

RECIBIDO EL 6 DE ABRIL DE 2021 - ACEPTADO EL 8 DE JULIO DE 2021

INCIDENCIA DE LA POROSIDAD EN LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE UNA MUESTRA TAMIZADA Y COMPACTADA A PRESIÓN CONSTANTE

INCIDENCE OF POROSITY ON THE THERMAL PROPERTIES OF A SAMPLE SIEVED AND COMPACTED AT CONSTANT PRESSURE

Víctor Julio Useche Arciniegas¹

Rosa Virginia Hernández²

Luis Fernando Mariño³

Universidad Francisco de Paula Santander

Colombia

RESUMEN

El conocimiento de las propiedades térmicas de los materiales en forma granular juega un papel importante tanto en la industria como

en la ciencia de los materiales, debido a sus aplicaciones y riesgos que pueden traer a las personas en los diferentes procesos industriales de producción. En la industria cerámica se trabaja muy poco en el conocimiento de las propiedades térmicas -conductividad térmica (K), difusividad térmica (α), efusividad térmica (ϵ) y calor específico por unidad de volumen (C)- en función de la porosidad o tamaño de grano. El presente trabajo se sitúa dentro del tipo de investigación exploratoria aplicada, el cual pretende determinar las propiedades termofísicas (k , α , ϵ , C) a temperatura ambiente, de muestras de polvos de arcillas

¹ Magister en Física. Ingeniero Civil. Profesor adscrito al Departamento de Física de la Universidad Francisco de Paula Santander (Cúcuta). Correo: victorjulioua@ufps.edu.co. Orcid: /orcid.org/0000-0003-0635-6676

² Magister en Educación Matemática. Licenciada en Matemáticas y Computación. Profesora adscrita al Departamento de Matemáticas y Estadística de la Universidad Francisco de Paula Santander (Cúcuta). Correo: rosavirginia@ufps.edu.co. Orcid: /orcid.org/0000-0002-2638-671X

³ Doctor en Educación Matemática. Licenciado en Matemáticas y Computación. Profesor adscrito al Departamento de Matemáticas y Estadística de la Universidad Francisco de Paula Santander (Cúcuta). Correo: fernandoml@ufps.edu.co. Orcid: https://orcid.org/0000-0002-3438-6963

rojas fabricadas por procesos de atomización (spray dried), en función de variables como la distribución de tamaño de partícula, porosidad y presión de compactación. Para determinar la distribución granulométrica se utilizó el vibrotamiz marca Gabrielli®, el cual se dejó vibrando durante un tiempo de cinco minutos, con el fin de conocer el polvo de arcilla pasante en cada malla y retenido en la siguiente. El proceso de compactación se realizó a través de un equipo manual, donde a la muestra se le aplica una carga o presión constante de 200 kg/cm². Las propiedades -conductividad térmica (K) y difusividad térmica (α)- fueron medidas a través del sensor dual *SH-1* perteneciente al dispositivo *KD2 Pro*, las otras dos propiedades -efusividad térmica (ε) y el calor específico por unidad de volumen (C)- se calcularon usando los valores de K y α , y las expresiones

$$\varepsilon = \frac{K}{\sqrt{\alpha}} \quad \text{y} \quad C = \frac{K}{\alpha} \quad \text{respectivamente.}$$

Las propiedades térmicas (k , α , ε y C) de la muestra tamizada, compactada a presión constante de 200 Kg/cm² en función del tamaño del grano o la porosidad relativa, disminuyen al aumentar el tamaño de grano y su porosidad relativa; observándose la reducción del índice de vacíos,

PALABRAS CLAVE

arcilla atomizada, presión de compactación, porosidad, propiedades térmicas, tamaño de grano.

ABSTRACT

The knowledge of the thermal properties of materials in granular form plays an important role both in industry and in materials science, due to their applications and risks that can bring people into different industrial production processes. In the ceramics industry very little work is done on the knowledge of thermal properties - thermal conductivity (K), thermal diffusivity (α), thermal

effusivity (ε) and specific heat per unit volume (C)- depending on porosity or grain size. The present work is located within the type of applied exploratory research, which aims to determine the thermophysical properties (k , α , ε , C) at room temperature, of samples of red clay powders manufactured by spray dried processes, depending on variables such as the distribution of particle size, porosity and compaction pressure. To determine the granulometric distribution was used the vibrotamiz mark Gabrielli® which was left vibrating for a time of five minutes, in order to know the clay powder through in each mesh and retained in the next. The compaction process was carried out through a manual equipment, where the sample is applied a constant load or pressure of 200 kg / cm². The properties -thermal conductivity (K) and thermal diffusivity (α)- were measured through the *sh-1* dual sensor belonging to the *KD2 Pro* device, the other two properties -thermal effusivity (ε) and the specific heat per unit volume (C)- were calculated using the values of K and α , and the expressions y

$$\varepsilon = \frac{K}{\sqrt{\alpha}} \quad \text{respectively.} \quad C = \frac{K}{\alpha} \quad \text{The thermal}$$

properties (k , α , ε and C) of the sieved sample, compacted at constant pressure of 200 kg/cm² depending on the size of the grain or the relative porosity, decrease with increasing the grain size and its relative porosity; the reduction in the vacuum index is observed,

KEYWORDS:

atomized clay, compaction pressure, porosity, thermal properties, grainsize.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito industrial y en la ciencia de los materiales es importante conocer la estructura y propiedades de éstos; y una de esas propiedades son las térmicas, las cuales determinan el desempeño de los materiales frente al incremento de la temperatura; en otras palabras,

es la respuesta de un material a la aplicación de calor. Las propiedades térmicas -conductividad térmica, difusividad y efusividad térmica, calor específico por unidad de volumen- son propiedades fundamentales de los materiales; donde dos de ellas -conductividad térmica y el calor específico por unidad de volumen- se utilizan en la ecuación de conducción de calor de Fourier:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = F$$

donde ρc es el calor específico por unidad de volumen; T es la temperatura en un punto del material sólido con coordenadas x , y , z ; t es el tiempo; K es la conductividad térmica del material y F es una función de las fuentes de calor (Popov, Beardsmore, Clauser, y Roy, 2016).

El coeficiente de conductividad térmica (K), es una medida de la velocidad a la que el calor fluye a través de un material (Ramakrishnan, Bharti, Nithya, Kusuma, y Singh, 2012), y se expresa

$$\text{como } K = \frac{Q \cdot \Delta x}{A \cdot \Delta T}, \text{ donde } K$$

es la conductividad térmica ($W/m \text{ } ^\circ K$), Q es el flujo de calor (W), Δx es el espesor de la muestra (m), A es el área de sección transversal de la superficie conductora (m^2) y ΔT es la diferencia de temperatura en estado estable ($^\circ K$). Hoy en día, conocer el comportamiento de la conductividad térmica de los elementos usados en la construcción, en la cerámica, en el vidrio, entre otros; es de suma importancia para la selección de los materiales en el diseño bioclimático.

Según Bird, Stewart, y Lightfoot (2002), la determinación experimental de la conductividad térmica de los sólidos depende de diversos factores que a veces son difíciles de medir. La conductividad térmica de distintos materiales depende de su estructura atómica interna (Holman, 1998); del contenido de agua y aire

(Clauser y Huenges, 1995; Bristow, 1998); de la humedad y la porosidad del material (Zhang y Wang, 2017). Un aumento en el tamaño de los poros implica una reducción significativa de la conductividad térmica del material (Vincent, Silvain, Heintz, y Chandra, 2012); lo anterior ocurre, porque los poros pueden ser ocupados por gases (aire) o porque los poros se llenan de fluidos (Ariza, Aguirre, Quesada, Abril, y García, 2016), los cuales actúan como barreras al flujo de calor.

En materiales con alta conductividad térmica, la transferencia de calor se lleva a cabo a mayor velocidad en relación con los materiales que tienen baja conductividad. En la naturaleza se encuentran materiales que presentan una alta conductividad térmica; son los llamados conductores, como los metales, los cuales su conductividad está en el intervalo de 10 a 400 ($W/m \text{ } ^\circ K$); en tanto que, los materiales aislantes, aquellos que no conducen el calor, presentan valores entre 0,1 a 0,5 ($W/m \text{ } ^\circ K$) como los polímeros, y de 1 a 200 ($W/m \text{ } ^\circ K$) para vidrios y cerámicos (Segovia, 2016).

Por otra parte, la difusividad térmica (α) es otra de las propiedades importantes de los materiales, la cual está asociada con la velocidad de propagación del calor durante los cambios de temperatura a lo largo del tiempo (Salazar, 2003); es decir, establece la velocidad con la que se desplaza un frente de temperatura a lo largo del material; y su valor es susceptible a la temperatura, a la composición y cambios estructurales del material.

La difusividad térmica (α) se determina mediante la relación entre la conductividad térmica (K) y el calor específico por unidad de volumen (C), donde la conductividad y difusividad térmica presentan una relación inversa con la temperatura (Chekhonin et al., 2012). Esta propiedad, la difusividad térmica (α), se determina mediante la expresión $\alpha = \frac{K}{C}$

y tiene por unidad $\frac{m^2}{s}$

(Eppelbaum, Kutasov, y Pilchin, 2014), donde (K) es la conductividad térmica del material dada en ($W/m \text{ } ^\circ K$) y el calor específico por unidad de volumen (C) está dado en ($J/m^3 \text{ } ^\circ K$). La difusividad térmica (α), la conductividad térmica (K) y el calor específico por unidad de volumen (C) se encuentran estrechamente relacionados por la ecuación $\alpha = \frac{K}{C}$

La efusividad térmica (ε), también conocida por algunos autores como *coeficiente de contacto* (Boeker y Grondelle, 1999), describe la capacidad de cierto material para intercambiar energía térmica con el medio ambiente (Marin, 2006). Dicha propiedad térmica se correlaciona directamente con la conductividad térmica (K) y el calor específico por unidad de volumen (C) a través de la ecuación $\varepsilon = \sqrt{KC} = \frac{K}{\sqrt{\alpha}} = C\sqrt{\alpha}$

(Popov, Beardsmore, Clauser, y Roy, 2016), donde ε es la efusividad térmica, la cual tiene por unidad ($J/m^2 K s^{1/2}$).

La efusividad térmica, pese a que es una propiedad importante en los procesos de calentamiento y enfriamiento de los materiales; es una magnitud que muy poco se conoce en el área de la Física, tal vez debido a la falta de aparatos técnicos comerciales previstos para tal fin. Sin embargo, esta propiedad térmica cambia en función de la composición, humedad, temperatura, densidad y porosidad del material (Poulsen, 1982).

Y, por último, el calor específico por unidad de volumen (C), expresa la cantidad de calor necesario para que la temperatura de una muestra de volumen constante aumente en un grado (Marín, Delgado-Vasallo, y Valiente, 2003). El calor específico por unidad de volumen de un material es característico de cada sustancia y depende de su estructura interna y composición (Gordillo-Delgado, 2019). El calor específico por unidad de volumen (C) está relacionado con el

calor específico (c) mediante la expresión

$C = \rho c$, donde (ρ) es la densidad del material en (Kg/m^3) y el calor específico (c) tiene por unidad ($J/Kg \text{ } ^\circ K$). Como el valor del calor específico (c) es un dato casi constante en los sólidos, algún cambio en el valor de la conductividad térmica se manifiesta en el valor de la difusividad térmica del material.

MATERIALES Y MÉTODOS

Una vez recibida la muestra, se llevó a cabo el análisis granulométrico, el cual consistió en separar y clasificar por tamaños los granos que componen la muestra de arcilla atomizada (spray dried). Se tomaron 100 gramos de muestra y se hizo pasar por una serie de siete tamices con mallas N° 30, 40, 60, 80, 100, 120 y 200 mesh, tal como lo expresa la (Norma ASTM D422-07, 2007), la cual consiste en colocar los tamices en orden de mayor a menor tamaño de abertura en la malla. Para determinar la granulometría se utilizó el vibrotamiz marca Gabrielli®, el cual se dejó vibrando durante un tiempo de cinco minutos, con el fin de conocer el polvo de arcilla pasante en cada malla y retenido en la siguiente. El procedimiento anterior se realizó hasta completar un promedio de 300 gramos de cada tamaño de grano, cantidad que sería utilizada en el análisis del comportamiento de las propiedades térmicas a temperatura ambiente en función de una presión de compactación constante.

Para llevar a cabo el proceso de compactación de la arcilla atomizada suministrada por Cerámica Italia S.A., se tomaron 300 gramos de muestra pasante de malla N° 200, se dejó airear a temperatura ambiente y se le midió la humedad; la cual reporta un dato de 1,49%. Como dicha humedad no está en el rango de 6 a 7 %, el cual es usado por la empresa para los procesos de compactación; se le incorporó agua destilada rociada con atomizador hasta alcanzar un valor que estuviera dentro de dicho

intervalo. La unificación de la muestra se llevó a cabo a mano, usando una espátula metálica y corrigiendo la pérdida de agua por evaporación. Este mismo procedimiento se realizó para la muestra pasante de malla N° 120, 100, 80, 60, 40 y 30 mesh.

Una vez obtenida la humedad óptima de cada muestra, se procede a la compactación de ésta, usando 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"). En uno de los extremos del molde, se coloca un disco con dos agujas, las cuales tienen la longitud y el diámetro de la sonda del sistema KD2 Pro, dispositivo que se utilizó para medir las propiedades termofísicas (conductividad y difusividad térmica). A continuación, se procedió a llenar el molde en tres etapas; cada una de aproximadamente 1/3 de la altura del molde, con el fin de lograr una mejor uniformidad a lo largo de la muestra.

Después de que la muestra se depositó en cada fase dentro de la probeta cilíndrica, ésta se golpea lateralmente con un pisón de caucho durante un minuto, con el objeto de eliminar microburbujas de aire que puedan formar agujeros. Finalmente, mediante una espátula se enrasa la muestra más o menos a 10,47 mm del borde superior del molde, hasta conseguir una cara perfectamente plana y lisa, con el fin de colocar el otro disco de acero, de forma tal que selle la muestra, para luego iniciar el proceso de compactación.

Una vez lista la muestra en el molde de acero, se llevó al equipo manual de compactación, donde se le aplicó una presión de 200 Kg/cm²; procedimiento que está basado en el Ensayo de Harvard Miniatura (DAS, 2001). Después de que esté compactada la muestra, se realizó el proceso de desmonte, introduciendo un pistón para expulsar la muestra, luego se retiró el disco cilíndrico con las agujas y más adelante

se introdujo la sonda del sistema KD2 Pro, para comenzar la medida de las propiedades térmicas.

La evaluación de las propiedades térmicas (conductividad y difusividad) de las muestras de arcilla tamizadas, se realizó mediante el dispositivo KD2 Pro desarrollado por la empresa estadounidense Decagon Devices. Dicho aparato, utiliza el método de la fuente lineal de calor transitorio para medir la conductividad y la difusividad térmica; y un algoritmo patentado que ajusta los datos de tiempos y temperaturas con funciones integrales exponenciales usando un método no lineal de mínimos cuadrados (Decagon-Devices, 2011). Las medidas de las propiedades térmicas se llevan a cabo en un ciclo corto de tiempo (de 1 a 10 minutos) incrustando una aguja (sensor) metálica en la muestra.

Del kit de sensores que presenta el equipo (KS-1, SH-1, TR-1) se utilizó el SH-1, el cual consta de dos agujas paralelas de acero inoxidable de 30 mm de longitud y 1,3 mm de diámetro, con una separación de 6 mm; una funciona como fuente de calor y la otra como sensor de temperatura; dicho sensor cumple con las especificaciones de la norma (Norma IEEE 442, 1981) y (Norma ASTM D5334-00, 2000). Este equipo se calibró por medio de una muestra testigo de conductividad térmica conocida; y se encuentra en el Laboratorio del Grupo de Investigación en Instrumentación y Física de la Materia Condensada de la Facultad de Ciencias Básicas de la UFPS, donde los autores realizaron la toma de datos.

Posteriormente se procedió a medir las propiedades térmicas de los polvos de arcilla elaborados por atomización (spray dried) suministrada por la empresa Cerámica Italia S.A. Dicha medición, se realizó a cada una de las muestras tamizadas que fueron compactadas a una presión constante de 200 kg/cm². Es

importante aclarar que, la conductividad térmica (K) y la difusividad térmica (α), fueron medidas experimentalmente; en cambio, la efusividad térmica (ε) y el calor específico por unidad de volumen (C), se determinaron usando los valores K y α , y las expresiones

$$\varepsilon = \frac{K}{\sqrt{\alpha}} \quad \text{y} \quad C = \frac{K}{\alpha} \quad \text{respectivamente.}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de granulometría de los polvos de arcilla atomizada muestran que el tamaño de grano fluctúa entre 75 y 600 μm ; en el que el 1,8% de la muestra tiene un tamaño de grano inferior a 75 μm ; el 43,6% de la muestra oscila entre 250 y 425 μm y el 8,3% de la muestra es mayor a 600 μm ; como se puede observar en la figura 1 (Rodríguez, Arciniegas, y Moreno, 2010).

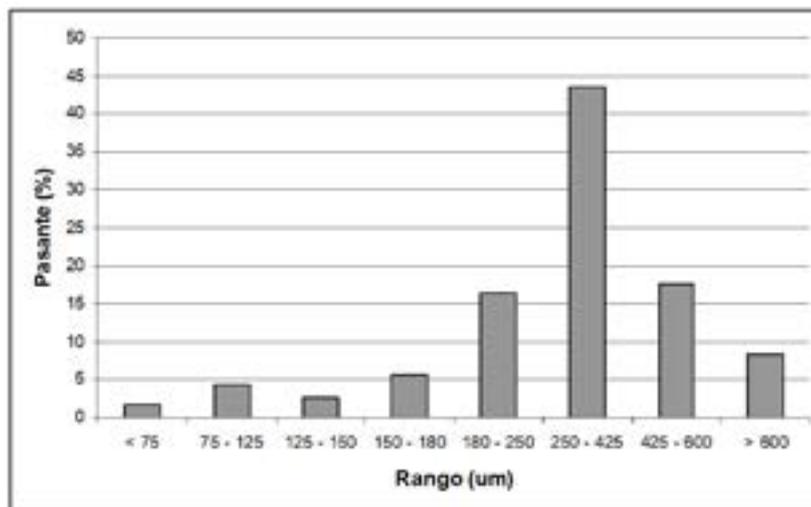


Figura 1. Distribución granulométrica de la muestra de arcilla elaborada por atomización

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en el análisis de las propiedades térmicas de los polvos de arcilla tamizados que fueron compactados a presión constante de 200 Kg/cm^2 en función del tamaño del grano o la porosidad relativa de la muestra. Durante el procedimiento de compactación se observó la reducción rápida del índice de vacíos, por la expulsión del aire que ocupa los poros de la muestra; debido a esto, se producen deformaciones permanentes que altera la estructura de la muestra y modifica sus propiedades mecánicas y térmicas (Buenfil Berzunza, 2007).

Tabla 1. Conductividad (k), calor específico por unidad de volumen (ρc), difusividad (α) y efusividad térmica (ϵ) de la muestra para cada tamaño de grano y a presión constante de 200 Kg/cm², para una temperatura promedio entre 27 y 29 °C.

PRESIÓN	MALLA	WV HUMEDAD	K PROMEDIO	ρc PROMEDIO	α PROMEDIO	ϵ PROMEDIO	T PROMEDIO	μ ANTES DE COMPACT T.	μ DESP. DE COMPACT T.
(Kg/m ²) x 10 ¹	N° (ϕ)	%	W/m. k	(J/m ² Q) x 10 ¹	(m ² /s) x 10 ⁻⁷	J/m ² .K.s ^{1/2}	°C	Kg/m ³	Kg/m ³
200	200 (7%)	6.09 ± 0.18	0.519 ± 0.007	1.589 ± 0.011	3.261 ± 0.004	607.582 ± 6.081	28.3 ± 0.1	951 ± 21	1758 ± 37
200	125 (12%)	6.03 ± 0.18	0.496 ± ±0.016	1.562 ± 0.026	3.177 ± 0.006	880.322 ± 14.349	27.5 ± 0.1	1035 ± 22	1712 ± 28
200	100 (15%)	6.06 ± 0.18	0.486 ± 0.013	1.536 ± 0.016	3.162 ± 0.004	863.825 ± 9.154	28.1 ± 0.1	1058 ± 21	1692 ± 34
200	80 (18%)	6.04 ± 0.18	0.475 ± 0.008	1.505 ± 0.008	3.137 ± 0.004	848.405 ± 4.457	27.2 ± 0.3	1153 ± 28	1688 ± 33
200	60 (25%)	6.05 ± 0.18	0.467 ± 0.011	1.474 ± 0.016	3.128 ± 0.007	836.584 ± 9.024	27.2 ± 0.2	1219 ± 29	1623 ± 31
200	40 (42%)	6.06 ± 0.18	0.457 ± 0.001	1.450 ± 0.013	3.113 ± 0.001	814.212 ± 7.247	27.9 ± 0.3	1218 ± 22	1586 ± 34
200	30 (60%)	6.06 ± 0.18	0.449 ± 0.008	1.427 ± 0.007	3.112 ± 0.001	800.562 ± 3.292	26.8 ± 0.3	1220 ± 29	1572 ± 31

4 2 2

En las figuras 2, 3, 4 y 5, se presentan los comportamientos de la conductividad térmica (k), difusividad térmica (α), calor específico por unidad de volumen (ρc) y efusividad térmica (ϵ) de la muestra tamizada compactada a presión constante de 200 Kg/cm², en función de la porosidad relativa (pr). Dichas figuras fueron realizadas de acuerdo con los datos experimentales obtenidos y reportados en la tabla 1.

De las figuras se deduce que, los parámetros térmicos (k , α , ϵ y ρc) disminuyen al aumentar el tamaño de grano y su porosidad relativa. Para el caso de la conductividad térmica (figura 2), se puede observar y deducir que ésta decrece exponencialmente y aumenta al disminuir la porosidad del material; es decir, cuando el tamaño de grano de la muestra es muy pequeño o su porosidad presenta un porcentaje bajo (cero porosidades), el valor de la conductividad térmica corresponde a la conductividad térmica de la muestra sólida. Se realizó el ajuste a los datos experimentales usando el modelo

de Ryshkewitch (Arambarri y Aglietti, 2009) mediante la ecuación 1.

$$k(pr) = a \cdot e^{b \cdot pr} \quad (1)$$

Donde: k es la conductividad térmica a temperatura específica, tiene un valor máximo cuando no exista porosidad en el interior de la muestra, o sea para la muestra sólida; pr es la porosidad relativa de la muestra; a es la conductividad térmica extrapolada a $pr = 0$; y b es un exponente.

En la figura 2 se muestra la variación de la conductividad térmica en función de la porosidad relativa para la muestra de arcilla tamizada. La línea sólida, representa el mejor ajuste a los datos experimentales usando la ecuación 1.

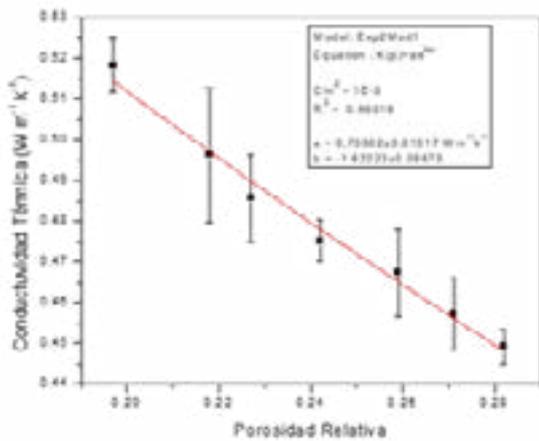


Figura 2. Conductividad térmica en función de la porosidad relativa

La porosidad puede tener una drástica influencia sobre la conductividad térmica; el aumento en la fracción de volumen de poros conduce generalmente a una reducción de la conductividad térmica. Los poros contienen aire, el cual tiene una conductividad térmica muy baja (0,02 W/m k), lo que proporciona a la estructura de la muestra una pequeña conductividad. Se encontró que cuando la muestra presenta cero porosidades, la conductividad térmica calculada mediante la ecuación 1 y datos de la figura 1, arroja un valor de 0,708 W/m K, que es prácticamente igual (0,714 W/m K) al reportado por (Gómez y Peña, 2009) en muestras de arcilla con densidad de 2190 kg/m³. Por lo tanto, el aumento en la conductividad térmica está asociado con la disminución en el tamaño de grano y con la disminución del diámetro de poro, haciendo que el aire que está en los poros, el cual es un excelente aislante, disminuya; permitiendo en su interior una transferencia de calor.

Para las otras propiedades térmicas (α , ϵ y ρc) (figuras 3, 4 y 5), se encontró que éstas también decrecen exponencialmente, pero de una manera diferente a la conductividad térmica y que también disminuyen al aumentar el tamaño de grano o su porosidad relativa.

En la figura 3 se muestra la variación de la difusividad térmica en función de la porosidad relativa para la muestra de arcilla tamizada. La línea sólida, representa el mejor ajuste a los datos experimentales usando la ecuación 2

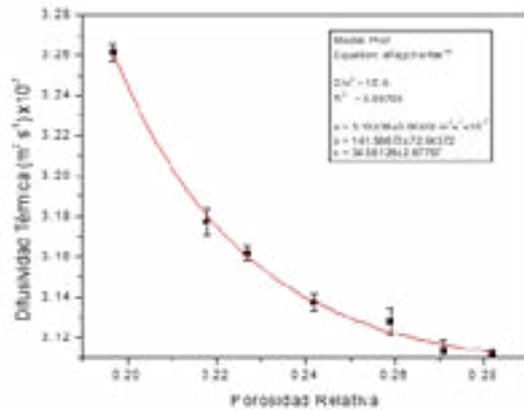


Figura 3. Difusividad térmica en función de la porosidad relativa

En la figura 4 se muestra la variación del calor específico por unidad de volumen en función de la porosidad relativa para la muestra de arcilla tamizada. La línea sólida, representa el mejor ajuste a los datos experimentales usando la ecuación 2.

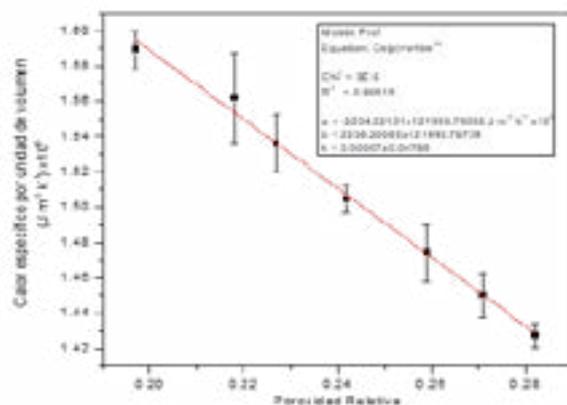


Figura 4. Calor específico por unidad de volumen en función de la porosidad relativa

En la figura 5 se muestra la variación de la efusividad térmica en función de la porosidad relativa para la muestra de arcilla tamizada. La línea sólida, representa el mejor ajuste a los datos experimentales usando la ecuación 2

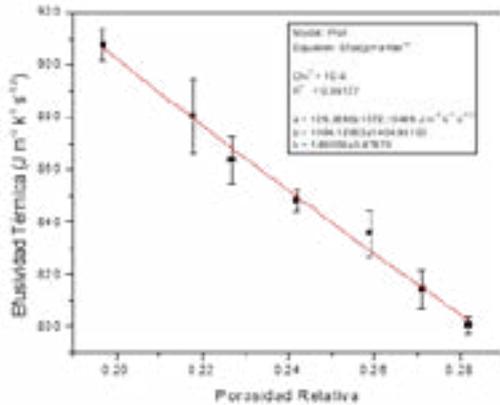


Figura 5. Efusividad térmica en función de la porosidad relativa

Debido a que no se encuentran datos reportados sobre el comportamiento de estas propiedades térmicas de este tipo de arcilla atomizada, se realizó el ajuste a los datos experimentales

utilizando el siguiente modelo.

$$y(pr) = a + b \cdot e^{k \cdot pr} \quad (2)$$

Donde: $y(pr)$ es cada una de las propiedades termofísicas (α , ϵ y ρc) en función de la porosidad relativa a temperatura específica, que tienen un valor máximo cuando no exista porosidad en el interior de la muestra; pr es la porosidad relativa de la muestra; a , b y k son constantes que se obtuvieron del ajuste.

El ajuste a los datos experimentales usados en la ecuación 1 y 2 fue realizado usando el software Origin Pro Versión 7.0, y corresponde a la línea sólida roja en cada figura. Es importante observar en cada figura, que la desviación cuadrática media (χ^2) es inferior a 10^{-3} en todos los ajustes y que el coeficiente de correlación (R^2) es prácticamente la unidad a excepción de la conductividad térmica ($R^2 = 0.98516$), lo cual da confiabilidad y seguridad a los valores obtenidos y reportados.

En la tabla 2, se presentan los valores de las constantes a , b y k , obtenidos para cada parámetro termofísico, de acuerdo al ajuste realizado con la ecuación 2.

Tabla 2. Parámetros a , b y k , para cada propiedad térmica, obtenidos del ajuste a los datos experimentales usando la ecuación 2

Parámetros de ajuste	Difusividad térmica (α) ($m^2 \cdot s^{-1}$) $\times 10^{-7}$	Calor específico por unidad de volumen (ρc) ($J/m^3 \cdot K$) $\times 10^6$	Efusividad térmica (ϵ) $J/m^2 \cdot K \cdot s^{1/2}$
a	3.10438	-2234.22131	129.3698
b	141.58672	2236.20085	1084.12953
k	-34.56128	-0.00087	-1.69009

CONCLUSIONES

En esta investigación se determinaron las propiedades termofísicas (k , α , ε , C) a temperatura ambiente, de muestras de polvos de arcillas rojas tamizadas, fabricadas por procesos de atomización en función del tamaño de partícula, porosidad y presión de compactación, así como su relación. La distribución granulométrica de la muestra de arcilla tamizada (vía seca) reportó que el tamaño de grano varía entre 75 y 600 μm ; en el cual, el 1,8% es inferior a 75 μm ; el 43,6% se encuentra en el rango entre 250 y 425 μm y **el 8,3% es mayor a 600 μm .**

Se aprecia que, para un mismo tamaño de grano, la densidad de los polvos de arcilla aumenta en función de la presión de compactación constante de 200 kg/m^2 , disminuyendo así la cantidad de aire presente en la muestra; obteniéndose un aumento en la rigidez y una disminución de la permeabilidad de la muestra. Al comparar las densidades de los polvos de arcilla tamizada y compactados a una presión constante de 200 kg/m^2 ; se puede observar que dicha propiedad disminuye al aumentar el tamaño de grano.

Las propiedades térmicas (k , α , ε y ρc) de la muestra tamizada, compactada a presión constante de 200 Kg/cm^2 en función del tamaño del grano o la porosidad relativa, disminuyen al aumentar el tamaño de grano y su porosidad relativa; observándose la reducción del índice de vacíos, debido a la expulsión del aire que ocupan los poros de la muestra; provocando deformaciones permanentes que alteran la estructura de la muestra y modificando sus propiedades mecánicas y térmicas.

En el caso de la conductividad térmica, ésta decrece exponencialmente y aumenta al disminuir la porosidad del material; es decir, cuando el tamaño de grano de la muestra es muy pequeño o su porosidad presenta un porcentaje bajo (cero porosidad), el valor de esta propiedad, corresponde a la conductividad

térmica de la muestra sólida; el cual es $k=0.708$ W/mK , que es aproximadamente igual a $k=0,714$ W/mK , reportado por (Gómez y Peña, 2009) en muestras de arcilla con densidad de 2190 kg/m^3

Para las otras propiedades térmicas (α , ε y ρc), éstas decrecen exponencialmente, donde cada una tiene un parámetro inicial constante en la ecuación de ajuste de datos, y también disminuyen al aumentar el tamaño de grano o su porosidad relativa. Como los datos reportados en investigaciones sobre el comportamiento de las propiedades térmicas de la muestra atomizada son muy escasos, se realizó el ajuste a los datos experimentales, donde la desviación cuadrática media (χ^2) es inferior a 10^{-3} en todos los ajustes y el coeficiente de correlación (R^2) es aproximadamente la unidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arambarri, G., & Aglietti, E. F. (2009). Materiales aislantes de perlita y silicato de calcio. Conductividad térmica y propiedades. *En: Jornadas SAM 2000-IV Coloquio Latinoamericano de fractura y fatiga*, 941-947.
- Ariza, M. R., Aguirre, D., Quesada, A., Abril, A. M., & García, F. J. (2016). ¿Lana o metal? Una propuesta de aprendizaje por indagación para el estudio de las propiedades térmicas de materiales comunes. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 15(2), 297-311.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2002). *Thermal conductivity and the mechanisms of energy transport. Transport Phenomena Second Edition (pp 266–287)*. New York: John Wiley & Sons.

- Boeker, E., & Grondelle, R. v. (1999). *Environmental Physics*. New York: Wiley.
- Bristow, K. L. (1998). Measurement of thermal properties and water content of unsaturated sandy soil using dual-probe heat-pulse probes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 89(2), 75-84.
- Buenfil Berzunza, C. M. (2007). Caracterización experimental del comportamiento hidromecánico de una arcilla compactada. (Tesis de doctorado). Universitat Politècnica de Catalunya.
- Chekhonin, E., Parshin, A., Pissarenko, D., Popov, Y., Romushkevich, R., Safonov, S., & Stenin, V. P. (2012). When rocks get hot: thermal properties of reservoir rocks. *Oilfield Review*, 24(3), 20-37.
- Clauser, C., & Huenges, E. (1995). *Rock Physics and Phase Relations. A Handbook of Physical Constants (Issue 1)*.
- DAS, B. M. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: Editorial Thomson Learning.
- Decagon-Devices . (2011). KD2 Pro Compliance to ASTM and IEEE Standards. Application Note.
- E. Boeker , & R. van Grondelle. (1999). *Environmental Physics*. New York: Wiley.
- Eppelbaum, L., , L., Kutasov, I., & Pilchin, A. (2014). *Thermal Properties of Rocks and Density of Fluids. En Applied Geothermics (pp. 99-149)*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Gómez , M., & Peña, Y. (2009). Determinación experimental de la conductividad térmica efectiva y simulación numérica de la conducción de calor en bloques de arcilla N° 5 fabricados en Cúcuta y su área metropolitana (Trabajo de pregrado). Universidad Francisco de Paula Santander.
- Gordillo-Delgado, F. (2019). Uso de la técnica de relajación térmica para la medición de calor específico de láminas recubiertas con TiO₂. *Scientia et Technica*, 24(4), 659-665.
- Holman, J. P. (1998). *Transferencia de calor*. In C. F. Madrid: Mc graw hill (Octava edi, Vol. 7, Issue 11).
- Marin, E. (2006). Thermal physics concepts: the role of the thermal effusivity. *The Physics Teacher*, 44(7), 432-434.
- Marín, E., Delgado-Vasallo, O., & Valiente, H. (2003). A temperature relaxation method for the measurement of the specific heat of solids at room temperature in student laboratories. *American Journal of Physics*, 71(10), 1032-1036.
- Norma ASTM. (2000). ASTM D5334-00. Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure.
- Norma ASTM. (2007). ASTM D422-63. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
- Norma IEEE . (1981). IEEE 442-1981. Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements.
- Popov, Y., Beardsmore, G., Clauser, C., & Roy, S. (2016). ISRM suggested methods for determining thermal properties of rocks from laboratory tests at atmospheric pressure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(10), 4179-4207.

- Popov, Y., Beardsmore, G., Clauser, C., & Roy, S. (2016). ISRM suggested methods for determining thermal properties of rocks from laboratory tests at atmospheric pressure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(10), 4179-4207.
- Poulsen, K. P. (1982). Thermal diffusivity of foods measured by simple equipment. *Journal of Food Engineering*, 1(2), 115-122.
- Ramakrishnan, D., Bharti, R., Nithya, M., Kusuma, K. N., & Singh, K. D. (2012). Medición de las propiedades térmicas de las granulitas intactas y meteorosas seleccionadas y su relación con las propiedades de la roca. *Geofísica*, 77(3), D63-D73.
- Rodríguez, G. P., Arciniegas, V. J., & Moreno, H. J. (2010). Efecto de la presión de compactación en las propiedades termofísicas de polvos de arcilla roja elaboradas por atomización. *Respuestas*, 15(2), 25-33.
- Salazar, A. (2003). On thermal diffusivity. *European journal of physics*, 24(4), 351-358.
- Segovia, E. E. (2016). *Influencia de la concentración y dispersión de estructuras grafíticas (Grafito y nano placas de Grafito-GNP) sobre la conductividad térmica de compuestos de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) empleando mezclado en fundido. (Tesis de doctorado)*. Centro de investigación en química aplicada: Saltillo, Coahuila.
- Vincent, C., Silvain, J. F., Heintz, J. M., & Chandra, N. (2012). Effect of porosity on the thermal conductivity of copper processed by powder metallurgy. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 73(3), 499-504.
- Zhang, N., & Wang, Z. (2017). Review of soil thermal conductivity and predictive models. *International Journal of Thermal Sciences*, 117, 172-183.