

# Efecto de la presión de compactación en las propiedades termofísicas de polvos de arcilla roja elaboradas por atomización.

G. Peña- Rodríguez<sup>1</sup> | V. Julio Useche A<sup>2</sup> | J. Dulcé Moreno<sup>1</sup>

Recibido:  
Mayo 11 de 2010

Aceptado:  
Noviembre 12 de 2010

## Resumen

Se reportan las propiedades termofísicas a temperatura ambiente, de polvos de arcilla rojas elaborados por procesos de atomización (Spray-Dried), en función de la presión de compactación aplicada para un rango entre 50 y 250 kg/cm<sup>2</sup>. La técnica experimental utilizada fue la de flujo lineal transitorio de calor, usando el sistema KD2 Pro. La distribución granulométrica se determinó por tamizado, encontrándose que el tamaño de grano varía entre 75 y 600  $\mu\text{m}$ , donde el 43,6% de la muestra se encuentra en el rango entre 250 y 425  $\mu\text{m}$ , mientras que el 1,8% presenta un tamaño de grano inferior a 75  $\mu\text{m}$ . El porcentaje de humedad presente en la muestra durante el proceso de compactación fue entre el 6 y el 7%. La compactación de la muestra se realizó usando prensa hidráulica y un molde cilíndrico de acero con diámetro interior 44,45 mm (1 $\frac{3}{4}$ "), diámetro exterior 57,15 mm (2 $\frac{1}{4}$ " ) y una altura de 203,2 mm (8"). Los parámetros térmicos medidos experimentalmente, fueron la conductividad térmica ( $k$ ) y la difusividad térmica ( $\alpha$ ), mientras que la efusividad térmica ( $\epsilon$ ) y el calor específico por unidad de volumen ( $\rho c$ ), se calcularon usando los valores de  $k$  y  $\alpha$  y las expresiones

$$\epsilon = \frac{k}{\sqrt{\alpha}} \text{ y } \rho \cdot c = \frac{k}{\alpha}.$$

El comportamiento de la propiedad térmica, en función de la presión de compactación ( $p$ ), se analizó mediante el ajuste a los datos experimentales usando el software Origin Pro Ver. 7.0. Analizando el comportamiento de la densidad en función de la presión, se encontró que la presión aparente de cadencia fue  $p_0 = 153 \text{ Kg/cm}^2 = 15 \text{ Mpa}$ , es decir que para el rango de presiones entre 50 y 150 Kg/cm<sup>2</sup>, los gránulos en la muestra se deforma elásticamente, sin que exista fractura en éstos, pero que a partir de  $p_0$  los gránulos inician el proceso de deformación o fractura, reduciendo el volumen de los grandes intersticios o la porosidad intergranular. Los resultados reportados en este trabajo, serán utilizados en la optimización de los procesos de producción en las empresa Cerámicas.

**Palabras clave:** presión de compactación, propiedades termofísicas, arcillas por spray dried

<sup>1</sup>Centro de Investigación en Materiales Cerámicos, Departamento de Física –UFPS. AA: 1055 Cúcuta- Colombia. ggabrielp@yahoo.com

<sup>2</sup>Departamento de Física –UFPS. Plan de estudios de Maestría en Física Universidad de Pamplona.

## Abstract

Thermophysical properties are reported at room temperature in function of the compaction pressure applied to range between 50 and 250 kg/cm<sup>2</sup> for samples of red clay powder produced by atomization processes (Spray-Dried). The experimental technique used was linear transient heat flow using the KD2 Pro system. Size distribution was determined by sieving, found that the grain size varies between 75 and 600  $\mu\text{m}$ , where 43.6 % of the sample is in the range between 250 and 425  $\mu\text{m}$ , while 1.8% has a grain size less than 75 micrometers. The percentage of moisture present in the sample during the compaction process was between 6 and 7%. The compaction of the sample was performed using a hydraulic press and a steel cylindrical die with internal diameter of 44.45 mm (1  $\frac{3}{4}$ "), outer diameter 57.15 mm (2  $\frac{1}{4}$ ") and a height of 203.2 mm (8"). The thermophysical parameters measured experimentally were thermal conductivity ( $k$ ) and thermal diffusivity ( $\alpha$ ), while the thermal effusivity ( $\epsilon$ ) and the specific heat per unit volume ( $\rho c$ ) were calculated using the values of  $\alpha$  and  $k$  using  $\rho c = k\alpha^{-1}$  and  $\epsilon = k\alpha^{-1/2}$  expressions. The behaviour of the thermal properties as a function of the compacting pressure ( $p$ ) was analyzed by fitting to experimental data using the Origin Pro Ver 7.0. software. The analysis of the density as a function of the pressure, reported the apparent pressure  $p_o = 153 \text{ Kg/cm}^2 = 15 \text{ MPa}$ , this pressure to describe the boundary between the plastic and elastic deformation of the particles. The results reported in this paper will be used in the optimization of production processes in the ceramic industries.

**Keywords:** compaction pressure, thermophysical properties, spray-dried clays.

## Introducción

Norte de Santander, es una región que se caracteriza por sus grandes reservas de arcillas de excelente calidad, la cual es utilizada por los industriales de la región en la elaboración de productos cerámicos como tejas, ladrillos, tabletas y baldosas cerámicas para piso y pared.

La compactación de una muestra de arcilla en polvo, puede ser definida como la aplicación de energía mecánica a ésta, provocando reacomodo de sus partículas sólidas, resultando un rápido incremento de su densidad [1]. Este proceso comprende la reducción de volumen total por la expulsión

de aire que ocupa los poros, manteniendo la cantidad de agua constante; lográndose así, un aumento en la resistencia, rigidez, mejora en la estabilidad volumétrica y una disminución de la permeabilidad de la muestra [2].

La compactación en una muestra en polvo, tiene gran influencia en las propiedades físicas y mecánicas, por ejemplo si se mantiene constante la energía de compactación y se varía el contenido de humedad, se obtienen diferentes valores de peso unitario seco, la variación del peso unitario en función de la humedad, permite analizar la forma en que se disponen las partículas durante la compactación. Para bajas humedades de compactación, el agua está en forma

## Efecto de la presión de compactación en las propiedades termofísicas de polvos de arcilla roja elaboradas por atomización.

capilar produciendo compresiones entre las partículas constituyentes de la arcilla, lo cual tiende a la formación de grumos difícilmente desintegrables que dificultan la compactación. A medida que se agrega agua, las partículas se recubren con agua libre, generan presión neutra local y se desplazan relativamente para formar una estructura más compacta, con peso unitario seco mayor [2]. La permeabilidad, varía con la porosidad, el grado de saturación y su estructura. La más alta se obtiene cuando se compacta con humedades por debajo de la óptima, disminuyendo al aumentar la concentración de agua, por otra parte la estabilidad volumétrica varía presentándose hinchamiento debido a la absorción de agua. Lo contrario ocurre al compactar con humedades superiores a la óptima, presentándose contracción en los procesos de secado, generando fractura en los productos terminados [2].

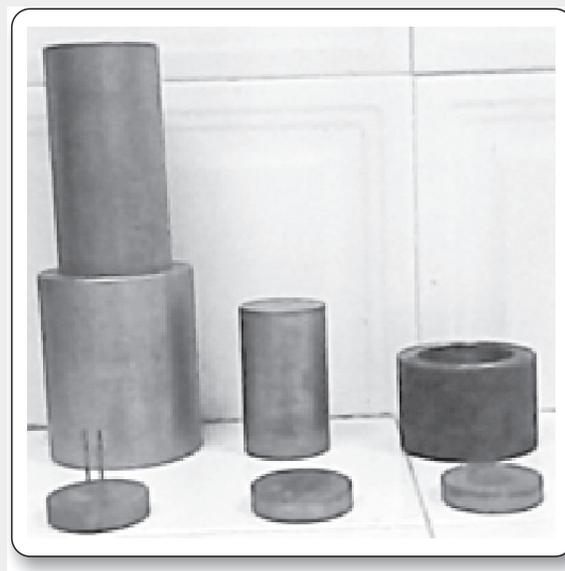
El conocimiento de las propiedades físicas, químicas y estructurales de los materiales en forma granular posee una importancia especial a nivel industrial debido a su amplio campo de aplicación en la ingeniería y tecnología moderna. En particular, para el caso de las propiedades térmicas en función de su tamaño de grano, composición química y presión de compactación son muy poco reportadas [3].

En este trabajo, se reportan las propiedades termofísicas a temperatura ambiente, de polvos de arcilla rojas elaborados por procesos de atomización (Spray-Dried) utilizadas por la empresa Cerámica Italia S. A., en función de la presión de compactación aplicada para un rango entre 50 y 250 kg/cm<sup>2</sup>.

## Materiales y métodos

Una vez obtenida la muestra, se procedió a conocer su distribución granulométrica, la cual se realizó por tamizado usando la norma ASTM D422-07 [4], lo anterior se llevo a cabo usando la serie de tamices No. 30, 40, 60, 80, 100, 120, 200 y el vibrotamiz marca Gabrielli®.

**Figura 1.** Proceso de compactación de a muestra. (a) Molde de acero inoxidable y sus accesorios, (b) sistema manual de compactación.



(a)



(b)

Para el proceso de compactación, la muestra se dejó airear a temperatura ambiente, reportando una humedad de 1.49% aproximadamente. Se usaron 300 g de muestra y se mezcló con agua destilada, agregándola con un atomizador, hasta alcanzar el contenido de agua en un rango de 6 a 7% valor utilizado por la empresa para la compactación de sus productos. La homogenización se realizó manualmente, retirando los grumos mayores de 2 mm por cribado con la malla N<sup>o</sup> 10,

luego la mezcla se colocó en bolsas de plástico selladas para permitir la distribución uniforme de agua. Para el proceso de compactación se utilizó un molde de acero inoxidable con diámetro interior 44,45 mm (1¾”), diámetro exterior 57,15 mm (2¼”) y altura de 203,2 mm (8”) (ver figura 1 (a)). El procedimiento usado en la compactación de la muestra fue el siguiente: se colocó en el fondo del cilindro el disco con las dos agujas, las cuales tienen la longitud y diámetro de la sonda del sistema KD2 Pro, con el cual se miden las propiedades térmicas. Luego se depositaron los primeros 100 g aproximadamente de muestra dentro del molde, se aplicó vibración mecánica por un tiempo aproximado de un minuto, posteriormente se agregan otros 100 g de muestra y se repite el proceso hasta que el molde quede totalmente lleno (aproximadamente 300 g de muestra). El paso siguiente es colocar el otro disco cilíndrico en la parte superior del molde, de forma tal que selle la muestra. Una vez lista la muestra en la probeta o molde cilíndrico, se usa el equipo manual de compactación (ver figura 1 (b)), donde se le aplica la carga o presión de compactación (50 a 250 Kg/cm²). Una vez compactada la muestra se retira el disco que tiene las dos agujas, y se introduce la sonda del sistema KD2 Pro (ver figura 2 (a)), para iniciar el proceso de medida de las propiedades termofísicas. Las muestras compactadas y desmoldadas se pueden observar en la figura 2 (b).



(b)

La técnica experimental utilizada para la determinación de los parámetros térmicos fue la de flujo lineal transitorio de calor, que es la utilizada por el sensor SH-2 del sistema KD2-Pro, como se puede observar en la figura 2 (a); la cual consiste en dos agujas de acero inoxidable de 3 mm de longitud y 1,4 mm de diámetro separadas 6 mm, una que funciona como fuente de calor y la otra como sensor de temperatura, dicho sensor cumple con las especificaciones de la norma IEEE 442-1981 [5] y ASTM D5334-00 [6]. La determinación de los parámetros termofísicos, usando este sistema está basada en el análisis de los perfiles de temperatura en función del tiempo, los cuales están gobernados por la solución de la ecuación de difusión de calor, que en coordenadas cilíndricas se describen por la expresión (1) [7]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + r^{-1} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

Donde T es la temperatura (°C), t es el tiempo (s),  $\alpha$  es la difusividad térmica (m².s⁻¹) y r es la distancia (m) entre la fuente y el sensor. La solución de la ecuación anterior está dada por expresión (2) [8]:

$$T - T_0 = \left( \frac{q}{4\pi.k} \right) E_i \left( -\frac{r}{4\alpha.t} \right), \quad (2)$$

Donde  $T_0$  es la temperatura inicial, q es la cantidad de calor producida por unidad de longitud y unidad de tiempo (W.m⁻¹), k es la conductividad térmica del medio (W.m⁻¹.C⁻¹)

Figura 2. (a) Sistema KD2 Pro, (b) Muestras compactadas



(a)

y  $E_i$  es la función exponencial integral, dada por la ecuación (3)

$$-E_i(-a) = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{a}\right) \exp(-u) du = -\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) + \left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) - \left(\frac{r^2}{8\alpha t}\right)^2 + \dots \quad (3)$$

Con  $a = r^2/4\alpha t$  y  $\gamma$  es la constante de Euler (0.5772...). Para valores grandes de  $t$ , los términos de orden superior pueden ser ignorados, luego, combinando las ecuaciones (2) y (3) se obtiene la expresión:

$$T(r, t) \cong T_0 + \frac{q}{4\pi k} \left( \ln(t) - \gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \right) \quad (4)$$

La ecuación (4), representa la temperatura en función del tiempo para una posición ( $r$ ) finita entre la fuente de calor y el sensor de temperatura, la cual depende de los parámetros termofísicos ( $k$ ,  $\alpha$ ) de la muestra. La conductividad térmica ( $k$ ), se determina a partir de la pendiente ( $m = (q/4\pi k)$ ) del comportamiento de  $\Delta T = T(r, t) - T_0$  en función del logaritmo natural del tiempo ( $\ln(t)$ ).

La difusividad térmica ( $\alpha$ ) se obtiene de la ecuación (4), encontrándose un tiempo  $t_0$  para el cual  $\Delta T = 0$ , es decir registrando la intersección de la regresión lineal de  $\Delta T$  en función del  $\ln(t)$  dando la ecuación (5) de la cual se despeja  $\alpha$

$$\ln(t_0) = \gamma + \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha t_0}\right) \quad (5)$$

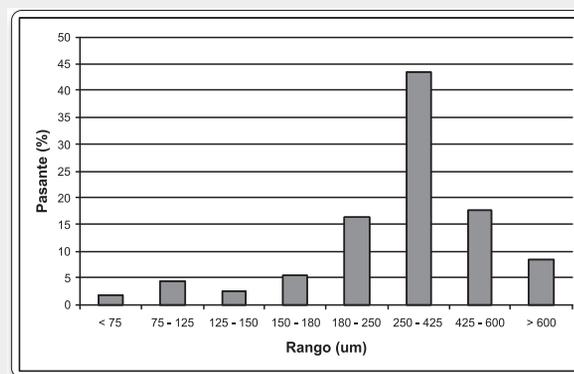
Utilizando los aspectos teóricos descritos, que son los utilizados por el sistema KD2 Pro a través del sensor dual SH-2, se procedió a medir los parámetros termofísicos, a las muestras de polvos elaborados por atomización (spray dried) y suministrados por la empresa Cerámica Italia S.A. Lo anterior se realizó a la muestra tal y como fue suministrada por la empresa (sin tamizar), variando las presiones de compactación en 50, 100, 150, 200 y 250 Kg/cm<sup>2</sup>. Es importante aclarar, que los parámetros térmicos medidos experimentalmente, son la conductividad térmica ( $k$ ) y la difusividad térmica ( $\alpha$ ), mientras que la efusividad térmica ( $\varepsilon$ ) y el calor específico por unidad de volumen ( $\rho c$ ), se calcularon usando los

valores de  $k$ ,  $\alpha$  y las expresiones  $\varepsilon = \frac{k}{\sqrt{\alpha}}$  y  $\rho c = \frac{k}{\alpha}$  respectivamente.

## Resultados y discusión

En la figura 3, se presentan los resultados obtenidos de la distribución granulométrica de las muestras de polvos de arcillas. En ésta se aprecia que el tamaño de grano de los polvos de arcilla varía entre 75 y 600  $\mu m$ , donde el 43,6 % de la muestra se encuentra en el rango entre 250 y 425  $\mu m$ , mientras que el 1,8 % de la muestra presenta un tamaño de grano inferior a 75  $\mu m$ .

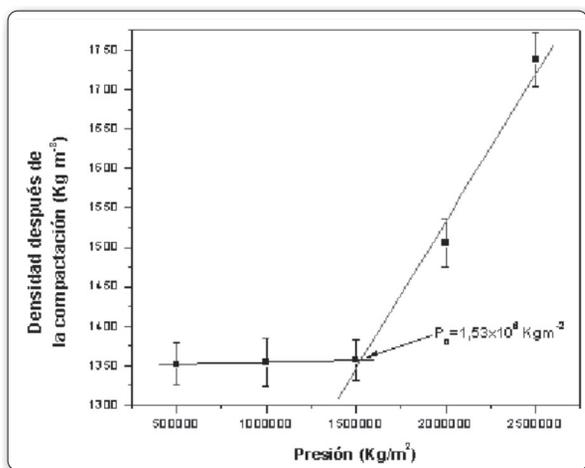
Figura 3. Distribución granulométrica de la muestra de polvos de arcilla elaborada por atomización (Spray Dried), utilizada por la empresa Cerámica Italia S.A.



El estudio de la densidad de la muestra, en función de la presión de compactación para el rango estudiado (50 a 250 kg/cm<sup>2</sup>), se presenta en la figura 4, en ésta se observa el comportamiento típico descrito por Reed J.S.[9], para materiales granulares sometidos a cargas de compactación, donde se aprecia un comportamiento lineal suave para las presiones entre 50 y 150 kg/cm<sup>2</sup>, el cual corresponde al reordenamiento de los gránulos a bajas presiones, sin que exista fractura o deformación de éstos, ocasionando un pequeño aumento en la densidad de la muestra, y que a partir de cierta presión ( $p_0 = 1,53 \times 10^6$  Kg m<sup>-2</sup>), se observa un cambio brusco en la pendiente del ajuste lineal, que corresponde a la presión a partir de la cual los gránulos inician su deformación o fractura, trayendo como consecuencia una disminución en la porosidad intergranular y un incremento en la densidad de la muestra. De lo anterior se concluye que para el rango de presiones entre 50 y 150 Kg/cm<sup>2</sup>, los gránulos en la muestra se deforman elásticamente, sin

que exista fractura en éstos, pero que a partir de  $p_o=153 \text{ Kg/cm}^2=15 \text{ Mpa}$ , los gránulos inician el proceso de deformación o fractura, reduciendo el volumen de los grandes intersticios o la porosidad intergranular, a lo se le conoce como la presión aparente de cedencia, y corresponde al punto de intersección entre las dos rectas tal y como se observa en la figura 4.

**Figura 4.** Densidad en función de la presión de compactación. Las líneas sólidas corresponden al mejor ajuste lineal a los datos experimentales usando el software Origin Pro. Ver. 7.0



Según el comportamiento de la densidad en función de la presión de compactación (ver figura 4), se aprecia que la densidad aumenta al incrementarse la presión, y por ende disminuye la cantidad de aire presente en la muestra, y como es ampliamente conocido, el aire actúa como una barrera al flujo del

calor [10-13], de lo anterior se infiere que el comportamiento de las propiedades térmicas para una temperatura constante, debe también incrementarse al aumentar la presión. Dicho incremento tendrá un límite de saturación, el que corresponda a la muestra cuando no tenga en su interior porosidad o aire, es decir, las propiedades térmicas para una temperatura constante aumentarán a medida que se incrementa la presión de compactación.

En la tabla 1, se reportan los valores medidos experimentalmente de la conductividad ( $k$ ) y difusividad ( $\alpha$ ) térmica, y los calculados calor específico por unidad de volumen ( $\rho c$ ) y efusividad térmica ( $\epsilon$ ) de la muestra, para una temperatura promedio entre 27 y 29 °C y una presión de compactación de 50, 100, 150, 200 y 250 Kg/cm².

En las figuras 5 y 6 se presentan los comportamientos de los parámetros determinados experimentalmente ( $k$  y  $\alpha$ ), en función de la presión ( $p$ ) de compactación, para el rango entre 50 y 250 kg/cm². De las gráficas anteriores, se infiere que los parámetros térmicos ( $k$ ,  $\alpha$ ) aumentan al incrementarse la presión de compactación. Dicho aumento para una temperatura constante, supone un límite de saturación, es decir que para cuando la presión sea muy grande, los parámetros térmicos deben corresponder a la muestra sólida, o sea sin porosidad. Por lo anterior se realizó un ajuste a los datos experimentales, utilizando una función logística de crecimiento

**Tabla 1.** Conductividad ( $k$ ), calor específico por unidad de volumen ( $\rho c$ ), difusividad ( $\alpha$ ) y efusividad térmica ( $\epsilon$ ) de la muestra para una temperatura promedio entre 27 y 29 °C y presión de compactación entre 50 y 250 kg/cm².

Presión (Kg/m²)x10 <sup>4</sup>	k Promedio W/m.K	$\rho c$ Promedio (J/m³.K)x10 <sup>6</sup>	$\alpha$ Promedio (m²/s)x10 <sup>7</sup>	$\epsilon$ Promedio J/m².k.s <sup>1/2</sup>	T Promedio °C	wt %	$\rho$ Desp. Compact. Kg/m³
50	0,3415±0,0117	1,2885±0,0151	2,6504±0,0064	663,3382±7,9191	28,22±0,45	6,34±0,10	1352±27
100	0,3525±0,0130	1,2996±0,0169	2,7123±0,0117	676,8466±8,7990	27,04±0,83	6,38±0,10	1354±30
150	0,3705±0,0163	1,3279±0,0216	2,7902±0,0072	701,4077±11,4329	26,78±0,79	6,41±0,10	1357±26
200	0,4110±0,0163	1,3585±0,0221	3,0254±0,0092	747,2233±12,1797	27,12±0,11	6,09±0,10	1506±30
250	0,4710±0,0120	1,4489±0,0174	3,2506±0,0064	826,1124±9,9133	29,02±0,29	6,08±0,10	1738±34

Efecto de la presión de compactación en las propiedades termofísicas de polvos de arcilla roja elaboradas por atomización.

con límite de saturación dada por la expresión (6) [14].

$$y(p) = \frac{(A_1 - A_2)}{[1 + (p/x_0)^n]} + A_2 \quad (6)$$

Donde:  $A_1$  corresponde al valor de la propiedad térmica a la presión inicial de 50 kg/cm<sup>2</sup>;  $A_2$  corresponderá al valor de la propiedad térmica a una presión muy grande ( $p \gg$ ), es decir el valor máximo o de saturación, el cual ocurrirá cuando ya no exista aire en el interior de la muestra, o sea para la muestra sólida;  $x_0$  corresponde al punto donde se produce el cambio de curvatura y  $n$  es la razón de crecimiento.

De los valores calculados para  $\rho c$  y  $\varepsilon$  (ver tabla 1), se aprecia que éstos también aumentan al incrementarse la presión de compactación, no se presentan las gráficas pues su comportamiento es similar al de  $k$  y  $\alpha$ .

Figura 5. Conductividad térmica efectiva en función de la presión de compactación. La línea sólida, representa el mejor ajuste a los datos experimentales usando la ecuación (6) y el software Origin Pro Ver. 7.0

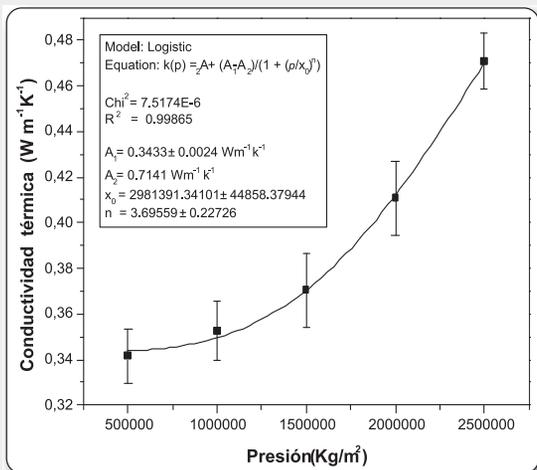
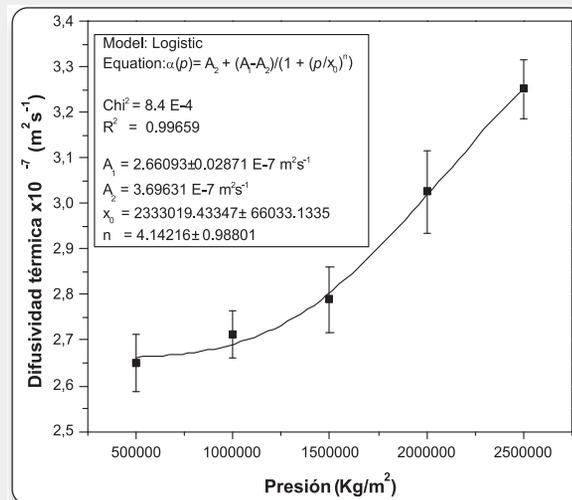


Figura 6. Difusividad térmica efectiva en función de la presión de compactación. La línea sólida, representa el mejor ajuste a los datos experimentales usando la ecuación (6) y el software Origin Pro Ver. 7.0



El mejor ajuste a los datos experimentales usando la ecuación (8), fue realizado usando el software Origin Pro Versión 7.0, y corresponde a la línea sólida en cada gráfica. En la tabla 2, se presentan los valores de  $A_1$  y  $A_2$  obtenidos para cada parámetro termofísico, los cuales se obtuvieron del ajuste. Es importante observar, que la desviación cuadrática media ( $\chi^2$ ) es inferior a  $10^{-3}$  en todos los ajustes y que el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) es prácticamente la unidad, lo anterior da confiabilidad y seguridad a los valores obtenidos y reportados.

Al comparar los valores de  $A_1$  reportados en la tabla 2, con los valores experimentales hallados en la tabla 1, se observan que son prácticamente iguales a los valores de  $k$ ,  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  y  $\rho c$  para la presión inicial de 50 kg/cm<sup>2</sup>.

Tabla 2. Parámetros  $A_1$  y  $A_2$ , para cada propiedad térmica, obtenidos del ajuste a los datos experimentales usando la ecuación (6).

Parámetros de ajuste	Conductividad Térmica ( $k$ )	Difusividad Térmica ( $\alpha$ )	Calor específico por Unidad de volumen ( $\rho c$ )	Efusividad térmica ( $\varepsilon$ )
	$Wm^{-1}K^{-1}$	$(m^2s^{-1}) \times 10^{-7}$	$(J/m^3.K) \times 10^6$	$J/m^2.K.s^{1/2}$
$A_1$	0,343	2,661	1,293	665.930
$A_2$	0,714	3,696	1,932	1174.559

De los valores reportados en la tabla 2 para  $A_2$ , los cuales corresponderán a los valores de los parámetros termofísicos, de la muestra sometida a presiones muy grandes ( $p \gg$ ), se encontró que  $A_2 = 0,714 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  para  $k$ , es prácticamente igual al reportado por Mayra Gómez y Yesid Peña [15], en muestras de arcilla con densidad de  $2190 \text{ kgm}^{-3}$ . Al comparar el valor de  $A_2 = 3,696 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , para la difusividad térmica, con el reportado por G. Peña y otros [3] ( $\alpha = 3,87 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ), para muestras de arcillas sometidas a presión de  $1700 \text{ kg/cm}^2$  usando técnica fotoacústica, se encuentra que son similares. Usando los valores de  $A_2$  para  $k$  y  $\alpha$ , se determinaron los valores de  $\varepsilon = k\alpha^{-1/2}$  y  $\rho c = k\alpha^{-1}$ , los cuales concuerdan con los reportados en la tabla 2 para éstos mismos parámetros. Lo anterior da seguridad y confianza a los datos reportados (valores de  $A_2$  en la tabla 2), para los valores de las propiedades térmicas a presiones muy grandes.

## Conclusiones

La muestra reportó una distribución de tamaño de partícula que varía entre  $75$  y  $600 \mu\text{m}$ , donde el  $43,6 \%$  de la muestra se encuentra en el rango entre  $250$  y  $425 \mu\text{m}$ , mientras que el  $1,8 \%$  de la muestra presenta un tamaño de grano inferior a  $75 \mu\text{m}$ . Del análisis de la densidad de compactación para el rango de presiones entre  $50$  y  $150 \text{ Kg/cm}^2$ , se encontró que ésta aumenta al incrementarse la presión, disminuyendo la cantidad de aire presente en la muestra, obteniéndose un aumento en la rigidez y una disminución de la permeabilidad de la muestra, de lo anterior se deduce que el comportamiento de las propiedades térmicas para una temperatura constante, debe también incrementarse al aumentar la presión de compactación. Por otra parte se halló que las partículas en la muestra se deforman elásticamente hasta la presión  $p_o = 153 \text{ Kg/cm}^2 = 15 \text{ Mpa}$ ; para presiones superiores a ésta, las partículas inician el proceso de deformación o fractura, reduciendo el volumen de los grandes intersticios o la porosidad intergranular.

Se determinó los parámetros termofísicos ( $k$ ,  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  y  $\rho c$ ) a temperatura ambiente ( $27$  a  $29 \text{ }^\circ\text{C}$ ), en función de la presión de compactación para el rango entre  $50$  y  $250 \text{ kg/cm}^2$ , encontrándose que dichos parámetros aumentan al incrementarse la presión. Del ajuste a los datos experimentales usando la expresión (8), se determinó los valores de las propiedades térmicas anteriores, para presiones muy grandes ( $p \gg$ ), hallándose para  $k$ ,  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  y  $\rho c$  valores de  $0,714 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;  $3,696 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ;  $1174.559 \text{ J/m}^2\text{K}\cdot\text{s}^{1/2}$  y  $1,932 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$  respectivamente.

## Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones en Materiales Cerámicos (CIMAC) de la Universidad Francisco de Paula Santander, por su colaboración en el préstamo de los equipos y laboratorios. A Edison Uriel Rivas González por su colaboración en la preparación de las muestras. A Cerámica Italia S.A, por el suministro de las muestras

## Bibliografía

- [1] JUÁREZ, E. y RICO, A. Fundamentos de la mecánica de suelos, Tomo I, México: Limusa Noriega Editores. 2000. p. 575-561
- [2] SCHWARTZA, M. O.; TRAVSSOS RIOS TOMÉA, J. A. y LIRAB, B. B. Avaliação da adição de vermiculita na secagem de massa cerâmica através da curva de Bigot. En: Revista Cerâmica Industrial. 2005. Vol. 10, N<sup>o</sup> 1. p. 28-30.
- [3] G. Peña-Rodríguez, J. Dulcé Moreno, M. Corzo Paredes, N. Peñaranda Tozcano y A. Calderón. Determinación experimental de la difusividad térmica en polvos de arcillas usando técnica fotoacústica. Revista Colombiana de

- Física. Vol. 38, No. 4, 2006. pp 1443-1446.
- [4] ASTM D422-63 (2007) "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils", 2007 ASTM Standards, Vol. 04.08, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA
- [5] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements. Piscataway (Estados Unidos): 1981 (IEEE 442-1981)
- [6] ASTM D5334 (2000) "Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure", 2001 ASTM Standards, Vol. 04.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA
- [7] H. S. Carslaw and J. C. Jeager, Conduction of heat in solids. Second edition. Clarendon press-Oxford, New York, 2000.
- [8] A. Fontana, J. Wacker, B. Campbell, S. Colin and G. Campbell, "Simultaneous Thermal Conductivity, Thermal Resistivity, and Thermal Diffusivity Measurement of Selected Food and Soils"; Annual international Meeting Sponsors by ASAE, 2001, p. 1-7
- [9] REED. J.S. Principles of ceramic processing. New York: Editorial John Wiley and Sons, Inc., Segunda Edición. 1995. p. 425-433.
- [10] FONTES VIEIRA, Carlos Mauricio; SALES FEITOSA, Hygina y NEVES MONTEIRO, Sergio. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot. En: Revista Cerámica Industrial. 2003. Vol.8, Nº 1. p. 42-46.
- [11] FUENTES RAMIREZ, R.; MEJIA ORDAZ, O. y DELAROSA ALVAREZ, M. G. Evaluación de mezclas de arcillas de la región de Guanajuato. En: Acta universitaria. Diciembre 2008. Vol. 18, Nº 3. p. 20-26.
- [12] Gabriel Peña Rodríguez, Jaime Dulce Moreno y Emilio Vera. 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, No. 2, Julio 2008.
- [13] BAREA, R. et al. Equipo comparativo para la medida de conductividad térmica de materiales cerámicos. En: Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio. 2006. Vol. 45, Nº 2, p. 80-86.
- [14] AUKI, Dragan and SCITOVSKI, Rudolf. The existence of optimal parameters of the generalized logistic function. En: Applied Mathematics and Computation. 1996. Vol. 77, Issues 2-3, p. 281-294.
- [15] GÓMEZ, Mayra y PEÑA, Yesid. Tesis de pregrado. Determinación experimental de la conductividad térmica en bloques de arcilla Nº 5. Universidad Francisco de Paula Santander. Plan de Estudios de Ingeniería Mecánica. San José de Cúcuta. 2009.