

CNEA-NT 12/85

04.05.22

REPUBLICA ARGENTINA  
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
Dependiente de la Presidencia de la Nación  
GERENCIA DE DESARROLLO

CURVAS DE AJUSTE PARA LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL  
POLIESTIRENO EXPANDIDO EN FUNCION DEL ESPESOR DE MUESTRA.  
MEDICION DEL CALOR ESPECIFICO

C.C. Edgardo MOYANO y Lic. Enrique PASQUALINI

Buenos Aires

1985

CURVAS DE AJUSTE PARA LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL  
POLIESTIRENO EXPANDIDO EN FUNCION DEL ESPESOR DE  
MUESTRA. MEDICION DEL CALOR ESPECIFICO.

C.C. Edgardo Moyano, Lic. Enrique Pasqualini.

Dpto. Materiales. Comision Nacional de Energía Atómica.  
Av. del Libertador 8250  
1429- Buenos Aires.  
Argentina.

RESUMEN

Al medir la conductividad térmica del poliestireno expandido (PSE) por el método estacionario de placa caliente, surge una dependencia de dicho valor con el espesor de muestra utilizado. Esta dependencia se puede explicar teniendo en cuenta mecanismos de calor por radiación en el seno del material.

El trabajo realizado está enfocado al tratamiento de las curvas experimentales de conductividad térmica en función del espesor de muestra para materiales de baja densidad por métodos de ajuste computacionales.

Estos ajustes son realizados en base a parametrizar una expresión teórica obtenida previamente al contemplar los distintos mecanismos puestos en juego en la transferencia de calor: conducción y radiación exclusivamente.

Los parámetros utilizados son la emisividad y la absorción del material.

Los valores obtenidos de estos parámetros muestran en el caso del PSE que son menores a los del material en volumen, que pueden deberse a variaciones en la estructura normal del polímero.

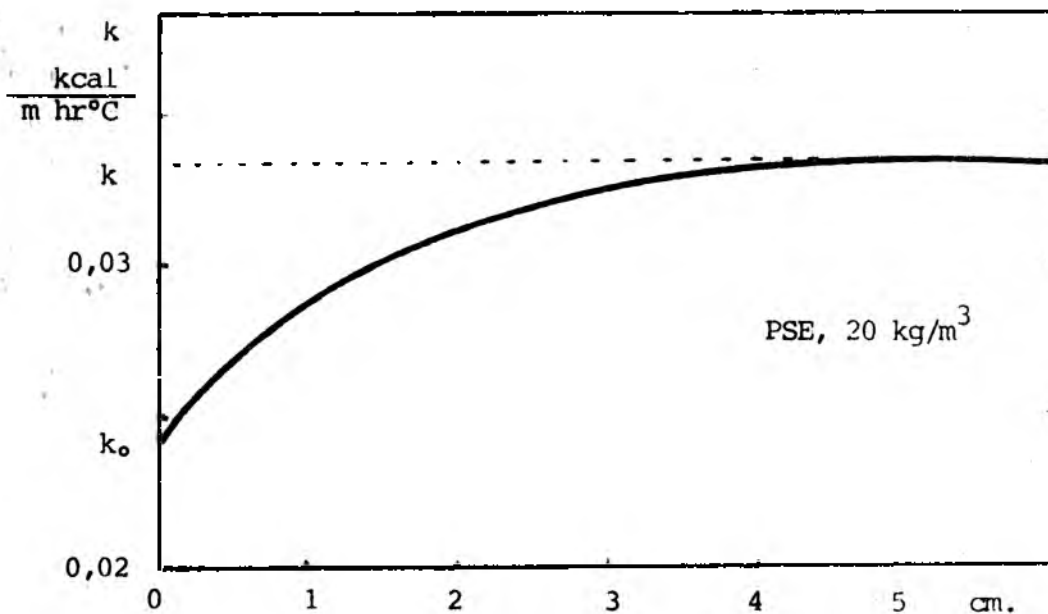
La medición del calor específico es a los fines de confirmar estas variaciones de estructura observándose que los valores obtenidos son un 50% menores de los del material en volumen.

## CURVAS DE AJUSTE PARA LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO EN FUNCIÓN DEL ESPESOR DE MUESTRA Y MEDICIÓN DEL CALOR ESPECÍFICO.

### INTRODUCCION

En un trabajo experimental realizado por Cammerer en 1975 (1) se midió la variación de la conductividad térmica de materiales aislantes de baja densidad con respecto al espesor de muestra por el método estacionario de placa caliente.

Estas curvas han permitido explicar teóricamente la razón de dicha dependencia a través de flujos de calor debido a radiación (2).



Conductividad térmica de materiales de baja densidad Vs. el espesor de muestra (Método estacionario de medición). P.ej.:PSE,  $20 \text{ kg/m}^3$

De las curvas teóricas surgen dos parámetros característicos del material frente a estas propiedades : absorción de la radiación y emisividad volumétrica (3), que son los más importantes a ajustar en base a los datos experimentales.

### EXPRESION TEORICA DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA

Haciendo un análisis de los mecanismos de transferencia de calor involucrados en PSE (3) obtenemos una expresión de la conductividad térmica cuando se utiliza el método estacionario de placa caliente:

$$k = k_g + c\rho + 4\sigma T_o^3 \frac{E}{\alpha} \frac{\rho_s}{\rho} (1 - e^{-\alpha \frac{\rho}{\rho_s} d})$$

donde hemos incluido los fenómenos de reflexiones internas en las paredes de las celdas, en el parámetro  $\alpha$ .

$k_g$  = conductividad térmica del gas en las celdas.

$\rho_s$  = densidad del poliestireno

$\rho$  = densidad del poliestireno expandido

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman

$T_o$  = temperatura de la placa fría en el ensayo ( $^{\circ}K$ )

$E$  = Emisividad equivalente

$\alpha$  = coeficiente de atenuación del material sólido.

$d$  = espesor de muestra.

$$c = \frac{2}{3} \frac{k_s}{\rho_s} \left[ 1 - \frac{k_g}{2k_s} \left( 1 + \frac{k_g}{2k_s} \right) \right]$$

donde:  $k_s$  = conductividad térmica del poliestireno.

Para realizar un ajuste de las curvas teóricas con las experimentales representamos esta expresión de la siguiente forma:

$$y = A - B e^{-Cx}$$

donde:

$y = k$

$x = d$

$$A = k_g + c\rho + 4\sigma T_o^3 \frac{E}{\alpha} \frac{\rho_s}{\rho}$$

$$B = 4\sigma T_o^3 \frac{E}{\alpha} \frac{\rho_s}{\rho}$$

$$C = \alpha \frac{P}{\rho_s}$$

De los valores obtenidos por medio del ajuste de B y C, podemos hallar  $\alpha$  y E conociendo  $\sigma$ ,  $T_0$ ,  $\rho_s$  y  $\rho$ .

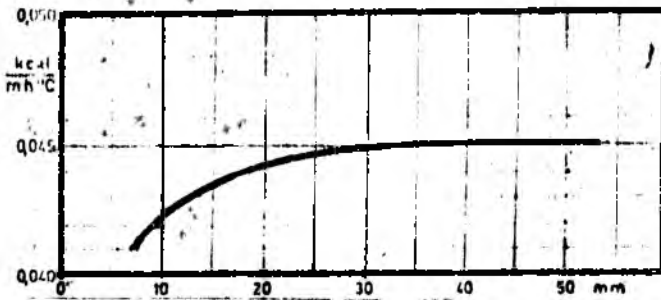
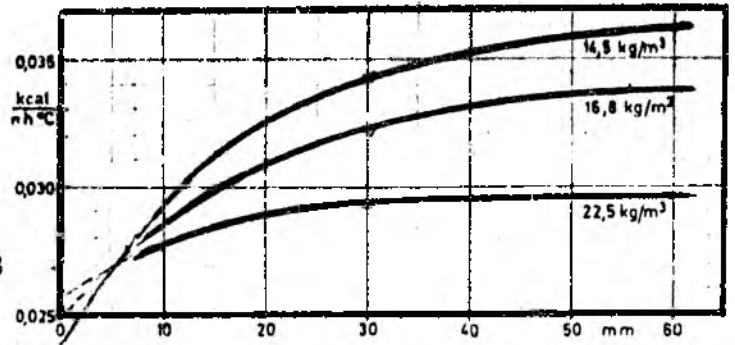
Con el valor de A, podemos utilizar como incógnita, ya sea el valor de c, o bien el de  $k_0$ , o hacer un nuevo ajuste por cuadrados mínimos.

Las siguientes curvas son las medidas por Cammerer y ajustadas paramétrica-mente.

### CONDUCTIVIDAD TERMICA EN FUN- CION DEL ESPESOR DE MUESTRA.

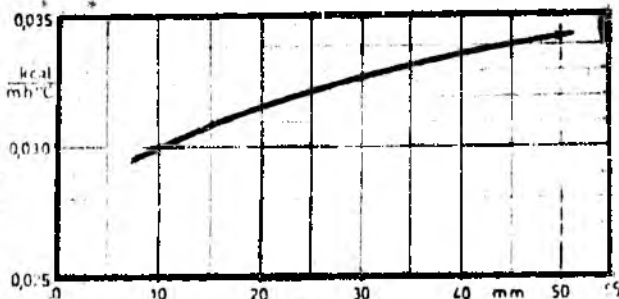
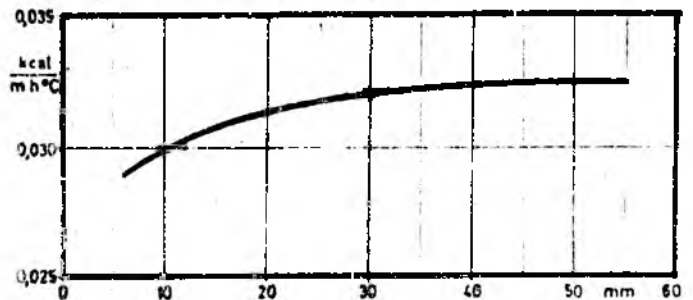
#### MATERIAL Y DENSIDAD.

Poliestireno expandido  
14,5; 16,8 y 22,5 kg/m<sup>3</sup>



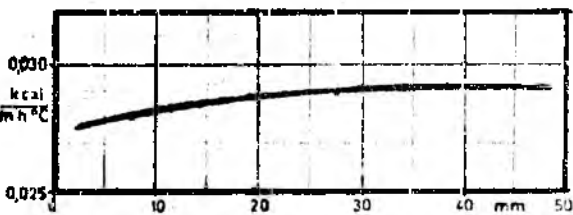
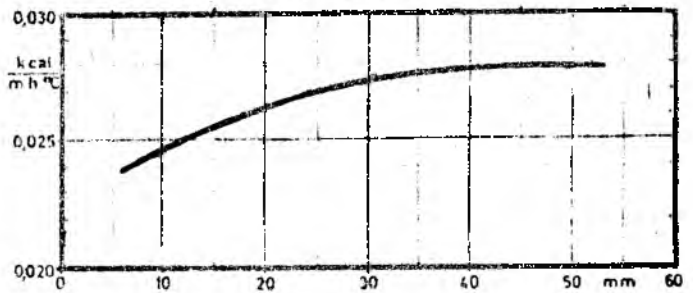
Vidrio celular, 127 kg/m<sup>3</sup>

PSE extrudado, 29 kg/m<sup>3</sup>



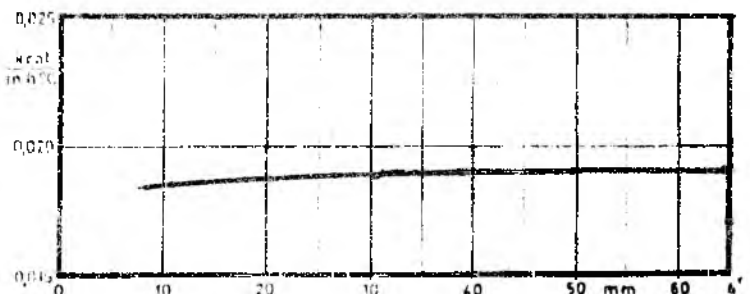
Corcho, 96 kg/m<sup>3</sup>

Resina fenólica, 44 kg/m<sup>3</sup>



Espuma de aminoplasto, 10 kg/m<sup>3</sup>

PUR, 39 kg/m<sup>3</sup>



ALGORITMO USADO PARA AJUSTAR LOS DATOS EXPERIMENTALES

La expresión (2) genera otra más general

$$X_{i+1} = X_i - \eta_i V_i f_i \quad (3)$$

que da origen a distintos modelos iterativos de acuerdo al tipo de matriz  $V_{(m \times n)}$  que se elija; el factor  $\eta_i$  se selecciona de modo tal que para alguna norma conveniente, resulte

$$\|f_{i+1}\|_K \leq \|f_i\|_K, \text{ siendo } f \text{ el vector de residuos calculado en } X_{i+1}.$$

Si  $V_i = J_i^{-1}$  y  $\eta_i = 1$  se obtiene el método de Taylor, también llamado de Newton.

Si  $V_i = J_i^T$ , dado que  $-\text{grad } S(X) = -2 \cdot J^T(X) \cdot f(X)$  se obtiene el método de descenso rápido o del gradiente.

En el presente trabajo se ha seguido la orientación dada por Levenberg (4), con las modificaciones de Marquardt (5), (7), empleando

$$V_i = (J_i^T \cdot J_i + \lambda_i \cdot I)^{-1} \cdot J_i^T$$

La variación de  $\lambda_i$  permite moverse desde el método de Newton hasta el método del gradiente, ya que  $\lambda_i = 0$  origina  $V_i = J_i^{-1}$ . Por el contrario si  $\lambda_i$  aumenta  $V_i \rightarrow \frac{1}{\lambda_i} J_i^T$  y el algoritmo tiende a la dirección del gradiente.

Se acostumbra llamar paso a la diferencia  $X_{i+1} - X_i$ . Es de esperar que cada paso se acerque más al mínimo de  $S$ , pero como ese mínimo no se conoce, resulta imposible testear directamente la condición. De ahí que se considere mejorada la situación (acercamiento en el espacio  $S$  no en el  $X$ ) si  $S_{i+1} < S_i$ .

Por ello se dice que el paso  $i$ -ésimo es aceptable si  $S_{i+1} < S_i$  y el método iterativo es aceptable si todos los pasos son aceptables.

En general los métodos iterativos que se emplean en problemas de minimización siguen el esquema

$$X_{i+1} = X_i - \eta V_i f_i \text{ y el siguiente procedimiento (6):}$$

- (i) ingresar un vector inicial  $X_1$
- (ii) determinar un vector  $V_i f_i$  en la dirección del paso  $i$ -ésimo propuesto.
- (iii) determinar  $\eta_i$  de modo que  $S_{i+1} < S_i$ .

(iv) Testear si la precisión alcanzada es la requerida.

Los métodos existentes difieren en la forma de elegir la dirección del paso  $V_i f$  y la medida del paso  $\eta_i$ , en el esquema  $X_{i+1} = X_i - \eta_i V_i f_i$ . Sea la  $i$ -ésima iteración de un proceso de minimización. Sea  $V_i f = v$ . Supóngase que se parte de  $X_i$  a lo largo de una dirección y generándose

$$X(\eta) = X_i + \eta v. \text{ Se interpreta } S \text{ como función de } \eta \text{ y se la llama} \\ \xi(\eta) = S(X(\eta)) = S(X_i + \eta v)$$

$$\frac{d\xi}{d\eta} \Big|_v = \left( \frac{\delta S}{\delta X} \right)^T \cdot \left( \frac{\delta X}{\delta \eta} \right) = \left( \frac{\delta S}{\delta X} \right)^T \cdot v$$

Sea  $p(X)$  el gradiente de  $S(X)$ ,  $p_i$  su valor en  $X_i$

$$\xi'_{iv} = \left( \frac{d\xi}{d\eta} \right)_{\eta=0} = p_i^T \cdot v$$

Si  $\xi'_{iv}$  es negativo, entonces  $S(X)$  decrece al apartarse de  $X_i$  en la dirección  $v$ . De modo que un  $\eta > 0$  suficientemente pequeño hace que el paso  $\eta v$  sea aceptable.

Se demuestra que una dirección es aceptable si y sólo si existe una matriz DEFINIDA POSITIVA  $V$  tal que esa dirección es expresable como

$$v = -V \cdot p_i \quad (p_i \text{ es el gradiente de } S \text{ en } X_i).$$

El método de Marquardt se basa en la idea que cualquiera sea la matriz  $A$ , y siendo  $P$  cualquier matriz DEFINIDA POSITIVA, resulta  $A + \lambda P$  DEFINIDA POSITIVA para  $\lambda$  suficientemente grande.

Marquardt propone el uso de una matriz diagonal  $P$ , siendo  $P$  la diagonal de  $A$ . Dado que los sistemas a resolver tienen matriz SIMETRICA DEFINIDA POSITIVA, se ha empleado el método de Cholesky para su solución.

El modelo elegido para el presente problema físico es

$$x^{(1)} = x^{(2)} \cdot e^{-x^{(3)} \cdot t}$$

correspondiendo  $x^{(1)}$ ,  $x^{(2)}$  y  $x^{(3)}$  a los parámetros  $A$ ,  $B$  y  $C$  respectivamente. Razones físicas obligaron a imponer restricciones en el rango de los mismos, tarea que se implementó desde una subrutina destinada al cálculo de los residuos dados por el modelo propuesto.

Los cálculos se efectuaron con una computadora IBM/370-158 del Centro de Cálculo Científico de la Comisión Nacional de Energía Atómica.

## NOMENCLATURA UTILIZADA

$x_1 = (x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)})$  valores iniciales de los parámetros.

$J$  : matriz jacobiana de la función vectorial  $S$  de residuos.  $S$  es la función a minimizar.

$D$  : Matriz formada con la diagonal de  $J^T J$ .

$\lambda$  : factor que variará de modo que  $(J^T J + \lambda D)$  resulte definida positiva.

$\Sigma f_i^2$  : suma de cuadrados de residuos generados a partir del modelo no lineal.

$\Sigma f_i^{*2}$  : suma de cuadrados de residuos generados a partir del modelo linealizado.

eps: precisión requerida para detener la iteración.

RESULTADOS NUMERICOS:

MATERIAL Y DENSIDAD

| T     | Y      | $\bar{Y}$ |                                                                                 |
|-------|--------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 0.01  | 0.0292 | 0.0292    | PSE, 14,5 kg/m <sup>3</sup>                                                     |
| 0.015 | 0.0312 | 0.0311    |                                                                                 |
| 0.020 | 0.0326 | 0.0324    |                                                                                 |
| 0.025 | 0.0336 | 0.0335    |                                                                                 |
| 0.030 | 0.0342 | 0.0342    |                                                                                 |
| 0.035 | 0.0347 | 0.0348    |                                                                                 |
| 0.040 | 0.0352 | 0.0352    |                                                                                 |
| 0.045 | 0.0356 | 0.0355    |                                                                                 |
| 0.050 | 0.0358 | 0.0358    |                                                                                 |
| 0.055 | 0.0361 | 0.0360    |                                                                                 |
| 0.060 | 0.0362 | 0.0361    | $x^{(1)} = 0.03653$<br>$x^{(2)} = 0.01299$<br>$x^{(3)} = 0.58475 \cdot 10^2$    |
| <hr/> |        |           |                                                                                 |
| 0.010 | 0.0285 | 0.0285    | PSE, 16,8 kg/m <sup>3</sup>                                                     |
| 0.015 | 0.0298 | 0.0298    |                                                                                 |
| 0.020 | 0.0308 | 0.0308    |                                                                                 |
| 0.025 | 0.0316 | 0.0316    |                                                                                 |
| 0.030 | 0.0323 | 0.0322    |                                                                                 |
| 0.035 | 0.0328 | 0.0327    |                                                                                 |
| 0.040 | 0.0332 | 0.0331    |                                                                                 |
| 0.045 | 0.0334 | 0.0334    |                                                                                 |
| 0.050 | 0.0336 | 0.0336    |                                                                                 |
| 0.055 | 0.0337 | 0.0337    |                                                                                 |
| 0.060 | 0.0338 | 0.0339    | $x^{(1)} = 0.03426$<br>$x^{(2)} = 0.00993$<br>$x^{(3)} = 0.53691 \cdot 10^2$    |
| <hr/> |        |           |                                                                                 |
| 0.010 | 0.0279 | 0.0279    | PSE, 22,5 kg/m <sup>3</sup>                                                     |
| 0.015 | 0.0285 | 0.0285    |                                                                                 |
| 0.020 | 0.0290 | 0.0289    |                                                                                 |
| 0.025 | 0.0293 | 0.0292    |                                                                                 |
| 0.030 | 0.0294 | 0.0293    |                                                                                 |
| 0.035 | 0.0295 | 0.0294    |                                                                                 |
| 0.040 | 0.0295 | 0.0295    |                                                                                 |
| 0.045 | 0.0295 | 0.0295    |                                                                                 |
| 0.050 | 0.0295 | 0.0295    |                                                                                 |
| 0.055 | 0.0295 | 0.0295    |                                                                                 |
| 0.060 | 0.0295 | 0.0295    |                                                                                 |
| 0.065 | 0.0296 | 0.0296    | $x^{(1)} = 0.029619$<br>$x^{(2)} = 0.004137$<br>$x^{(3)} = 0.900000 \cdot 10^2$ |
| <hr/> |        |           |                                                                                 |
| 0.010 | 0.0300 | 0.0300    | PSE, extrudado, 29 kg/m <sup>3</sup>                                            |
| 0.015 | 0.0308 | 0.0308    |                                                                                 |
| 0.020 | 0.0314 | 0.0313    |                                                                                 |
| 0.025 | 0.0318 | 0.0318    |                                                                                 |
| 0.030 | 0.0320 | 0.0320    |                                                                                 |
| 0.035 | 0.0322 | 0.0322    |                                                                                 |
| 0.040 | 0.0324 | 0.0324    |                                                                                 |
| 0.045 | 0.0325 | 0.0325    |                                                                                 |
| 0.050 | 0.0325 | 0.0325    |                                                                                 |
| 0.055 | 0.0326 | 0.0326    |                                                                                 |
|       |        |           | $x^{(1)} = 0.032689$<br>$x^{(2)} = 0.005489$<br>$x^{(3)} = 0.714820 \cdot 10^2$ |

$$\begin{aligned}x^{(1)} &= 0.03653 \\x^{(2)} &= 0.01299 \\x^{(3)} &= 0.58475 \cdot 10^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x^{(1)} &= 0.03426 \\x^{(2)} &= 0.00993 \\x^{(3)} &= 0.53691 \cdot 10^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x^{(1)} &= 0.029619 \\x^{(2)} &= 0.004137 \\x^{(3)} &= 0.900000 \cdot 10^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x^{(1)} &= 0.032689 \\x^{(2)} &= 0.005489 \\x^{(3)} &= 0.714820 \cdot 10^2\end{aligned}$$

| T     | Y       | $\bar{Y}$ |                                             |
|-------|---------|-----------|---------------------------------------------|
| 0.010 | 0.0245  | 1.0244    | Resina fenólica, 44 kg/m <sup>3</sup>       |
| 0.015 | 0.0255  | 1.0255    |                                             |
| 0.020 | 0.0263  | 1.0263    |                                             |
| 0.025 | 0.0270  | 1.0269    |                                             |
| 0.030 | 0.0274  | 1.0273    |                                             |
| 0.035 | 0.0276  | 1.0275    |                                             |
| 0.040 | 0.0277  | 1.0277    |                                             |
| 0.045 | 0.0278  | 1.0278    |                                             |
| 0.050 | 0.0279  | 1.0279    |                                             |
| <hr/> |         |           |                                             |
| 0.010 | 0.0136  | 1.0135    | PUR, 39 kg/m <sup>3</sup>                   |
| 0.015 | 0.0133  | 1.0133    |                                             |
| 0.025 | 0.0139  | 1.01338   |                                             |
| 0.025 | 0.01390 | 1.01333   |                                             |
| 0.030 | 0.01300 | 1.01337   |                                             |
| 0.035 | 0.01300 | 1.01339   |                                             |
| 0.045 | 0.01300 | 1.01300   |                                             |
| 0.050 | 0.01300 | 1.01301   |                                             |
| 0.055 | 0.01300 | 1.01301   |                                             |
| 0.060 | 0.01300 | 1.01302   |                                             |
| 0.065 | 0.01300 | 1.01302   |                                             |
| <hr/> |         |           |                                             |
| 0.005 | 0.0273  | 1.0273    | Espuma de aminoplasto, 10 kg/m <sup>3</sup> |
| 0.010 | 0.0232  | 1.0232    |                                             |
| 0.015 | 0.0235  | 1.0235    |                                             |
| 0.020 | 0.0235  | 1.0235    |                                             |
| 0.025 | 0.0237  | 1.0237    |                                             |
| 0.030 | 0.0233  | 1.0233    |                                             |
| 0.035 | 0.0230  | 1.0230    |                                             |
| 0.040 | 0.0230  | 1.0230    |                                             |
| 0.045 | 0.0230  | 1.0230    |                                             |
| 0.050 | 0.0231  | 1.0230    |                                             |
| <hr/> |         |           |                                             |
| 0.010 | 0.0300  | 0.0300    | Corcho, 96 kg/m <sup>3</sup>                |
| 0.015 | 0.0303  | 0.0303    |                                             |
| 0.020 | 0.0315  | 0.0315    |                                             |
| 0.025 | 0.0312  | 0.0312    |                                             |
| 0.030 | 0.0327  | 0.0327    |                                             |
| 0.035 | 0.0332  | 0.0332    |                                             |
| 0.040 | 0.0336  | 0.0336    |                                             |
| 0.045 | 0.0340  | 0.0340    |                                             |
| 0.050 | 0.0343  | 0.0343    |                                             |
| <hr/> |         |           |                                             |
| 0.010 | 0.0423  | 0.0423    | Vidrio celular, 127 kg/m <sup>3</sup>       |
| 0.015 | 0.0435  | 0.0435    |                                             |
| 0.020 | 0.0443  | 0.0443    |                                             |
| 0.025 | 0.0447  | 0.0445    |                                             |
| 0.030 | 0.0449  | 0.0443    |                                             |
| 0.035 | 0.0450  | 0.0450    |                                             |
| 0.040 | 0.0450  | 0.0450    |                                             |
| 0.045 | 0.0450  | 0.0451    |                                             |
| 0.050 | 0.0450  | 0.0451    |                                             |

Resina fenólica, 44 kg/m<sup>3</sup>

$$\begin{aligned}x^{(1)} &= 0.02810 \\x^{(2)} &= 0.00780 \\x^{(3)} &= 0.75631 \cdot 10^2\end{aligned}$$

PUR, 39 kg/m<sup>3</sup>

$$\begin{aligned}x^{(1)} &= 0.03279 \\x^{(2)} &= 0.00840 \\x^{(3)} &= 0.75595 \cdot 10^2\end{aligned}$$

Espuma de aminoplasto, 10 kg/m<sup>3</sup>

$$\begin{aligned}x^{(1)} &= 0.029149 \\x^{(2)} &= 0.002002 \\x^{(3)} &= 0.768060 \cdot 10^2\end{aligned}$$

Corcho, 96 kg/m<sup>3</sup>

$$\begin{aligned}x^{(1)} &= 0.036579 \\x^{(2)} &= 0.0086010 \\x^{(3)} &= 0.266350 \cdot 10^2\end{aligned}$$

Vidrio celular, 127 kg/m<sup>3</sup>

$$\begin{aligned}x^{(1)} &= 0.045258 \\x^{(2)} &= 0.00609126 \\x^{(3)} &= 0.9000000 \cdot 10^2\end{aligned}$$

# INTERPRETACION DE LOS DATOS

Damos a continuación una reseña de los datos ajustados de las cuatro curvas medidas por Cammerer para el poliestireno expandido. De los ajustes obtenemos A, B y C. En base a éstos, calculamos los valores de atenuación ( $\alpha$ ) y emisividad (E).

$$\alpha = \frac{\rho_s C}{\rho} \quad ; \quad E = \frac{\alpha \rho B}{4\sigma T_o^3 \rho_s}$$

$$\sigma = 4,93 \times 10^{-8} \frac{\text{K cal.}}{\text{m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{K}^4} \quad T_o = 298 \text{ } ^\circ\text{K} \quad ; \quad 4\sigma T_o^3 \rho_s = 4450 \frac{\text{kcal kg}}{\text{m}^5 \text{ hr } ^\circ\text{K}}$$

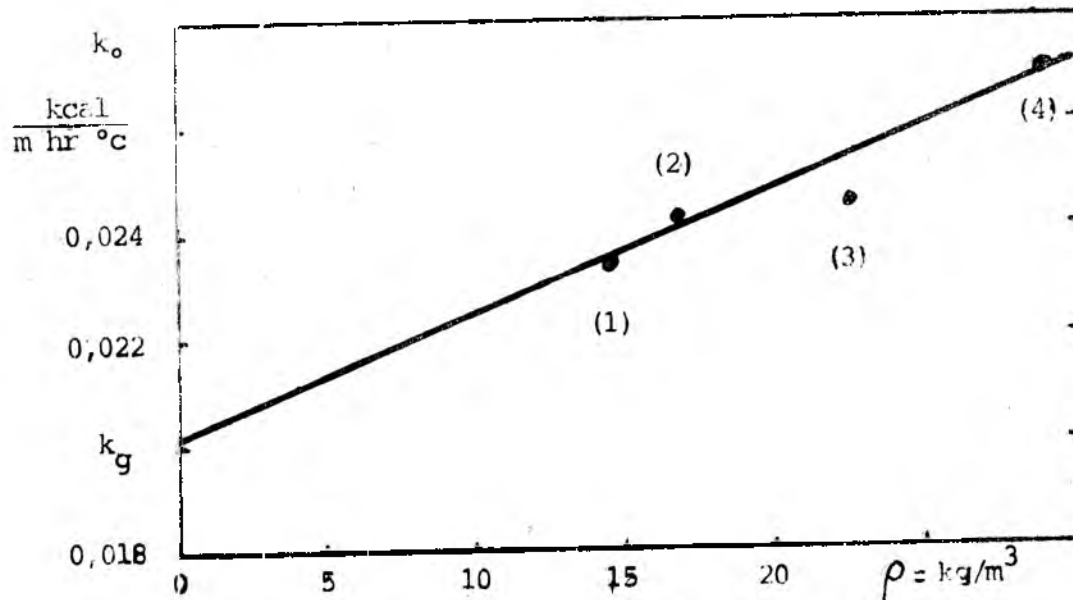
| magnitud.<br>ma-<br>terial. | $\rho$                         | $A=k_\infty$                                        | $B=k_\infty-k_o$                                    | $C$                  | $\alpha$             | $E$   | $k_o$                                               |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|-------|-----------------------------------------------------|
|                             | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ | $\frac{\text{k cal.}}{\text{m hr } ^\circ\text{C}}$ | $\frac{\text{k cal.}}{\text{m hr } ^\circ\text{C}}$ | $\frac{1}{\text{m}}$ | $\frac{1}{\text{m}}$ | -     | $\frac{\text{k cal.}}{\text{m hr } ^\circ\text{C}}$ |
| PS                          | 1050                           |                                                     |                                                     |                      | 7540                 | 0,95  | 0,14                                                |
| PSE (1)                     | 14,5                           | 0,0365                                              | 0,0130                                              | 58,5                 | 4236                 | 0,179 | 0,0235                                              |
| PSE (2)                     | 16,8                           | 0,0342                                              | 0,0099                                              | 53,7                 | 3356                 | 0,125 | 0,0243                                              |
| PSE (3)                     | 22,5                           | 0,0296                                              | 0,0051                                              | 109,2                | 5096                 | 0,131 | 0,0245                                              |
| PSE (4)<br>extrudado        | 29                             | 0,0326                                              | 0,0055                                              | 74                   | 2679                 | 0,096 | 0,0271                                              |

$$\text{donde: } K_o = A - 4\sigma T_o^3 \rho_s \frac{E}{\alpha \rho} = c\rho + k_g$$

De esta última expresión, utilizando como variables ( $k_o; \rho$ ) y como incógnitas  $c$  y  $k_g$  hallamos por el método de recta por cuadrados mínimos los siguientes valores:

$$k_g = 0,0201 \frac{\text{k cal.}}{\text{m hr } ^\circ\text{C}} \quad ; \quad c = 2,27 \times 10^{-4} \frac{\text{k cal. m}^2}{\text{hr } ^\circ\text{C kg}}$$

y el factor de correlación,  $r = 0,94$



Dependencia de la conductividad térmica de PSE de distintas densidades sin tener en cuenta los efectos de radiación.

A su vez de la expresión de  $c$  en función de  $k_g$  y  $k_s$ , despejamos este último valor obteniendo  $k_s = 0,38 \text{ kcal/m}^2\text{°C}^2$ .

El valor de  $k_s$  es dos veces y media el del poliestireno, la atenuación está reducida entre un 30 y un 60% para distintas densidades; como también la emisividad: desde un 10 a un 18% de los valores del material en volumen. Esto también se ha podido constatar a través de la menor absorción del material en el infrarojo (8).

Estos valores evidencian que existen transformaciones notables en las propiedades del poliestireno que conforma las celdas con respecto al material en espesores mayores.

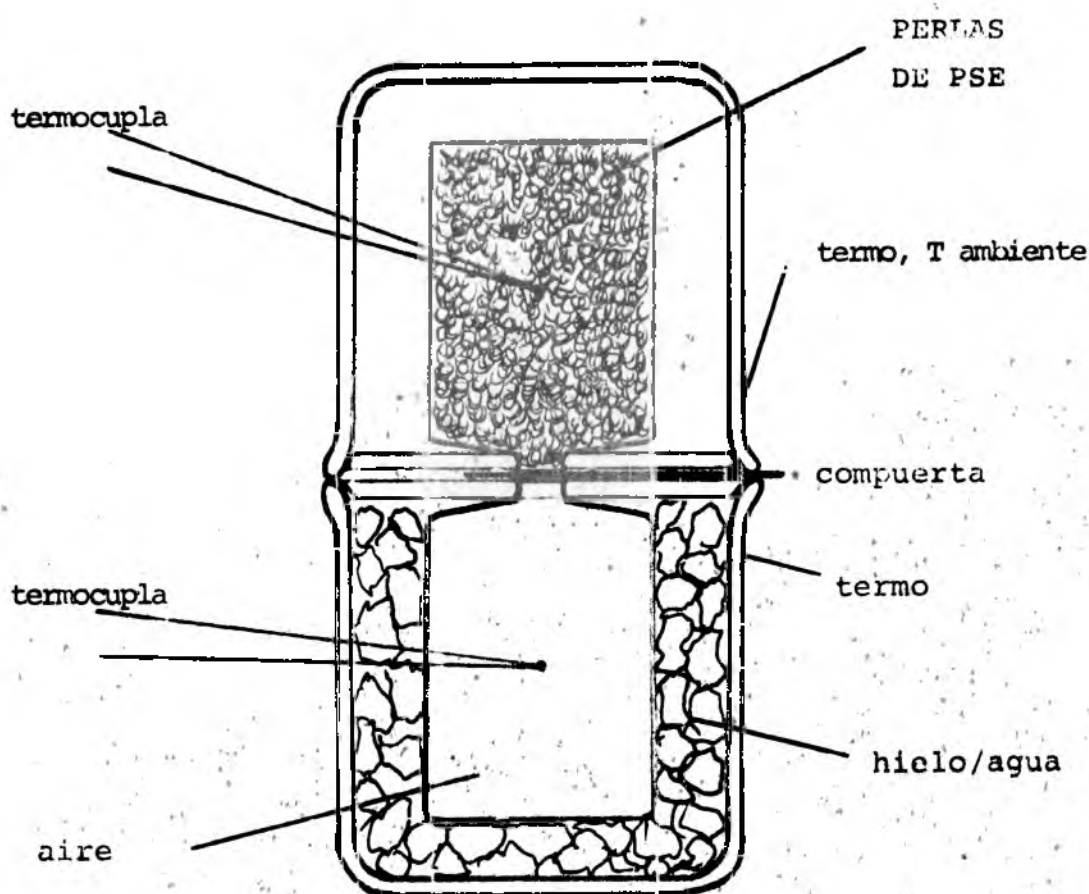
Podemos por lo tanto afirmar que el poliestireno expandido posee propiedades muy diferentes a aquellas que surgen de la utilización de los datos habituales del poliestireno.

Estas diferencias halladas lo han sido en experimentos donde existe transporte de energía radiante. Veamos lo que sucede, por ejemplo, con otra propiedad, como ser el calor específico del poliestireno expandido.

#### MEDICION DEL CALOR ESPECIFICO

Se utilizaron perlas expandidas cuya densidad unitaria en promedio es de  $14,5 \text{ kg/m}^3$ . Dichas perlas si se las expande por los métodos habituales, conformarían un bloque de PSE de aproximadamente  $10 \text{ kg/m}^3$ .

El sistema de medición consistió en dos recipientes (frascos plásticos) cilíndricos de aproximadamente medio litro de capacidad cada uno, y diámetros de 6,5 cms superpuestos por sus bocas y a distinta temperatura. La temperatura era medida con termocuplas fijas y delgadas (diámetro menor de 0,1mm) ubicadas en el centro de cada uno de ellos. El frasco superior, en el cual se introdujeron las perlas, se encontraba inicialmente a temperatura ambiente. El inferior, lleno con aire seco, a 0°C.



Sistema de medición del calor específico de perlas preexpandidas de poliestireno.

El ensayo consiste en medir la evolución de la temperatura en ambos frascos a partir del momento en que se dejan pasar las perlas de la cámara superior a la inferior por medio de una compuerta accionada manualmente. Utilizando las temperaturas iniciales y las inmediatas de equilibrio después del traspaso, podemos calcular el  $C_p$  del PSE conociendo el del aire.

Planteando conservación de energía en el sistema termodinámico formado por los frascos, obtenemos la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{V_o \rho_o C_o}{M} \frac{T'_i - T_o}{T_1 - T'_1}$$

donde:

$V_o$  = volumen de los frascos =  $520 \text{ cm}^3$

$\rho_o$  = densidad del aire =  $0,001293 \text{ gr/cm}^3$

$C_o$  = calor específico del aire =  $0,24 \text{ cal/gr}^\circ\text{C}$

$M$  = masa del PSE =  $4,47 \text{ gr}$

$T_o$  = temperatura inicial del frasco inferior =  $0^\circ\text{C}$

$T_1$  = " " " superior =  $31,1^\circ\text{C}$

$T'_o$  = " final del frasco superior =  $30,8^\circ\text{C}$

$T'_1$  = " " " inferior =  $24,6^\circ\text{C}$

Hemos considerado despreciable el volumen de poliestireno y que no hay cambios en la densidad y calor específico del aire en el rango de temperaturas utilizados. A su vez consideramos que  $T_1 = T'_o$  (del experimento); que el calor específico de las termocuplas es pequeño y que el sistema queda homogeneizado antes que influyan en el centro las pérdidas por las superficies exteriores de los frascos

$$C_p = \frac{520 \cdot 0,001293 \cdot 0,24 \cdot (24,6)}{4,47 \cdot (31,1 - 24,6)} = 0,14 \frac{\text{cal}}{\text{gr}^\circ\text{C}}$$

Este valor obtenido del PSE es la mitad del tabulado para el PS. Otros métodos de medición para el calor específico, menos precisos, también indicaron la misma tendencia: los valores obtenidos para el PSE son significativamente meno-

res que los obtenidos para el PS.

## DISCUSION

Tres son las posibles causas físicas de la disminución de los valores medidos en poliestireno expandido comparados con los del poliestireno.

1) El pequeño espesor de las paredes ( $< 1 \mu$ ) comparados con las longitudes de onda relacionados con los procesos radiativos ( $\lambda \approx 10 \mu$ ) y térmicos a temperatura ambiente, produce una restricción en los grados de libertad existentes en el material expandido modificando su espectro y por lo tanto las antedichas propiedades.

2) Cambios estructurales en el material (orientaciones preferenciales de las macromoléculas) debidos a la alta deformación biaxial del material en el proceso de fabricación, que si bien se realiza por encima de la temperatura vítrea ( $T_g$ ), estarían restringidos en su reacomodamiento debido a los pequeños espesores finales de las paredes de celda.

3) Efectos debidos a la geometría de las celdas y a las reflexiones que se presentan en las caras de éstas.

De acuerdo a los valores para  $k_s$  y  $E$ , podemos decir que existen cambios estructurales en el material. De no ser así la primera y tercera causa no podrían explicar estas diferencias.

Con respecto a los bajos valores de calor específico obtenido, donde obviamente no existen efectos de reflexiones internas, podemos afirmar, que si bien estas existen en los procesos radiativos, no son la única causa de los bajos valores obtenidos.

Con respecto al espesor de las paredes de celda, ha sido contemplado en la expresión teórica de la conductividad térmica y no sabemos si cuantitativamente también influye en los valores bajos obtenidos de  $C_p$  y  $\alpha$ .

## CONCLUSIONES

De las mediciones de la atenuación, emisividad y calor específico, se evidencian cambios sustanciales en la respuesta térmica del poliestireno expandi-

do con respecto al poliestireno sin expandir.

Estas diferencias son atribuidas a cambios estructurales debidos a la alta deformación que sufre el material en el proceso de fabricación.

No se pueden dejar de lado en la interpretación física directa o indirecta de estos parámetros las consideraciones pertinentes al espesor de pared de celda y en los casos de transporte de energía radiante a las reflexiones en las superficies de éstas.

La medición de la conductividad térmica en función del espesor de muestra es un ensayo indispensable para caracterizar el material.

Debido a que existen cambios estructurales en el poliestireno que conforma el material expandido, es de notar que muchas más propiedades se verán afectadas: Temperatura de transición vítrea, reflectividad, etc.

## REFERENCIAS

- (1) W. F. Cammerer, Thermal Conductivity as a function of the thickness of insulating materials. Bulletin de L'Institute International du Froid. Vol. 4 (1975).
- (2) POLIESTIRENO EXPANDIDO, Contribuciones para la interpretación de la conductividad térmica aparente. E. Pasqualini, a ser publicado.
- (3) E. Pasqualini, Interpretación de los mecanismos de transferencia de calor en PSE, Proceedings del I Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, La Plata, Argentina, Setiembre 1982. (CNEA-NT 13/82).
- (4) K. Levenberg, "A method for the solution of certain non-linear problems in least squares", Quart. Appl. Math., 2(1944), pp 164-168.
- (5) Donald W. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of non linear parameters", J. Soc. Indust. Appl. Math., 11 (1963), 431-441.
- (6) Yonathan Bard, "Nonlinear parameter estimation", Academic Press (1974).
- (7) D. W. Marquardt, R. G. Bennett and E. J. Burell, Jour. Molec. Spectroscopy, 7 (1961), N° 4, pp 269-279.