

## Medición de la Conductividad Térmica de Materiales Aislantes en CENAM.

**L. Lira-Cortés, E. Méndez-Lango**

*División de Termometría,  
Centro Nacional de Metrología,  
Querétaro 76000, México*

### Resumen

En el CENAM se ha establecido un patrón nacional para medir la conductividad térmica de materiales aislantes, en este artículo se presentan las características del patrón.

El patrón utiliza un método primario con un aparato de placa caliente con guarda que opera en una condición de estado permanente de flujo de calor. El límite de su intervalo de operación y la incertidumbre se establecieron de forma teórica y experimental, se muestran los resultados que se obtienen.

Para desarrollar el método primario se realizaron varios estudios y caracterizaciones al aparato de placa caliente con guarda, algunos de ellos son estudio:

- del efecto de borde para obtener criterios de diseño y parámetros para la evaluación teórica del error en cualquier aparato de placa caliente.
- de la distribución del campo de temperatura en el plato caliente y la guarda de forma teórica y experimental.
- de la transferencia de calor en el espacio anular, el cual muestra que la conducción es el principal proceso de transferencia de calor.
- del efecto sobre el valor de la conductividad térmica como función del material que se utilice en la guarda.

Finalmente se presenta la evaluación de la incertidumbre para un caso típico.

**Palabras Clave.** Conductividad térmica, aparato de placa caliente, espacio anular.

### 1. Introducción.

Un método primario de medición es aquel que tiene la mas alta calidad metrológica, cuya operación se puede describir y entender completamente, para el cual se puede escribir una declaración completa de la incertidumbre en términos de unidades del SI y cuyos resultados son aceptados sin referencia a un patrón de la cantidad a ser medida. [1].

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

$$\lambda = q L / (A \Delta T) \quad (1)$$

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 a través 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, este hecho origina que el flujo de calor no sea uniforme.

El diseño de un plato caliente con guarda se hace tan cercano como es posible a las condiciones ideales. El propósito de la guarda es prevenir la pérdida de calor y promover un campo de temperatura uniforme a través de la muestra.

**2. Aparato.**

El aparato de placa caliente con guarda es una disposición de un plato caliente colocado entre dos platos fríos que generan un gradiente de temperatura sobre las dos muestras colocadas entre los platos (figura 1). El principio de operación del aparato es la conducción de calor en estado permanente.

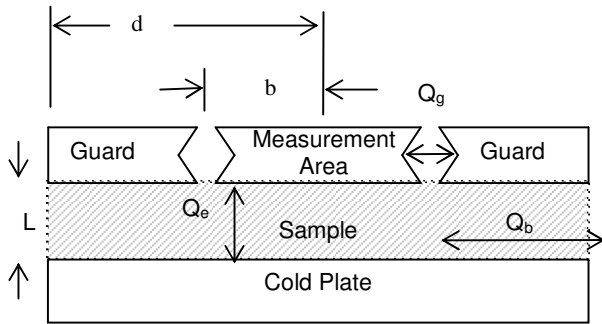


Figura 1. Esquema del aparato de placa caliente con guarda.

Cuando se establece una diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) entre los platos caliente y frío, se genera un flujo de calor  $q$  a través de la muestra. Un flujo de calor axial  $q_e$  en la zona de medición, mientras un flujo residual  $q_b$  de la zona de medición a los alrededores. Existe otro flujo de calor residual  $q_g$  entre la zona de medición y la guarda.

La muestra debe cubrir toda la sección de medición. En el espacio bajo la sección guarda se puede colocar un material del mismo tipo que la muestra o algún otro material aislante.

**3. Efecto de borde.**

El principal resultado del estudio permite evaluar el límite de error de cualquier aparato de placa caliente con guarda como función de sus parámetros geométricos, sus dimensiones y las características de la muestra.

El calor proporcionado por el plato caliente  $q_i$  es el mismo a través de la muestra  $q_e$  al plato frío. Así, esto es verdadero si y solo si no existe pérdidas de calor a los alrededores, es decir  $q_b = 0$ . Experimentalmente se encuentra que  $q_b > 0$ . Se define el efecto de borde ( $EE$ ) como:

$$EE = (q_i - q_e) / q_i = q_b / q_i \quad (2)$$

$EE$  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 para  $EE$  en dos dimensiones ( $r, z$ ) es:

$$(k_r / r) (\partial / \partial r (r \partial T / \partial r)) + k_z (\partial^2 T / \partial z^2) = 0 \quad (3)$$

su solución se puede escribir como:

$$T = V \left[ \frac{(V-U)z}{L} + \left( \frac{2h}{Lk_r} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\left( \frac{V - (-1)^n U}{a_n} \right) I_0(w_n r) \text{sen}(a_n z)}{w_n I_1(w_n d) + \left( \frac{h}{k_r} \right) I_0(w_n d)} \right\} \right] \quad (4)$$

y el flujo de calor esta dado por:

$$q_b = (\pi b^2 k_z) (V - U) / L + (4\pi b h / L) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{[V - (-1)^n U] I_1(w_n b)}{(a_n^2) [I_1(w_n d) + (h / k_r w_n) I_0(w_n d)]} \right\} \quad (5)$$

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  $X, L, b, d, h, k$

$$EE = EE(X, L/b, d/b, h / k_z, k_z / k_r), \quad (6)$$

donde

$$X = (T_H + T_C - 2 T_A) / T_H - T_C, \quad (7)$$

“Esta es una traducción libre del artículo original (sin revisión) en inglés que fue enviado para su publicación en el 10th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Tempmeko 2007, en consecuencia no puede ser citado como tal, sino como comunicación personal o privada con uno de sus autores”.

la cual, es función de la temperatura del plato caliente ( $T_H$ ), plato frío ( $T_C$ ) y la temperatura ambiente ( $T_A$ ),  $L$  es el espesor de la muestra,  $b$  es el radio del área de medición (fig. 1) y  $d$  es el radio de la guarda,  $k_z$  y  $k_r$  son las conductividades térmicas en las direcciones axial y radial y  $h$  es el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

La ecuación 6 se puede escribir como:

$$EE = A + BX \quad (8)$$

La figura 2 muestra los resultados para el error basado sobre el parámetro  $L/b$ .  $EE$  se calcula con ayuda de las figuras y las condiciones experimentales vía la ecuación (8).

**4. Campo de temperatura en el plato caliente y la guarda; teórico y experimental.**

**4.1 Teórico**

El principal éxito de este estudio es conocer el campo de temperaturas y sus promedios para seleccionar la posición donde colocar los termopares en los platos.

La solución analítica al problema se determino en el estado transitorio usando la función de Green y el método de separación de variables. Un análisis similar presentó Hann et al. [4], pero el modelo de Hann se desarrollo sin considerar la dependencia angular. La solución que se obtiene permite calcular las temperaturas promedio de las secciones del plato caliente y de la guarda

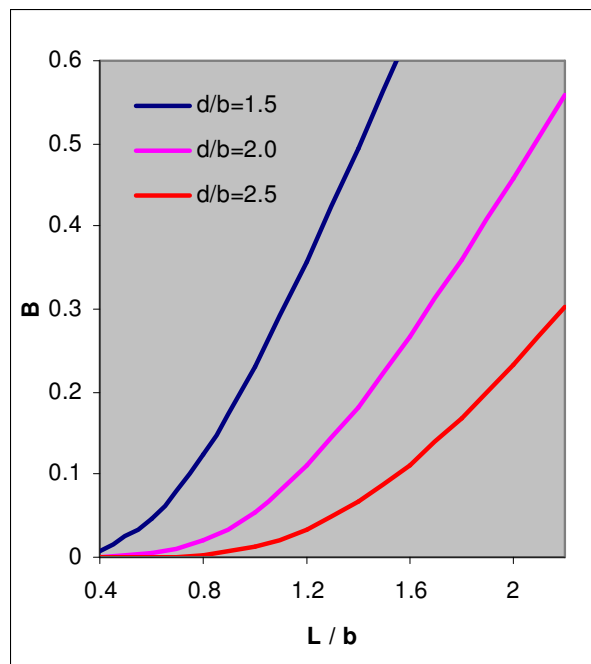
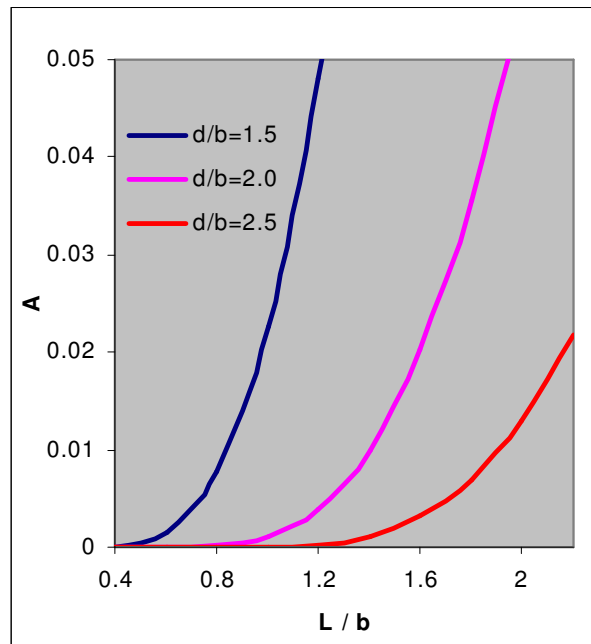


Figura 2a y 2b muestra el error A y B como función de L/b

Se presenta la formulación matemática para el plato caliente y la guarda y la solución analítica por medio de graficas para mostrar el acuerdo con los resultados experimentales.

La ecuación diferencial de conducción de calor para el estado transitorio con generación de calor dentro del plato circular (PC) o anillo circular (G) en dos dimensiones:  $r, \phi$  con propiedades físicas constantes esta dada por:

$$\frac{\partial^2 T_{hp}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{hp}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_{hp}}{\partial \phi^2} + \frac{1}{k} g(r, \phi, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_{hp}}{\partial t}$$

con  $0 \leq r < b$ ,  $0 \leq \phi \leq 2\pi$ , and  $t > 0$  (9)

$$\frac{\partial^2 T_g}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_g}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_g}{\partial \phi^2} + \frac{1}{k} g(r, \phi, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_g}{\partial t}$$

con  $b \leq r < d$ ,  $0 \leq \phi \leq 2\pi$ , and  $t > 0$  (10)

Con las condiciones iniciales y a la frontera para el plato caliente

$$\frac{\partial T_{hp}}{\partial r} + HT_{hp} = HT_a \quad \text{en} \quad r = b,$$

con  $H = h / k$  y  $t > 0$  (11)

$$T_{hp} = T_o \quad \text{para} \quad 0 \leq r \leq b, \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi,$$

y  $t = 0$  , (12)

y para la guarda

$$-\frac{\partial T_g}{\partial r} + HT_g = HT_a \quad \text{en} \quad r = b, \quad \text{con} \quad H = h / k$$

y  $t > 0$  , (13)

$$\frac{\partial T_g}{\partial r} + HT_g = HT_a \quad \text{en} \quad r = d, \quad \text{con} \quad H = h / k$$

y  $t > 0$  , (14)

$$T_g = T_o \quad \text{para} \quad b \leq r \leq d, \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi,$$

y  $t = 0$  (15)

La solución de esas ecuaciones se puede escribir en terminos de la función de Green; de funciones de Bessel y funciones periódicas para ambos casos, los resultados se muestran en la figura 3.

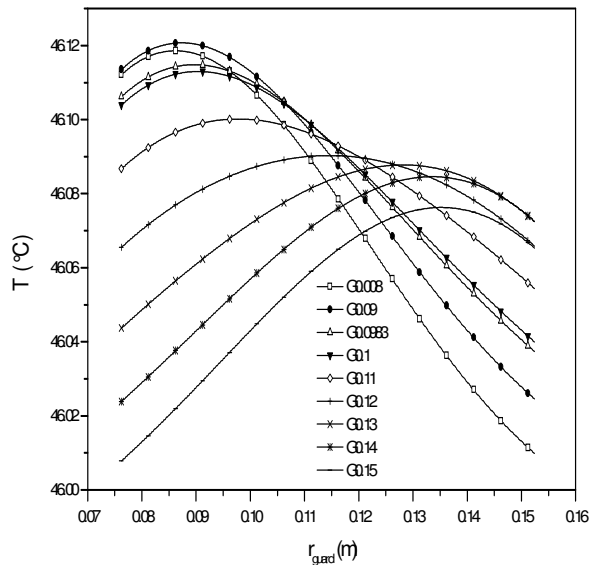
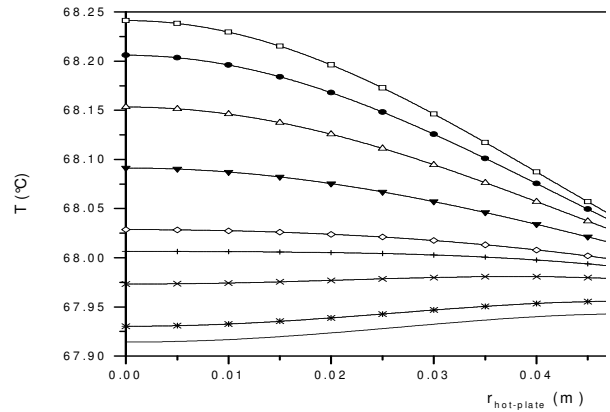


Figura 3a y 3b. Muestra los resultados teóricos para a) plato caliente b) guarda

#### 4.2 Experimental.

La validación del modelo matemático se realizó al comparar los resultados experimentales en el plato caliente y la guarda del aparato contra los resultados teóricos.

Se realizaron varios experimentos para medir el campo de temperatura cuando el calefactor en el plato esta “encendido” y con temperatura ambiente constante,  $T_a$  (29.4 °C). el calentador circular en el plato caliente esta localizado en  $r=a$  (Fig 4a). Con el producto del voltaje y la corriente se calcula la potencia de la fuente de calor (5 W).

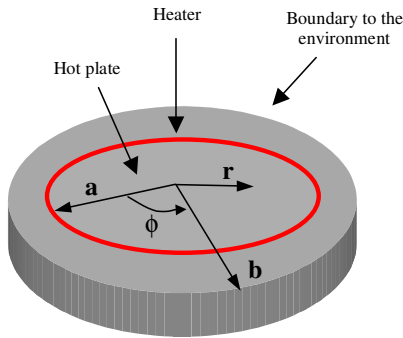


Figura 4a Modelo plato caliente

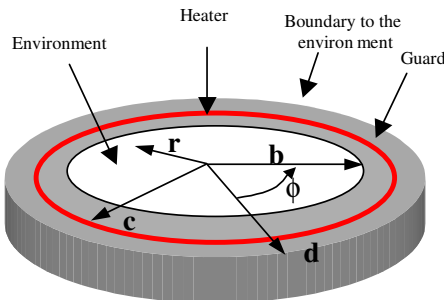


Figura 4b. Modelo Guarda

Figura 4a y 4b. Modelo para a) plato caliente b) guarda

El calentador de la guarda, esta localizado en  $r=c$  (Fig 4b). La guarda en su anillo interior ( $r=b$ ) no esta en contacto con el plato caliente. El producto del voltaje y la corriente miden la potencia de la fuente de calor (3 W) de la guarda, la temperatura ambiente durante el experimento fue de 27.2 C.

De la distribución teórica de la temperatura, un promedio se calcula como la temperatura representativa de la placa y entonces es posible seleccionar una posición en la cual los termopares

deben ser colocados sobre el plato. La figura 5 muestra los resultados teóricos y experimentales.

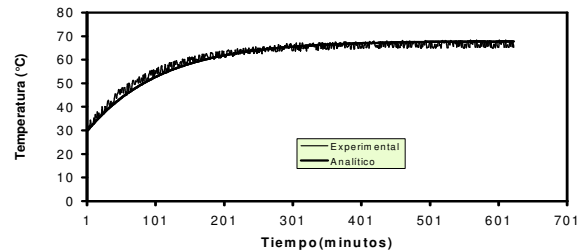
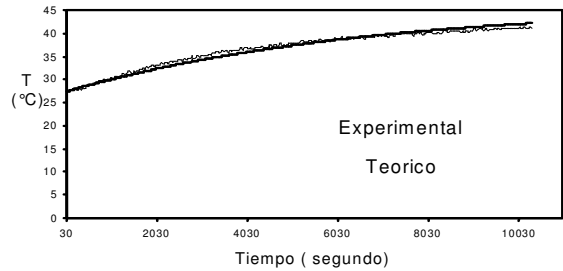


Figura 5. Comparación entre los resultados teóricos y experimentales para a) plato caliente b)guarda

**5. Transferencia de calor en el espacio anular.**

Existe un flujo de calor ( $q_g$ ) en el espacio anular entre el plato caliente y su guarda. La transferencia de calor en esta región se realiza por:

- a) Conducción a través del aire del espacio anular.
- b) Conducción a través de los pernos que fijan el plato caliente y la guarda.
- c) Conducción a través de los alambres de los termopares que cruzan el espacio anular.
- d) Conducción a través de los alambres que alimentan el calentador del plato caliente.
- e) Convección en el aire a través del espacio anular.
- f) Radiación a través del espacio anular.

**5.1 Transferencia de calor por conducción a través del aire en el espacio anular.**

La sección transversal del espacio anular tiene la forma de un diamante (Fig. 6a). Para simplificar los cálculos se supone que el flujo de calor entre la superficie DOD' y la superficie B'FB (Fig. 6 b) es el mismo, la misma situación se supone para la porción virtual OE'FE. Con las condiciones a la frontera especificadas y si se supone un flujo de calor unidimensional a través de las porciones lineales del espacio anular (AB-CD y A'B'-C'D'). Así, se obtiene el campo de temperatura para el modelo de la Figura 6c, la ecuación de conducción de calor en 2-D, en estado permanente y con propiedades constantes es:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (16)$$

Las condiciones a la frontera para el cuadrado virtual son (fig 2c):

$$\begin{aligned} x=0, 0 \leq y \leq p; T &= T_o \\ y=0, 0 \leq x \leq p; T &= T_o \\ x=p, 0 \leq y \leq p; T &= 0 \\ y=p, 0 \leq x \leq p; T &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

La solución para el campo de temperatura es:

$$T(x, y) = \frac{4T_o}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n \operatorname{sen} n\pi} \left[ \operatorname{sen} \left( \frac{n\pi x}{p} \right) \operatorname{senh} \left( \frac{n\pi(p-y)}{p} \right) + \operatorname{sen} \left( \frac{n\pi y}{p} \right) \operatorname{senh} \left( \frac{n\pi(p-x)}{p} \right) \right] \quad (18)$$

El flujo total es:

$$q_g = 2\pi bK_a \int_0^y \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L} dx \quad (19)$$

La ecuación 19 se deriva con respecto a "y" y la expresión resultante se integra, usando sus respectivos limites, para obtener:

$$q_{ea} = 16bK_g T_o \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{\operatorname{csch}(n\pi) \cosh \frac{n\pi(p-s)}{p}}{\operatorname{coth}(n\pi) \cos \frac{n\pi s}{p}} \quad (20)$$

Si las contribuciones a través de las porciones planas del espacio anular se suman, entonces el flujo total a través del espacio anular es:

$$q_g = \frac{2\pi b m K_g T_o}{w} \left[ \frac{m}{m} \frac{2R}{2R+w} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{\operatorname{csch}(n\pi) \cosh \left( \frac{n\pi w}{2R+w} \right)}{\operatorname{coth}(n\pi) \cos \left( \frac{2n\pi}{2R+w} \right)} \right] \quad (21)$$

La máxima diferencia de temperatura entre el plato caliente y la guarda es mucho menor que un grado, sin embargo para evaluar el efecto de  $q_g$ , se utilizan diferencias de temperatura de 1, 5, 10, 50 y 100 °C.

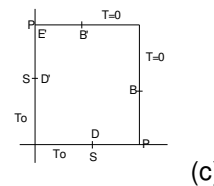
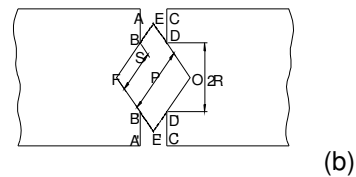
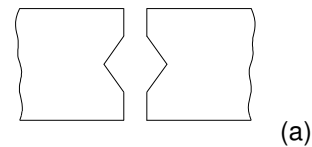


Figura 6. Diagrama de la forma del espacio anular a) forma actual b) modelo para realizar el análisis del flujo total y c) modelo del espacio anular en forma de diamante.

## 5.2 Conducción de calor a través de los pernos.

Existen tres pernos que unen el plato caliente con la guarda fabricados de acero inoxidable tipo 304 con un diámetro de  $1,59 \times 10^{-3}$  m y una longitud de  $1,6 \times 10^{-3}$  m. LA conducción de calor por los pernos es:

$$q_p = nK_p A_p \frac{T_0}{L_p}, \quad (22)$$

donde,  $T_0$  es la diferencia de temperatura entre el plato caliente y la guarda,  $n$  ( $=3$ ) es el numero de pernos,  $K_p$  es la conductividad térmica y  $A_p$  es el área de la sección transversal y  $L_p$  su longitud. Se supone que los pernos son cilíndricos y proporcionan un buen contacto térmico entre el plato caliente y la guarda, pero realmente sus extremos están redondeados de aquí el contacto térmico es débil.

## 5.3 Conducción de calor a través de los termopares

Tres termopares del tipo T (calibre 32,  $2 \times 10^{-4}$  m de diámetro y  $7,5 \times 10^{-2}$  m de longitud) Cruzan en un posición la región anular, la conducción de calor a través de ellos esta dada por

$$q_T = nK_T A_T \frac{T_0}{L_T}, \quad (23)$$

donde  $n$  es el numero de alambres,  $K_T$ ,  $A_T$  y  $L_T$  son la conductividad térmica, sección transversal y la longitud de cada alambre de termopar.

## 5.4 Conducción de calor a través de los cables de conexión del calefactor.

Los alambres de conexión del calentador del plato caliente son de cobre (calibre 14,  $1,63 \times 10^{-3}$  mm de diámetro) La conducción se calcula entonces por:

$$q_{cal} = 2K_a A_l \frac{T_m}{l}, \quad (24)$$

donde  $T_m$  es la diferencia de temperatura entre el valor de la prueba y la temperatura ambiente,  $A_l$  es el

área de la sección transversal y  $K_a$  la conductividad térmica y  $l$  es la longitud del alambre.

## 5.5 Transferencia de calor por convección a través del espacio anular.

El espacio anular se modela como una cavidad cerrada de dos dimensiones con flujo laminar. El campo de temperatura para cavidades con flujo laminar para números de Grashof ( $Gr$ ) entre  $10^3$  a  $10^6$  y números de Prandtl ( $Pr$ ) de 0.71 (aire) se han calculado [7, 8].

En esos estudios el efecto de la transferencia de calor por convección es importante si los números de Grashof  $Gr > 10^3$  y si  $Gr < 10^3$  entonces domina la transferencia de calor por conducción [7-9].

En este estudio los números de Grashof se calcularon para diferentes valores de  $T_0$  con:

$$G_r = \frac{g\beta T_0 \delta^3}{\nu^2}, \quad (25)$$

donde,  $g$  es la aceleración debida a la gravedad,  $\beta$  es el coeficiente de expansión volumétrica del fluido,  $T_0$  es la diferencia de temperatura entre el plato caliente y la guarda,  $\delta$  es la longitud característica entre las paredes y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido.

El máximo valor del numero de Grashof que se obtiene (para  $T_0 = 100$  °C) es 103.5, por lo tanto, el principal proceso de transferencia de calor para esta cavidad es por conducción y la convección es despreciable.

## 5.6 Transferencia de calor por radiación a través del espacio anular.

Si el espacio anular se considera una cavidad gris y difusa, el intercambio por radiación entre las superficies se puede aproximar por [10]:

$$q_r = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)}, \quad (26)$$

donde  $q_r$  es el flujo de calor por intercambio radiativo entre las superficies,  $A_1$  es el área de la superficie interior en  $m^2$ ,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzman  $T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas de las superficies interior y exterior y  $r_1$  y  $r_2$  son los radios interior y exterior respectivamente.

**5.7 Resultados.**

Los cálculos de los términos se hicieron con las dimensiones de Aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG) del CENAM. Se supone que la diferencia de temperatura a través del espacio anular es uniforme. Entonces bajo diferentes condiciones de diferencia de temperatura las contribuciones se calculan. Los resultados muestran que la principal transferencia de calor en el espacio anular es la conducción de calor en el aire y los otros efectos se pueden considerar despreciables.

Para los cálculos se supone una diferencia de temperatura de 100 K sin embargo, en condiciones normales de operación el máximo valor de la diferencia de temperaturas para algunos instrumentos es de un grado, en el caso del aparato del CENAM opera con una máxima diferencia de 0.05 K. En las tablas I y II y la figura 7 se muestran los resultados.

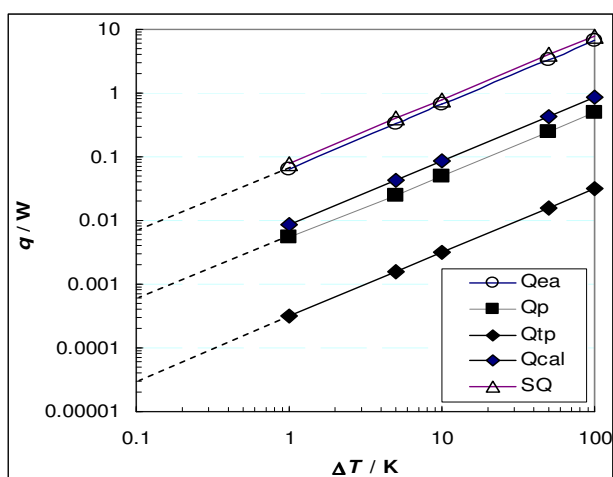


Figura 7. Contribución de cada componente al flujo total como función del gradiente en el espacio anular,  $Q_{ea}$  representa el flujo de calor por conducción en el aire del espacio anular,  $Q_p$  la contribución de los pernos,  $Q_{tp}$  la contribución de los termopares,  $Q_{cal}$  la contribución de los alambres del calentador y la SQ contribución total.

**Tabla I.** Transferencia de calor en el espacio anular.

| $\Delta T$<br>(K) | $q_{ea}$<br>(W) | $q_p$ (W) | $q_{tp}$ (W) | $q_{cal}$ (W) | $\Sigma q$ (W) |
|-------------------|-----------------|-----------|--------------|---------------|----------------|
| 1                 | 0.065           | 0.00547   | 0.000321     | 0.00865       | 0.079441       |
| 5                 | 0.327           | 0.0252    | 0.0016       | 0.043         | 0.3968         |

|     |       |        |         |        |         |
|-----|-------|--------|---------|--------|---------|
| 10  | 0.654 | 0.0505 | 0.00321 | 0.0865 | 0.79421 |
| 50  | 3.27  | 0.252  | 0.016   | 0.43   | 3.968   |
| 100 | 6.54  | 0.505  | 0.032   | 0.86   | 7.937   |

**Tabla II.** Contribuciones a la transferencia de calor en el espacio anular

| $\Delta T$ (K) | $q_{ea}$ | $q_p$ | $q_{tp}$ | $q_{cal}$ |
|----------------|----------|-------|----------|-----------|
| 1              | 81.8     | 6.9   | 0.4      | 10.9      |
| 5              | 82.4     | 6.4   | 0.4      | 10.8      |
| 10             | 82.3     | 6.4   | 0.4      | 10.9      |
| 50             | 82.4     | 6.4   | 0.4      | 10.8      |
| 100            | 82.4     | 6.4   | 0.4      | 10.8      |

**6. Efecto sobre el valor de la conductividad térmica como función del material utilizado en la guarda.**

El efecto sobre un valor medido de conductividad térmica se determino cuando tres tipos diferentes de material se usan para la guarda. Resultados (Tabla III) muestran que los valores medidos no se ven afectados cuando se usan diferentes materiales en la guarda.

Si por el cambio del material de la guarda se observara un cambio significativo en el valor de la conductividad térmica, entonces se requiere cuantificar las fugas térmicas para evaluar el error debido a este efecto y en una situación extrema para validar el uso de la ley de Fourier para describir el experimento.

**7. Evaluación de la incertidumbre para un caso típico.**

El análisis de incertidumbre se realizó a partir del modelo para medir la conductividad térmica:

$$\lambda = \frac{q L}{A \Delta T} \tag{27}$$

donde  $L$  es el espesor del material,  $q$  es el flujo de calor efectivo a través de la muestra,  $A$  es el área de la sección trasversal de la muestra bajo prueba y  $\Delta T$

“Esta es una traducción libre del artículo original (sin revisión) en inglés que fue enviado para su publicación en el 10th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Tempmeko 2007, en consecuencia no puede ser citado como tal, sino como comunicación personal o privada con uno de sus autores”.



es la diferencia de temperaturas entre el plato caliente y el frío.

La incertidumbre se calcula con:

$$\frac{U_\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{U_q}{q}\right)^2 + \left(\frac{U_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{U_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta T}}{\Delta T}\right)^2} \quad (28)$$

### 7.1. Estimación de la incertidumbre en la potencia disipada $U_q$ .

La potencia efectiva disipada esta dada por:

$$q_e = q - q_g - q_b \quad (29)$$

donde  $q_e$  es el flujo de calor efectivo a través de la muestra,  $q$  es la potencia disipada en el área de medición,  $q_g$  es el flujo de calor en el espacio anular y  $q_b$  es el flujo de calor entre la muestra y los alrededores.

Estimaciones de  $q_g$  se discuten en la sección 5. El protocolo de medición usado en el CENAM establece que la diferencia de temperatura entre el plato caliente y la guarda es menor que 0.01 °C, entonces una contribución despreciable (menor al 0.01% del valor de  $q$ ) se debe a  $q_g$ .

El flujo de calor  $q_b$  depende de varios factores, pero principalmente de las dimensiones del instrumento y de la muestra a medir. Estudios de límites de diseño conduce a trabajar con espesores  $L \leq 47$  mm para mantener este flujo en un máximo de 0.01 % de la potencia total disipada.

El flujo de calor efectivo es aproximadamente igual a la potencia disipada en el área del plato de medición,  $q = VI$ , así su incertidumbre esta dada por:

$$\frac{U_q}{q} = \sqrt{\left(\frac{U_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{U_I}{I}\right)^2} \quad (30)$$

La Tabla IV muestra unos valores típicos.

### 7.2. Incertidumbre debida al espesor y al área de la sección transversal de la muestra

Las mediciones del espesor se hicieron con un micrómetro calibrado y un vernier con resolución de 0.001 mm y 0.01mm respectivamente.

El área de la sección transversal del plato caliente se midió en la división de dimensional del CENAM. De este valor se calcula el área nominal  $A$  y el valor real de  $A(t)$  se calcula considerando su expansión térmica.

LA Tabla V muestra la incertidumbre estimada debido al espesor y al área de la sección transversal.

### 7.3 Estimación de la incertidumbre en la temperatura $U_{\Delta T}$ .

La incertidumbre en la diferencia de temperatura por ejemplo en 17.52 °C, se observo ser de 0.1 °C y 0.08 °C para la incertidumbre del tipo A y del tipo B respectivamente, la incertidumbre combinada es 0.13 °C (absoluta) or  $7.3 \times 10^{-3}$  °C/°C (relativa).

### 7.4 Estimación de la incertidumbre combinada de la conductividad térmica

Tabla VI resume la incertidumbre combinada para un ejemplo dado. La contribución más significativa a la incertidumbre es aquella debida a la diferencia de temperatura y al espesor de la muestra.

Este caso representa el máximo valor de incertidumbre y es similar a aquellos observados después de hacer sobre 100 pruebas de conductividad térmica en diferentes temperaturas y materiales. El valor máximo observado es 0.8 % así, la incertidumbre expandida en el valor de la conductividad térmica ( $k=2$ ) es 1.6 %.

**Tabla III.** Resultados para la muestra de poliestireno con diferentes muestras de material en la guarda.

| Guard material | Thickness (mm) | Test Temperature (°C) | Thermal conductivity (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) | Uncertainty (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) |
|----------------|----------------|-----------------------|---|--|
| Polystyrene    | 23.5           | 22.02                 | 0.03268   | 0.00011  |
| Ceramic fiber  | 23.5           | 22.06                 | 0.03248   | 0.00011  |
| Glass fiber    | 23.5           | 21.99                 | 0.03253   | 0.00008  |

**Tabla IV.** Potencia disipada por el calentador del plato caliente con una estimación de su incertidumbre.

| VARIABLE      | VALOR    | TIPO A                 | TIPO B                 | SUMA                   | RELATIVA               |
|---------------|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| VOLTAJE (V)   | 10,0264  | 5,3 X 10 <sup>-5</sup> | 1,2 X 10 <sup>-5</sup> | 5,4 X 10 <sup>-5</sup> | 5,4 X 10 <sup>-6</sup> |
| CORRIENTE (A) | 0,105322 | 2,2 X 10 <sup>-6</sup> | 2,7 X 10 <sup>-6</sup> | 3,5 X 10 <sup>-6</sup> | 3,3 X 10 <sup>-5</sup> |
| POTENCIA (W)  | 1,05599  | -                      | -                      | -                      | 3,4 X 10 <sup>-5</sup> |

**Tabla V.** Estimación de la incertidumbre debida al espesor y la sección transversal.

| VARIABLE               | VALOR    | TIPO A               | TIPO B               | SUMA                   | RELATIVA               |
|------------------------|----------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| ESPESOR (M)            | 0,02271  | 5 X 10 <sup>-5</sup> | 1 X 10 <sup>-5</sup> | 5,1X10 <sup>-5</sup>   | 2,2 X 10 <sup>-3</sup> |
| AREA (M <sup>2</sup> ) | 0,021448 | -                    | -                    | 6,5 X 10 <sup>-7</sup> | 3,0 X 10 <sup>-5</sup> |

**Tabla VI.** Incertidumbre para la muestra de material aislante.

| VARIABLE                  | VALOR                                    | RELATIVA               |
|---------------------------|--|------------------------|
| POTENCIA                  | 1,05599 W                                | 3,4 X 10 <sup>-5</sup> |
| ESPESOR                   | 0,02271 M                                | 2,2 X 10 <sup>-3</sup> |
| ÁREA                      | 0,021448 MM <sup>2</sup>                 | 3,0 X 10 <sup>-5</sup> |
| DIFERENCIA DE TEMPERATURA | 17,52 °C                                 | 7,3 X 10 <sup>-3</sup> |
| CONDUCTIVIDAD TÉRMICA     | 0,0319 W M <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> | 7,6 X 10 <sup>-3</sup> |

## 8. Referencias.

1. Quinn T.J., Metrologia, **34**: 61-65 (1997).
2. ASTM, "ASTM-C-177-97. **04.06**: Standard ANSI/ASTM C- 177-97, Philadelphia, pp. 1-18, (1997).
3. J. Xamán, Master degree thesis, Cenidet; Cuernavaca, México, (1999).
4. M. Hahn, H. Robinson, D. Flynn, *In Proceedings of Symposium on thermal and cryogenic insulating materials*, Philadelphia: 167-192 (1973).
- 5 N. Ozisik, Heat Conduction, John Wiley and Sons, Inc. (1980).
6. L. Lira, *in Memorias de Congreso de ANIM*, Chihuahua: 101-105 (1997).
7. L. Lira, *in Memorias de V Congreso de la AGM*, Guanajuato: 31-35 (1997).

8. R. Salazar, Master degree thesis Genidet, Cuernavaca, Mor.
9. L. Lira , E. Méndez-Lango, *In Proceedings of Simposio de Metrología, Cenam, 2006*, México.
10. L. Lira, *In Proceedings of Simposio de Metrología, Cenam, 2006*, México.