

# Determinación de la conductividad térmica de materiales en polvo de la Península de Yucatán

W. D. Mena-Novelo, R.A. Un-Aragón, J.E. Corona, M. Romero, A.I. Oliva<sup>1</sup>

*Fecha de recepción: marzo de 2014 – Fecha de aprobación: marzo 2015*

## RESUMEN

Se discute la metodología implementada para determinar la conductividad térmica  $k$  de materiales en polvo de uso común en la Península de Yucatán. El sistema implementado, basado en las normas ASTM C-177 y C-508, permite determinar la  $k$  de materiales en estado sólido. Se construyó y caracterizó un sistema experimental adiabático en geometría de paralelepípedo con paredes de poliestireno de 10 cm de espesor y un foco incandescente como fuente de calentamiento y potencia controlada con un autotransformador variable. Conociendo la potencia aplicada al sistema, mediante un balance térmico se determinaron las pérdidas involucradas en el sistema adiabático, así como la potencia neta que se aplica en el recipiente contenedor de la muestra a analizar. Para mayor confiabilidad en las mediciones realizadas, se automatizó el sistema de captura y se reportaron los valores promedio de las mediciones realizadas. Se reporta el valor de  $k$  de un grupo de materiales en polvo de uso común en la región como: arena de mar, yeso, cemento gris, tierra roja, tierra negra, polvo de piedra, polvo de piedra fino y cerámica comercial, siendo el yeso el material con menor valor de  $k = 0.04 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$  medido, el cual lo hace adecuado como material para aislamiento térmico.

**Palabras clave:** conductividad térmica, materiales en polvo, cámara adiabática.

## Determination of the thermal conductivity of powders of the Yucatan Peninsula

### ABSTRACT

A methodology for determining the thermal conductivity  $k$  of powdered materials of the Yucatan's Peninsula is discussed. The implemented system based on the C-177 and C508 ASTM standards permits to estimate the thermal conductivity of solid state materials. An adiabatic chamber with 10 cm-thickness polystyrene walls and an incandescent spotlight with controlled power through a variable autotransformer was implemented and characterized. By knowing the applied power to the system, the thermal losses of the adiabatic chamber were estimated from a thermal balance, as such as the useful heat flowing through the samples container. For high reliability, the measurement of temperature and the captured data were automatized and the mean values were reported. We report the  $k$  values obtained from samples of sea sand, plaster, maya's cement, red land, black land, rough stone powder, fine stone powder, and commercial ceramic. The plaster was found to be the material with minor thermal conductivity,  $k = 0.04 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ , which is appropriate to be used as thermal isolator.

**Keywords:** thermal conductivity, powdered material, adiabatic chamber.

<sup>1</sup>Centro de Investigación y de Estudios Avanzados el IPN Unidad Mérida, Departamento de Física Aplicada, A.P. 73-Cordemex, 97310 Mérida Yucatán México. Correo electrónico: oliva@mda.cinvestav.mx

**Nota:** El período de discusión está abierto hasta el 1° de septiembre de 2015. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19, No.2, 2015, ISSN1665-529-X.

## INTRODUCCIÓN

La conductividad térmica  $k$  de un material sólido es un parámetro térmico que es utilizado para diseñar, predecir o proponer dispositivos y metodologías para un mejor uso de la energía consumida (Antoni y Mills, 1999). Su valor depende de muchos factores, sobre todo de las propiedades físicas del material, tales como densidad, estructura cristalina, entre otras Welty et al., 1999). En conductores, es altamente deseable que el material posea un alto punto de fusión y que tenga una ordenación cristalina que permita una buena transferencia del calor. En materiales aislantes, es deseable que el material tenga un alto punto de fusión, una baja densidad y bajos puntos de fusión y flamabilidad. Los valores de  $k$  de los materiales están reportados en libros de texto de transferencia de calor o en manuales de Ingeniería, donde para cada valor reportado, están establecidas las condiciones y características del material analizado. Sin embargo, se sabe que una arena de la costa del pacífico es muy diferente a una arena del Golfo de México, lo que hace indispensable establecer los valores de  $k$  para cada tipo específico de material. Una manera muy común de determinar el valor de la conductividad térmica  $k$  es a través de la conocida ecuación de Fourier (Kern, 2001) para la conducción del calor. Asumiendo un material en geometría de placa plana que se le hace pasar un flujo de calor, la ecuación de Fourier está dada por:

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Donde  $Q$  es el flujo de calor que atraviesa la pared,  $A$  es el área transversal al flujo de calor,  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre las paredes del material y  $\Delta x$  es el espesor de la pared del material por el cual atraviesa el flujo de calor. El signo negativo implica que la transferencia del calor fluye de una temperatura mayor a una menor. Para determinar el valor de  $k$  es necesario conocer y controlar las variables de la ecuación 1. Esto es:

$$k = -\frac{Q\Delta x}{A\Delta T} \quad (2)$$

La *American Society for Testing Materias* (ASTM) ha propuesto las normas C-177 y C-508 (ASTM C-177. 1997, ASTM C-518. 2002) para establecer una metodología estándar para medir el valor de  $k$  de materiales sólidos.

En México, la Secretaría de Energía, dicta las normas de ahorro y eficiencia de energía a través de las NOM (Normas Oficiales Mexicanas) (NOM-008-2001, NOM-018-1997, NOM-020-

2008). Estas normas de carácter obligatorio relacionadas con la eficiencia de energía son las NOM-008, NOM-018 y NOM-020, donde se requiere la determinación de las propiedades físicas de los materiales y en particular la conductividad térmica  $k$ .

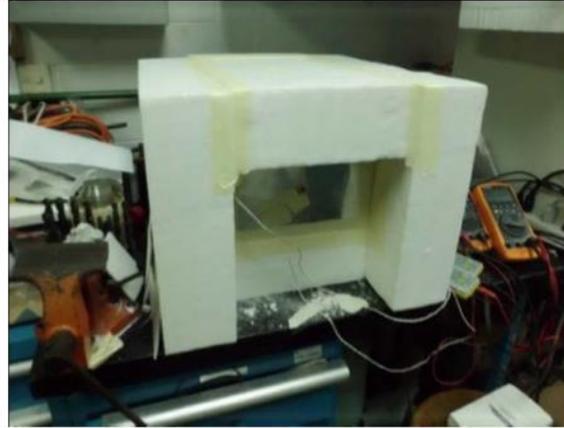
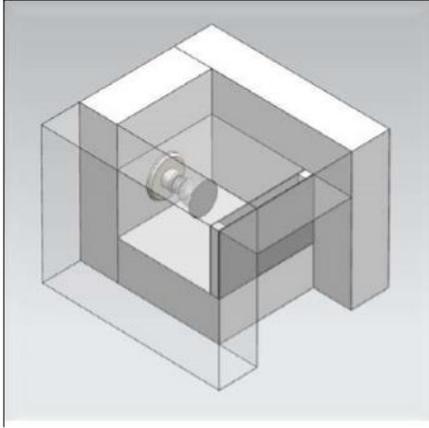
Siguiendo de cerca estos lineamientos y los procesos de transferencia de calor, en este trabajo se reportan el sistema experimental, las mediciones realizadas, así como los valores obtenidos de conductividad térmica  $k$  de algunos materiales en polvo que son ampliamente utilizados en la región de la Península de Yucatán con el fin de conocer su valor y con ello potenciar otras posibilidades de utilización.

### La cámara adiabática

Para la determinación experimental de  $k$ , se diseñó y construyó una cámara tipo adiabática (sin pérdidas de calor) donde en forma controlada podemos aplicar un flujo de calor al material a analizar y medir su respuesta térmica, conociendo su geometría. La cámara adiabática se construyó en forma de paralelepípedo ( $25 \times 25 \times 15$  cm<sup>3</sup> interior) usando placas de poliestireno de 10 cm de espesor (Figura 1). Una pared vertical de menor área de la cámara fue utilizada para ubicar el recipiente metálico contenedor de la muestra en polvo a analizar. Como fuente de calor, se utilizó un foco incandescente ubicado en el interior de la caja y frente a la pared de la muestra a estudiar. La potencia aplicada a la muestra es controlada usando un autotransformador variable (*variac*).

Una pantalla de aluminio colocada sobre el foco evita que la radiación térmica emitida llegue a la muestra en forma directa. En cada pared interior y exterior del contenedor metálico se colocan tres sensores de temperatura electrónicos tipo LM-35 con una resolución de 0.01°C para medir los perfiles de calentamiento de la muestra a analizar.

Para determinar el valor de  $k$  de la muestra se utiliza el cambio de temperatura promedio ocasionado por el flujo de calor a través del contenedor de la muestra una vez que el sistema térmico alcanza el estado estacionario. El flujo de calor aplicado al sistema se determina con el producto de la corriente y voltaje aplicado al elemento calefactor. Este flujo de calor se aplica a las 6 paredes interiores de la cámara adiabática y requiere de un balance de energía para conocer el flujo de calor que atraviesa únicamente por la muestra analizada. Por ello, es necesario realizar una calibración de la cámara adiabática antes de proceder a la medición de las muestras.



**Figura 1.** Esquema y fotografía de la cámara adiabática implementada para medir el valor de la  $k$  de materiales en polvo.

Para realizar el balance térmico de los procesos de transferencia de calor involucrados en el sistema implementado, hacemos uso de las ecuaciones de conservación de la energía:

$$Q = Q_u + Q_{perd} \quad (3)$$

Donde  $Q=VI$  es el flujo de calor eléctrico ( $V$  voltaje,  $I$  corriente) proporcionada por la fuente de calor,  $Q_u$  es el flujo de calor útil aprovechado por el sistema y  $Q_{perd}$  es el flujo de calor perdido por conducción, convección y radiación en los alrededores de la cámara. El término  $Q_u$  se determina mediante la relación:

$$Q_u = k_m A_m \frac{(T_{1m} - T_{sm})}{\Delta x_m} + h A_m (T_{1m} - T_{sm}) + \varepsilon \sigma A_m (T_{sm}^4 - T_{\infty}^4) \quad (4)$$

Donde el subíndice  $m$  hace referencia a los parámetros respecto de la muestra o cada pared de la cámara. Los tres términos del lado derecho de la ecuación 4 se refieren al flujo de calor útil por conducción, convección y radiación. En forma análoga, el término  $Q_{perd}$  se determina con la relación:

$$Q_{perd} = k_p A_p \frac{(T_{1p} - T_{sp})}{\Delta x_p} + h A_p (T_{1p} - T_{sp}) + \varepsilon \sigma A_p (T_{sp}^4 - T_{\infty}^4) \quad (5)$$

Aquí el subíndice  $p$  se refiere a la pérdida parcial de cada pared involucrada en la cámara adiabática. Para la determinación del valor de la conductividad térmica  $k_{PE}$  del PE utilizado como

material aislante del calor en las paredes de la cámara adiabática, se hace uso de la ecuación:

$$k_{PE} = \frac{(Q - Q_{perd} - Q_{convm} - Q_{radm}) \Delta x_{PE}}{A_{PE} (T_{1PE} - T_{sPE})} \quad (6)$$

Y para la conductividad térmica  $k_m$  de cada material analizado, utilizamos la relación:

$$k_m = \frac{(Q - Q_{perd} - Q_{convPE} - Q_{radPE}) \Delta x_m}{A_m (T_{1m} - T_{sm})} \quad (7)$$

Donde los parámetros mencionados significan:

$A$  = área de transferencia de calor del elemento involucrado.

$\Delta x$  = espesor de la pared.

$T_j$  = temperatura interior de la pared.

$T_s$  = temperatura exterior de la pared.

$T_{\infty}$  = temperatura ambiente = 25°C (temperatura del laboratorio).

$h$  = coeficiente de transferencia de calor por convección de la pared:  $h = 2.28$  W/m °C para paredes verticales y  $h = 2.60$  W/m °C para paredes horizontales.

$\varepsilon$  = emisividad de la superficie ( $\varepsilon = 0.9$  para el PE).  
 $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman,  $5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>.

$Q_{conv}$  = flujo de calor perdido por convección.

$Q_{rad}$  = flujo de calor perdido por radiación.

### Programa para captura de datos en tiempo real

Una vez desarrolladas las relaciones involucradas en los procesos de transferencia de calor, se procedió a desarrollar un programa para la captura de los datos de temperatura medidos mediante el

software *LabView* 7.0. El programa permite capturar las temperaturas interior y exterior de las superficies del contenedor metálico de la muestra, así como la temperatura ambiente durante todo el proceso de calentamiento. La pantalla principal del programa desarrollado se muestra en la Figura 2. El programa permite capturar, mediante una tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6216, los datos de temperatura provenientes de los sensores electrónicos LM-35 y mostrarlos en tiempo real en forma gráfica en función del tiempo de muestreo. Con el programa es posible controlar la velocidad de muestreo, así como generar un archivo .dat para su posterior análisis y graficación.

**Metodología para la medición de  $k$  Calibración de la cámara adiabática.** Aunque la cámara adiabática construida asume que las pérdidas de calor son nulas, en la práctica esto no es así. Por ello se hace necesario determinar las pérdidas del sistema adiabático. Dado que las paredes de la cámara poseen un valor de conductividad térmica, cierta cantidad del calor aplicado se pierde por conducción, convección y radiación por las paredes que la conforman. Un primer experimento realizado para calibrar nuestra cámara adiabática construida fue medir el valor de la  $k$  del poliestireno (PE) utilizado para conformar las paredes adiabáticas usando el proceso de

transferencia de calor por conducción a través de las paredes de PE. Para ello se realizaron diferentes mediciones usando diferentes potencias aplicadas en el interior de la cámara y se midieron las temperaturas superficiales del interior y del exterior de las paredes de PE. El valor de  $k$  reportado para el PE en la literatura es de  $k = 0.06$  W/m K [7], aunque este valor puede ser diferente dependiendo de la densidad del PE utilizado. La Figura 3 muestra un perfil de calentamiento típico medido para determinar la  $K$  del PE.

Puede observarse que la estabilidad térmica se alcanza después de 120 min. Para determinar el valor de  $k$ , el gradiente de temperatura  $\Delta T$  obtenido en cada experimento, es el valor promedio de los valores obtenidos durante el tiempo de estabilización medido, el cual es señalado con recuadros grises en la Figura 3, así como el área  $A$  y el espesor  $\Delta x$  de la muestra. La Tabla 1 resume los valores medidos y calculados correspondientes a 5 diferentes experimentos realizados para el PE, así como los valores de la  $Q$  aplicada, el valor de  $k_{PE}$  obtenido y su incertidumbre asociada. Para fines prácticos, el valor de  $k_{PE}$  se considerará como el valor promedio de los experimentos realizados.

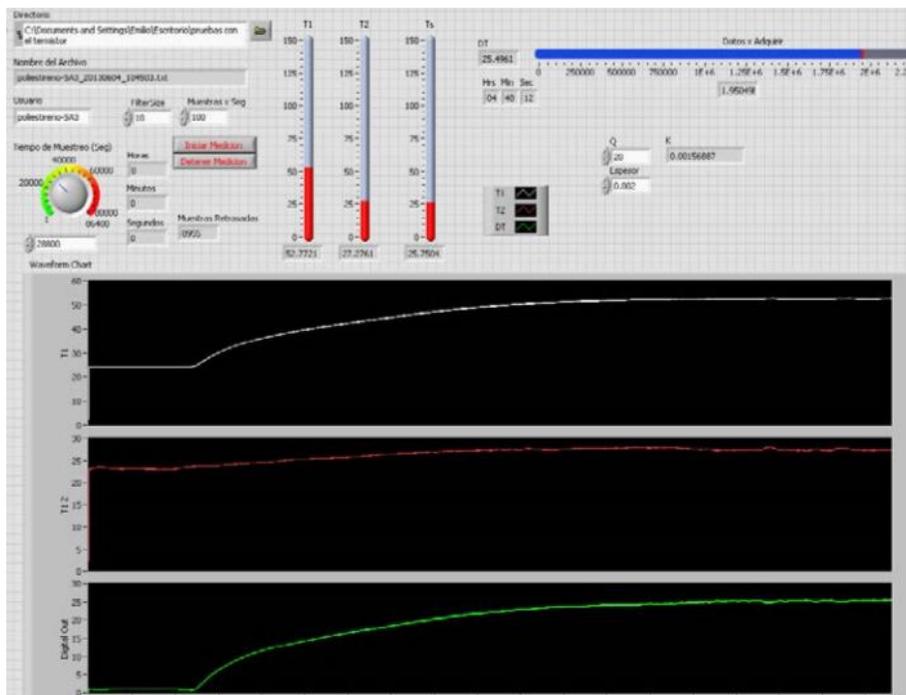


Figura 2. Pantalla principal del software desarrollado para la captura de las temperaturas en tiempo real.

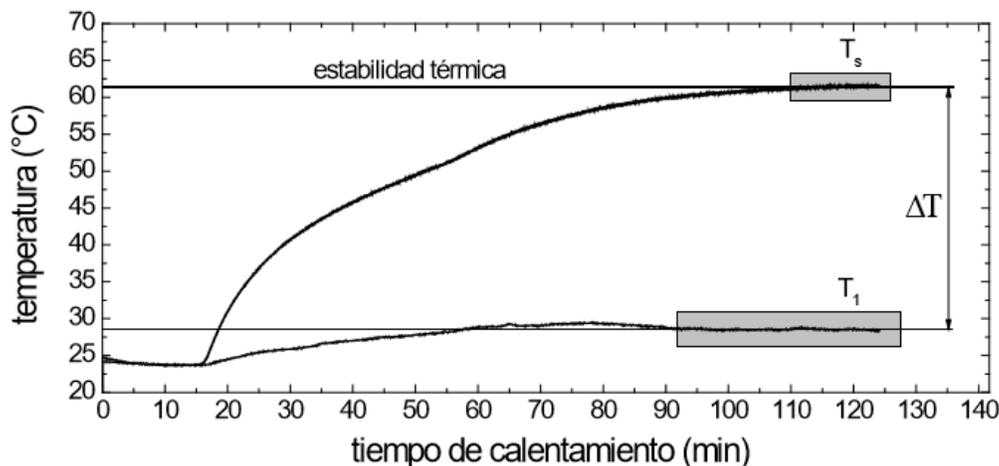


Figura 3. Perfil de calentamiento medido por conducción a través del PE.

Tabla 1. Datos experimentales obtenidos durante las diferentes mediciones realizadas para determinar la conductividad térmica del poliestireno (PE).

Muestra	$T_1$ (°C)	$T_s$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$T_\infty$ (°C)	I (A)	V (V)	Q [W]	$k_{PE}$ [W/m°C]	$\delta k_{PE}$ [±]
PE_1	64.83	33.71	31.12	25.01	0.26	38.16	9.92	0.052	0.004
PE_2	63.29	29.42	33.87	25.50	0.26	37.66	9.79	0.057	0.005
PE_3	61.39	28.53	32.86	25.93	0.36	29.25	10.53	0.063	0.004
PE_4	52.47	28.59	23.88	25.75	0.32	24.70	7.90	0.060	0.004
PE_5	51.77	28.22	23.55	26.89	0.32	24.80	7.94	0.046	0.003
							<b>Prom.</b>	<b>0.056</b>	<b>0.004</b>

Así, de la Tabla 1, el valor medido de la conductividad térmica del PE es de  $k_{PE} = 0.056 \pm 0.004$  W/m °C, valor muy cercano a la valor reportado en los manuales de  $0.060$  W/m °C [7]. Este valor medido será de gran utilidad para determinar la  $k$  de los diferentes materiales en polvo a analizar, ya que se medirán usando la misma cámara adiabática calibrada.

**Determinación de  $k$  de los diferentes materiales en polvo estudiados.** El valor de  $k$  de cada muestra en polvo analizada se determina usando la ecuación 5 y midiendo las variables similares a las medidas para el experimento del PE. La Figura 4 muestra las diferentes muestras de los materiales en polvo medidos en este trabajo.

Para las mediciones, se debe evitar generar poros al introducir los materiales en el contenedor metálico con el fin de que el espesor de la muestra en polvo (2.0 cm) sea uniforme para la

conducción del calor. En el caso de las tierras y polvos de piedra, se tuvo el cuidado de que las muestras tengan un tamaño similar de partícula, usando para ello un tamizador. La muestra de material a analizar es colocada en un contenedor de aluminio de  $21 \times 14 \times 2$  cm<sup>3</sup> y colocada como una pared vertical de la cámara adiabática. Se cierra herméticamente la cámara y se procede a aplicar un flujo controlado de calor. Durante el proceso de calentamiento se mide su perfil térmico hasta alcanzar las condiciones de estabilidad térmica. Una vez estable, se determina el valor de  $\Delta T$  alcanzado entre las paredes interior y exterior y con la ecuación 7, el valor de  $k$ .

## RESULTADOS

La Figura 5 (a y b) muestra los perfiles típicos obtenidos del gradiente de temperatura correspondiente a cada muestra en polvo analizada. Las curvas representan el valor promedio de tres mediciones realizadas en cada

material bajo condiciones similares. Puede observarse que se requirió cerca de 300 min (5 h) para alcanzar el estado estacionario en cada caso. El valor promedio de  $\Delta T$  de cada muestra analizada es utilizado para calcular el valor de  $k$  de cada material.

La Tabla 2 muestra los resultados de una medición típica de un grupo de tres diferentes mediciones realizadas usando la tierra negra como muestra. Se reportan las temperaturas interior, exterior y ambiente, la potencia utilizada para la prueba y los valores de  $k$  determinados con las variables medidas. De estos valores medidos bajo condiciones similares, se obtiene un valor

promedio que es reportado como la  $k$  del material analizado.

Finalmente, después de realizar obtener todas las mediciones de los perfiles de calentamiento en estado estacionario de cada material estudiado, se calcularon los valores de  $k$  y los resultados correspondientes se reportan en la Tabla 3. De la Tabla 3 se concluye que los materiales analizados presentan un valor de  $k$  entre 0.085 y 0.040 W/m°C, correspondientes al grupo de materiales aislantes, siendo el yeso comercial el que obtuvo el menor valor de  $k$ .



Figura 4. Muestras de los diferentes materiales en polvo a quienes se midió el valor de la conductividad térmica  $k$ .

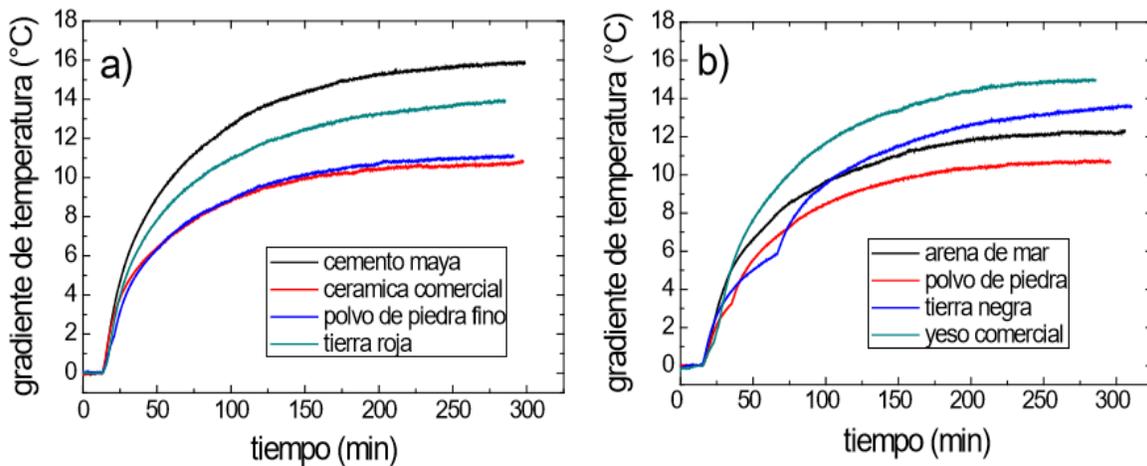


Figura 5. Gradientes de temperatura medidos para las diferentes muestras de materiales en polvo analizadas.

**Tabla 2.** Valores obtenidos en la experimentación de la muestra de tierra negra.

Material	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	ΔT (°C)	T <sub>∞</sub> (°C)	I (A)	V (V)	Q (W)	k (W/m°C)	δk (W/m°C)
Tierra negra1	46.50	33.09	13.41	27.38	0.33	24.94	8.23	0.059	0.004
Tierra negra2	46.78	33.15	13.63	27.31	0.33	24.90	8.22	0.060	0.004
Tierra negra3	46.85	32.99	13.86	26.42	0.33	24.88	8.21	0.053	0.003
<b>Promedio</b>	<b>46.71</b>	<b>33.08</b>	<b>13.63</b>	<b>27.37</b>	<b>0.33</b>	<b>24.91</b>	<b>8.22</b>	<b>0.057</b>	<b>0.004</b>

**Tabla 3.** Valores obtenidos en la experimentación para los diferentes materiales en polvo de la región. En las últimas columnas se reportan los valores promedio de *k* y las incertidumbres asociadas.

Material	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	ΔT (°C)	T <sub>∞</sub> (°C)	I (A)	V (V)	Q <sub>prom</sub> (W)	k <sub>prom</sub> (W/m°C)	δk (W/m°C)
Arena de mar	44.94	32.67	12.27	26.60	0.32	24.90	8.05	<b>0.057</b>	0.004
Polvo de piedra	43.84	33.15	10.69	26.43	0.33	24.90	8.13	<b>0.085</b>	0.006
Tierra negra	46.71	33.08	13.63	26.37	0.33	24.90	8.22	<b>0.057</b>	0.004
Yeso Comercial	47.80	32.74	15.06	26.53	0.33	24.87	8.21	<b>0.040</b>	0.003
Cemento Maya	47.63	31.80	15.83	25.96	0.33	24.85	8.20	<b>0.085</b>	0.005
Cerámica comercial	44.77	33.93	10.84	26.49	0.33	24.90	8.22	<b>0.059</b>	0.003
Polvo de piedra fino	44.25	33.19	11.06	26.42	0.33	24.90	8.22	<b>0.084</b>	0.005
Tierra Roja	46.59	32.68	13.91	26.42	0.33	24.83	8.20	<b>0.058</b>	0.003

### CONCLUSIONES

Se implementó un sistema de medición para determinar la conductividad térmica *k* de un grupo de ocho materiales en polvo de la Península de Yucatán basado en las normas ASTM C-177 y C-08. Para ello, se construyó una cámara adiabática con paredes de poliestireno de 10 cm de espesor y mediante un balance térmico, se determinaron las pérdidas de calor útil que se aprovecha en dicha cámara. Midiendo el gradiente de temperatura generado entre las paredes de la muestra analizada y usando la ley de Fourier para la conducción del calor y la geometría de la misma, es posible

determinar el valor de *k* de los materiales en polvo. La conductividad térmica de yeso, tierra negra, tierra roja, cemento maya, cerámica comercial, arena de playa, polvo de piedra y polvo de piedra fino fueron determinados usando esta metodología. Los valores de *k* oscilaron y entre 0.040 y 0.085 W/m °C, siendo el yeso el material con menor conductividad térmica medida. Los valores reportados pueden ser de gran utilidad para estudios de suelos y su uso en cultivos, así como para nuevas aplicaciones en áreas no convencionales de los procesos térmicos.

### REFERENCIAS

Antoni F. Mills, (1999) Heat transfer, 2a Ed., Prentice Hall PTR, Los Angeles USA.

ASTM C-177. (1997) Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus. West Conshohocken PA, ASTM International.

ASTM C-518. (2002) Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus. West Conshohocken PA, ASTM International.

Kern D. Q., (2001). Procesos de transferencia de calor, 3ª Ed., CECSA, México.

Normas Oficiales Mexicanas, NOM-008-2001, NOM-018-1997, NOM-020-2008, Secretaria de Energía, México.

Welty, J.R. Wicks Ch. E. y R.E. Wilson (1999) Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa, 2ª Ed., Limusa, México, 1999.

---

Este documento debe citarse como: Mena-Novelo W. D., Un-Aragón R.A., Corona J.E., Romero M., Oliva A.I. (2015) **Determinación de la conductividad térmica de materiales en polvo de la Península de Yucatán**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 19-2, pp. 85-90, ISSN 1665-529-X.