

# Determinación Experimental de la Conductividad Térmica Efectiva en Bloques Extinguidos de Arcilla Roja

## Experimental Determination of the Effective Thermal Conductivity in the Extruded Red Clay Bricks

G. Peña Rodríguez<sup>a,\*</sup>  
J. Y. Peña Quintero<sup>b</sup>  
M. A. Gómez Tovar<sup>b</sup>

Recepción: 26-feb-13  
Aceptación: 27-mar-13

### Resumen

Se reporta la conductividad térmica efectiva ( $k_e$ ), a una temperatura promedio de 35 °C, de los bloques o ladrillos de arcilla roja No. 5 fabricados por extrusión en Cúcuta (Colombia) y su área metropolitana, los cuales tienen en su interior huecos con diferentes geometrías (seis rectangular, ocho rectangular, ocho circular y mixta). Además de la  $k_e$ , se calculó la masa, la densidad aparente, la porosidad y la fracción de aire presente en los bloques. Para hallar la  $k_e$  se utilizó la técnica experimental de la cámara de aislamiento térmico, que funciona con el principio físico de la placa caliente en estado estacionario de temperatura. La porosidad y la densidad aparente fueron calculadas usando la norma NTC 4321-3. Los resultados muestran que los bloques que presentan mayor valor de  $k_e$  son los que tienen geometría mixta en sus huecos, y el menor valor correspondió a los bloques con seis orificios rectangulares. Las pruebas corroboraron que la  $k_e$  aumenta al incrementarse la masa y la densidad, pero que disminuye cuanto mayor es la porosidad o fracción de aire en su interior [1]. También se encontró, mediante el ajuste a los datos experimentales usando software OriginPro 6.1, que el comportamiento de  $k_e$  en función de la fracción total de aire presente en los bloques ( $\sigma$ ), de la conductividad térmica de la arcilla sólida ( $k_s$ ) y de la conductividad térmica del aire ( $k_g$ ), está dado por la expresión  $k_e = P_1 k_s (1 - \sigma) + P_2 k_g \sigma$ , donde  $P_1$  y  $P_2$  son parámetros que pueden ser atribuidos a la geometría de los huecos presentes en los bloques. Los datos de  $k_e$ , reportados en este trabajo, serán de vital importancia para determinar el coeficiente de transmitancia térmica (U-value), usado en el cálculo de los aislamientos, y las pérdidas energéticas en el diseño de la calefacción en una edificación que utilice dichos materiales.

**Palabras clave:** Bloques de arcilla roja No. 5, Conductividad térmica efectiva, Fracción total de aire, Porosidad, Transmitancia térmica.

<sup>a</sup>Departamento de Física, Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica UFPS, Cúcuta, Norte de Santander.

\*Correo electrónico: gpenaro@ufps.edu.co

<sup>b</sup>Ingeniería Mecánica, Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS), Cúcuta, Norte de Santander.

## Abstract

It is reported the effective thermal conductivity ( $k_e$ ) at 35 °C average temperature, for the blocks or the clay bricks No. 5, made by extrusion in the Cucuta city (Colombia) and its metropolitan area, which are hollow inside, and with different geometries (six rectangular, eight rectangular, eight circular and mixed). In addition to the thermal conductivity study, we calculated their mass, their apparent density, the porosity and the air fraction present in the samples. To find the  $k_e$  it was used the hot plate insulation technique at steady state. The porosity and the bulk density were calculated, by using the standard NTC 4321-3. Our results showed that the samples with a higher value than  $k_e$  were those with mixed geometry in their holes, and the lowest value corresponded to the bricks with six rectangular holes. The test confirmed that  $k_e$  was higher for samples with the increasing mass and density and diminishes for the samples with higher porosity or air fraction within them [1]. The  $k_e$  behavior, in the correlation to the air present fraction in the sample ( $\sigma$ ), the solid clay thermal conductivity ( $k_s$ ) and the air thermal conductivity ( $k_g$ ), was found by fitting to the experimental data, using OriginPro 6.1 software and the expression  $k_e = P_1 k_s (1 - \sigma) + P_2 k_g \sigma$ , where  $P_1$  and  $P_2$  are parameters which can be attributed to the holes geometry in the sample. The data reported in this document, is very important to determine the thermal transmittance coefficient (U-value), used in the insulation and energy losses calculation, in a building heating design, that use such materials.

**Key words:** Air Total Fraction, Effective Thermal Conductivity, Red Clay Bricks No. 5, Porosity, Thermal Transmittance

## 1. Introducción

El conocimiento de las propiedades mecánicas y físicas de un material permite utilizarlo en aplicaciones industriales según las necesidades de operación y uso. Dentro de las propiedades físicas está la conductividad térmica ( $k$ ), que indica la cantidad de calor (energía térmica) que pasa entre dos puntos dentro del material por unidad de área, de tiempo y gradiente de temperatura [2, 4]; dicho parámetro depende de la estructura interna, de la humedad, la configuración geométrica, la composición química del material y la temperatura [1]. Para el caso de materiales compuestos, la conductividad térmica efectiva ( $k_e$ ) del material depende de la conductividad térmica de cada una de las fases que lo forman [4, 5]; lo anterior se puede aplicar al caso de los bloques de arcillas cocidos, que presentan dos fases, una sólida (arcilla) y la otra gaseosa (aire), que se encuentra dentro de los huecos.

Actualmente, se han reportado valores experimentales de  $k$  para diversos materiales de construcción, donde se han aplicado técnicas como la de la placa caliente aislada o la cámara de aislamiento térmico [6, 7, 8]. En el presente trabajo se presentan los resultados experimentales de  $k_e$  a temperatura promedio de 35 °C, en bloques extruidos de arcilla roja, elaborados en Cúcuta y su área Metropolitana; así

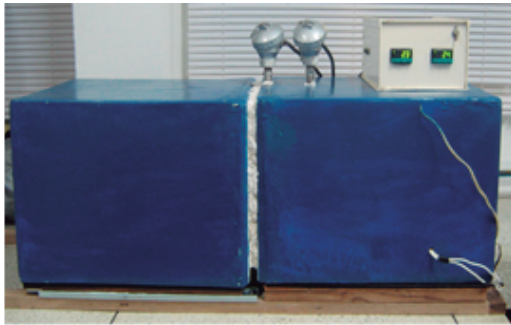
mismo, se evaluó la influencia en dicho parámetro termofísico de variables como la masa, la densidad, la porosidad y la fracción de aire presente en los bloques.

## 2. Experimental

### 2.1. Método de la placa caliente

Consiste en colocar la muestra entre dos placas rectangulares, una caliente ( $T_1$ ) y otra fría ( $T_2$ ); debido al gradiente de temperatura, se produce transferencia de calor a través de la muestra. La cuantificación de esta energía térmica a través del espesor de la muestra ( $\Delta x$ ), área transversal ( $A$ ) y gradiente de temperatura ( $\Delta T = T_1 - T_2$ ), que para las muestras objeto del estudio fueron  $\Delta x = 0,1023$  m y  $A = 4,42 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>, se rige por la expresión (1), donde  $P$  representa la potencia eléctrica (razón de flujo de calor por conducción) suministrada a las resistencias en la placa caliente, la cual, por efecto Joule, se transforma en calor [2], y que para este trabajo fue de vatios. En la figura 1 se presenta una foto digital de la cámara de aislamiento térmico, la cual funciona con el principio físico de la placa caliente.

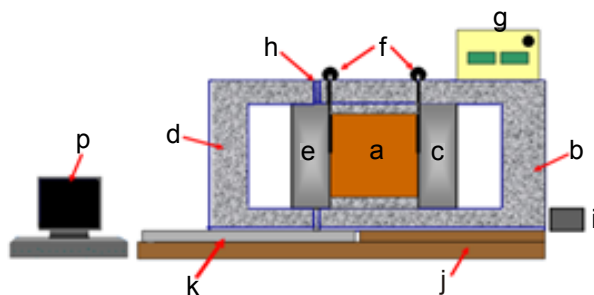
$$k_e = \frac{P \Delta x}{A \Delta T} \quad (1)$$



**Figura 1.** Cámara de aislamiento térmico, ubicada en el Centro de Investigación de Materiales Cerámicos (CIMAC-UFPS).

## 2.2. Equipo de medida

El diseño experimental del sistema de la cámara aislante térmica que se utilizó para la determinación de  $k_e$  en los bloques de arcilla roja se presenta en la figura 2. La cámara está constituida por: a) muestra, b) cámara caliente, c) placa caliente, d) cámara fría, e) placa fría, f) sensores PT-100, g) caja de controladores de los sensores, h) manta aislante, i) medidor de potencia eléctrica (DDS26B) consumida por la resistencia alojada en la placa caliente, j) base de madera, k) riel metálico y p) Computador personal, que registra el gradiente de temperatura ( $\Delta T = T_1 - T_2$ ) en función del tiempo.



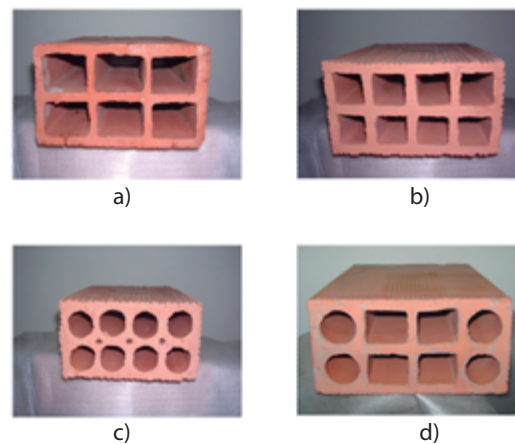
**Figura 2.** Diagrama experimental de la cámara aislante térmica, que funciona bajo el principio físico de la placa caliente aislada.

## 2.3. Selección y preparación de las muestras

Actualmente, las empresas ladrilleras y tejares de Cúcuta y su área Metropolitana fabrican bloques extruidos de arcilla cocida (No. 5) de forma rectangular con dimensiones promedio de 30x20x11 cm, que tienen seis u ocho huecos, con geometrías circulares, rectangulares y combinadas (ver figura 3). Estos bloques son usados por la industria de la construcción en paredes y placas.

Se seleccionaron 36 muestras (bloques de arcilla), 9 por cada tipo, con el fin de satisfacer la condición requerida por la prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis, que se aplica a un número mínimo de cinco muestras [9]. La medida experimental de la masa, de la densidad aparente y de la fracción de aire presente en la muestra se realizó a las muestras tal y como fueron suministradas por las empresas.

Para determinar la conductividad térmica efectiva en el régimen estacionario de temperaturas se sellaron los orificios de los bloques con mezcla de arena-cemento, para evitar el flujo de aire en el interior de los agujeros, y se aislaron térmicamente las parte superior, inferior y laterales, usando manta aislante, para luego ser alojados los bloques en el interior de la cámara aislante térmica y realizar el proceso de medida de  $k_e$ . El tiempo total de medida para cada muestra fue de 6 horas, el cual garantizó el estado estable de temperatura, tomando registros de las temperaturas ( $T_1$  y  $T_2$ ), corriente (I) y voltaje (V) a intervalos de 10 segundos, datos que fueron registrados en el computador.



**Figura 3.** Bloques de arcilla Roja: a) bloque No. 5 seis rectangular; b) bloque No. 5 ocho rectangular; c) bloque No. 5 ocho circular, y d) bloque No. 5 mixto.

## 3. Resultados y discusión

En la tabla 1 se presenta la masa ( $m_a$ ) y la densidad promedio ( $\rho_a$ ) medidas para cada tipo de bloque (ver figura 3); se aprecia que el bloque mixto tiene una masa y densidad mayor que los demás tipos de bloques.

Por otra parte, al comparar la densidad de cada tipo de bloque con la densidad de un bloque de arcilla sólido (sin orificios), para el cual se halló un valor

**Tabla 1.** Masa y densidades promedios para cada tipo de bloque.

Tipo de bloques	$m_a$ (kg)	$\rho_a$ ( $\times 10^2$ kg/m <sup>3</sup> )
6 RECT	4,67 $\pm$ 0,05	8,29 $\pm$ 0,21
8 RECT	5,77 $\pm$ 0,06	9,51 $\pm$ 0,29
8 CIR	5,93 $\pm$ 0,06	9,73 $\pm$ 0,33
MIXTO	6,14 $\pm$ 0,06	10,66 $\pm$ 0,26

promedio de  $\rho_r = 2190 \pm 0.02$  kg/m<sup>3</sup>, se observa que esta es superior en un 164,2%, 130,3%, 125% y 105,4%, respectivamente, a las reportadas para los diferentes tipos de bloques (ver tabla 1).

Los promedios para el porcentaje de porosidad (%  $\varepsilon$ ) y la fracción de aire ( $\rho$ ) presente en cada tipo de bloque se reportan en la tabla 2, donde el %  $\varepsilon$  representa el porcentaje total de poros que hay en el material sólido (arcilla), el cual se determinó usando la norma NTC 4321-3. Mientras que  $\sigma$  hace referencia a la fracción total de aire que está contenido en la muestra, factor que se halló usando la expresión (2), donde  $V_p = V_{ar} \times \varepsilon$  representa el volumen de aire debido a la porosidad ( $\varepsilon$ ) presente en fase sólida (arcilla) del bloque, el cual fue hallado del producto del volumen de la fase sólida ( $V_{ar} = m_a / \rho_r$ ) y el %  $\varepsilon$ , y  $V_h$  corresponde al volumen de los huecos u orificios presentes en cada tipo de bloque (ver figura 3), el cual se determinó de la diferencia entre el volumen total ( $V_t$ ) de cada bloque y el volumen de la fase sólida o arcilla ( $V_{ar}$ ) presente en este.

$$\sigma = \frac{V_p + V_h}{V_t} \quad (2)$$

**Tabla 2.** Promedios de los porcentajes de porosidad y fracción de aire para cada tipo de bloque.

Tipo de bloques	$\varepsilon$ (%)	$\sigma$ ( $\times 10^{-1}$ )
6 RECT	11 $\pm$ 0,02	6,63 $\pm$ 0,06
8 RECT	9,73 $\pm$ 0,02	6,08 $\pm$ 0,06
8 CIR	7,38 $\pm$ 0,02	5,89 $\pm$ 0,07
MIXTO	6,24 $\pm$ 0,02	5,43 $\pm$ 0,05

Al comparar los resultados presentes en la tabla 2 con las masas y densidades de cada bloque (ver tabla 1) se observa coherencia, ya que al disminuir el porcentaje de porosidad (%  $\varepsilon$ ) y la fracción de aire ( $\sigma$ ) presente en las muestras se espera un incremento en las masas y las densidades para cada tipo de bloque.

La conductividad térmica efectiva ( $k_e$ ), medida experimentalmente en cada tipo de bloque, para una temperatura promedio de 35 °C, se presenta en la tabla 3.

**Tabla 3.** Conductividad térmica efectiva promedio  $k_e$  a 35 °C, para los diferentes tipos de bloques de arcilla roja.

Tipo de bloques	$k_e$ (W/m °C)
6 RECT	0,37 $\pm$ 0,03
8 RECT	0,38 $\pm$ 0,03
8 CIR	0,43 $\pm$ 0,04
MIXTO	0,44 $\pm$ 0,04

De los datos de la tabla 3 se concluye que el tipo de bloque que tiene la mayor  $k_e$ , corresponde al que tiene mayor densidad y masa (bloque mixto), resultado que es consistente, pues a mayor fase sólida o densidad, mayor transferencia de calor a través del material [1]; de igual forma el tipo de bloque que reporta menor valor de  $k_e$  corresponde al de menor densidad y masa, como era de esperarse.

**Tabla 4.** Conductividad térmica  $k$  reportada para materiales de construcción a temperatura ambiente.

Material	$k$ (W/m °C)
Ladrillo común	0,39-0,67 [10]
Concreto aligerado	0,11-0,25 [11]
Morteros de cemento	0,88-0,94 [11]
Ladrillos para exteriores	0,77 [12]
Ladrillos para interiores	0,56 [12]
Bloques de arcilla	0,391 [13]
Ladrillo macizo	0,7141 [14]

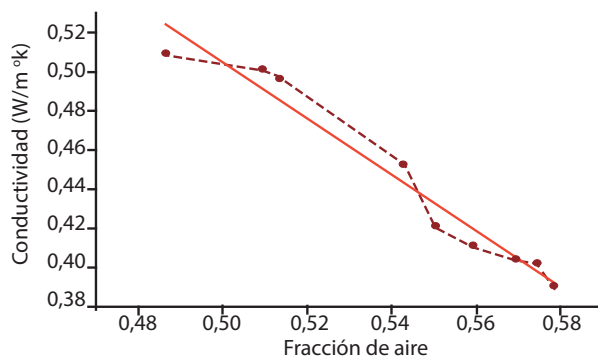
Por otra parte, al comparar los valores de  $k_e$  hallados para los diferentes bloques extruidos de arcilla roja (ver tabla 3) con los reportados para materiales de construcción (ver tabla 4), se aprecia que están en el mismo orden de magnitud y que son similares a los reportados en [13] para bloques de arcilla con espesores de 10,5 cm, y quedan incluidos en los encontrados para el ladrillo común [10]; lo anterior da confianza a los valores hallados en el presente trabajo.

La interpretación de la disminución de  $k_e$  al incrementarse el espacio ocupado por aire en el interior de los bloques se debe a que el aire funciona como una barrera para el flujo de calor debido a su baja conductividad térmica (0,026 W/m °C).

Considerando los bloques de arcilla como un material constituido por dos fases, una sólida (arcilla) y otra aire, se procedió a realizar un ajuste a los datos experimentales encontrados para  $k_e$  en función de la fracción de aire total ( $\sigma$ ) presente en el interior de los bloques (porosidad más aire en los huecos), con el objetivo de estudiar el comportamiento de

$k_e$  en función  $\sigma$ . Para el ajuste de los datos experimentales se usó el software OriginPro 6.1, y como valor de la conductividad térmica de la fase sólida (arcilla), el reportado para el ladrillo macizo extruido (0,7141 W/m °C) [15], y el del aire (0,026 W/m °C) [2]. El ajuste se realizó con base en la ecuación planteada por Deissler R.G. [16] para hallar la conductividad térmica efectiva en sistemas de dos fases (sólido-gas), que fue la que más se ajustó a este caso, encontrándose que el mejor ajuste a los datos experimentales se obtuvo usando la expresión (2):

Donde  $P_1$  y  $P_2$  son parámetros adimensionales que pueden ser atribuidos al tipo de geometría de los huecos en los bloques; con  $k_s$ , la conductividad térmica de la fase sólida (arcilla), y  $k_g$ , la del aire.



**Figura 4.** Ajuste a los datos experimentales de la conductividad térmica en función de la fracción de aire total para los bloques mixtos.

En la figura 4 se presenta el ajuste a los datos experimentales de  $k_e$  en función de  $\sigma$ , para los bloques mixtos, donde la línea sólida representa el mejor ajuste usando la ecuación (2). No se presentan las gráficas para los demás tipos de bloques por ser muy similares. En la tabla 5 se reportan los valores hallados de  $P_1$  y  $P_2$  para cada tipo de bloque.

**Tabla 5.** Parámetros adimensionales para los diferentes tipos de bloques, obtenidos del ajuste a los datos experimentales de  $k_e$  versus porosidad.

Tipo de bloques	$P_1$	$P_2$
6 RECT	$1,29 \pm 0,06$	$3,37 \pm 0,84$
8 RECT	$8,81 \pm 0,76$	$-131,90 \pm 13,5$
8 CIR	$4,23 \pm 0,24$	$-53,10 \pm 4,66$
MIXTO	$1,71 \pm 0,08$	$-8,14 \pm 2,03$

#### 4. Conclusiones

Se reporta por primera vez la conductividad térmica efectiva ( $k_e$ ) a temperatura promedio de 35 °C,

para los bloques de arcilla roja No. 5, fabricados por extrusión en Cúcuta y su área metropolitana, los cuales tienen en su interior huecos u orificios con geometrías rectangulares, circulares y mixtas, variando la cantidad (seis y ocho). Se encontró que los bloques presentan espesor y volumen semejantes, pero masa, densidad, porosidad, volumen de los orificios y fracción de aire variables, características de gran influencia en la determinación de  $k_e$ .

Los bloques mixtos obtuvieron mayores valores en variables como la masa y la densidad, contrario a los bloques con seis orificios rectangulares, que presentaron grandes valores de porosidad y fracción de aire; por tal razón, los bloques con geometría de orificios mixtos, al tener poca porosidad y fracción de aire, registraron el mayor valor de  $k_e$ , y, como era de esperarse, los bloques con seis orificios rectangulares, por tener baja masa y densidad, obtuvieron el valor más bajo de  $k_e$ .

El comportamiento de  $k_e$  en función de la fracción de aire total ( $\sigma$ ) presente en los bloques se ajustó al modelo teórico estudiado por Deissler y Eian [4] para la conducción de calor en sistemas de dos fases (sólido-gas), donde una fue considerada como las arcillas y la otra como el aire presente en la porosidad y en los huecos.

En general, se aprecia que al aumentar la masa y, por ende, la densidad, la conductividad térmica efectiva de los bloques aumentó; así mismo,  $k_e$  disminuyó al incrementarse la porosidad y la fracción de aire presente en el bloque; lo anterior es debido a que el aire actúa como una barrera al flujo de calor. Por otra parte, al comparar los valores hallados de  $k_e$  para estos bloques, con los reportados en la literatura para otros ladrillos y materiales de construcción, se encontró que son del mismo orden de magnitud y muy similares a los reportados por [13] para bloques de arcilla, y que están en el rango de  $k_e$  para los ladrillos comunes.

El valor de  $k_e$  hallado para los bloques No. 5 en este trabajo es de suma importancia para determinar el coeficiente de transmitancia térmica (U-value) en los elementos constructivos, como paredes y placas que usan estos materiales, el cual representa la cantidad de energía que atraviesa, en la unidad de tiempo, una unidad de superficie de un elemento constructivo de caras planas cuando hay un gradiente de temperatura entre estas; coeficiente que es un parámetro

utilizado para el cálculo de los aislamientos y pérdidas energéticas en los diseños de calefacción en una edificación.

### Agradecimientos

Al Fondo de Investigaciones Universitarias FINU-UFPS, por su apoyo económico.

### Referencias

- [1] P. Lertwattanaruk P. and J. Choksiriwanna, "The physical and thermal properties of adobe brick containing bagasse for earth construction". *Built*, vol. 1, no. 1, pp. 53-61, 2011.
- [2] A. Bader and K. Vafai. "Analysis of Variable Porosity, Thermal Dispersion, and Local Thermal Nonequilibrium on Free Surface Flows Through Porous Media", *Journal of Heat Transfer*, vol. 126, pp. 389-399, 2004.
- [3] Y. S. Touloukian, R. W. Powell, C. Y. Ho and P. G. Klemens. "Thermal Conductivity, Thermophysical properties of matter". Volume 2, 1970. IFI/PLENUM. New York.
- [4] L. Sassi, F. Mzali, A. Jemnia and S. B. Nasrallah. "Hot-Wire Method for Measuring Effective Thermal Conductivity of Porous Media". *Journal of Porous Media*, vol. 8, no. 2, pp. 97-113, 2005.
- [5] J. K. Carson, S. J. Lovatt, D. J. Tanner and A. C. Cleland, "Thermal conductivity bounds for isotropic porous materials". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 2150-2158, 2005.
- [6] A. Bouguerra, "Measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 28, no. 8, pp. 1065-1078, 2001.
- [7] T. Log and S. E. Gustafsson, "Transient plane source (TPS) technique for measuring thermal transport properties of building materials". *Fire and Materials*, vol. 19, no. 1, pp. 43-49, 1995.
- [8] T. M. I. Mahlia, B. N. Taufiq, Ismail, H. H. Masjuki, "Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulation materials for building wall". *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 2, pp. 182-187, 2007.
- [9] D. C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*. Segunda edición, México: Limusa Wiley, 2004.
- [10] S. Goodhew & R. Griffiths, "Sustainable earth walls to meet the building regulations". *Energy and Buildings*, vol. 37, pp. 451-459, 2005.
- [11] CIBSE guide A. Section 3.3, 2006.
- [12] V. S. Ramachandran, R. M. Paroli, J. J. Beaudoin and A. H. Delgado, *Handbook of thermal analysis of construction materials*. New York: William Andrew Publishing Norwich, 2002.
- [13] B. Anderson. En ISO 6946:1997, "Building components and building elements –thermal resistance and thermal transmittance– Calculation methods", 2006.
- [14] L. Lira Cortés, O. J. González Rodríguez y E. Méndez Lango, "Medición de la conductividad térmica de algunos materiales utilizados en edificaciones". *Simposio de metrología*, pp. 1-5. México, 2008.
- [15] G. Peña Rodríguez et al., "Conductividad térmica efectiva promedio de polvos de arcillas utilizadas en la industria cerámica del área metropolitana de san José de Cúcuta". *Revista Colombiana de Física*, vol. 40, pp. 278-280, 2008.
- [16] R. G. Deissler and C. S. Eian, *Investigation of effective thermal conductivities of powders*. National Advisory Committee for Aeronautics. Washington, 1952.