

CONTRIBUCION A LA DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DIVERSOS MATERIALES

Iris Sánchez Soloaga*, Carlos E. Baronetto*, Bárbara Belén Raggiotti*, Angel Oshiro*,
María J. Positieri*

*Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC) - Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina. Ciudad Universitaria - CP (X5016ZAA) - Córdoba – Argentina. Teléfono/Fax: 0351-5986050/
0351- 4681823.e-mail: carlosbaronetto@gmail.com

Palabras claves: Conductividad térmica, materiales, desempeño

RESUMEN

El concepto de construcción sustentable se refiere a las estrategias destinadas a minimizar el impacto ambiental de las obras de construcción en todas las fases de su ciclo de vida; un aspecto importante para la selección de materiales es su conductividad térmica. Vinculado a ello, la posibilidad de evaluar el desempeño de los materiales componentes, los elementos y los sistemas constructivos un avance para el sector y constituye el camino para la evolución de todos los que componen la cadena de la construcción.

Este trabajo describe el proceso de desarrollo del equipo de conductividad térmica y su calibración y el resultado de mediciones en materiales diversos como mezclas cementicias con y sin adiciones minerales, mezclas cementicias con y sin materiales reciclados y otros materiales no cementicios. Se logró el diseño y construcción del equipo y el resultado de las mediciones de estos materiales está permitiendo obtener conclusiones valiosas a la hora de evaluar su desempeño térmico cuando el ahorro energético se transforma en una premisa al momento de proyectar.

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento de la calidad de vida y conservación del medio ambiente son temas que a diario se presentan de numerosas formas, hecho que se pone de manifiesto en los distintos eventos científicos. El tema tiene innumerables aristas, siendo una de ellas la industria de la construcción, como importante impulsora de beneficios para la humanidad y a su vez como generadora de contaminación ambiental tanto para el desarrollo de la infraestructura y vivienda, como durante la operación y utilización de la misma.

El avance en el conocimiento ha permitido cambiar paradigmas y propiciar cambios en el enfoque de reglamentos y normas para evaluar el desempeño de las edificaciones. Esta difícil tarea incorpora requisitos y criterios para juzgar el desempeño de las construcciones en cuanto a las exigencias de los usuarios y en función de las condiciones de exposición. La posibilidad de evaluar el desempeño de los materiales componentes, los elementos y los sistemas constructivos es un avance para el sector y constituye el camino para la evolución de todos los que componen la cadena de la construcción civil. Las sucesivas evaluaciones realizadas hasta ahora no dejan lugar a dudas sobre la inconveniencia de realizar obras de mala calidad que a los pocos años se deben ser reparadas con intervenciones más o menos onerosas y a veces con pocas probabilidades de éxito.

Además es necesario contar con un profundo conocimiento del comportamiento de los materiales y su interacción con las condiciones de exposición y conocer las posibilidades que ofrecen los nuevos métodos de ensayos para adoptar las decisiones

apropiadas. Además de los requisitos de durabilidad, también es muy importante definir las exigencias de habitabilidad (desempeño térmico, acústico y otros) y sus niveles de desempeño de forma tal que los proveedores entregue la calidad comprometida y que el comprador no exija un desempeño superior a aquel que se pactó por el precio acordado (5). En ese contexto, un caso interesante es la norma brasilera ABNT NBR 15575 "Edificaciones Habitacionales-Desempeño" (2013) que entró en vigencia en Julio de 2013, que establece parámetros que pueden ser medidos con el objetivo de evaluar el desempeño de los sistemas constructivos y es un avance en el camino de todos aquellos que constituyen la cadena de la industria de la construcción.

Esto lleva a que los materiales de construcción del siglo XXI deben responder a un conjunto totalmente diferente de las condiciones, el cambio climático global, la contaminación del aire, el aumento de los costos de combustible, la destrucción ecológica, y la pérdida de la biodiversidad, deben obligar a repensar la industria de la construcción a partir de un desarrollo sustentable(2). En relación al consumo de energía de las edificaciones en general se menciona que la energía consumida por los edificios en América del Norte ocasiona la liberación a la atmósfera de más de 2200 Mde dióxido de carbono (CO₂), alrededor de 35% del total de la región, según el informe del Secretariado al Consejo conforme al artículo 13 del acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte (6).

Esta realidad lleva a la necesidad de disponer y/o desarrollar el equipamiento que permita evaluar el desempeño térmico de materiales y los componentes que se utilizan en la construcción. Ante esta necesidad general y en particular la de evaluar la conductividad térmica por su vinculación con el ahorro energético, es que se propuso el desarrollo y la construcción de un equipo que permitiera medir la conductividad térmica en diferentes materiales, y de esta forma evaluar esta propiedad directamente relacionada con la sustentabilidad del medio ambiente.

CONCEPTOS

La *conductividad térmica* (λ) se define como la cantidad de calor que se transmite en una dirección, por unidad de tiempo y de superficie, cuando el gradiente de temperatura es unitario (IRAM 11.549, 2002). La densidad aparente es un parámetro fundamental para diferenciar la conductividad de familias de materiales, como los hormigones, agregados y aislantes. Existe una ley general que relaciona la baja conductividad con la baja densidad aparente. La norma argentina IRAM 11601 (2002) presenta valores de conductividad térmica para diferentes materiales (Tabla 1).

Tabla 1: Conductividad térmica para diferentes materiales

Material	Densidad aparente [kg/m ³]	Conductividad térmica [W/m.K]
Hormigón con agregados pétreos	2.400	1,63
Hormigón con poliestireno expandido	1.300	0,35
Hormigón celular	1.400	0,66
Tejas	-	0,70-0,76
Laminado plástico termoestable	1.400	0,49
Madera (arce, paralela a las fibras)	700	0,42
Madera dura	1.200-1.400	0,34

Los valores presentados en la Tabla 1 para una determinada densidad deben considerarse genéricos, dado que existen variaciones de conductividad térmica de acuerdo con la composición del material y también según sea la tecnología de producción utilizada. Esta norma dice que los valores de conductividad térmica pueden experimentar

un incremento de hasta un 70 % con respecto a los valores que figuran en dicha tabla, si al formar parte de un cerramiento, quedan expuestos a la variación de su contenido de humedad respecto del adoptado en las condiciones de ensayo (2).

Resistividad térmica (1/λ) A menudo es más conveniente emplear en los cálculos el recíproco de la conductividad térmica. La resistividad térmica puede considerarse como el número de horas requeridas para la transmisión de una kilocaloría, a través de un metro cuadrado de superficie en un material de un metro de espesor, cuando la diferencia de temperatura entre las caras externas es de un grado centígrado.

Transmitancia térmica (K o U). Para determinar el consumo de energía de una vivienda o edificio se utiliza la transmitancia térmica medida en $W/m^2.K$. Según la norma IRAM 11601 (2002), la transmitancia térmica es la cantidad de calor que se transmite en la unidad de tiempo a través de la unidad de superficie de un elemento constructivo, (muro o tabique de un cierto espesor), cuando la diferencia de temperatura entre las masas de aire es igual a la unidad. La transmitancia o conductancia térmica es la cantidad de calor que fluye a través de un material o de una combinación de materiales de un determinado espesor. Para verificar y eventualmente ajustar los valores de transmitancia térmicas (K) a los máximos admitidos, primero se deberá determinar la Zona Bioambiental correspondiente a la ubicación geográfica del terreno donde estará ubicada la construcción. (IRAM 11603, 2012).

Mientras que el valor λ es un coeficiente para un material simple y definido, y que por lo mismo tiene una ampliación y un significado general, el valor K se refiere a la transmisión de calor a través de algún sistema específico de muro. Este valor representa la resistencia de la pared entre sus caras exteriores, tomando en cuenta la resistencia de las superficies de acabados, los efectos de las cavidades interiores y otros factores similares. Sin embargo, el valor K básicamente se integra con el valor λ de cada uno de los materiales que forman parte del espesor del muro y por tanto conforman la línea de resistencia al flujo del calor. La transmitancia térmica tiene una gran importancia práctica ya que proporciona las bases para comparar los valores efectivos de aislamiento de distintos sistemas de techos y muros usando diferentes materiales y estimar el consumo de energía de una vivienda o edificio bajo condiciones estables

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

Este trabajo presenta el diseño y construcción de un equipo para la medición de la conductividad térmica (Norma IRAM 11.559 - Determinación de la resistencia térmica y propiedades conexas en régimen estacionario. Método de la placa caliente), que no estaba disponible en Córdoba y que se consideraba necesario para avanzar en la caracterización de nuevos materiales. Este desarrollo fue planteado como trabajo final de un grupo de alumnos de la carrera de Ingeniería Electrónica de nuestra Facultad Regional Córdoba, quienes construyeron el equipo como parte de su tesis de grado, con el apoyo económico del CINTEMAC y la contribución técnica de sus investigadores.

La fabricación de un equipo capaz de medir la conductividad térmica de los materiales surge ante la necesidad de demostrar la importancia del aislamiento térmico en la construcción para la mejora de la eficiencia energética de edificaciones, a fin de reducir costes por pérdidas energéticas. Tomando como base la norma IRAM 11.559 se llevó a cabo el diseño y construcción de un equipo para la medición de la conductividad térmica mediante el método de la placa caliente con guarda. El funcionamiento del equipo se basa en la ley de Fourier de conducción de calor en materiales sólidos.

$$q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dt}{dx} \quad (1)$$

Donde:

- q es la velocidad de transmisión del calor a lo largo del espesor medida en W/seg
- λ es la conductividad térmica del material en W / m * s * °C,
- A es la sección del material, perpendicular al flujo del calor , medida en m2
- dt es la variación de temperatura entre la cara fría y la cara caliente y se mide en °C
- dx es el espesor en la dirección x y se mide en metros

De esta manera es posible obtener la conductividad térmica de un material conociendo el área de la probeta, la potencia suministrada a la unidad calefactora, el espesor de la probeta y la diferencia de temperatura entre las caras de la misma. No obstante, la anterior ecuación solo es válida cuando la probeta es atravesada por un flujo de calor uniforme y perpendicular a la misma cuando se logra el régimen estacionario de temperatura. Esto se logra dividiendo la placa calefactora en dos, una zona central o zona de medición que es donde se mide la temperatura de la probeta en una cara y otra zona de guarda la cual es un anillo que rodea toda la zona de medición y su principal función es mantener el flujo térmico perpendicular y uniforme al mantener su temperatura igual a la de la placa central. Para lograr un flujo de calor perpendicular se utiliza una placa fría la cual hace contacto con una de las caras de la probeta y la placa calefactora anteriormente mencionada hace contacto con la otra, dejando el material a ensayar entre las dos placas. Por último todo este conjunto se rodea de un material aislante para evitar pérdidas de flujo por los laterales y debajo de la placa calefactora. En la Figura 1 se presenta un esquema del equipo.

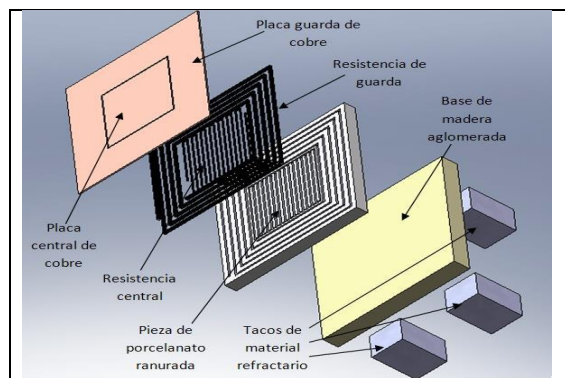


Figura 1:Esquema del equipo

La placa calefactora fue elaborada en base a una placa de porcelanato de 30x30cm que fue calada de forma de dos resistencias, una en la zona central y otra en la zona de guarda. Para obtener una temperatura uniforme en toda la superficie se utilizó una placa de cobre de 30x30x3cm de espesor en donde se cortó en el centro un cuadrado de 15x15cm haciendo las veces de zona de medición y el resto representa la zona de guarda. Luego se fijó la placa de porcelanato sobre una base de madera y se colocaron cuatro tacos de ladrillo refractario para obtener una mejor aislación de la placa caliente con el gabinete del equipo. La placa fría fue realizada con dos planchas de aluminio de 30x30cm y 2mm de espesor y una planchuela de aluminio de 2.5cm de ancho y 2mm de espesor. Los canales de la unidad refrigerante, que se presentan en la Figura 2, fueron construidos con las planchuelas de aluminio, las mismas se doblaron de tal forma de generar un par de espirales a lo largo de toda la superficie de la placa, lo que genera dos circuitos de refrigeración. Las planchuelas se pegaron con pegamento siliconado a la placa utilizada como base.

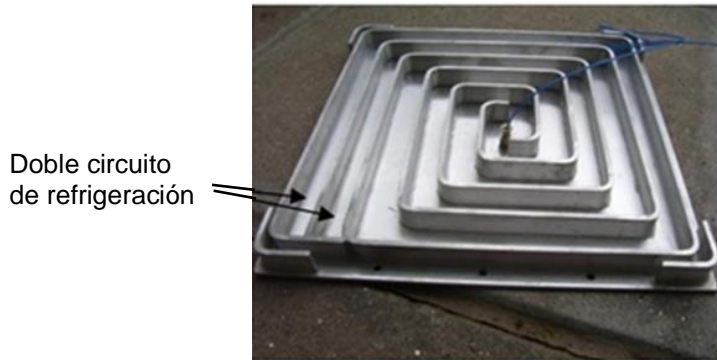


Figura2- Unidad refrigerante

Para lograr una refrigeración óptima de la placa fría, se realizó un circuito cerrado por donde fluye el agua. Esto presenta la ventaja que no se desperdicia agua y se logra una buena disipación del flujo térmico proveniente de la probeta. Dentro de un recipiente de 25 litros se colocó una bomba de agua la cual genera un caudal de 1,216 litros/minutos; el agua circula hacia la placa fría luego sale con una temperatura mayor a la que entró, después continúa su flujo hacia un radiador el cual posee cuatro *coolers* para hacer que descienda un poco la temperatura del agua y por último retorna al recipiente de 25 litros.

Para evitar la pérdida de flujo térmico, la parte de abajo, los costados de las placas y donde estaría la probeta se recubrió con lana mineral (Figura 3) que tiene una conductividad térmica muy baja, entre 0.050 y 0.031 W/m.°C, por lo que es un excelente aislante térmico. En el gabinete se colocó un circuito electrónico encargado de medir, controlar y representar los parámetros físicos necesarios para el cálculo de la conductividad térmica. La medición de espesor se obtiene ante el desplazamiento de la placa fría. Cuando se coloca una probeta dentro del equipo, un vástago localizado sobre la placa se eleva transformando el desplazamiento en una tensión que luego es procesada por el circuito electrónico. La potencia es obtenida mediante un control *PWM* sobre una fuente de corriente continua de 18,5V x 3,3Amp. Así se logra una potencia constante sobre el área de medición que es regulada por el control *PWM* obteniendo la potencia adecuada para distintas probetas y lograr una diferencia de temperatura entre las caras de más de 10°C y menos de 20°C.

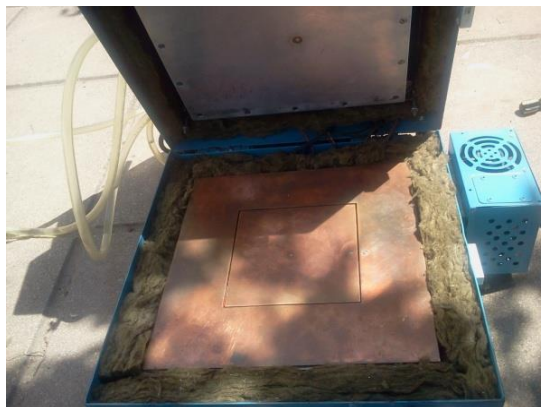


Figura3- Aislación lateral

Para la medición de temperatura se utilizaron sensores AD590 los cuales presentan una respuesta lineal entregando 1μA por °K. Se colocaron dos sobre la placa calefactora central, uno en el centro y otro en un lateral, otro al lado sobre la placa de

guarda y por último uno, en el centro de la placa fría. La señal de corriente entregada por los sensores es procesada por el circuito y representada en pantalla. Al encender el equipo la potencia aplicada sobre la probeta va aumentando lentamente hasta lograr un incremento de $0,4^{\circ}\text{C}$ por minuto. Una vez conseguido, la potencia se mantiene constante hasta que la diferencia de temperatura entre las caras de la probeta llegue a régimen estacionario. A medida que aumenta la temperatura, el circuito controla la potencia aplicada sobre la resistencia de la guarda para obtener una temperatura igual a la de la zona de medición. Por último, al llegar a régimen permanente con los datos de la potencia, espesor, diferencia de temperatura y área de la zona de medición, el equipo calcula la conductividad térmica mediante la ecuación de Fourier, representando el valor en pantalla y con la posibilidad de conectar una PC vía USB para transferir los resultados de la medición y generar un informe de la misma. En las Figuras 4 y 5, se presentan las pantallas con los datos obtenidos en cada situación.



Figura 4-Datos de medición Figura 5- Resultado de conductividad térmica

MATERIALES

La posibilidad de disponer del equipo ha permitido realizar mediciones en muestras de diferentes materiales utilizados en los proyectos de investigación. En este trabajo se presentan resultados de determinaciones de la conductividad térmica en distintos materiales de construcción para lo cual en todos los casos se moldearon probetas prismáticas de $30 \times 30 \times 5 \text{cm}$, cuidando que las superficies obtenidas fueran planas y lisas. Los materiales analizados son:

- Mezclas cementicias con y sin adiciones minerales. Se han estudiado mezclas cementicias a las que también se les incorporaron adiciones minerales en diferentes porcentajes como reemplazo del cemento. La presencia de adiciones minerales en las mezclas cementicias logra mejorar sus propiedades en general, en lo relativo a las propiedades térmicas y en particular la conductividad térmica se mantiene esta tendencia, tal como lo informara Demirboga (3).
- Mezclas cementicias con y sin materiales reciclados provenientes de plásticos. Se realizaron series de pastones sin plástico y luego con incorporación de plásticos reciclados; se trabajó con un residuo plástico post industrial, generado por grandes fábricas de golosinas, cuyo material no les interesa a los recicladores porque su reciclaje no lo pueden vender. Considerando que la forma de los plásticos influye notablemente en las propiedades de los hormigones elaborados con ellos, se procedió a modificar la geometría y textura de los plásticos reciclados a través del proceso de agrupado que se realizó en el laboratorio (CINTEMAC). También se han estudiado mezclas cementicias con el agregado de zeolita que tiene propiedades puzolánicas y baja conductividad térmica, es económica comparativamente con el cemento, y su obtención no lleva procesos productivos ambientalmente nocivos.

c) Otros materiales reciclados no cementicios: caucho reciclado y polietileno. Hay una abundante disponibilidad de todos estos materiales, lo cual justifica la realización de una investigación sobre sus posibles aplicaciones. Con este material compuesto se fabrican tejas para cubierta de techos ligando partículas plásticas y de caucho mediante un procedimiento de termo-moldeo con compactación para lo cual se utiliza un equipo de prensa con temperatura. Los residuos empleados para obtener el material compuesto son de dos tipos:

- Plásticos: polietileno de baja densidad procedente de bidones y caños desechados, polietileno-tereftalato procedentes de botellas descartables y polipropileno procedente de recipientes descartados de la industria alimenticia.
- Caucho: procedente de neumáticos en desuso, material que también es triturado.

La posibilidad de utilizar adiciones minerales y/o agregados alternativos (generados a partir de los desperdicios de diferentes industrias), como reemplazo de algunos tradicionalmente utilizados en la industria de la construcción y que tengan influencia en la conductividad térmica, procura una mejora medioambiental por un lado a partir de la reutilización de residuos y por otro ante la posibilidad de reducir el consumo energético.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en muestras de los distintos materiales incluidos en este trabajo, continuando con la realización de ensayos con el objetivo de determinar la dispersión de los resultados.

Tabla 2- Conductividad térmica de los materiales en estudio

Material	Conductividad térmica(W/m.k)
Morteros con 20% de reemplazo de zeolita	1.16
Mortero con cemento y arena	1,35
Caucho reciclado y polietileno de baja densidad	0,33
Hormigón convencional	1.40
Hormigón con reemplazo de 10% por plástico	1.34
Hormigón con reemplazo de 20 % por plástico	1.21

Los resultados permiten obtener conclusiones valiosas a la hora de evaluar los distintos tipos de materiales, tradicionales y no tradicionales utilizados en la construcción, cuando el ahorro energético se transforma en una premisa al momento de proyectar.

Es conocido que existe una relación directa entre la conductividad térmica y la densidad aparente(4). En la Figura 6 se presenta la relación entre ambas propiedades para los materiales estudiados; se verifica un menor valor de la conductividad para menores valores de la densidad aparente.

Es de destacar que aquí se ha trabajado con materiales de diversas composiciones tales como los plásticos y los materiales cementicios, manteniéndose la tendencia que se encuentra en la bibliografía tradicional.

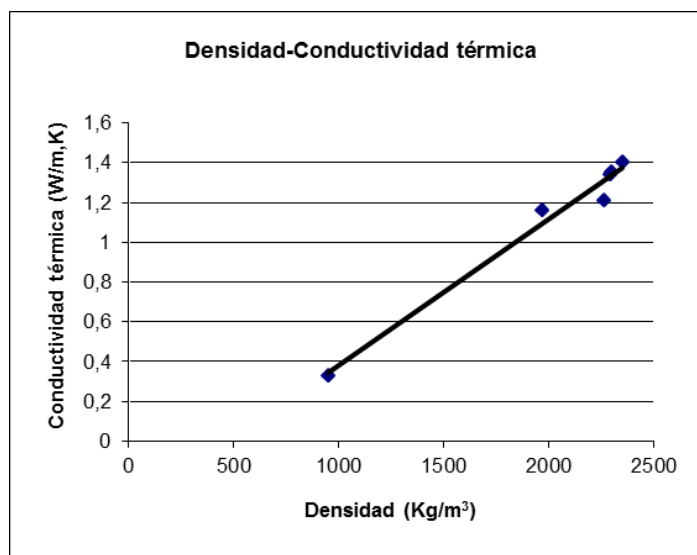


Figura 6- Relación entre conductividad térmica y densidad teórica

CONCLUSIONES

El trabajo final de los alumnos de la carrera de Ingeniería Electrónica de nuestra Facultad Regional Córdoba culminó con éxito en el diseño y construcción del equipo, permitiendo el desarrollo mutuo por la interacción de diferentes áreas de una institución.

La posibilidad de medir la conductividad térmica, contribuye al conocimiento y evaluación de los materiales y a avanzar en el concepto de construcción sustentable con diferentes estrategias destinadas a minimizar el impacto ambiental de las obras de construcción tales como la utilización de materiales alternativos y reciclados

Disponer del equipo ha permitido realizar mediciones en distintos materiales que no sólo incluyen mezclas cementicias tradicionales sino también materiales alternativos, obteniéndose resultados acordes a los antecedentes; su aplicación para el estudio de diversos materiales de construcción permitirá avanzar en la búsqueda de un mejor aprovechamiento energético de las edificaciones.

REFERENCIAS

- (1) Calkins M. "Materials for Sustainable Sites, A Complete Guide to the Evaluation, Selection, and Use of Sustainable Construction Materials" (2008)
- (2) Short, A. & Kinniburgh, W., Concreto Ligero. "Cálculo, Fabricación, Diseño y Aplicaciones". Editorial Limusa-Wiley, S. A. México. (1967)
- (3) Demirboga R., "Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar". Energy and Buildings. (2003):
- (4) Blanco, F., García, P., Mateos, P. & Ayala J., "Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with cenospheres. Cement and Concrete Research", 30, 1715-1722. (2000).
- (5) Sánchez Soloaga, I.. "Envolventes de hormigón liviano sustentable: Diseño y propiedades para el ahorro energético". Tesis Doctoral. Facultad Regional Mendoza. Universidad Tecnológica Nacional. Mendoza, Argentina. (2014)
- (6) www.cec.org/greenbuilding, "Informe del Secretariado al Consejo. Artículo 13 del Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte" (2008)