

EVALUACIÓN DE LA CELULOSA DE PAPEL Y DE LAS CENIZAS DE CARBÓN, COMO MATERIALES AISLANTES ALTERNATIVOS

EVALUATION OF THE CELLULOSE OF PAPER AND COAL ASHES, LIKE ALTERNATIVE INSULATING MATERIALS

ALEJANDRO MUÑOZ

Escuela de Procesos y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, damunoz@unalmed.edu.co

FARID CHEJNE

Escuela de Procesos y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

JORGE ESPINEL S.

Escuela de Procesos y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

CARLOS LONDOÑO G.

Escuela de Procesos y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Recibido para revisar 29 de Octubre de 2004, aceptado 28 de Marzo de 2005, versión final 12 de Septiembre de 2005

RESUMEN: Se construyó un medidor de conductividad térmica de materiales sólidos según las recomendaciones de las Normas ASTM C518 y C177. El equipo sirvió para medir la conductividad térmica como una función de la temperatura de dos materiales de desecho sólidos, cenizas de carbón y una mezcla de celulosa de papel con cemento. La conductividad de las cenizas fue tan baja como 0.073 W/mK a una temperatura de 250°C y la conductividad de la mezcla de celulosa de papel con cemento fue de 0.241 W/mK a una temperatura de 160°C . Esto muestra que ambos materiales tienen propiedades de aislantes térmicos como para usarse industrialmente. Las cenizas de carbón que soportan altas temperaturas pueden reemplazar la costosa fibra cerámica.

PALABRAS CLAVE: aislantes térmicos económicos, medición de conductividad térmica, reutilización de materiales de desecho, aislantes, celulosa de papel, cenizas de carbón.

ABSTRACT: A conductimeter following ASTM C518 and C177 recommendations was built in order to measure the thermal behavior of two kind of solid waste materials coal ash and cellulose paper mixed with cement. Conductivity of these materials was obtained as a function of temperature. Coal ash conductivity was as low as 0.073 W/mK at a temperature of 250°C and the mixed cellulose paper conductivity was 0.241 W/mK at a temperature of 160°C . It shows that both kinds of materials have competitive insulating properties. Coal ash as example can replace the expensive ceramic fiber at high temperatures.

KEYWORDS: Thermal conductivity measure, recycled materials, insulating materials, cellulose paper, coal ash

1. INTRODUCCIÓN

En el diseño del aislamiento térmico para hornos, equipos de proceso a alta temperatura, calderas y conductos de gases calientes, el conocimiento de la conductividad térmica de los aislantes a diversas temperaturas es dato indispensable. Las compañías fabricantes entregan datos de conductividad térmica de sus referencias de aislantes pero con limitaciones: en muchos casos no se conoce la funcionalidad de la propiedad térmica con la temperatura; también suele ocurrir que las características específicas de materiales de una región o fabricados en un proceso hace inútil la información general publicada en la bibliografía. (Por ejemplo: los datos publicados para arena no tienen en cuenta la gran variabilidad en conductividad térmica de los diversos tipos de ella según el origen). También se tienen en abundancia materiales de desecho que por algunas características generales se consideran potenciales aislantes térmicos de bajo costo, que no se han investigado desde esta perspectiva. Aparece por esto el interés por determinar la conductividad térmica de diversos materiales sólidos a las temperaturas de trabajo para su evaluación como aislantes.

Se escogieron para este estudio, dos desechos industriales: las cenizas de carbón y la celulosa de papel reciclados, materiales abundantes en nuestro medio. El equipo de medición de la conductividad térmica se diseñó y construyó para operar en el intervalo de temperatura de 25 a 350°C. Existen diversas métodos de determinación de la conductividad térmica (*Maarten, 1998*), el método escogido en este trabajo es del tipo de medición en estado estable según estándares ASTM, por las características de los materiales a ensayar y por la alta confiabilidad del método de prueba.

El objeto de la investigación de la conductividad térmica de materiales alternativos a temperaturas de uso industrial es la búsqueda de sustitutos baratos para los aislantes comúnmente utilizados, a la vez que la reutilización de desechos industriales para aminorar su impacto ambiental.

2. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

Como se mencionó anteriormente, los materiales escogidos para realizar las pruebas, fueron la celulosa de papel reciclada, mezclada con cemento para obtener un compuesto con resistencia estructural y cenizas de carbón recicladas. A continuación se presentan algunas características químicas y físicas de ellos.

2.1 CENIZAS DE CARBÓN RECICLADAS (*PAUCAR, 1997*)

Las cenizas del carbón se definen como el residuo final generado en la combustión de carbones gruesos o en polvo (*Norma ASTM 593-76a*), y su contenido en el carbón varía entre un 3% y un 45%. Su composición química global es similar a la de una arcilla, presentan constituyentes mayoritarios como óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio en proporción de 95% a 99%. Los componentes minoritarios son pequeñas cantidades de compuestos de magnesio, titanio, potasio, fósforo, azufre y compuestos alcalinos en proporciones entre 0.5 % y 3.5%. Los elementos traza más característicos como el Ar, Be, Cd, Pb se presentan en proporciones menores a 0.5 %.

Las cenizas son generalmente de tipo básico aunque según el medio en el cual se encuentren su pH varía entre 3 y 8. Mineralógicamente contienen anhidrita, calcita, dolomita, y cuarzo como minerales mayoritarios posteriores al tratamiento térmico (*Georgakopoulos, 1994*).

Algunas características físicas como el tono, varía desde claro a oscuro dependiendo del contenido de carbono que les da tonos grises y dependiendo del contenido de hierro que les da tonos pardos. La densidad promedio de las cenizas es de 2,24 g/cm³ a 2,56 g/cm³.

En Colombia se han realizado algunos estudios de las cenizas del carbón (*Paucar, 1997*) en los cuales se proponen las siguientes prioridades de uso: prefabricados, relleno en vías, morteros y combustible secundario. Usos para un futuro son: ladrillo cerámico, ladrillo sílico-cálcico, cementos, concretos.

Características de las pruebas

En las pruebas realizadas se usaron cenizas producidas en la caldera Número 1 de la empresa Cervecería Unión S.A. ubicada en Itagüí (Antioquia), las cuales tienen la granulometría mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis granulométrico de las cenizas (Peso de la muestra 257.5g, tiempo de tamizado de 15 min.).

Table 1. Grain sized analysis of ashes (weight of the sample 257.5g, sifted time: 15 min.).

Tamiz N°	Reten. [g]	% Ret.	Abert. malla [mm]	Diám. prom [mm]
20	2.5	0.971	0.841	
30	11	4.272	0.595	0.7180
60	76	29.51	0.25	0.4225
100	55.5	21.55	0.149	0.1995
120	13	5.048	0.125	0.1370
140	19	7.379	0.105	0.1150
230	57.5	22.33	0.063	0.0840
Colector	23	8.932		
Total	257.5	100		

2.2 CELULOSA DE PAPEL RECICLADA

El papel y el cartón después de pasar varias veces por un proceso de reciclaje adquieren características que le impiden su reutilización y por lo tanto las empresas productoras lo desechan. Esta celulosa se mezcló con cemento para obtener un material resistente estructuralmente para trabajo a temperaturas intermedias (200°C). La celulosa fue suministrada por la empresa COLPAPEL S.A. La relación de peso celulosa a peso cemento utilizada fue de 0.6 (propuesta por Vasco, 1998 para obtener una placa con adecuada resistencia estructural). La relación agua cemento fue de 0.75 L/kg. Como la celulosa seca absorbe agua por cada gramo de celulosa, se adicionaron 0.7 ml de agua por recomendación de (Vasco, 1998). Para conformar las muestras de celulosa reciclada con cemento, se usó una formaleta con dimensiones 300×300×25.4mm para realizar el vaciado de la mezcla.



Figura 1. Presentación de la celulosa reciclada utilizada en la fabricación de las muestras

Figure 1. Presentation of the used recycled cellulose in the manufacture of the samples

3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

El equipo experimental fue diseñado conforme las Normas ASTM C518 y C177, y consta de las siguientes partes:

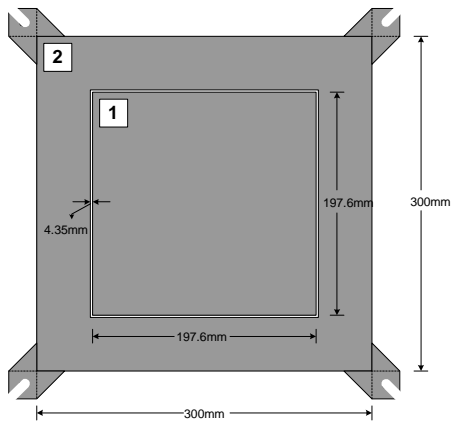
1. Una placa central, *parte número 1*, con guarda primaria, *parte número 2*, (Figura 2) dotadas de un sistema de control para mantener iguales las temperaturas de ambas en todo el intervalo de trabajo 25°C-350°C
2. Placas del material a ensayar con dimensiones 300×300×25.4mm en el caso de material laminar o dos cajas portamuestras en acero inoxidable para el material a granel colocado en ellas con llenado sin ningún tipo de compresión.
3. Dos placas auxiliares de calentamiento (resistencias auxiliares) con sistema de regulación de potencia.
4. Placas de aislante externo.
5. Dos enfriadores con agua para retirar el calor generado en las resistencias.
6. Una manta aislante lateral envolvente
7. 17 termocuplas, 2 tipo K y 15 tipo J, ubicadas en las superficies de las placas calentadoras.

8. Un panel de control para el monitoreo de las temperaturas, los voltajes y las corrientes eléctricas de las resistencias y desde donde se controlan las temperaturas de la placa central y la guarda primaria.

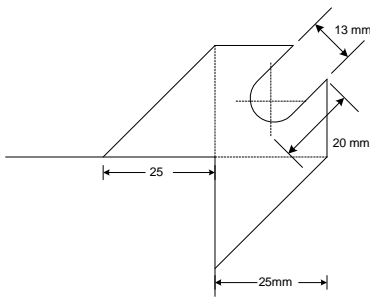
La distribución de las diferentes partes en el conductímetro, puede apreciarse en la Figura 3.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para determinar el comportamiento de la conductividad térmica para un intervalo amplio (25-350°C), se comenzaron las mediciones a temperaturas bajas para ir incrementando la energía suministrada al sistema y así obtener los demás puntos de operación.



a)



b)

Figura 2. Dimensiones y estructura de la placa central

Figure 2. Dimensions and structure of the central plate

Después de tener el montaje del sistema

(Figura 4), se procedió de la siguiente manera: Dependiendo del tipo de muestra, se estimó el orden de magnitud de la conductividad térmica esperada para cuantificar aproximadamente la potencia a suministrar al sistema. Esto se realizó mediante un balance de energía en estado estacionario. Para evitar errores significativos en el cálculo de la conductividad térmica se buscó que la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen no fuera mayor a 20°C.

Luego de obtener el estado estable, determinado por el establecimiento de un perfil de temperaturas constante durante varias horas, y basados en la ley de Fourier, se aplica el siguiente modelo de cálculo.

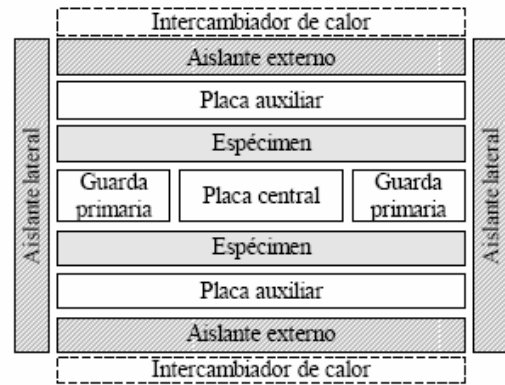


Figura 3: Distribución del equipo experimental
Figure 3. Distribution of the experimental equipment

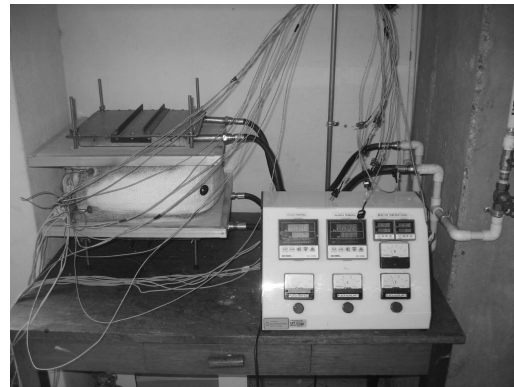


Figura 4. Fotografía del equipo experimental
Figure 4. Photography of the experimental equipment

Modelo de cálculo:

Cálculo de la conductividad térmica

$$\lambda = \frac{Q}{(\Delta T/L) \times A}$$

$$\lambda = \frac{V \times I \times L}{(T_h - T_c) \times \left(A_m + \frac{A_g}{2} \right)} \quad (1)$$

Temperatura de prueba

Los valores de conductividad térmica a reportar, son para una temperatura de prueba que se define como la temperatura promedio entre las dos caras de la muestra

$$\bar{T}_p = \frac{\bar{T}_c + \bar{T}_f}{2} \quad (2)$$

Parámetros de diseño geométricos

En los cálculos se utilizan las dimensiones ya establecidas para el equipo. En la Norma ASTM C177, se recomienda que el área transversal de transferencia de calor, se calcule agregando la mitad del área de la ranura que separa la placa central de la guarda primaria. Como las dimensiones de la placa central y la ranura, son 0.1976 y 0.00435m respectivamente, entonces:

$$A = 0.1976^2 + \frac{(0.1976 + 2 \times 0.00435)^2 - 0.1976^2}{2} = 0.0408m^2$$

Este valor es el mismo para cada muestra evaluada.

5. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

5.1 CENIZAS DE CARBÓN RECLADAS

Para estas muestras, se obtuvieron cuatro condiciones de estado estable, en el intervalo de temperaturas (30-350°C). Estos estados pueden observarse en la Figura 5, la cual muestra la evolución en tiempo real de las temperaturas de interés en el sistema.

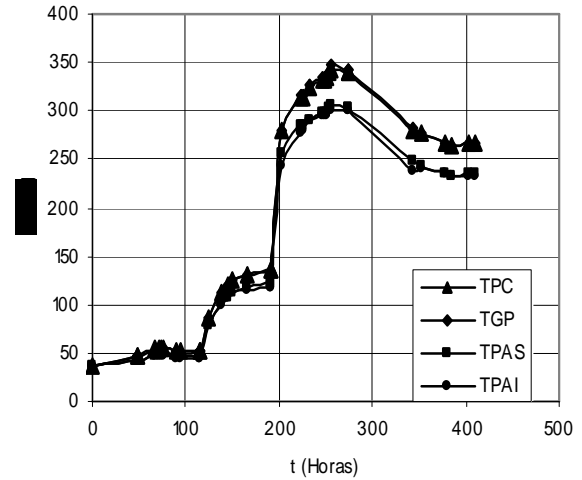


Figura 5. Evolución en tiempo real del sistema con muestras de cenizas de carbón recicladas

Figure 5. Evolution in real time of the system with recycled coal ash samples

Las condiciones de operación para los estados estables (EE), las condiciones de prueba de las placas calentadoras (PC) y el calor generado que pasa a través de las muestras, se presentan en la Tabla 2.

Usando el modelo de cálculo descrito en la Sección 3.1, en la Tabla 3 se presentan los resultados de la conductividad térmica para cada punto de operación.

Tabla 2. Voltajes y corrientes de las placas calentadoras para obtener los puntos de operación deseados

Table 2. Voltages and currents of the heating plates to obtain the wished points of operation

EE	PC		PAS		PAI	
	V[V]	I[A]	V[V]	I[A]	V[V]	I[A]
1	9.64	0.74	Apagada		Apagada	
2	11.98	0.71	2	0.1	2	0.1
3	10.01	0.77	15.29	1.8	19.67	2.4
4	10.25	0.72	10.25	0.72	10.25	0.72

Tabla 3. Conductividades térmicas de las cenizas de carbón recicladas a diferentes temperaturas
Table 3. Thermal conductivities of recycled ashes of coal to different temperatures

	Muestra Superior	Muestra inferior	Promedio
Primer Punto			
λ [$W/m^{\circ}C$]	0.423	0.357	0.390
\bar{T}_p [$^{\circ}C$]	49.9	48.4	49.15
Segundo Punto			
λ [$W/m^{\circ}C$]	0.234	0.172	0.203
\bar{T}_p [$^{\circ}C$]	128.35	125.4	126.88
Tercer Punto			
λ [$W/m^{\circ}C$]	0.072	0.059	0.066
\bar{T}_p [$^{\circ}C$]	322.55	321.4	321.975
Cuarto Punto			
λ [$W/m^{\circ}C$]	0.078	0.068	0.073
\bar{T}_p [$^{\circ}C$]	250.75	250.92	250.84

5.2 RESULTADOS CON EL MATERIAL COMPUESTO DE CELULOSA RECI-CLADA Y CEMENTO

Los puntos de operación obtenidos pueden observarse en la Figura 6, la cual muestra la evolución en tiempo real de las temperaturas de interés en el sistema.

De igual forma, en la Tabla 4 se presentan las condiciones de prueba y en la Tabla 5 las conductividades térmicas respectivas.

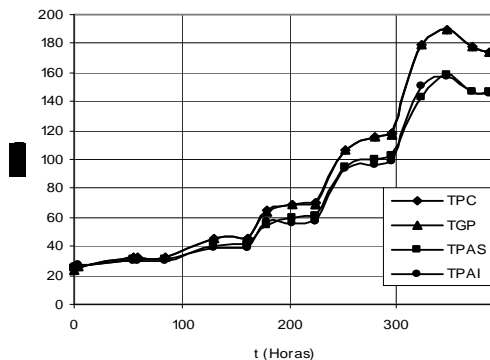


Figura 6. Evolución en tiempo real de las muestras mezcla de celulosa de papel reciclada y cemento
Figure 6. Evolution in real time of the samples mixture of recycled cellulose of paper and cement

Tabla 4. Voltajes y corrientes de las placas calentadores para obtener los puntos de operación deseados

Table 4. Voltages and currents of the heating plates to obtain the wished points of operation

EE	PC		PAS		PAI	
	V[V]	I[A]	V[V]	I[A]	V[V]	I[A]
1	11.6	0.81	Apagada		Apagada	
2	12.26	0.87	2.16	0.31	1.87	0.1
3	11.89	0.86	5.35	0.8	7.47	1.16
4	15.08	0.91	6.08	0.91	10.17	1.53

Tabla 5. Conductividades térmicas a diferentes temperaturas de la mezcla de celulosa de papel reciclada y cemento

Table 5. Thermal conductivities to different temperatures from the mixture of recycled cellulose of paper and cement.

	Muestra superior	Muestra inferior	Promedio
Primer Punto			
λ [$W/m^{\circ}C$]	0.927	0.788	0.857
\bar{T}_p [$^{\circ}C$]	43.83	42.51	43.2
Segundo Punto			
λ [$W/m^{\circ}C$]	0.508	0.460	0.484
\bar{T}_p [$^{\circ}C$]	65.4	62.68	64.0
Tercer Punto			
λ [$W/m^{\circ}C$]	0.301	0.294	0.298
\bar{T}_p [$^{\circ}C$]	109.8	106.7	108.3
Cuarto Punto			
λ [$W/m^{\circ}C$]	0.237	0.244	0.241
\bar{T}_p [$^{\circ}C$]	160.1	158.6	159.4

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La aceptación de los datos de conductividad térmica depende del error en la medida de la conductividad térmica de un material de referencia (Rezaei et al., 2000). En nuestro caso, se usó el aislante suministrado por SEALCO S.A. Generalmente en la literatura (Rezaei et al., 2000) usan como criterio de aceptación el 10% de error en la medida de la conductividad térmica de un material de referencia con respecto a el valor reportado en

la literatura. El error obtenido para el material de referencia utilizado fue de un 4%, lo que permite la aceptación de los valores obtenidos para los materiales estudiados. El error en las medidas es principalmente atribuido a la resistencia de contacto entre las termocuplas y el espécimen y a la no uniformidad de la transferencia de calor en cada lado.

De las muestras trabajadas, se pueden analizar dos aspectos: el primero es resaltar que debido al comportamiento de su conductividad térmica, estos materiales podrían ser utilizados como aislantes térmicos. Este comportamiento puede explicarse debido a que ambos materiales presentan una matriz porosa, en la cual el aire se convierte en un aislante potencial para que estos materiales presenten éstas características. Además en el caso de la mezcla de celulosa con cemento, este último le conferirle resistencia a la estructura y adiciona una resistencia térmica que mejora las propiedades aislantes de dicha muestra. En el caso del carbón, además de ser una estructura porosa, su estructura química parecida a la arcilla, confirma las propiedades aislantes de este.

El segundo aspecto es el comportamiento decreciente de la conductividad térmica con la temperatura para ambas muestras. Una posible explicación a éste comportamiento es que en ambas muestras se encuentran presentes óxidos, los cuales le confieren sus propiedades de forma global.

En la literatura (*Rezaei et al., 2000*) existes otros estudios de la conductividad térmica de las cenizas de carbón en el intervalo de temperaturas 250-900°C. La comparación de los resultados resulta impráctica debido a la diferencia de los intervalos de temperatura trabajados. El orden de magnitud de los valores obtenidos en (*Rezaei et al., 2000*) para la conductividad térmica de las cenizas de carbón fue de 5×10^{-1} lo que muestra que tanto los resultados obtenidos en este trabajo como los reportados en (*Rezaei et al., 2000*) están alrededor de dicho valor. Este trabajo complementa en cierta forma los resultados de (*Rezaei et al., 2000*) pero hay que tener en cuenta que el material utilizado en ambas investigaciones es diferente.

Por otro lado, para las muestras de celulosa,

hay que tener en cuenta que su estructura también está formada por material orgánico, el cual tiene un punto de ignición bajo, que lo imposibilita para trabajar a altas temperaturas (mayores a 300K).

7. CONCLUSIONES

Con este trabajo se consiguió la construcción de un equipo para la medición de conductividades térmicas de materiales aislantes en capas y a granel para el intervalo de temperaturas desde el ambiente hasta 300°C según Normas ASTM. Las mediciones fueron validadas con un material de conductividad térmica conocida.

Se efectuó la caracterización y medición de las conductividades térmicas de materiales de desecho, como son las cenizas de carbón (a granel) y el descarte de celulosa (haciendo parte de un material compuesto con cemento) de una industria de papel, a diversas temperaturas. Se encontró que los dos materiales tienen buenas propiedades aislantes y que su conductividad térmica disminuye con la temperatura lo que es muy conveniente para el uso en equipos que operan a temperaturas cercanas a 300°C.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso de las cenizas como material aislante entre hornos de doble pared. Se recomienda seguir explorando en sucesivos trabajos con otros materiales de desecho que pueden llegar a reemplazar aislantes costosos.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen al DIME de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín la financiación de este proyecto

NOMENCLATURA

Símbolos latinos

A = área del espécimen normal a la dirección del flux de calor, [m²]

A_m = área geométrica del espécimen normal a la dirección del flux de calor, [m²]

I = corriente [A]

L = espesor del espécimen, [m]

M = masa, [kg]

Q = flujo de calor a través del espécimen, [W]

q = flux de calor a través del espécimen por unidad de área, Q/A , [W/ m²]

T = temperatura, [K]

\bar{T} = temperatura media, $(T_h + T_c)/2$,

ΔT = diferencia de temperatura, $T_h + T_c$,

t = tiempo, [s]

V = voltaje [V]

x = longitud del grosor de la ranura (gap) [m],

ó dimensión espacial.

Símbolos griegos

ρ = densidad global del espécimen, [kg/m³]

λ = conductividad térmica o conductividad térmica aparente del espécimen, [W/mK],

$\bar{\lambda}$ = conductividad térmica media, promedio con respecto a la temperatura de T_c hasta T_h

Subíndices

A = aislante

a = ambiente del intercambiador de calor

h = caliente

c = temperatura baja ó de la placa fría

E = espécimen

GP = guarda primaria

g = ranura, gap

p = promedio

PA = placa auxiliar

PAI = placa auxiliar inferior

PAS = placa auxiliar superior

PC = placa central

PF = placa fría del intercambiador de calor

PP = placa principal

REFERENCIAS

[1] SALAS S. J., VERAS C. J. Materiales de construcción con propiedades aislantes a base de cascarilla de arroz, *Informes de la Construcción*, Vol. 37, n° 372, 53-64, 1985

[2] THERMOMETRICS. Thermistor sensor handbook. Thermometrics Inc., NJ. 1987

[3] NORMA ASTM C1045-90. Standard Practice for calculating thermal Transmission Properties From Steady-State Heat Flux Measurements.

[4] MAARTEN F. VAN GELDER. A Thermistor Based Method for Measurement of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Moist Food Materials at High Temperatures [PhD Thesis]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute, 1998

[5] VASCO G. J. Tableros prefabricados en hormigón aligerado con pulpa de celulosa. [TDG]. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1998.

[6] MOHSENIN, N.N. Thermal properties of foods and agricultural materials. Gordon and Breach Science Publishers, NY. 1980

[7] BAGHE-KHANDAN, M.S. and M.R. OKOS. Improved Line Heat Source Thermal Conductivity Probe, *J. of Food Science*, Vol. 46, 1430-1432, 1981b.

[8] PAUCAR C. Características y usos de la cenizas de carbón, *Cuaderno de Cerámicos y Vítreos*, N°6, 13-21, 1997.

[9] GEORGAKOPOULOS, ANDREAS et al. Morphology and trace elements contents of the fly ash from Main and Northern lignite fields, ptoleimais Greece, *Fuel*, vol. 73, N° 11, 1802-1804.

[10] NORMA ASTM C177-85. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.

[11] REZAEI H.R., et al. Thermal conductivity of coal ash and slags and models used, *Fuel*, Vol. 79, 1697-1710, Oct. 2000.