



ENTAC2006

A CONSTRUÇÃO DO FUTURO XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído | 23 a 25 de agosto | Florianópolis/SC

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE PLACA CALIENTE PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

María R. Aeberhard (1); Juan J. Corace (2); Pablo A. Martina (3)

(1) G.I.D.E.R. -Departamento de Termodinámica – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste – ARGENTINA – e-mail: raquel@ing.unne.edu.ar

(2) G.I.D.E.R. -Departamento de Termodinámica – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste – ARGENTINA – e-mail: jcorace@ing.unne.edu.ar

(3) G.I.D.E.R. -Departamento de Termodinámica – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste – ARGENTINA – e-mail: pablo@ing.unne.edu.ar

RESUMEN

Propuesta: Los proyectos desarrollados por el Grupo de Investigación G.I.D.E.R. (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables) estuvieron orientados al diseño, construcción y ensayo de un prototipo experimental de secadero solar de convección natural, a su optimización y al estudio del proceso de secado de maderas. Los resultados alcanzados demostraron que para mejorar tanto la calidad de la madera tratada, como también la rentabilidad del proceso de secado, es necesario estudiar el almacenamiento y transporte de la humedad y del calor en la estructura porosa de la madera usada como material de construcción. Con este objetivo se construyó un dispositivo denominado “Aparato de Placa Caliente” con el cual se puede determinar el coeficiente de conductividad térmica para diferentes contenidos de humedad. **Método de Investigación/Abordaje:** El aparato de Placa Caliente se construyó siguiendo las especificaciones de las Normas IRAM 11.559 y ASTM C177-85. **Resultados:** Los resultados alcanzados con el dispositivo han demostrado una concordancia satisfactoria con los valores de conductividad térmica obtenidos de la bibliografía. La utilización de dicho aparato permite determinar las propiedades térmicas de todo tipo de material bajo diferentes condiciones de humedad. **Contribuciones/Originalidad:** El aparato de Placa Caliente cubre el vacío que existía en nuestro medio para estudiar las características térmicas de las maderas como también de otros materiales de la zona chaqueña. Este trabajo tiene como objetivo aportar conocimientos científicos a la industria regional de la madera para mejorar su calidad y con ello el valor agregado del producto forestal y su competitividad en el mercado local, nacional y del MERCOSUR.

ABSTRACT

PROPOSAL: Projects developed by the research group GIDER (Group of researching and developing of alternative energies) were aimed to design, construction an testing of an experimental prototype of natural convection solar drier, its optimization and the study of timber drying process. Results reached showed that it necessary investigate storage and transferring of humidity and heating in porous structure of used timber as construction material for getting better both quality of treated timber as well as cost effectiveness in dying process . Having this objective, a device called “ Hot-plate device” was constructed in order to determine thermal conductivity coefficient for different humidity contents.

METHOD OF REASERCH/ APPROACHING: The Hot-plate device was constructed fulfilling IRAM 11559 and ASTM C177-85 standards.

RESULTS: Reached results with the apparatus have showed that a satisfactory agreement with thermal conductivity rates for proper bibliography. The use of such a device allows to determine thermal properties of every kind of material under different humidity conditions.

CONTRIBUTIONS/ ORIGINALITY: The Hot-plate device covers the emptiness existing in the research environment to study thermal characteristics of timber as well as other materials of Chaco zone. This task is aimed to give scientific knowledge for the timber regional industry to get better its

quality and besides its surplus of tree product and its competitiveness in local and national markets and in MERCOSUR.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Los proyectos de investigación realizados por el grupo G.I.D.E.R. (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables), se dirigieron al estudio del proceso de secado solar de maderas por convección natural, al diseño, construcción y ensayo de un prototipo experimental de secadero solar, y a su optimización. Los resultados alcanzados en dichos proyectos demostraron que para mejorar tanto la calidad de la madera tratada, como también la rentabilidad del proceso de secado solar de la madera, es necesario estudiar el almacenamiento y transporte de la humedad y del calor en la estructura porosa de la madera usada como material de construcción. La transferencia de calor requiere el cálculo simultáneo de los efectos del calor latente y sensible. A su vez, la transferencia de humedad en materiales de construcción porosos, como las maderas duras y semi-duras, depende de las complejas características morfológicas de los poros de dichos materiales.

En los estudios de secado de madera se utilizó la madera de Algarrobo por ser una especie comercial muy abundante en el bosque chaqueño. La madera de algarrobo presenta las características de porosidad propias de las maderas duras y semi-duras, y es aplicada actualmente en la fabricación de muebles y materiales de construcción.

La provincia del Chaco, es la primera productora de madera de Algarrobo. Es importante destacar que más del 50% de su territorio está cubierto de bosques de especies nativas, en su mayoría duras y semi-duras.

Las características de las maderas son sumamente variables aún en la misma especie, lo que acarrea inseguridad en la determinación de sus propiedades físicas y mecánicas, frente a diversas condiciones.

1.2 Conductividad Térmica

La utilización de la madera como aislante térmico en la construcción de edificios es ya conocida. En el análisis energético, el cálculo de la conducción de calor a través de las paredes, generalmente desprecia el almacenamiento y el transporte de humedad en la estructura porosa de las mismas. Sin embargo las paredes están sujetas a efectos de calor y humedad.

En todas las aplicaciones prácticas desempeña un papel importante el coeficiente de conductividad térmica. Este coeficiente es una constante del material, que depende también de la dirección del flujo de calor, de la temperatura y del grado de humedad del mismo.

La conductividad térmica 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 (Norma Iram 11.549 Acondicionamiento térmico de edificios. Definiciones). Este coeficiente se indica con la letra griega lambda λ , y su unidad se expresa en $W/(mK)$.

La determinación de la conductividad térmica de los materiales es un factor fundamental para realizar estudios de calefacción y acondicionamiento térmico en edificios, ya que ésta propiedad indica la cantidad de calor que se pierde o se gana en un ambiente, habitación, etc.

Según la ley que rige la transferencia de calor en los sólidos (Ley de Fourier de la conducción), una vez que se ha alcanzado el régimen permanente, la velocidad de transmisión calorífica a través de un muro es:

$$q = -\lambda * A * \frac{dt}{dx} \quad (\text{eq.1})$$

Donde q es la velocidad de transmisión del calor a lo largo del espesor, en calorías/seg
 λ es el coeficiente de conductividad térmica del material, en W/(mK),
 A es la sección del material, perpendicular al flujo del calor, en m²
 dt es la variación de temperatura entre las caras fría y caliente, en °C
 dx es el espesor en la dirección x, en metros

De (eq.1) se obtiene el coeficiente de conductividad térmica λ , en función de los demás parámetros.

Las conductividades térmicas de los sólidos deberían determinarse experimentalmente ya que dependen de numerosos factores que son difíciles de medir o predecir. En el caso de sólidos porosos, la conductividad térmica depende extraordinariamente de la fracción de huecos, del tamaño de los poros y del fluido que está contenido en los mismos.

1.3 Conductividad Térmica en las maderas

En el caso de la madera, la deducción de una ley física para determinar el coeficiente de conductibilidad térmica presenta grandes dificultades ya que habría que considerar las dimensiones celulares, los espesores de las capas de moléculas de agua en la superficie interna, los cosenos en la dirección respecto a las fibras y los coeficientes de conductividad térmica de cada una de las partes componentes (Kollmann, 1951).

Generalmente ocurre que en materiales aislantes el coeficiente de conductividad térmica aumenta con el peso específico aparente, debido a que en los cuerpos secos y porosos se considera un valor medio entre la aptitud conductora de los componentes sólidos y del aire contenido en los poros.

En la práctica además del aire la madera contiene también agua ligada coloidalmente o libre que contribuye notablemente a la transmisión de calor. Es por ello que estos fenómenos son muy complicados de determinar, si además se tiene en cuenta la anisotropía de la madera.

La bibliografía proporciona datos de conductividad térmica de muchos materiales, incluyendo maderas, pero no se registran datos para especies específicamente de la región chaqueña o los márgenes de variación indicados son muy amplios. En ello radica la importancia de este trabajo, en determinar valores fidedignos de materiales de la zona, que en este momento, la bibliografía carece.

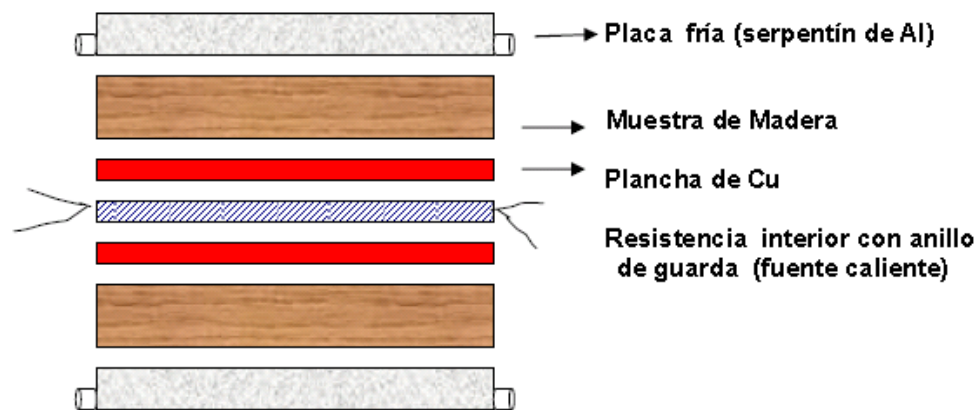
1.4 Aparato de Placa Caliente

Distintas normas indican que el coeficiente de conductividad térmica puede ser obtenido mediante la utilización de un aparato denominado de placa caliente, que consiste esencialmente en una fuente caliente constituida por una placa calefactora que comprende una parte central y un anillo de guarda separados por un espacio no mayor de 3mm. Esta fuente está ubicada en el centro del equipo.

La fuente caliente se alimenta por medio de 4 conductores eléctricos (2 en la zona central y 2 en el anillo de guarda). Estos conductores se conectan a 2 variadores de tensión que permiten una alimentación progresiva de la corriente eléctrica que calienta paulatinamente la placa caliente.

De este circuito eléctrico se miden permanentemente la tensión y la corriente. A ambos lados de la placa caliente se colocan 2 placas de material conductor (preferentemente cobre, pudiendo utilizarse aluminio u otros) con el objeto de formar una superficie homogénea de transmisión del calor.

Superpuestas a las placas conductoras se ubican las probetas del material a experimentar, y a continuación las planchas metálicas correspondientes a la fuente fría. Estas fuentes están compuestas por serpentines que permiten la circulación del agua de la red a efectos de mantener constante la temperatura. Todo lo indicado se observa en el siguiente esquema:



Esquema 1: ubicación de las fuentes y del material a ensayar

En ambas caras de la probeta a ensayar deben colocarse termocuplas en número suficiente para registrar permanentemente las temperaturas de la superficie fría y caliente. El conjunto se rodea de un material aislante para impedir fugas de calor al exterior. Se forma así una especie de “sándwich” horizontal formado por varias capas, donde el calor causado por la resistencia eléctrica en el centro se transmite hacia ambos lados externos por conducción.

Una de las normas internacionales que rigen la construcción y el funcionamiento de los equipos de placa caliente para la determinación de la conductividad térmica de los materiales es la Astm (American Standards for Testing Materials), ASTM C177-85: **Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot Plate Apparatus.**

Entre las especificaciones más importantes para materiales homogéneos de espesor inferior a 10 cm se pueden nombrar:

- El método se aplica a materiales cuya conductividad no exceda de $0,62 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$
- Las temperaturas del ensayo estarán comprendidas entre -45°C y 760°C
- El aislamiento exterior que rodea al anillo de guarda debe tener una resistencia de, por lo menos, el doble de la resistencia térmica de la placa del material que se ensaya.
- Los termopares serán de alambre cuyo diámetro no exceda de 0,57 mm
- El potenciómetro tendrá una sensibilidad mínima de 5 milésimas de milivoltio.
- La diferencia de temperaturas entre la cara caliente y la cara fría debe ser como mínimo de 22°C
- La atmósfera que rodea al ensayo debe tener como mínimo un punto de rocío superior a la temperatura más baja del aparato (para ambiente de la sala de laboratorio de 20°C y 50% de humedad relativa, el punto de rocío es de 9°C aproximadamente).

Otra de las normas que rigen el estudio de la conductividad térmica de los materiales es la Norma IRAM 11.559: **Acondicionamiento térmico de edificios. Método de determinación de la conductividad térmica de materiales de construcción mediante el aparato de placa caliente**, norma editada por el Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.

El aparato construido y ensayado en el Departamento de Termodinámica se basó principalmente en esta norma. Ésta establece muy claramente todos los parámetros, dimensiones, materiales, etc. que deberán utilizarse para construir el aparato, y una vez construido establece concretamente los pasos a seguir para que el ensayo pueda obtener valores correctos y comprobables.

Las dimensiones de las probetas están normalizadas, y en base a ellas se obtienen las magnitudes

principales del equipo. Esto se observa en la siguiente tabla 1:

Tabla 1 - Dimensiones para la construcción del Aparato de Placas

Espesor máximo de la probeta (cm)	Medidas mínimas de la superficie de la fuente de calor (cuadrada o circular) en cm		Distancia máxima entre resistencias (parte central y anillo de guarda) (mm)
	Parte central de la fuente de calor	Ancho del anillo de guarda alrededor de la fuente de calor	
2,5	10	5	10
5	15	7,5	15
6,25	30	7,5	20
10	30	15	20

2. OBJETIVO

El objetivo de este artículo es exponer y difundir el diseño y construcción de un dispositivo denominado **Aparato de Placa Caliente** con el cual se puede determinar el coeficiente de conductividad térmica para diferentes materiales.

Se indican además los valores del coeficiente de conductividad térmica, obtenidos en forma experimental con el aparato de placas, para la madera de la especie denominada Algarrobo (prosopis) según diferentes contenidos de humedad.

3. METODOLOGÍA

3.1 Materiales y Métodos de Construcción del Aparato

Para el diseño y construcción del equipo se siguieron las indicaciones de la Norma IRAM 11.559: **Acondicionamiento térmico de edificios. Método de determinación de la conductividad térmica de materiales de construcción mediante el aparato de placa caliente** y la 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.**

El corazón del equipo está constituido por una placa caliente, que suministra calor al aparato. Esta placa se construyó sobre un material semiduro (cartón marrón) usado en el bobinado de motores (maylan).

El cartón de 30cm*30cm*1,5mm de espesor, fue separado en dos partes, la central de forma cuadrada de 7,5cm*7,5cm, y la exterior o anillo de guarda, cuyas medidas externas son 30cm*30cm. Tanto el anillo de guarda como la parte central tienen bobinados en su derredor de alambre de cobre de 0,25mm de diámetro. Estos arrollamientos hacen que el valor de la resistencia del anillo de guarda sea de 6,5 ohm y el valor de la resistencia de la placa central o interna sea de 5,3 ohm (ambos valores medidos a 20 °C). Los 4 extremos de estos devanados salen hacia afuera mediante terminales largos para contactar en las borneras de los variadores de tensión.

Se cubrieron ambos lados de la placa caliente con una cartulina agujereada, para permitir el paso del calor e impedir el contacto eléctrico de los conductores con las placas de cobre que están junto a la placa caliente. En la foto 1 se observa la placa caliente:

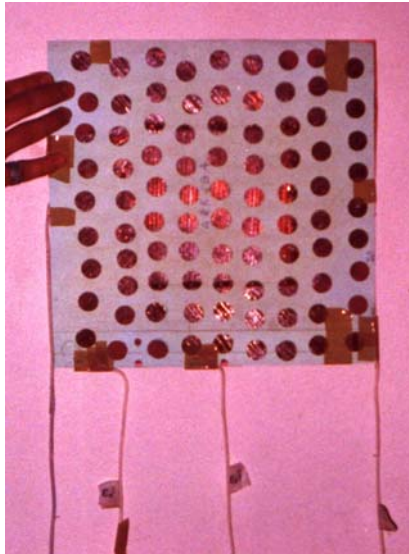


Foto 1: Placa caliente

A ambos lados del núcleo generador de calor se colocaron 4 planchas de cobre (2 de cada lado) cuyas medidas son: 30cm*30cm*1,5mm. Su función es formar una superficie homogénea de transferencia de calor hacia las muestras a ensayar que se encuentran hacia fuera. Luego de las planchas de cobre se ubicaron las probetas a ensayar, en nuestro caso 2 probetas de madera de Algarrobo (*Prosopis*) de 30cm*30cm*5cm. Los ensayos de conductividad térmica se realizaron con madera totalmente seca (secada en un horno a 105 °C), madera totalmente embebida en agua (sumergida en agua hasta que su peso permanezca constante) y madera en equilibrio higroscópico con el medio ambiente. Con esos valores se representa la curva conductividad versus contenido de humedad.

Superpuestas a las muestras de madera se colocan 2 fuentes frías, una a cada lado. Las medidas de estas placas de aluminio son: 30cm*30cm*3,9cm de espesor, mientras que los serpentines interiores tienen un diámetro de 11 mm. El objeto de estas fuentes es generar una fuente fría de temperatura constante. Las fuentes frías se construyeron con placas de aluminio, dentro de las cuales se encuentra un serpentín de agua, por el cual circula en forma permanente agua de red.

En los primeros ensayos realizados se trabajó con un caudal de agua de 1,4 a 1,5 litros de agua por minuto en cada serpentín. En la foto 2 se observa el aparato de placas en conjunto:



Foto 2: Aparato de placa caliente

Finalmente, se cubrieron los 6 lados con planchas de isopor de 3cm de espesor, para impedir que el calor fuese hacia afuera. Fuera de este cubo de isopor, salen los 4 cables de conexión hacia los variadores de tensión y los cables que conectan los resistores de platino pt100 para medir la temperatura. A continuación se observa en la foto 3 del equipo terminado:

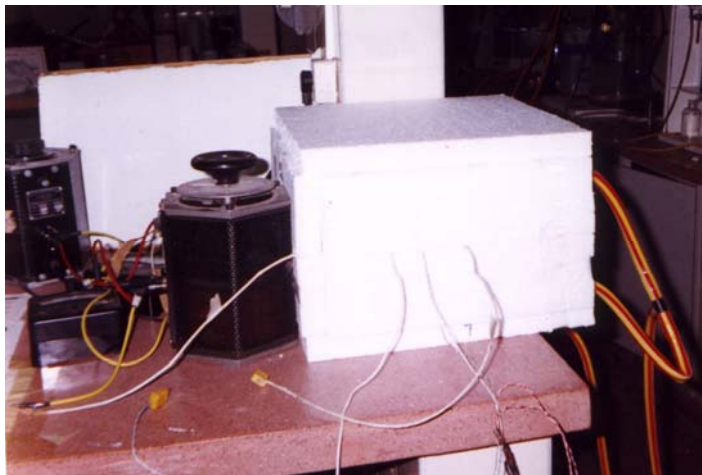


Foto 3: Equipo de placas aislado del exterior

3.2 Ensayos realizados con el Aparato de Placas

Se realizaron determinaciones con dos muestras de madera (M1 y M2) de 30cm*30cm*5cm en cuatro condiciones diferentes de contenido de humedad: estado anhidro (0%), al 3,6%, al 5,0% y totalmente saturadas de agua (al 31,14%). En esos 4 estados se ensayó la conductividad, obteniéndose 4 valores diferentes y crecientes al aumentar el contenido de humedad. En la foto 4 se observan las muestras de madera a ensayar.



Foto 4: muestras de madera de Algarrobo

Al inicio el ensayo, se reguló el variador de tensión para que entregue una intensidad de corriente baja, y luego se aumentó la corriente lentamente, para alcanzar una temperatura de fuente caliente entre 60°C y 70°C. En ese punto se deja fija la corriente eléctrica, y la temperatura de la fuente fría empieza a aumentar lentamente, hasta alcanzar luego, de 20 a 22 hs, una temperatura de entre 30°C y 40°C. Mientras tanto se hace circular agua de red por el serpentín de la placa fría.

Aproximadamente a las 26 hs, el sistema ya había alcanzado el estado estacionario (las temperaturas no variaban más), anotándose a partir de ese momento los valores de temperatura fría, caliente y potencia entregada a la placa, datos con los que se calculó la conductividad, aparte del espesor de la madera y la sección de pasaje del calor.

En los 3 ensayos realizados con maderas con cierto contenido de humedad (ensayos 2, 3 y 4), se observó que la muestra de madera perdía de peso al finalizar el ensayo, pero ésta disminución resultó ser poco significativa, casi despreciable. Por ejemplo, en el ensayo n°2, el peso inicial de la madera fue de 3250gr (3,602%) y al finalizar el ensayo, 26 horas después, el peso se redujo a 3233gr (3,060%). Por lo tanto, a pesar que el contenido de humedad no permanece rigurosamente constante a lo largo de todo el ensayo, se puede deducir que los valores hallados son correctos ya que la pérdida de humedad es mínima.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se mencionó anteriormente en el caso de sólidos porosos, como la madera, la conductividad térmica depende en gran medida del contenido de humedad.

Los ensayos se realizaron para 4 estados con diferentes contenidos de humedad bajo condiciones de flujo estacionario. El promedio de los resultados obtenidos en los ensayos para la muestra de madera M2 se indican en la Tabla 2:

Tabla 2: valores característicos de la muestra M2

ensayo n°	Peso (gr)	contenido de humedad (%)	conduct. térmica λ W/(mK)
1	3137	0,000	0,221
2	3250	3,602	0,242
3	3294	5,004	0,256
4	4114	31,144	0,284

Estos valores se representaron en el gráfico 1:

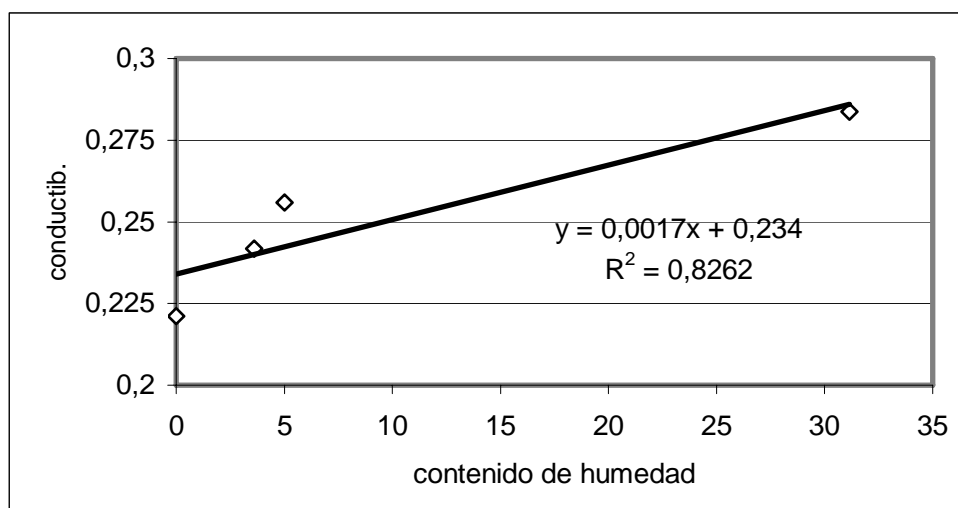


Gráfico 1: conductividad térmica en función del contenido de humedad

En el gráfico se observa que la conductividad térmica de la madera es función lineal o casi lineal del contenido de humedad.

Los valores de conductividad térmica determinados en forma experimental son coincidentes a los obtenidos en la bibliografía para maderas con características similares al Algarrobo (prosopis). Estos resultados fueron obtenidos en forma comparativa con otras especies debido a que no se encuentran

hasta la fecha datos del coeficiente de conductividad térmica específicos para la especie estudiada.

Los resultados obtenidos experimentalmente se consideran satisfactorios ya que la diferencia entre el valor medio aritmético de todas las determinaciones y cada uno de los valores obtenidos de λ no varió más del 1,5%.

El coeficiente de conductividad térmica del material húmedo es mucho mayor que la del material seco, es decir, que depende principalmente del peso específico. Este efecto queda explicado teniendo en cuenta que la conductividad térmica del aire que llena los poros es mucho menor que la del constituyente pesado del material poroso.

Los sólidos porosos secos son muy malos conductores del calor y constituyen excelentes aislantes térmicos.

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un equipo que permite medir el coeficiente de conductividad térmica de materiales utilizados en la construcción.

Este dispositivo cumple totalmente con las especificaciones técnicas de las normas IRAM 11.559 y ASTM C177-85, y aunque sólo se ha determinado, hasta el momento, el coeficiente de conductividad térmica para la madera, permite estudiar también, en forma directa, las características térmicas de otros materiales como ser ladrillo, poliestireno expandido, mosaicos, paneles diversos, etc. Este equipo es empleado en el proyecto de investigación que realiza actualmente el G.I.D.E.R. denominado: *Transferencia Combinada de Calor y Masa en Maderas Utilizadas como Material de Construcción Poroso e Higroscópico* y también es destinado a la docencia, ya que mediante este aparato se puede comprender el proceso de la transferencia del calor por conducción.

El aparato de placas construido por el Grupo de Investigaciones en Energías Renovables (G.I.D.E.R.), cubre el vacío que existía en nuestro medio de un equipo para medir propiedades térmicas en las maderas de la región chaqueña.

5. REFERENCIAS

KOLLMANN, F. **Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe**. Springer Verlag Berlin. 1951 pp. 399-576.

Norma Iram 11.559 **Acondicionamiento térmico de edificios. Método de determinación de la conductividad térmica de los materiales de construcción mediante el aparato de placa caliente.**

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**

Norma Iram 11.549 **Acondicionamiento térmico de edificios. Definiciones**

Norma Iram 11605 **Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en viviendas. Valores máximos admisibles de transmitancia térmica K**

Monografía del Instituto Eduardo Torroja, **Variación de la Conductibilidad Térmica de los Materiales en Función de su Densidad Aparente**, n 284, Madrid,

Página Oficial de IRAM disponible en: <http://www.iram.com.ar> Acceso: 6 oct. 2003.

Página Oficial de ASTM disponible en <http://www.astm.org> Acceso: 6 oct. 2003.

