

# *Medición de la conductividad térmica de materiales aislantes en el CENAM*

*Dr. Leonel Lira Cortés*  
*Dr. Edgar Mendez Lango*

*ÁREA DE METROLOGÍA ELÉCTRICA*  
*DIVISIÓN DE TERMOMETRÍA*

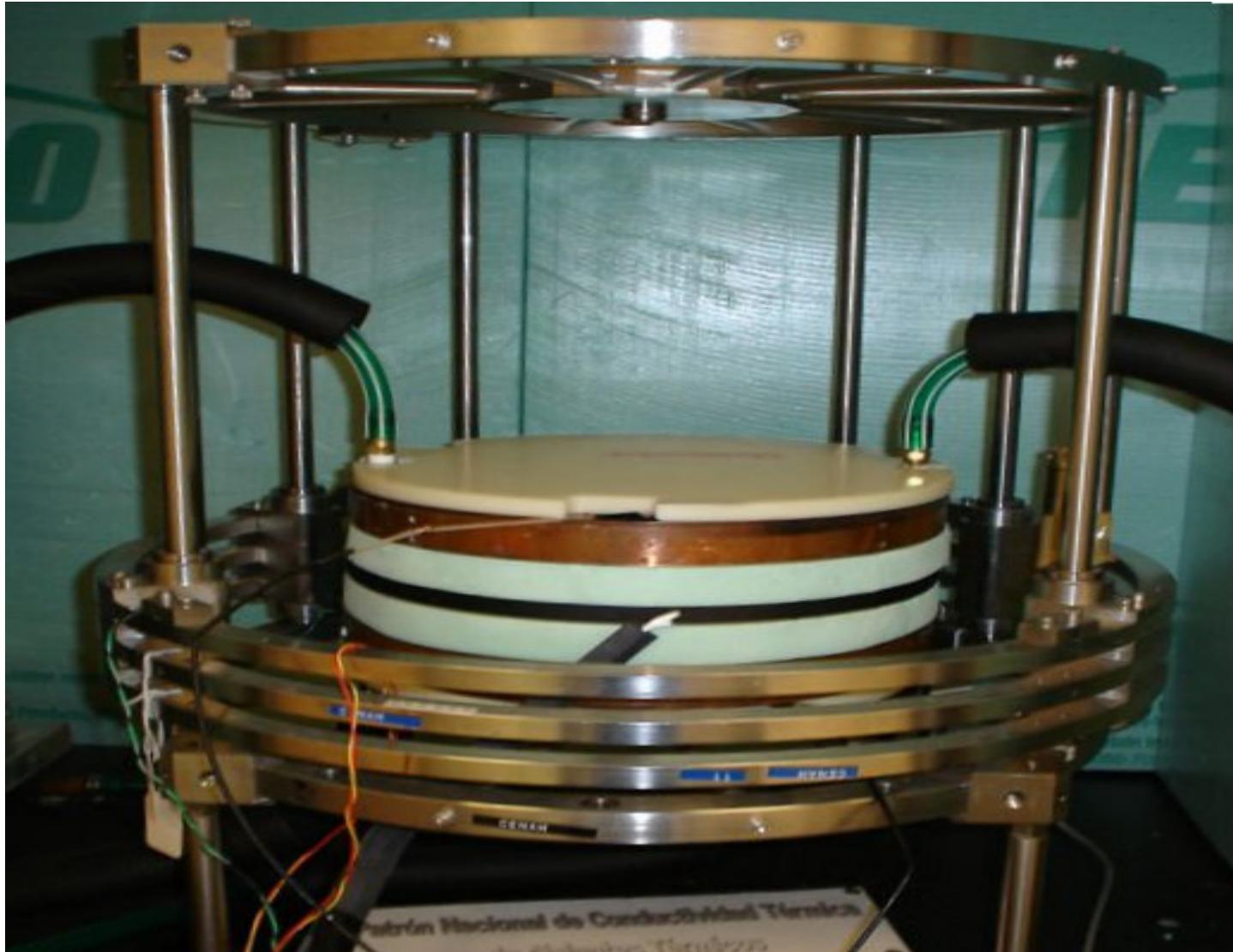
## *CONTENIDO*

- *INTRODUCCION*
- *ECUACION DE CONDUCCION DE CALOR (Ley de Fourier)*
  - (1) Efecto de Borde*
  - (2) Distribución del campo de Temperatura*
  - (3) Transferencia de calor en el espacio anular*
  - (4) Efecto del material de la guarda*
  - (5) Evaluación de la incertidumbre*
- *CONCLUSIONES*

## *INTRODUCCION*

- CENAM Desarrollo un patrón primario para la medición de la conductividad térmica de materiales aislantes usando un aparato de placa caliente (APCG)
- En México existe la necesidad de conocer el valor de la conductividad térmica de materiales que se usan como aislantes en edificaciones y sistemas térmicos.

## *INTRODUCCION (APCG)*



*La ecuación para la conductividad térmica es:*

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

*Donde:*

*q es el flujo de calor dentro de la muestra (W).*

*L es el espesor de la muestra (m).*

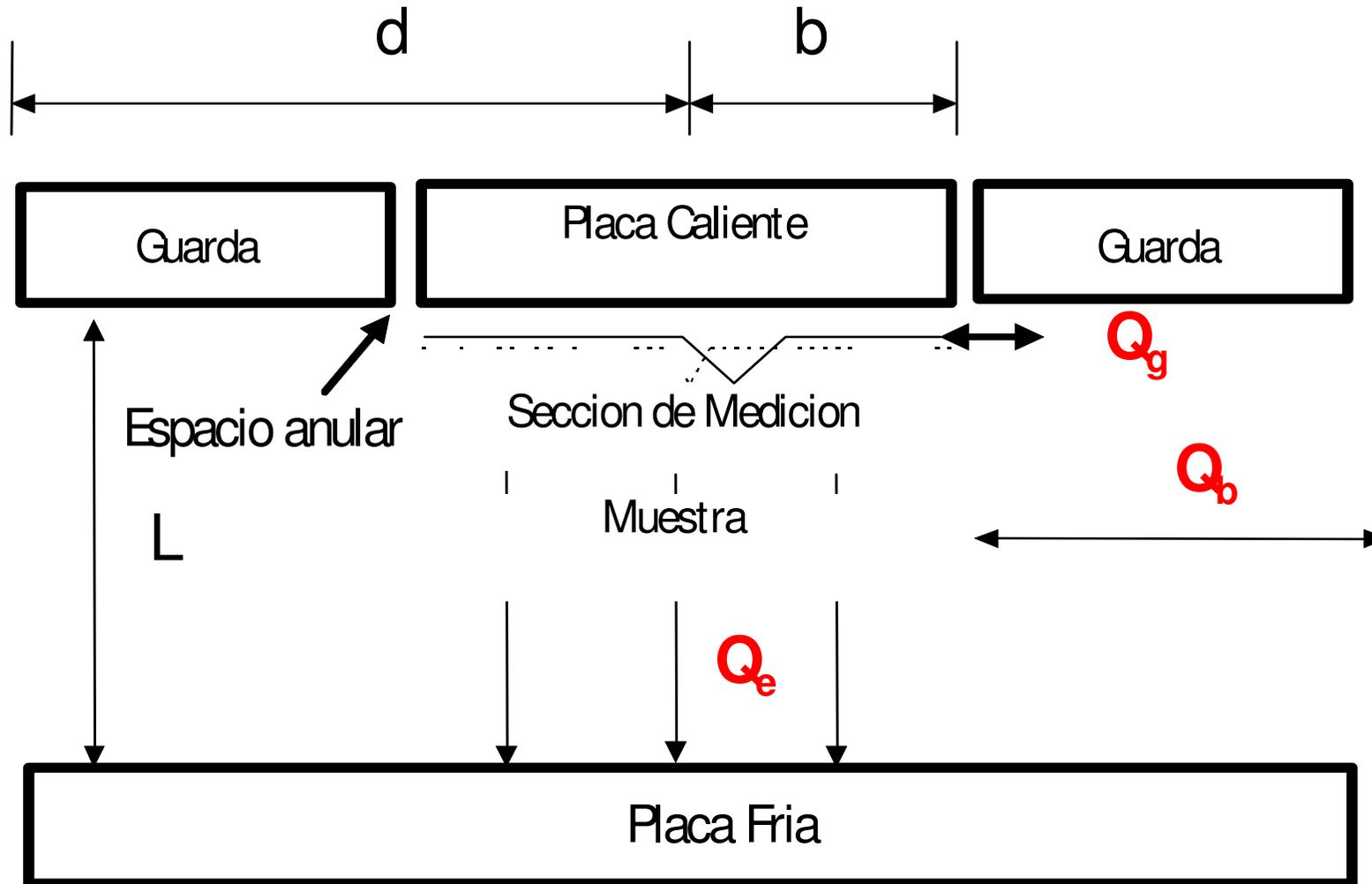
*A es la sección transversal de la muestra (m<sup>2</sup>).*

*$\Delta T$  es la diferencia de temperatura en la muestra (K) y*

*$\lambda$  es la conductividad térmica de la muestra (W/m K)*

# ECUACION DE CONDUCCION DE CALOR

## *Flujos de calor en el APCG*



## (1) El Efecto de Borde

*El efecto de borde se define como:*

$$EB = (Q_i - Q_e) / Q_i = Q_b / Q_i$$

*La ecuación a resolver para evaluar el efecto de borde es:*

$$k_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$

*Las condiciones a la frontera son:*

$$z = 0 \quad 0 \leq r \leq d \quad T = V = T_C - T_A$$

$$z = L \quad 0 \leq r \leq d \quad T = U = T_F - T_A$$

$$0 \leq z \leq L \quad r = d \quad 0 = k_r dT/dr + hT$$

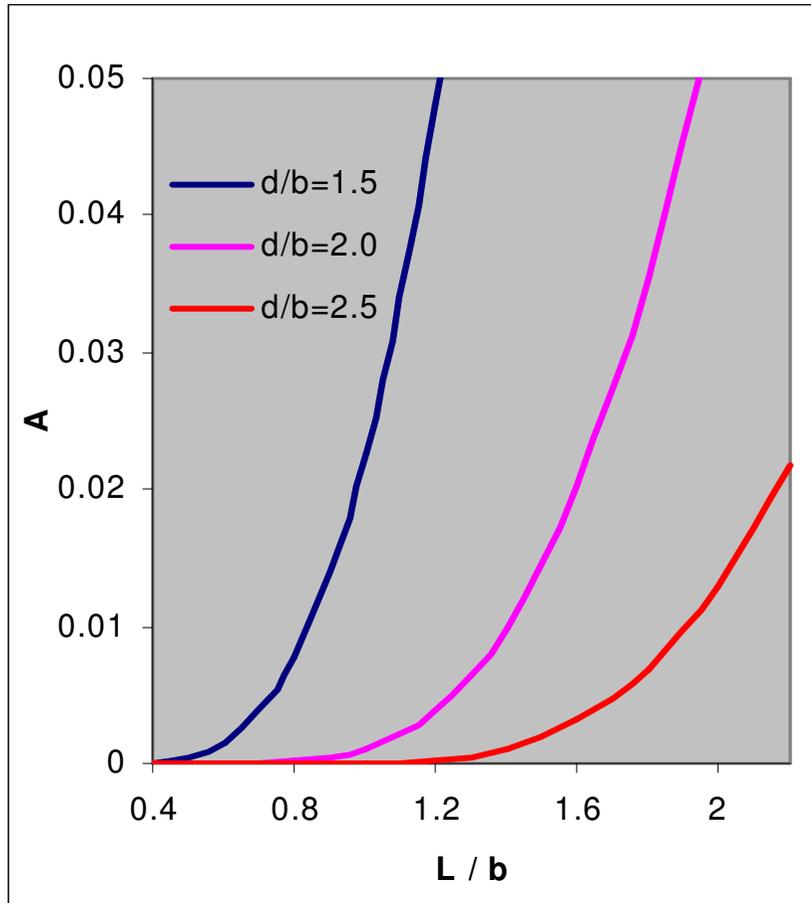
## *(1) El efecto de borde*

*Valores de los parámetros para este caso:*

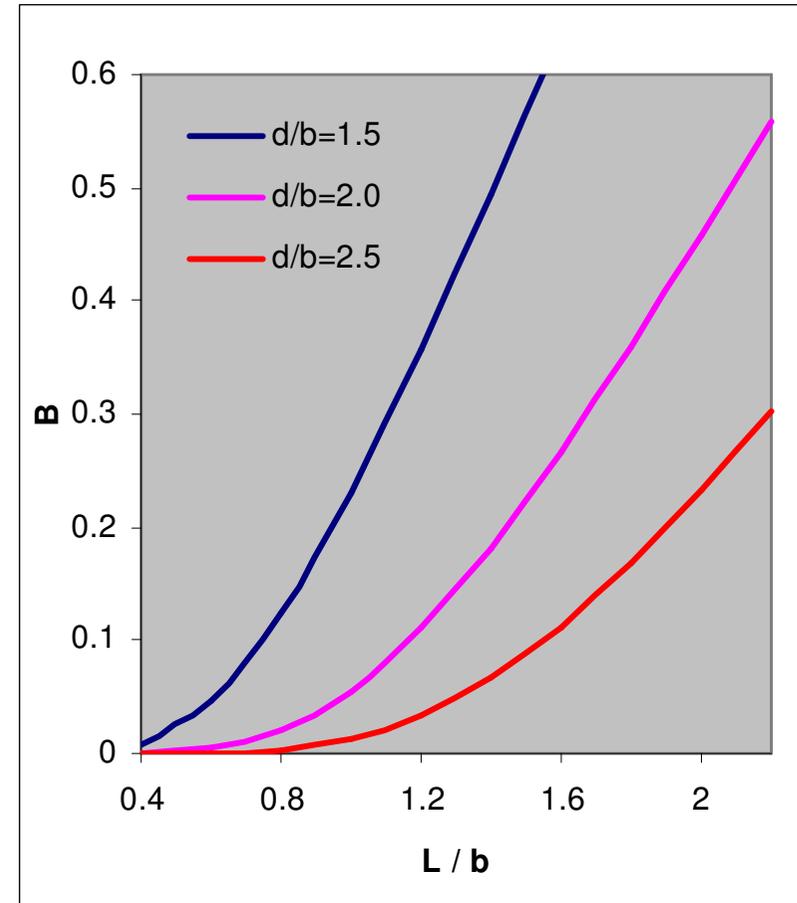
- *Temperatura ambiente: 18°C*
- *Temperatura de la placa caliente: 28°C*
- *Temperatura de la placa fría: 20°C*
- *Radio de la sección de medición (b): 76mm*
- *Conductividad térmica del poliestireno en la dirección z (K<sub>z</sub>): 0,029 W/mK*
- *Conductividad térmica del poliestireno en la dirección r (K<sub>r</sub>): 0,029 W/mK*

$$EB = A + B X$$

$$h / K_z = 196.5 \text{ m}^{-1}$$

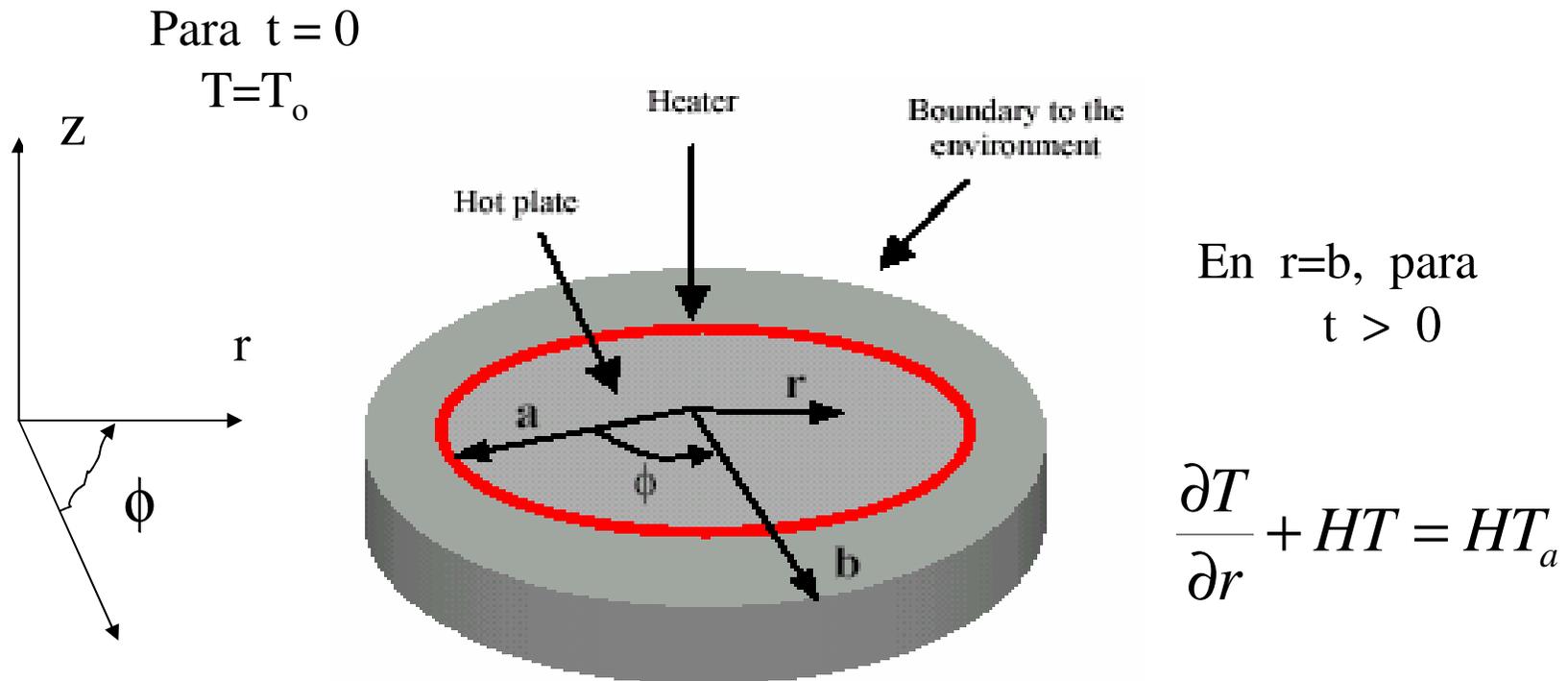


**Figura. A** Contribución del efecto de borde como función de L/b, el espesor y el radio del área de medición.



**Figura. B** Contribución del efecto de borde como función de L/b, el espesor y el radio del área de medición.

## (2) Distribucion de Temperatura



*Figura 1. Modelo fisisco para la placa caliente*

## *(2) Distribucion de temperatura*

*La ecuación a resolver para la placa caliente es:*

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

*las condiciones a la frontera:*

$$\frac{\partial T}{\partial r} + HT = HT_a \quad \text{en } r = b, H = h/k, \text{ for } t > 0$$

*y la condición inicial es:*

$$T = T_o \quad \text{en } 0 \leq r \leq b, 0 \leq \phi \leq 2\pi, \text{ con } t = 0$$

## (2) *Distribucion de temperatura*

*La solución es:*

$$T(r, \phi, t) = T_a + \left[ \frac{T_o - T_a}{\pi} \right] \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{e^{-\alpha \beta_m^2 t}}{N(\beta_m)} R_{\nu}(\beta_m, r) *$$

$$* \int_{r'=0}^b \int_{\phi'=0}^{2\pi} r' R_{\nu}(\beta_m, r') \text{Cos } \nu(\phi - \phi') d\phi' dr' +$$

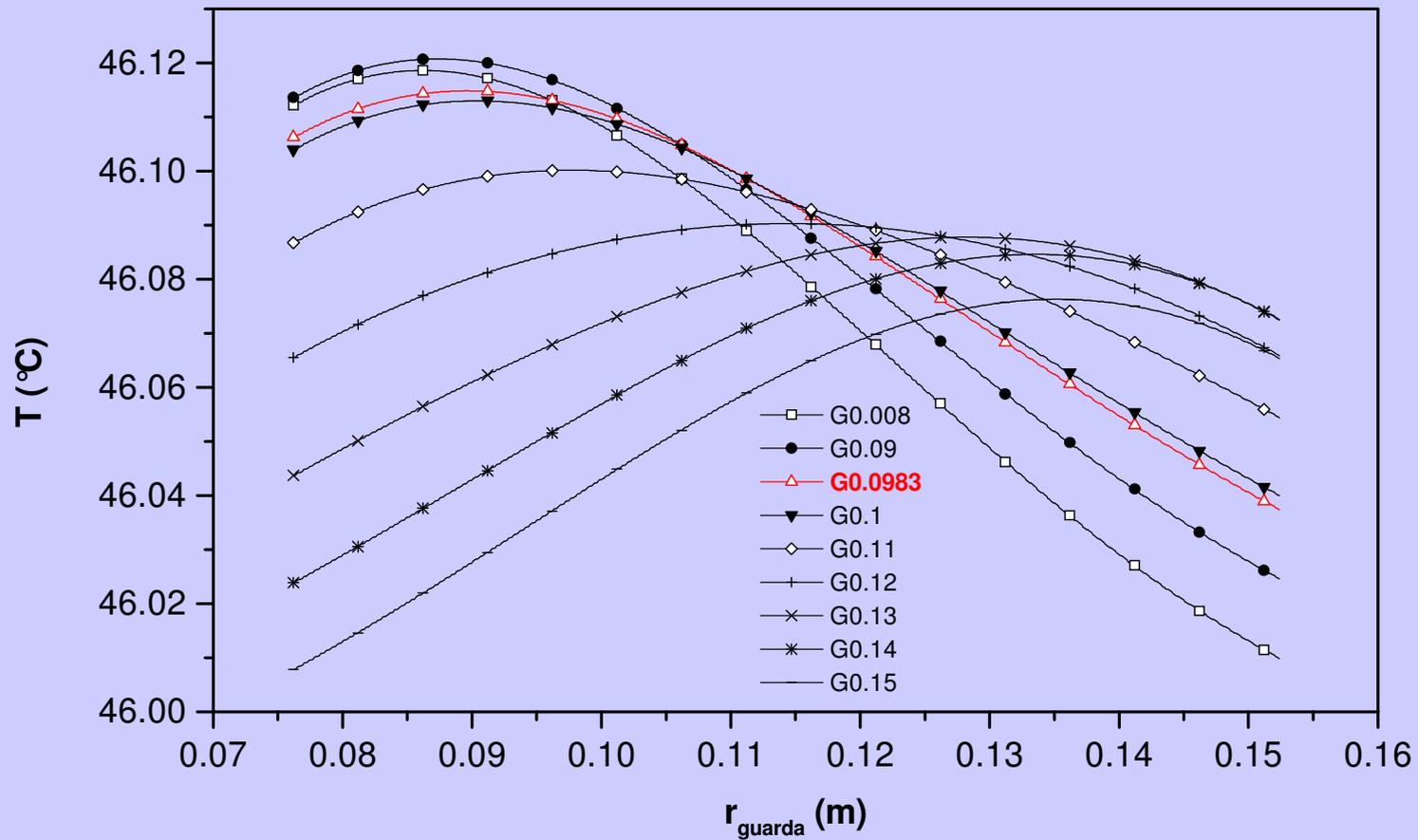
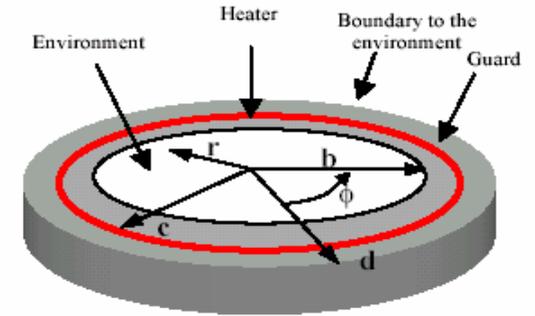
$$+ \frac{\alpha}{K} \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{e^{-\alpha \beta_m^2 t}}{N(\beta_m)} R_{\nu}(\beta_m, r) *$$

$$* \int_{r'=0}^b \int_{\phi'=0}^{2\pi} \int_{\tau=0}^t g(r', \phi', \tau) e^{\alpha \beta_m^2 \tau} *$$

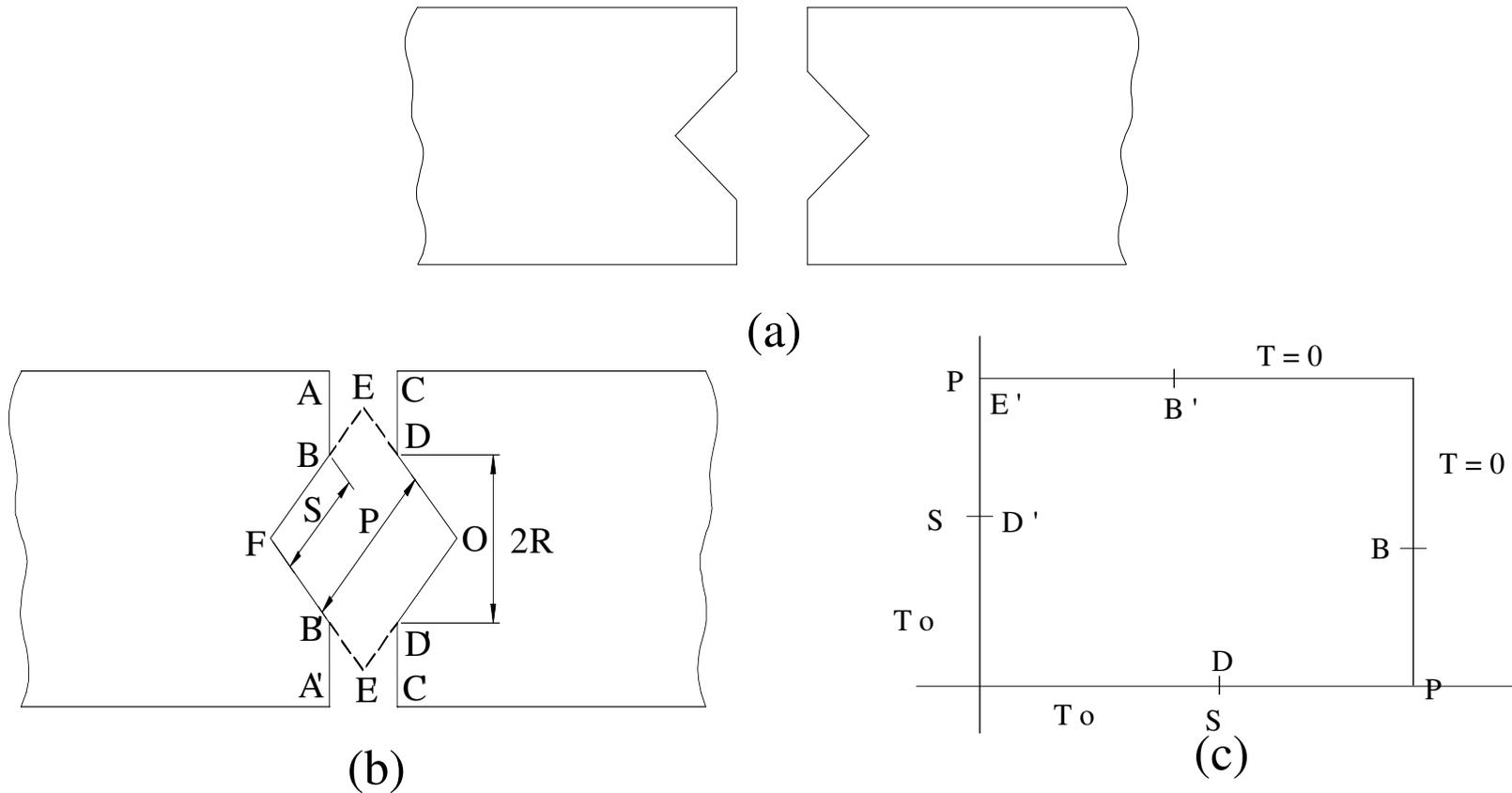
$$* r' R_{\nu}(\beta_m, r') \text{Cos } \nu(\phi - \phi') d\tau d\phi' dr'$$



# (2) Distribucion de temperatura (guarda)



### (3) *Trasferencia de calor en el espacio anular*



**Figura.** Diagrama del espacio anular a) forma real b) Modelo para análisis de flujo c) Modelo en forma de diamante para el espacio anular.

### *(3) Tráansferencia de calor en el espacio anular*

*La ecuación para determinar la temperatura en el espacio anular es:*

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

*Las condiciones a la frontera son:*

$$x=0, 0 \leq y \leq p; T= T_0$$

$$y=0, 0 \leq x \leq p; T= T_0$$

$$x=p, 0 \leq y \leq p; T= 0$$

$$y=p, 0 \leq x \leq p; T= 0$$

### *(3) Transferencia de calor en el espacio anular*

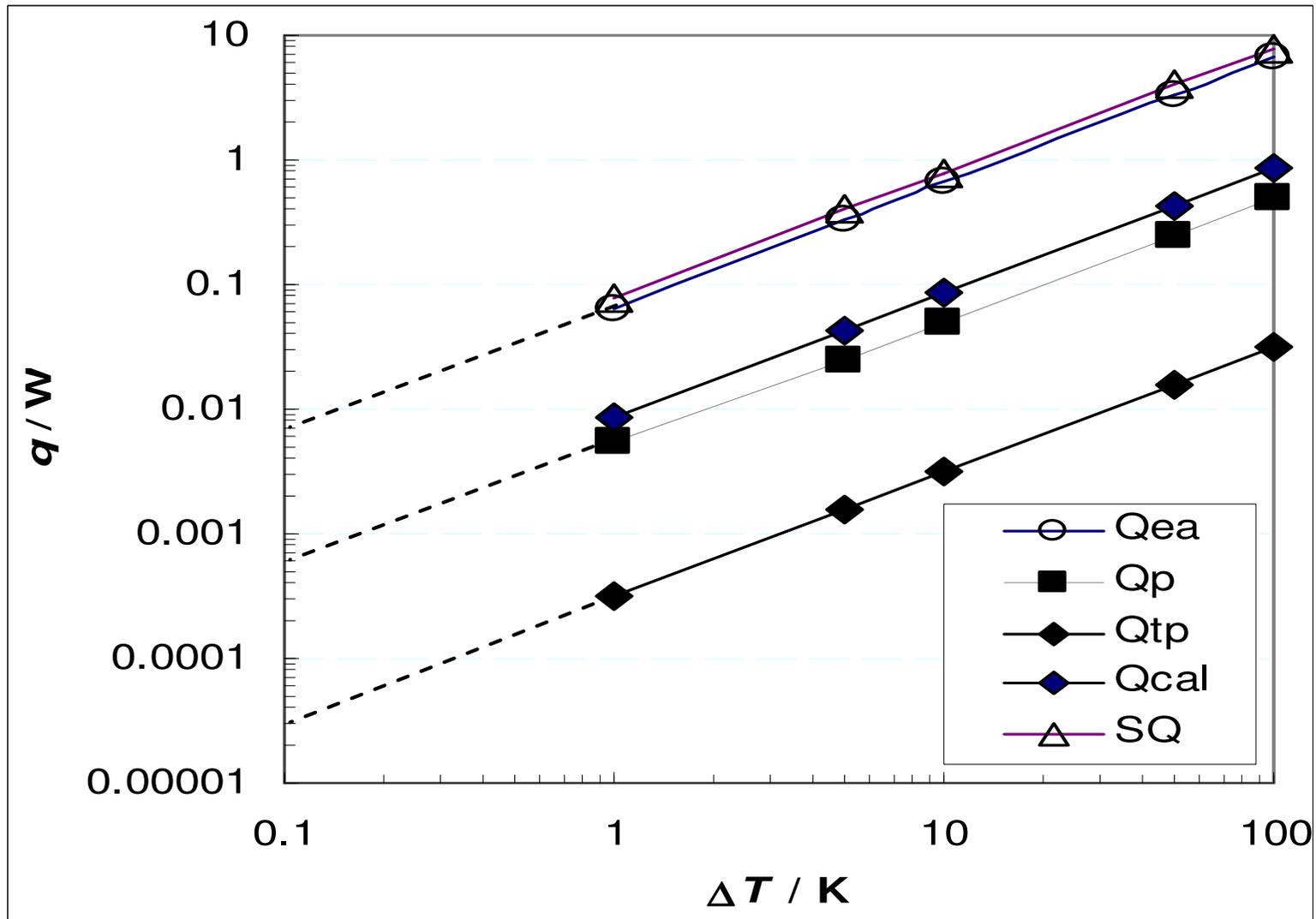
*Contribuciones a la transferencia de calor en el espacio anular:*

- *a) Transferencia de calor por conducción a través de:*
- *Espacio anular*
- *Pernos que fijan la guarda*
- *Alambres del calefactor*
- *Alambres de los termopares.*

### *(3) Transferencia de calor en el espacio anular (Resultados)*

$\Delta T$ (K)	$Q_g$ (W)	$Q_p$ (W)	$Q_t$ (W)	$Q_l$	$Q_{total}$
<b>1</b>	$6,50 \times 10^{-2}$	$5,47 \times 10^{-3}$	$3,21 \times 10^{-4}$	$8,65 \times 10^{-3}$	$7,94 \times 10^{-2}$
<b>5</b>	$3,27 \times 10^{-1}$	$2,52 \times 10^{-2}$	$1,60 \times 10^{-3}$	$4,30 \times 10^{-2}$	$3,96 \times 10^{-1}$
<b>10</b>	$6,54 \times 10^{-1}$	$5,05 \times 10^{-2}$	$3,21 \times 10^{-3}$	$8,65 \times 10^{-2}$	$7,94 \times 10^{-1}$
<b>50</b>	3,27	$2,52 \times 10^{-1}$	$1,60 \times 10^{-2}$	$4,30 \times 10^{-1}$	3,96
<b>100</b>	6,54	$5,05 \times 10^{-1}$	$3,20 \times 10^{-2}$	$8,6 \times 10^{-1}$	7,93

### *(3) Transferencia de calor en el espacio anular (Resultados)*



## *(4) Efecto del material de la guarda*

*Para determinar la influencia en el valor del valor de la conductividad térmica de un material se puso en el espacio de la guarda tres diferentes materiales aislantes y se mide bajo las mismas condiciones.*

<b>Muestra</b>	<b>Material guarda</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Conductividad térmica (W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)</b>	<b>Incertidumbre (W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)</b>
<b>Poliestireno</b>	<b>Poliestireno</b>	23.5	22.02	0.03268	0.00011
<b>Poliestireno</b>	<b>Fibra cerámica</b>	23.5	22.06	0.03248	0.00011
<b>Poliestireno</b>	<b>Fibra de vidrio</b>	23.5	21.99	0.03253	0.00008

## *(5) Evaluación de la Incertidumbre*

- *A partir del modelo para medir la conductividad térmica:*

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

- *La incertidumbre se calcula con:*
- 

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

## *(5) Evaluación de la Incertidumbre*

### *• Evaluación de la incertidumbre para la conductividad térmica*

Variable	Valor	Incertidumbre relativa
Potencia disipada	1,05599 W	$3,4 \times 10^{-5}$
Espesor	0,02271 m	$2,2 \times 10^{-3}$
Área	$0,021448 \text{ mm}^2$	$3,0 \times 10^{-5}$
Diferencia de temperatura	17,52 °C	$7,3 \times 10^{-3}$
Conductividad térmica	$0,0319 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$7,6 \times 10^{-3}$



## *CONCLUSIONES*

- El método utiliza un aparato de placa caliente con guarda
- Este método se caracterizó vía varias pruebas y estudios.
- Los resultados del efecto de borde proporcionan valores de límites de diseño a partir de parámetros dimensionales
- . El resultado de la distribución de temperatura permite encontrar la mejor posición para los termopares.
- El estudio del espacio anular permite conocer la pérdida de calor por flujo radial como función de la diferencia de temperatura.

## *CONCLUSIONES*

- El estudio del material de la guarda indica que el método y el modelo experimental adoptado para calcular la conductividad térmica por medio de la ecuación de Fourier es adecuado.
- La evaluación de la incertidumbre muestra que las contribuciones más significativas corresponden a la diferencia de temperatura y el espesor de la muestra.
- La incertidumbre se declara en términos del SI.
- El patrón nacional de conductividad térmica es un método primario.

Gracias por su atención

