

## MEASUREMENT OF THERMAL CONDUCTIVITY IN CEMENT COMPOSITES BY A CYLINDRICAL GEOMETRY SYSTEM

Vergara González, E.; Vergara González, D.; Corral Bovadilla, M.; Nájera Hernández, P.;  
Otaño Jiménez, L.

Universidad de La Rioja

The energy rehabilitation of buildings is an opportunity for the economy of a country because it can create jobs and reduce energy consumption. Similarly, it is an issue of great environmental importance allowing reducing carbon emissions and promoting sustainable construction.

This paper presents a system for measuring the thermal conductivity, aimed at achieving results efficiently (proper knowledge vs. low cost) applicable to the preliminary exploration for proposing new lines of research in cement-based composites. Designed and built system works at steady state, in thermal equilibrium and cylindrical geometry. The method facilitates the use of molds in the preparation of samples.

We present results of thermal conductivities in traditional lightweight concretes and cement-wood composites to explore their utility as thermal insulating materials for energy rehabilitation and progress towards more sustainable building.

**Keywords:** *Concrete; Insulation; Thermal conductivity*

## MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN COMPOSITES DE CEMENTO MEDIANTE UN SISTEMA DE GEOMETRÍA CILÍNDRICA

La rehabilitación energética de edificios es una oportunidad para la economía de un país debido a que puede generar empleo y reducir el consumo energético. Del mismo modo es un aspecto de gran importancia medioambiental permitiendo la reducción de las emisiones de carbono y fomentando la construcción sostenible.

En este trabajo se presenta un sistema de medida de la conductividad térmica, orientado a la obtención de resultados de forma eficiente (conocimiento apropiado vs bajo coste) aplicables a la exploración preliminar para la propuesta de nuevas líneas de investigación en composites basados en cemento. El sistema diseñado y construido trabaja en estado estacionario, en el equilibrio térmico y sobre geometría cilíndrica, reduciendo costes y facilitando el empleo de moldes para obtener las probetas de composites a estudiar.

Se presentan resultados de conductividades térmicas medidas en hormigones ligeros tradicionales y composites cemento-madera para explorar su utilidad como aislantes térmicos para rehabilitación energética y el avance hacia una construcción más sostenible.

**Palabras clave:** *Hormigón; Aislamiento; Conductividad térmica*

## 1. Introducción

La conducción de calor es la transferencia de energía calorífica desde la materia a la materia adyacente por contacto directo sin mezcla o transferencia de materia.

La Ley de Fourier define el flujo de energía en la conducción de calor y lo hace para todas las direcciones de un sólido:

$$q_x = -k_x \cdot (\delta T / \delta x) \quad q_y = -k_y \cdot (\delta T / \delta y) \quad q_z = -k_z \cdot (\delta T / \delta z) \quad (1)$$

$q_x$   $q_y$   $q_z$ : Densidad de flujo de calor por unidad de área (cantidad de calor que atraviesa la unidad de área en una unidad de tiempo) en los ejes x, y o z ( $W/m^2$ )

$k_x$   $k_y$   $k_z$ : Conductividad térmica en los ejes x, y o z ( $W/mK$ )

T: Temperatura

x y z: Distancia en los ejes x, y o z

Al integrar la ley de Fourier obtenemos resultados para tres posibles geometrías, en estado estacionario y en el equilibrio térmico: Geometría de lámina plana, principal geometría escogida para la medición de conductividad térmica de materiales de construcción, geometría esférica hueca y geometría cilíndrica hueca:

Solución de la conducción de calor en una geometría cilíndrica hueca:

$$q = k \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2) / \ln(r_2/r_1) \quad (2)$$

q: Flujo de calor (W)

k: Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )

$r_1$ : Radio de la cara 1 (m)

$r_2$ : Radio de la cara 2 (m)

L: Longitud de la muestra cilíndrica (m)

$T_1$ : Temperatura de la cara 1 (K o  $^{\circ}C$ )

$T_2$ : Temperatura de la cara 2 (K o  $^{\circ}C$ )

La conductividad térmica k para las diferentes geometrías, es la capacidad física propia de cada material para transmitir el calor. Es la cantidad de calor que pasa en la unidad de tiempo a través de la unidad de área de una muestra de extensión infinita y de espesor unidad, cuando se establece una diferencia de temperatura entre sus caras de un grado de temperatura. En el Sistema Internacional las unidades son  $W/m \cdot K$  (Wattios/metro-kelvin)

El valor de la conductividad térmica puede depender de la temperatura y de factores intrínsecos a la constitución del material, como la densidad, porosidad, contenido de humedad, diámetro de fibra, tamaño de poro, composición y tipo de gas que encierre el material, etc. cuando se produzca alguna de estas situaciones.

Si el material está constituido por una sustancia heterogénea, con poros o cargas de materiales diferentes, relativamente pequeños y distribuidos en la masa del material de un modo uniforme (sustancia macroscópicamente homogénea), la definición de conductividad térmica permanece válida, aunque en estos casos toma el significado de un coeficiente de conductividad de una sustancia ficticia "equivalente" para el conjunto del material.

Los métodos de medida de la conductividad térmica de materiales de construcción están definidos por varias normas (UNE-EN ISO 8990:1997, UNE-EN ISO 12667:2002). Estos métodos se basan en el empleo de geometría plana para la medida de su conductividad.

En este trabajo proponemos un método de medida de la conductividad térmica de materiales mediante geometría cilíndrica, lo cual permite:

La fabricación de probetas por moldeo, evitando la necesidad de tratamientos superficiales de las muestras a ensayar.

La obtención de probetas de materiales para verificación y/o calibración fabricadas mediante torno.

Facilitar el contacto de la superficie de la muestra con el elemento transmisor de calor.

Construir un sistema de bajo coste y con un coste de medida por muestra fácilmente accesible.

La finalidad del sistema de medida es permitir la evaluación rápida de muestras como conocimiento inicial que facilite la exploración preliminar de posibles nuevos composites con comportamiento térmico definido.

El valor de la conductividad térmica para algunos materiales de construcción está definido por el Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Edificación (Instituto Eduardo Torroja, 2010)) y la norma UNE-EN 12524:2000. Fabricantes y proveedores también indican valores de conductividad térmica para sus productos. Sin embargo las diferentes fuentes de datos pueden no coincidir, por ejemplo para un material basado en cemento y perlita, el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE indica 1,4 W/mK cuando su densidad es menor de 1400 Kg/m<sup>3</sup> mientras que datos de fabricantes indican a diferentes densidades: 350 Kg/m<sup>3</sup> 0,06 W/mK; 530 Kg/m<sup>3</sup> 0,08 W/mK; 750 Kg/m<sup>3</sup> 0,10 W/mK, lo que implica una apreciable divergencia a la hora de considerar la conductividad térmica de materiales de construcción.

## 2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es:

Proporcionar una herramienta y metodología de trabajo que permita evaluar la conductividad térmica de materiales basados en cemento como ligante.

Los objetivos específicos que se pretenden lograr con este sistema y metodología son:

Clasificar materiales según sus conductividades térmicas

Lograr una alta eficiencia de medida, entendida esta como una alta relación entre calidad de la información obtenida vs coste necesario para su obtención.

Medir conductividad térmica de materiales basados en cemento, tipo hormigón ligero y composites cemento-madera.

## 3. Metodología

Para la medida de la conductividad térmica de materiales se ha diseñado y construido un equipo que trabaja sobre geometría cilíndrica, estado estacionario y en el equilibrio.

Para obtener resultados de conductividad térmica aplicando la ecuación (2) es necesario:

Transferir calor (Wattios), de forma constante en el tiempo, mediante una resistencia eléctrica con valor de resistencia fijo, siendo alimentada dicha resistencia con un voltaje y amperaje constantes y conocidos.

Tomar datos de temperatura del interior de la muestra cilíndrica, zona a la que aportamos el calor producido por la resistencia eléctrica.

Tomar datos de temperatura exterior de la muestra cilíndrica a medir.

Un sistema de control del proceso de medida y de adquisición de datos.

### 3.1 Sistema de medida

El sistema de medida consta de dos partes principales, el sistema de medida conectado a un ordenador y el sistema de fabricación de probetas cilíndricas huecas.

El sistema de medida que realiza la adquisición de datos y los sensores y actuadores asociados a este, se ha construido mediante:

Una placa de desarrollo con microprocesador Arduino Leonardo.

A dos de las entradas analógicas del Arduino Leonardo se les suministran dos señales de temperatura acondicionadas por dos módulos de acondicionamiento de señal para termoresistencias de platino LKM tipo 224.

Los acondicionadores de señal reciben la medida de temperatura dada por dos sondas RTD. La sonda interior es una sonda de 3 mm de diámetro y 10 cm de longitud. La sonda exterior es de tipo plano de RTD.

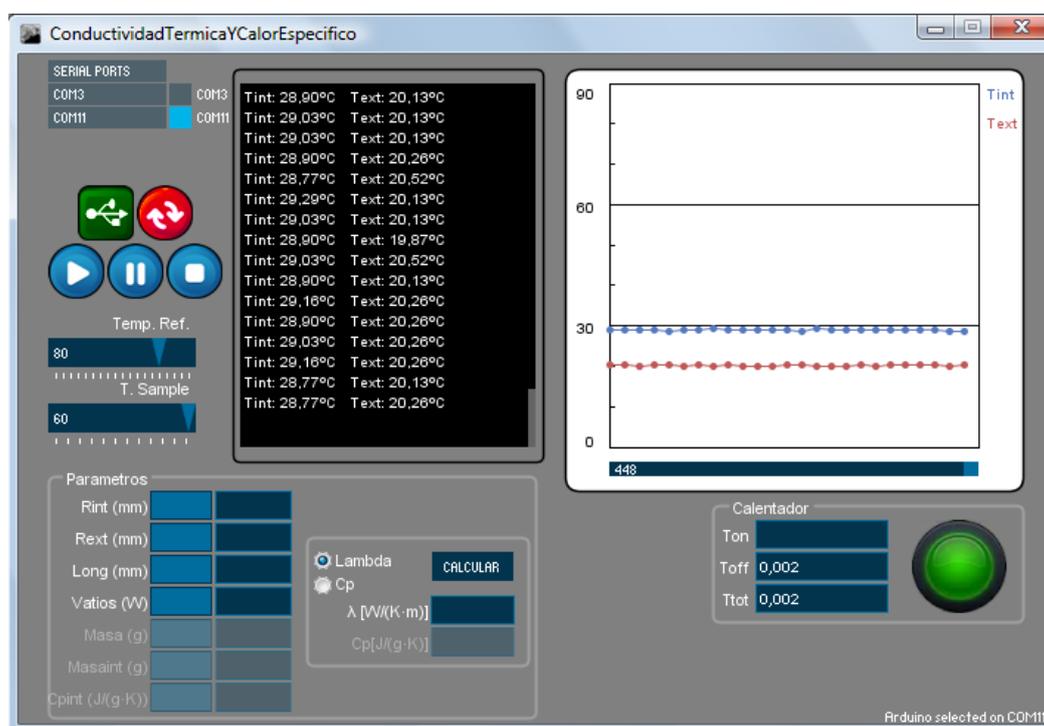
Mediante una salida digital del Arduino Leonardo se controla un termostato y un relé que sirve como mecanismo de seguridad para desconectar el calentamiento si este supera la temperatura máxima de trabajo seleccionada.

Una resistencia de calentamiento que proporciona 1,46 W de potencia a 28 V.

La resistencia de calentamiento y la sonda de temperatura interior van introducidas en un elemento cilíndrico de aluminio. El diámetro exterior del elemento es 20 mm y su longitud es de 150 mm. El cilindro de aluminio encaja en el interior de la camisa de cobre de las muestras a medir.

El sistema de medida recoge datos en un ordenador mediante un programa informático que presenta una iterfac de usuario.

Figura 1: Interfac de usuario del sistema de medida.



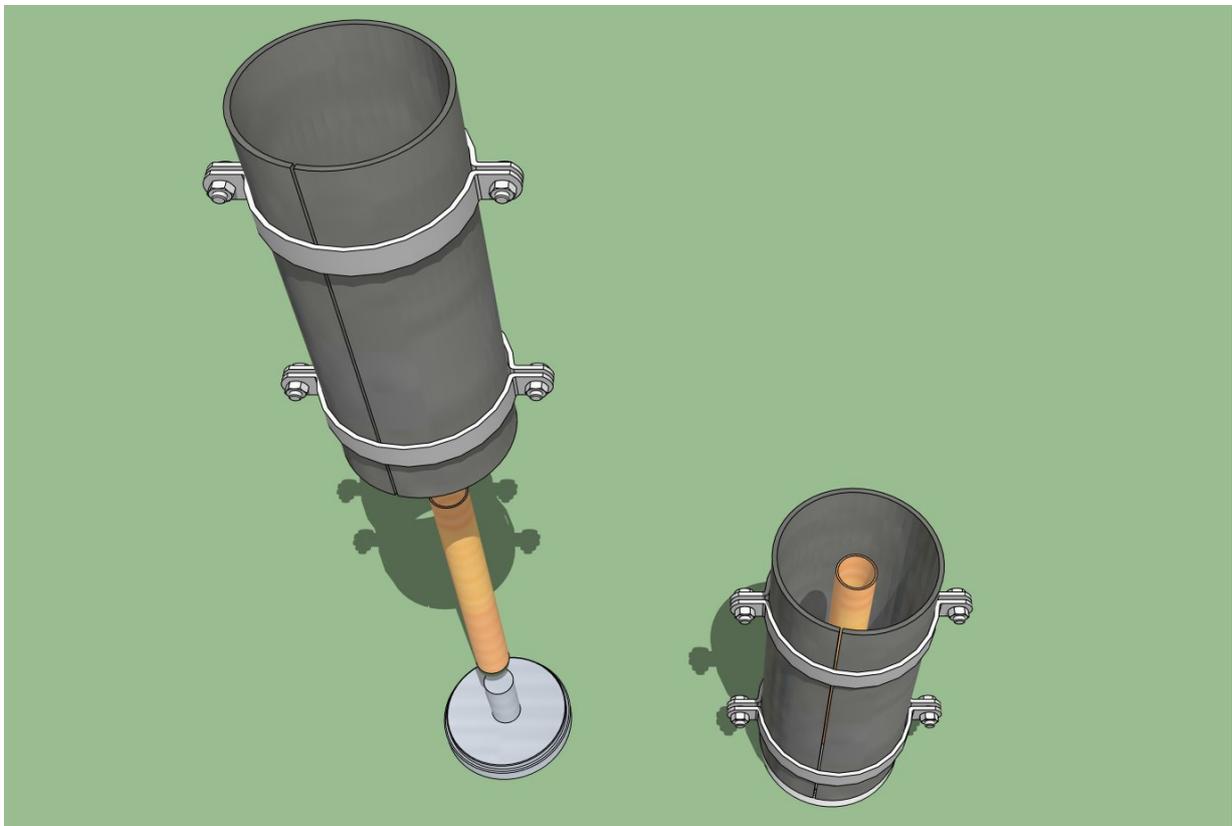
El molde y sistema para la fabricación de las probetas sobre las que se realiza la medida:

Consta de 4 piezas. Dos tapas, inferior y superior, fabricadas en poliamida, consistentes en cilindros que permiten encajar una camisa de cobre por el interior y un cilindro de PVC por el exterior.

En la parte interior del molde se coloca un cilindro de cobre hueco de diámetro exterior 22 mm pared 1 mm y diámetro interior 20 mm. Cuando el espacio se rellena con el composite a ensayar, este se une fuertemente a la pared exterior de la camisa de cobre.

La tapa inferior y superior van cerradas por una camisa cilíndrica de PVC. Esta camisa cilíndrica está cortada por una línea, lo que facilita la extracción de la muestra a ensayar del molde. El diámetro interior de la camisa cilíndrica de PVC es de 85 mm.

**Figura 2: Diseño del molde de preparación de muestras**



### 3.2 Verificación del sistema de medida

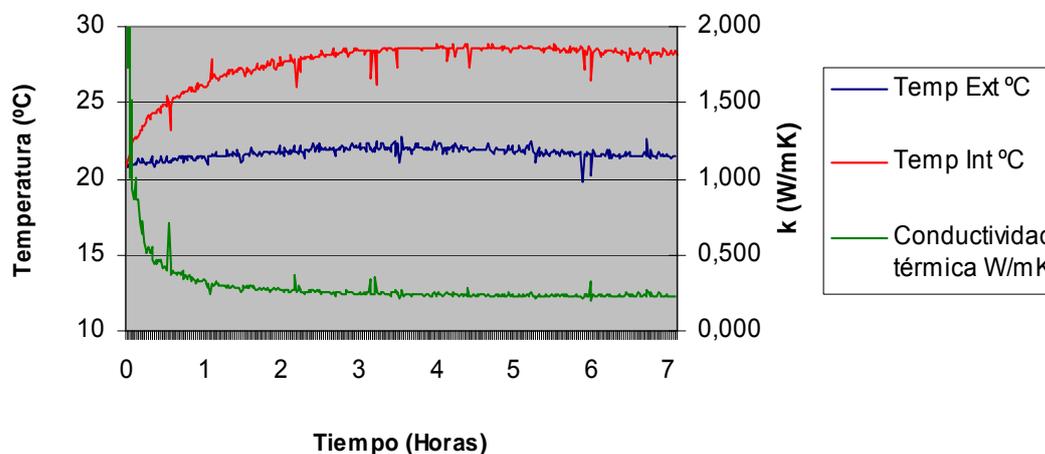
El sistema de medida puede ser verificado mediante el empleo de materiales de referencia de conductividad térmica.

Para verificar el sistema de medida propuesto en el rango de aplicación de los materiales composites de cemento aislantes térmicos, empleamos el siguiente material de referencia:

Cilindro de espesor 31,5 mm, diámetro interno 22 mm y diámetro externo 85 mm fabricado a torno, en material Extruded Polyoxymethylene Acetal Homopolymer (DuPont™ Delrin®) GlobalEPP POM-H, con valor de conductividad declarada por el fabricante GlobalEPP (Leicester) de 0,23 W/m·K según ISO 8301:1991

Las medidas realizadas y el comportamiento de temperaturas en la muestra se presentan en la figura 3:

**Figura 3: Datos de evolución de temperaturas (líneas roja y azul) y conductividad térmica (línea verde) vs tiempo para una medida de una probeta cilíndrica de acetel.**



Para verificar el funcionamiento del sistema se han realizado 10 medidas sobre la muestra de acetel, obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 1:

**Tabla 1: Resultados de la medida de una probeta del material de referencia.**

| ACETAL GlobalEPP POM-H<br>0,32 W/mK ISO 8301:1991 | k (W/mK) |
|---|----------|
| Ensayo 1  | 0,234    |
| Ensayo 2  | 0,242    |
| Ensayo 3  | 0,229    |
| Ensayo 4  | 0,238    |
| Ensayo 5  | 0,234    |
| Ensayo 6  | 0,228    |
| Ensayo 7  | 0,233    |
| Ensayo 8  | 0,237    |
| Ensayo 9  | 0,243    |
| Ensayo 10   | 0,234    |
| MEDIA   | 0,235    |
| DESVIACIÓN ESTANDAR                               | 0,005    |
| VARIACIÓN MÁXIMA                                  | 0,008    |
| % DE VARIACIÓN MÁXIMA                             | 3,40%    |

Las muestras son protegidas en su parte inferior y su parte superior por dos aislamientos de 5 cm de espesor de espuma de poliuretano, para evitar el posible error de las pérdidas de calor en el eje axial.

El proceso de medida implica lograr el equilibrio térmico en las muestras y en todos los casos se ha establecido un tiempo de calentamiento de 5 horas, previo a considerar las

medidas como apropiadas. Tras el establecimiento del equilibrio térmico para todas las muestras se toman datos durante 2 horas en intervalos de 1 minuto (120 datos). A partir de los datos obtenidos se calcula la conductividad térmica media.

### 3.3 Preparación de las muestras de materiales a medir

Los materiales ensayados son 5 tipos de hormigones ligeros, dos de los cuales se han fabricado empleando cargas de madera.

Para cada material se han realizado 5 probetas mediante la realización de 5 preparaciones diferentes con el fin de dotar a los materiales ensayados de una variabilidad que se aproxime a la variabilidad de procesos de fabricación reales.

La preparación de las muestras se ha realizado mediante la adición de cemento sobre el agua y agitación con sistema de hélice mecánico para preparación de morteros. Tras 1 minuto de mezclado, se añade la carga correspondiente a cada muestra y se mezcla la carga con el mismo sistema durante 5 minutos.

Una vez preparado el composite a ensayar, se rellena con este el molde de fabricación de la probeta. La probeta se golpea para realizar un efecto de vibración que compacte el material. La probeta se cierra mediante la tapa superior y se mantiene en el molde durante 24 horas hasta el desmolde de la misma.

Las probetas desmoldadas se dejan curar durante 28 días con anterioridad a la realización del ensayo de conducción calorífica.

**Figura 4: Probetas**



Las muestras son cilíndricas con un espacio interior cilíndrico y el volumen se calcula teniendo en cuenta que el radio exterior es 42,5 mm, el radio interior es 11 mm y la altura de la muestra es 200 mm, siendo para todos los casos 1054 ml.

El peso de la muestra se halla por diferencia entre el peso del conjunto de muestra y camisa de cobre menos el peso de la camisa de cobre.

La densidad de las muestras se halla mediante el peso y el volumen de las mismas.

**Tabla 2: Materiales fabricados**

| TIPO    | COMPOSICIÓN    |                |                 |                                 |          |          |                          |                       |                        |
|---------|----------------|----------------|-----------------|---------------------------------|----------|----------|--------------------------|-----------------------|------------------------|
|         | CARGA          | VOL CARGA (ml) | PESO CARGA (gr) | DENSIDAD APARENTE CARGA (gr/ml) | CEM (gr) | H2O (ml) | RELACIÓN CARGA/CEM (p/p) | % CARGA SOBRE CEMENTO | RELACIÓN H2O/CEM (p/p) |
| PERLITA | Perlita 0-5 mm | 1500           | 162,30          | 0,108                           | 480      | 440      | 0,34                     | 25,27                 | 0,92                   |
| PERLITA | Perlita 0-5 mm | 1500           | 168,90          | 0,113                           | 480      | 440      | 0,35                     | 26,03                 | 0,92                   |
| PERLITA | Perlita 0-5 mm | 1500           | 165,20          | 0,110                           | 480      | 440      | 0,34                     | 25,60                 | 0,92                   |
| PERLITA | Perlita 0-5 mm | 1500           | 164,31          | 0,110                           | 480      | 440      | 0,34                     | 25,50                 | 0,92                   |
| PERLITA | Perlita 0-5 mm | 1500           | 166,42          | 0,111                           | 480      | 440      | 0,35                     | 25,74                 | 0,92                   |
| MEDIA   | Perlita 0-5 mm | 1500           | 165,43          | 0,110                           | 480      | 440      | 0,34                     | 25,63                 | 0,92                   |
| ARLITA  | Arlita 3-8 mm  | 1200           | 454,88          | 0,379                           | 130      | 110      | 3,50                     | 77,77                 | 0,85                   |
| ARLITA  | Arlita 3-8 mm  | 1200           | 453,72          | 0,378                           | 130      | 110      | 3,49                     | 77,73                 | 0,85                   |
| ARLITA  | Arlita 3-8 mm  | 1200           | 448,08          | 0,373                           | 130      | 110      | 3,45                     | 77,51                 | 0,85                   |
| ARLITA  | Arlita 3-8 mm  | 1200           | 457,01          | 0,381                           | 130      | 110      | 3,52                     | 77,85                 | 0,85                   |
| ARLITA  | Arlita 3-8 mm  | 1200           | 455,24          | 0,379                           | 130      | 110      | 3,50                     | 77,79                 | 0,85                   |
| MEDIA   | Arlita 3-8 mm  | 1200           | 453,79          | 0,378                           | 130      | 110      | 3,49                     | 77,73                 | 0,85                   |
| EPS     | EPS 3-8 mm     | 1200           | 8,27            | 0,007                           | 385      | 190      | 0,02                     | 2,10                  | 0,49                   |
| EPS     | EPS 3-8 mm     | 1200           | 8,34            | 0,007                           | 385      | 190      | 0,02                     | 2,12                  | 0,49                   |
| EPS     | EPS 3-8 mm     | 1200           | 7,89            | 0,007                           | 385      | 190      | 0,02                     | 2,01                  | 0,49                   |
| EPS     | EPS 3-8 mm     | 1200           | 8,29            | 0,007                           | 385      | 190      | 0,02                     | 2,11                  | 0,49                   |
| EPS     | EPS 3-8 mm     | 1200           | 8,05            | 0,007                           | 385      | 190      | 0,02                     | 2,05                  | 0,49                   |
| MEDIA   | EPS            | 1200           | 8,17            | 0,007                           |          |          | 0,02                     | 2,08                  | 0,49                   |
| MADERA1 | Madera larga   | 1250           | 229,12          | 0,183                           | 345      | 345      | 0,66                     | 39,91                 | 1,00                   |
| MADERA1 | Madera larga   | 1250           | 230,45          | 0,184                           | 345      | 345      | 0,67                     | 40,05                 | 1,00                   |
| MADERA1 | Madera larga   | 1250           | 228,67          | 0,183                           | 345      | 345      | 0,66                     | 39,86                 | 1,00                   |
| MADERA1 | Madera larga   | 1250           | 227,72          | 0,182                           | 345      | 345      | 0,66                     | 39,76                 | 1,00                   |
| MADERA1 | Madera larga   | 1250           | 229,55          | 0,184                           | 345      | 345      | 0,67                     | 39,95                 | 1,00                   |
| MEDIA   | Madera larga   | 1250           | 229,10          | 0,183                           | 345      | 345      | 0,66                     | 39,91                 | 1,00                   |
| MADERA2 | Madera corta   | 1400           | 284,28          | 0,203                           | 385      | 385      | 0,74                     | 42,48                 | 1,00                   |
| MADERA2 | Madera corta   | 1400           | 291,13          | 0,208                           | 385      | 385      | 0,76                     | 43,06                 | 1,00                   |
| MADERA2 | Madera corta   | 1400           | 278,65          | 0,199                           | 385      | 385      | 0,72                     | 41,99                 | 1,00                   |
| MADERA2 | Madera corta   | 1400           | 288,56          | 0,206                           | 385      | 385      | 0,75                     | 42,84                 | 1,00                   |
| MADERA2 | Madera corta   | 1400           | 282,02          | 0,201                           | 385      | 385      | 0,73                     | 42,28                 | 1,00                   |
| MEDIA   | Madera corta   | 1400           | 284,93          | 0,204                           | 385      | 385      | 0,74                     | 42,53                 | 1,00                   |

### **3.4 Hormigones ligeros de cemento y perlita**

Se ha empleado cemento tipo III/B 42,5N/SR

La perlita que forma la carga es perlita expandida para aplicaciones en el sector de la construcción con tamaño de 0 a 5 mm.

Al agua de amasado se añade un aireante basado en lignosulfonatos en proporción de un 3% sobre el peso total de la muestra.

Se aprecia fragmentación en la perlita en el momento del amasado y llenado del molde.

### **3.5 Hormigones ligeros de cemento y arlita**

Se ha empleado cemento tipo III/B 42,5N/SR

La arlita que forma la carga es arcilla expandida estandar para aplicaciones en el sector de la construcción con tamaño de 3 a 8 mm.

### **3.6 Hormigones ligeros de cemento y poliestireno expandido (EPS)**

Se ha empleado cemento tipo III/B 42,5N/SR

El poliestireno integrante de la carga es poliestireno expandido con forma esférica para aplicaciones elaboración de hormigones ligeros con tamaño de 3 a 8 mm.

Al agua de amasado se añade latex tipo SBR dispersión acuosa del 33% y en cantidad de latex puro de un 1% sobre el peso de la muestra.

### **3.7 Composites ligeros de cemento y madera larga**

Se ha empleado cemento tipo III/B 42,5N/SR

La madera empleada son astillas de pino con forma acicular y longitud de las astillas entre 0,8 y 30 mm. En la carga existe una proporción alta de astillas de tamaño grande, mientras que la proporción de finos es baja.

La madera ha sido tratada previamente con una disolución acuosa de  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  en cantidad de la sal del 5% sobre el peso de la madera, dejando que se seque completamente a temperatura ambiente. El composite cemento-madera se ha fabricado 15 días después del tratamiento químico de la madera.

### **3.8 Composites ligeros de cemento y madera corta**

Se ha empleado cemento tipo III/B 42,5N/SR

La madera empleada son astillas de pino con forma plana y longitud de las astillas entre 0,8 y 5 mm. En la carga existe una proporción baja de astillas de tamaño grande, mientras que la proporción de finos es más alta.

La madera ha sido tratada previamente con una disolución de  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  en cantidad de la sal del 5% sobre el peso de la madera, dejando que se seque completamente a temperatura ambiente. El composite cemento-madera se ha fabricado 15 días después del tratamiento químico de la madera.

## **4. Resultados**

Los resultados de conductividad térmica se presentan en la tabla 3.

La variabilidad más importante tanto en densidad de la probeta como en conductividad térmica se ha producido en el hormigón con carga de perlita debido a la fragmentación de la carga durante su fabricación.

**Tabla 3: Conductividad térmica de los materiales**

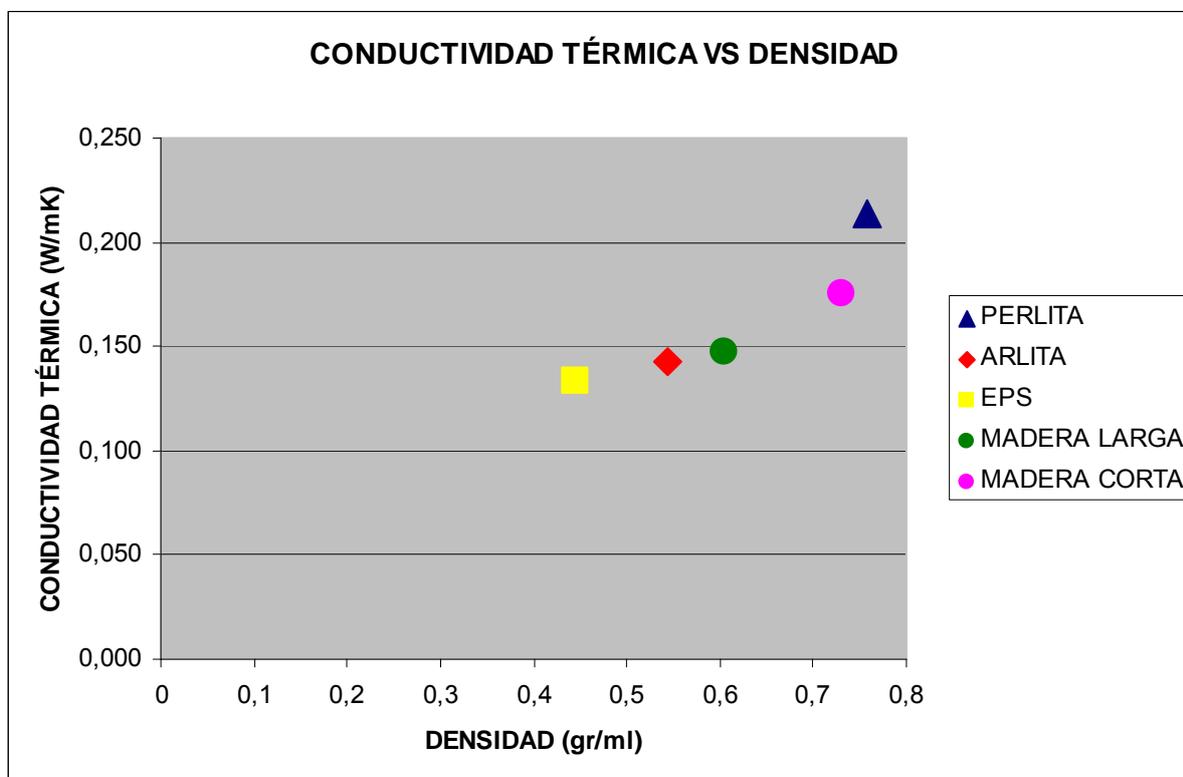
| MATERIAL                         | PERLITA | ARLITA | EPS   | MADERA LARGA | MADERA CORTA |
|----------------------------------|---------|--------|-------|--------------|--------------|
| Densidad media de las 5 muestras | 0,759   | 0,544  | 0,446 | 0,604        | 0,731        |
| Muestra 1 medida 1               | 0,221   | 0,142  | 0,138 | 0,155        | 0,153        |
| Muestra 1 medida 2               | 0,217   | 0,144  | 0,137 | 0,145        | 0,151        |
| Muestra 1 medida 3               | 0,219   | 0,141  | 0,138 | 0,145        | 0,150        |
| Muestra 2 medida 1               | 0,202   | 0,146  | 0,136 | 0,150        | 0,186        |
| Muestra 2 medida 2               | 0,199   | 0,143  | 0,131 | 0,151        | 0,185        |
| Muestra 2 medida 3               | 0,204   | 0,148  | 0,130 | 0,146        | 0,184        |
| Muestra 3 medida 1               | 0,225   | 0,146  | 0,125 | 0,157        | 0,180        |
| Muestra 3 medida 2               | 0,238   | 0,146  | 0,125 | 0,151        | 0,182        |
| Muestra 3 medida 3               | 0,233   | 0,141  | 0,124 | 0,150        | 0,184        |
| Muestra 4 medida 1               | 0,210   | 0,138  | 0,137 | 0,139        | 0,177        |
| Muestra 4 medida 2               | 0,208   | 0,141  | 0,136 | 0,139        | 0,180        |
| Muestra 4 medida 3               | 0,210   | 0,139  | 0,137 | 0,138        | 0,178        |
| Muestra 5 medida 1               | 0,209   | 0,142  | 0,136 | 0,150        | 0,182        |
| Muestra 5 medida 2               | 0,201   | 0,139  | 0,138 | 0,147        | 0,184        |
| Muestra 5 medida 3               | 0,207   | 0,142  | 0,138 | 0,147        | 0,180        |
| MEDIA                            | 0,214   | 0,143  | 0,134 | 0,147        | 0,176        |
| DESVIACIÓN ESTANDAR              | 0,012   | 0,003  | 0,005 | 0,006        | 0,013        |

#### 4.1 Relación entre densidad y conductividad térmica

La densidad es un factor que influye sobre la conductividad térmica de los composites que contienen cargas porosas. Para un volumen de muestra dado, una densidad más baja implica que dicho volumen contendrá mayor proporción de aire, el cual tiene una conductividad térmica baja.

Para los materiales estudiados existe una cierta relación entre la densidad y la conductividad térmica. Observamos que menores densidades implican menores conductividades térmicas. Sin embargo el comportamiento no es completamente lineal, existiendo ligera variación, resultado frecuente en composites de este tipo debido a que la densidad no es la única variable de la que depende la conductividad térmica (Naghizadeh et al, 2012; Uysal et al, 2004).

Figura 4: Valores medios de conductividad de los materiales preparados vs a los valores medios de densidad de dichos materiales.



#### 4.2 Relación entre huecos en el composite y conductividad térmica

Definimos composites de cemento cavernosos (hormigones cavernosos) como aquellos que contienen volúmenes ocupados solo por medio gaseoso (generalmente aire) y cuyo radio esférico de dichos volúmenes es superior a 1 mm.

Cuando un composite contiene volúmenes ocupados por aire, la conductividad térmica del composite disminuye porque el aire es muy mal conductor del calor. Del mismo modo, los huecos en el composite implican que su densidad final disminuya.

Los composites preparados, fundamentalmente debido al tamaño y la forma de la carga que contienen y la proporción de cemento que une dicha carga, muestran una mayor o menor proporción de huecos en el volumen del material.

Los composites basados en perlita y madera corta generan menos huecos de aire y presentan valores de conductividad térmica y de densidad más altos. Los composites basados en arlita, madera larga y EPS, con la proporción de ligante cemento que se han fabricado (tabla 2), contienen una apreciable proporción de zonas ocupadas solo por aire y su conductividad térmica es más baja. En este último caso, su densidad es también más baja.

**Figura 5: Huecos de aire macroscópicos en las muestras ordenadas de izquierda a derecha: Perlita, Arlita, EPS, Madera larga y Madera corta.**



## 5. Conclusiones

El método propuesto basado en geometría cilíndrica demuestra su validez como método de ensayo para la conductividad térmica.

Este método presenta ventajas en cuanto a la facilidad de preparación de las muestras, en cuanto a los costes del sistema y respecto de la realización de los ensayos.

El sistema exige tiempos de medida largos, por encima de las 5 horas para obtener el resultado de un ensayo. Sin embargo, el funcionamiento automático del sistema permite su empleo sin necesidad de estar controlado por personas.

Los materiales composites fabricados con madera, especialmente si se trata de madera larga, pueden competir con materiales basados en perlita, arlita o EPS, en cuanto a sus propiedades de aislamiento térmico, cuando la proporción en peso de madera es igual o superior al 40% sobre el peso total del composite.

Una posibilidad que incrementa el aislamiento térmico en composites ligados por cemento es la integración de huecos ocupados exclusivamente por aire. Esto es factible en el caso de empleo de madera cuando esta tiene forma alargada.

El empleo de composites madera-cemento es interesante desde el punto de vista de su origen renovable, son medioambientalmente benignos, reducen la huella de carbono y son económicamente competitivos frente a cargas tradicionales para hormigones ligeros.

## 6. Referencias

ISO 8301:1991 Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal resistance and related properties -- Heat flow meter apparatus.

Instituto Eduardo Torroja (2010) Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Vivienda Archivo: CAT-ECv6.3(MARZO10).doc

- Naghizadeh Z., Faezipour M., Ebrahimi G., Hamzeh Y. (2012) Manufacture of lignocellulosic fiber–cement boards containing foaming agent *Construction and Building Materials*, 35, 408-413
- UNE-EN ISO 8990:1997 Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada. (ISO 8990:1994).
- UNE-EN ISO 12667:2002 Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica" establece los principios para determinar la Resistencia térmica, R, y la Conductividad térmica,  $\lambda$ , de materiales de construcción.
- UNE-EN 12524:2000 Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores de diseño tabulados.
- Uysal H., Demirboğa R., Şahin R., Gü R. (2004) The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete *Cement and Concrete Research*, 34, 5, 845-848