o igual a 300 mm.

Para asegurar que los parámetros de éste nuevo APCG son al menos iguales a los del patrón

nacional CNM-PNE-16 que son  $d/b = 1.9$ , se elige  $b/d = 2$  y se analiza esta curva para los diferentes valores de  $L$ .

Con el valor de estos parámetros se fabrica la guarda de 610 mm de diámetro, el área de medición de 305 mm de diámetro, que permitirá medir muestras con espesor de 150 mm con error de diseño e incertidumbre iguales al patrón nacional que es menor a 2 %.

### 5.2 Ensamble del aparato

Las placas se fabricaron de una aleación de aluminio tipo 6061-T6. Las superficies en contacto con las muestras son planas dentro de 0.05 mm y se pintarán o se anodizarán de color negro mate para tener una emisividad normal mayor 0.9.

Las placas estarán montadas sobre cuatro varillas roscadas que permitan moverlas para la colocación de las muestras de forma mecánica.

El movimiento se transmitirá a partir de un motor eléctrico de pasos y una transmisión especialmente diseñada.

Las placas no tienen movimiento en dirección radial y estarán dentro de una cámara para aislar el sistema del medio ambiente.

### 5.3 Plato caliente con guarda

El plato caliente con guarda tiene 610 mm de diámetro y un espesor nominal de 19.1 mm, el diseño del plato como prototipo está basado en la información descrita en el estudio de efecto de borde (sección 4), diversos materiales se consideraron como cobre, aluminio, plata, oro, etc. El aluminio se seleccionó por su relativo bajo peso específico y su bajo costo, por su alta conductividad térmica, razonablemente baja capacidad calorífica volumétrica, un amplio intervalo de temperatura para su uso, buena resistencia a la oxidación, buena estabilidad dimensional, facilidad para su maquinado, fabricación, ensamble y reparación en caso necesario. El espesor se seleccionó para proporcionar una adecuada rigidez estructural mientras se minimiza la capacidad calorífica volumétrica.

La placa caliente (Figura 3) consiste de una placa de medición de 305 mm de diámetro y una placa guarda concéntrica coplanaria con un diámetro interior 306.2 mm. La separación entre las placas es de 0.6 mm en la orilla plana de las placas. El perfil del espacio es en forma de diamante para minimizar

el flujo de calor lateral a través del espacio y facilitar el ensamble de los platos [5].

La placa de medición y la placa guarda están unidas por medio de tres pernos de acero inoxidable, que permiten ajustarse; para fijar la placa de medición, ajustar el espacio y mantener en el mismo plano a la placa guarda. La planicidad a través del área de medición es mejor que 0.025 mm.



**Figura 3.** Placa guarda y placa de medición que forma la placa caliente.

La fuente de calor (Figura 4) de la placa de medición se coloca en un diámetro de 215 mm y es un elemento calefactor tipo listón. Éste elemento está formado por una cinta de nicromel de 0.1 mm de espesor y 2 mm de ancho, eléctricamente aislado por una cinta de poliamida, el calefactor tiene una resistencia eléctrica a temperatura ambiente de 58 ohm.



**Figura 4.** Elementos calefactores tipo listón.

Los alambres conductores de corriente eléctrica se conducen radialmente al exterior por una pequeña perforación al exterior de la placa guarda.

A diferencia del APCG-305 del patrón nacional, en la guarda se colocaron dos calefactores

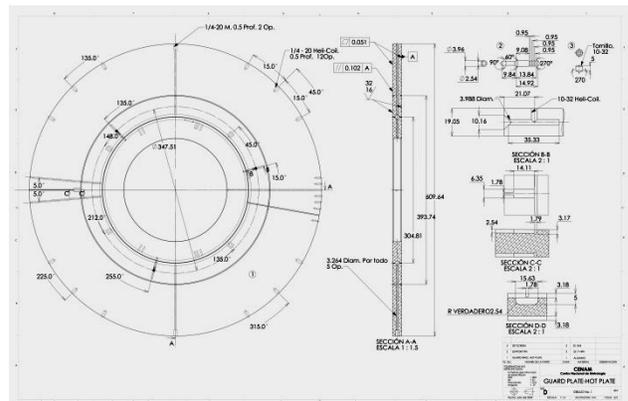
independientes a un diámetro de 395 mm. Los calefactores son del tipo tubo de 1.59 mm de diámetro. La resistencia eléctrica de cada uno de los elementos calefactores es de 70 ohm. Los calefactores se colocaron en los alojamientos en la superficie de la placa guarda. El alojamiento posteriormente se rellenó con arcilla aislante de alta temperatura. Los cables de alimentación eléctrica se conducen al exterior por una perforación radial en la placa guarda (Figura 3).

La placa caliente se diseñó para que se pueda enfriar rápidamente, mediante la circulación de un gas frío a través de la placa. Para éste propósito se encuentran dos perforaciones radiales sobre el plano medio de la placa desde el exterior.

Una fuente de corriente directa de 60 V proporcionará la corriente eléctrica al calefactor de 58 ohm de la placa de medición. La potencia en la placa se determinará al medir la caída de tensión eléctrica a través del calefactor y la correspondiente intensidad de corriente. La tensión a través del calefactor se mide directamente con un voltímetro y la intensidad de corriente se determina de la caída de tensión eléctrica a través de un resistor estándar de 0.1 ohm en serie con el calefactor.

#### 5.4. Placas frías

Las placas frías están diseñadas para que circule un fluido refrigerante por su interior. El ensamble y los detalles de construcción de una placa se presentan en la Figura 6. Cada placa tiene un espesor de 25.4 mm y consiste de una tapa de 6.4 mm de espesor que se fija con tornillos y un sellador epóxico de baja temperatura y una placa principal de 19.1 mm de espesor.



**Figura 5.** Plano de fabricación del plato caliente y los pernos de acero inoxidable.

