

BANCO DE PRUEBAS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE MATERIALES APLICADOS EN EDIFICACIONES

Fernando Enrique Flores Murrieta

feflores@ugroo.mx

División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo
Boulevard Bahía s/n, esq. Ignacio Comonfort, Col. del Bosque,
Chetumal, Quintana Roo, C.P. 77019

RESUMEN

En este trabajo se presenta la aplicación de un banco de pruebas de conductividad térmica, para determinar esta propiedad tanto en materiales de uso común en la construcción (yeso, madera de pino) como en aquellos a base de fibras leñosas dentro de un rango de bajas temperaturas (23 a 60 °C). Se utiliza un dispositivo denominado *placa caliente guardada*, que requiere de dos muestras idénticas del mismo material, colocadas entre una fuente de calor y una fuente fría, las cuales están aisladas térmicamente. Los materiales de uso común se han utilizado como referencia en la comparación de las propiedades termofísicas que aparecen en la bibliografía técnica, lo cual nos permite tener un buen grado de confiabilidad en el dispositivo utilizado en la determinación de dichas propiedades en materiales nuevos o poco comunes, de los cuales existe muy poca o nula información al respecto. La conductividad térmica de estos materiales y de cualquier otro que se emplee en la construcción de edificaciones es de mucha importancia para un buen diseño térmico en todo edificio, logrando con esto un adecuado confort y un considerable ahorro energético en materia de uso de sistemas de aire acondicionado, como se aprecia en un ejemplo de aplicación sencillo.

Palabras clave: Conductividad térmica–ecuación de Fourier–placa caliente guardada–materiales de construcción–estado estable.

INTRODUCCIÓN

Actualmente ya es de conocimiento general que el uso de materiales apli-

cados en climas tropicales húmedos se ha desarrollado como un fin comercial o de mercado y no como una respuesta a situaciones de confort térmico. En

consecuencia, se generan grandes ganancias de calor en las edificaciones, por lo que se deben realizar fuertes consumos de energía mediante sistemas electromecánicos (ventilación y acondicionamiento de aire) para contrarrestar dichas ganancias.

Por otro lado, si se pretende eficientar un sistema constructivo, es de suma importancia conocer las propiedades termofísicas de los materiales utilizados en el mismo. Por lo que el uso de la bibliografía técnica es útil como referencia para la selección adecuada de los materiales comunes que en la mayoría de los casos no son locales. Asimismo, en muchas ocasiones no aparecen los datos de materiales nuevos o que se desean aplicar.

De esta manera, es necesario contar con datos precisos de las propiedades térmicas y físicas de materiales locales y comunes que den como resultado una optimización de la energía de acuerdo a las necesidades constructivas de la región. Por lo tanto, en este trabajo también se presentan resultados del comportamiento térmico de dos materiales típicos usados en edificaciones. Tal es el caso del yeso y la madera de pino, así como de un material a base de fibras leñosas. Para esto, se utilizó un dispositivo de *placa caliente guardada* en la determinación de la propiedad térmica denominada “conductividad” de los materiales mencionados. El conocimiento de la conductividad térmica de cualquier material de construcción, es un factor determinante para poder establecer un criterio de uso en el diseño de un edificio.

En el caso de la ciudad de Chetu-

mal, gran parte de sus edificios están contruidos con block de concreto. En lo que respecta a los muros y en lo referente a los techos, son del tipo de losa de concreto, vigueta y bovedilla; siendo que éstos materiales tienen un alto valor de conductividad térmica y por consiguiente un elevado coeficiente de transmisión de calor, lo que se traduce en elevadas temperaturas en el interior de los espacios con la consecuente falta de confort. En la Tabla 1 se muestran los materiales de uso común en edificaciones de la ciudad de Chetumal y sus conductividades térmicas correspondientes.

ANTECEDENTES

La conductividad térmica como propiedad termofísica ha sido preponderante en el diseño y construcción de dispositivos en los que se analizan materiales de la región empleados en edificios; esta propiedad permite seleccionar los materiales adecuados en el diseño de un edificio.

Se han construido ya bastantes dispositivos sobre transferencia de calor. Los primeros trabajos fueron elaborados por la National Institute of Standards and Technology (NIST) y se realizaron en aislamientos térmicos en materiales para edificios en 1910. En 1912 Dickinson diseñó y construyó la primera placa caliente guardada para el NIST. La transferencia de calor en aislamientos había sido determinada por métodos en los cuales el calor se transfería a través de paneles de aislamiento de aire caliente de un lado y aire frío en el otro (Llovera, 2003).

Tabla 1. Conductividad térmica de los materiales de construcción utilizados en una vivienda en la ciudad de Chetumal

Material	Conductividad "k" a 24 °C W/m-°C
EN LOSAS:	
Vigueta de concreto armado tipo 12-3	1.740
Bovedilla de concreto vibro prensado de 0.15 x 0.20 x 0.56 m	1.740
Aplanado de cal-arena-cemento 1:2:3 de 0.02 m de espesor	0.721
Calcreto en exterior de 0.02 m de espesor	0.372
EN MUROS:	
Block hueco de concreto vibro prensado de 0.15 x 0.20 x 0.40 m	0.998
Aplanado de cal-arena-cemento 1:2:3 de 0.02 m de espesor	0.721
EN PISOS:	
Mosaico de pasta de 0.30 x 0.30 m	1.047
Firme de concreto de 0.02 m de espesor	0.698
EN PUERTAS Y VENTANAS:	
Vidrio florentino de 0.003 m de espesor	0.814

Fuente: FIDE, *Guía para aplicar criterios de eficiencia energética en construcciones para uso habitacional* (Bojórquez et al., 2002)

En 1916 aparece la primera publicación por Dickinson y Van Dusan en la cual se mencionan determinaciones importantes de flujo de calor a través de espacios de aire y en 30 materiales aislantes; subsecuentemente usando un aparato similar, Van Dusen y Finck en 1928 reportaron estas medidas. Alrededor de 1929 Van Dusen construyó la versión final del aparato del tipo de placa caliente guardada que operó para el NIST por más de 50 años hasta 1983.

En 1945, la American Society for Testing and Materials (ASTM) adoptó el método de la placa caliente guardada, método basado en pruebas estándar, en parte, diseñada por el NIST. En 1947 Robinson y Watson incrementaron

el rango de temperaturas del aparato de la placa caliente guardada y en pocos años completaron las primeras comparaciones inter laboratorios de pruebas de conductividad térmica en aislamientos. Para 1977, más de 300 laboratorios contaban con estos equipos, resultando un considerable progreso en la calidad de los datos de conductividad térmica sobre aislantes y materiales para edificios reportados en revistas técnicas y manuales (Llovera, 2003).

En 1964, Robinson presentó los primeros diseños la fuente lineal de calor para *placa caliente guardada*, el diseño fue novedoso, en contraste a la *placa caliente guardada convencional* que usaba calentadores uniformemente distribuidos la fuente lineal de

Banco de pruebas

calor para placa caliente guardada utilizó la fuente lineal de calor circular en puntos específicos. Por la propia ubicación de la fuente lineal de calor, la temperatura en el borde de la placa de medición es igual a la temperatura media de la placa de medición, por lo tanto se facilitan las mediciones de temperatura y la mantienen. Las ventajas de una fuente lineal de calor para placa caliente guardada incluyen: métodos de construcción más simples, precisión mejorada, análisis matemático, simplificado para el cálculo de la temperatura media de la superficie de la placa y así, determinar los errores que resultan de las ganancias o pérdidas de calor en los bordes de las muestras y uso bajo condiciones de vacío. El diseño, análisis matemático y análisis de incertidumbre para un prototipo de la fuente lineal de calor para placa caliente guardada fueron publicados en 1973 por Hahn, Robinson y Flynn. La construcción del aparato prototipo fue finalizada en 1978 y descrita por Powell y Siu. La operación y el análisis de incertidumbre fueron publicados en 1981 por Siu y Bulik (Llovera, 2003).

A finales de 1980 el segundo aparato de fuente lineal de calor para placa caliente guardada fue finalizado con los esfuerzos de Hahn, Peavy del NIST y Ober. Estos aparatos eventualmente han reemplazado a los primeros aparatos de placa caliente guardada que fueron construidos en 1929 y que aún dan servicio actualmente (Llovera, 2003).

En nuestro país, también se han realizado diferentes trabajos, relacionados a la medición de la conductividad tér-

mica de diferentes materiales, sobre todo para materiales utilizados en la industria de la construcción. A continuación se mencionan algunas de estas investigaciones:

En la Universidad de Sonora, el grupo de Energía ha estado investigando el desarrollo de un Medidor de Conductividad Térmica para materiales de construcción, en el cual se experimentan con muestras cilíndricas.

En el centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Departamento de Ingeniería Mecánica-Diseño Térmico se construyó un Equipo de Medición de Conductividad Térmica de placa caliente guardada.

En la Universidad Autónoma de Baja California, se ha estado desarrollando un experimento, sobre la estimación de conductividad térmica en materiales de construcción, como apoyo a investigaciones sobre materiales alternativos, en el programa de Maestría en Arquitectura.

Existen también trabajos similares a los ya mencionados como los de Morillón (1990) citado por Rojas (1992) y Casas et al. (1996) en donde se realizan experimentos para estimar el valor de la conductividad térmica en materiales locales, todo esto con el fin de sustituir a los costosos equipos que existen en el mercado como lo es el conductímetro, nombre común que se le da al propio banco de pruebas de conductividad térmica.

DISPOSITIVO DE PLACA CALIENTE GUARDADA

En la Universidad de Quintana Roo, dentro del Proyecto de Fibras Leño-

sas de la región, fue necesario determinar la conductividad térmica del nuevo material de fibras leñosas. De ahí surgió la necesidad de desarrollar un banco de pruebas. Este dispositivo requiere de dos muestras idénticas colocadas entre una fuente de calor y una fuente fría dentro de un gabinete de madera que cuenta con placas de aislamiento para minimizar las pérdidas de calor hacia el exterior (Kern, 1965). Por medio de instrumentos de medición (termopares) se obtienen las diferencias de temperatura en ambas caras

de las muestras. El calor que circula a través de ellos es igual a la potencia suministrada por una resistencia eléctrica, controlada por un variador de voltaje (*Variac*) (STM C 177, 1997). La conductividad térmica se determina de la diferencia de temperaturas a través de las muestras, del espesor y área de las mismas y de la potencia suministrada a la fuente de calor (ASTM C 518, 1991). La Figura 1 muestra el dispositivo de placa caliente guardada operando (Flores et al. 1999a).

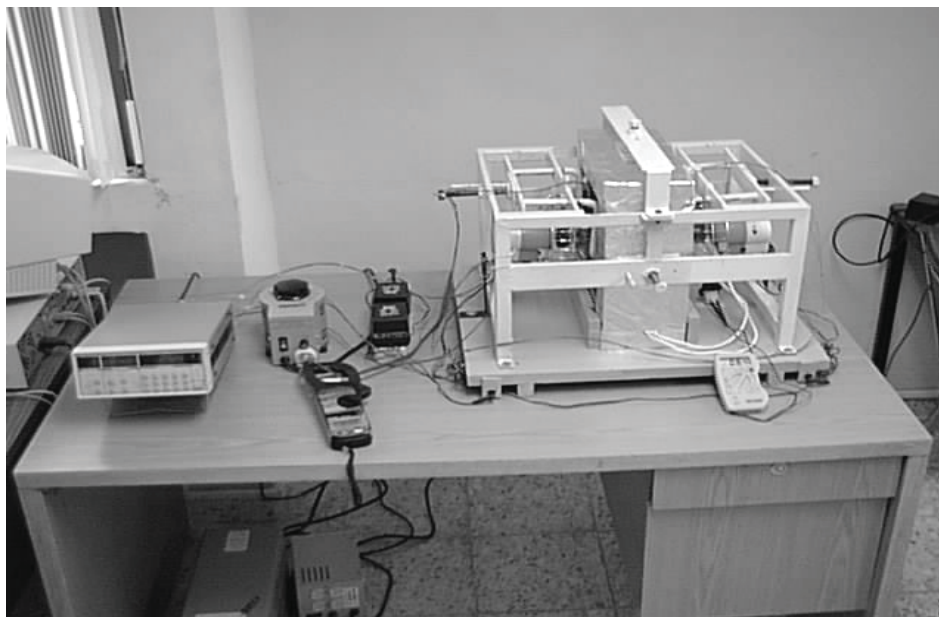


Figura 1. Dispositivo de placa caliente guardada operando

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las pruebas se realizaron en un medio ambiente controlado a temperatura

constante para evitar en mayor medida variaciones de temperatura en la fuente fría. El procedimiento para llevar a cabo la parte experimental consta de los siguientes pasos (Flores et al, 1999b):

Banco de pruebas

a) Preparación e instalación de las muestras

- Se probaron dos muestras de yeso, dos de madera de pino de 20.5 x 14.8 cm y 2 cm de espesor y dos más de fibra leñosa de 19.8 x 14.8 x 3.2 cm, fabricados con aserrín de caoba mezclado con polvo de piedra, cemento y agua en la proporción 1:0.2:0.6:0.6.
- A las muestras se les practicaron dos ranuras en ambos lados para colocar los instrumentos de medición de temperatura (termopares).
- Posteriormente se colocan en ambos lados de la fuente de calor previamente instalada

dentro del gabinete.

- Se disponen placas de aluminio en los extremos exteriores de las muestras y se ajusta todo el conjunto de placas mediante una prensa de hierro, como se muestra en la Figura 2. Se monta la tapa del gabinete, se colocan los materiales aislantes y se disponen ventiladores en los extremos del aparato para complementar así la fuente fría.
- Se enciende el circuito eléctrico: regulador de voltaje, variac, ventiladores y monitor de temperaturas y se conecta el multímetro para medir voltaje y amperaje. De esta manera se inicia la prueba térmica.

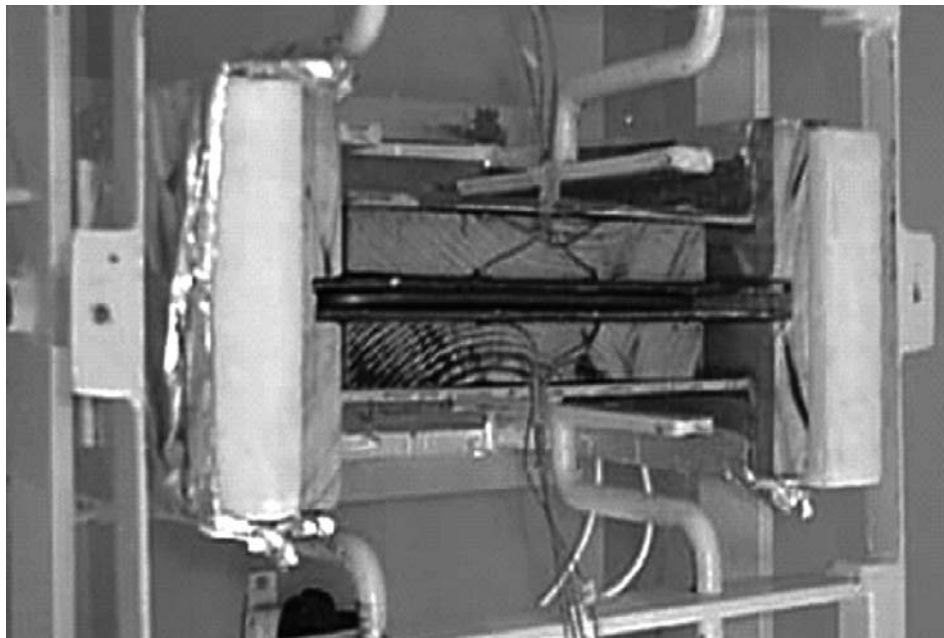


Figura 2. Gabinete de pruebas (vista superior)

b) Monitoreo y establecimiento de un estado térmico permanente

- Una vez iniciada la operación del banco de pruebas, se ajusta el térmico Variac para lograr las condiciones de temperatura a la que se realizará la prueba.
- El monitoreo de las variables se lleva a cabo desde el inicio de la corrida en intervalos de 10 minutos. Si después de cierto tiempo las temperaturas en las caras de las muestras no cambian significativamente, se habrá logrado el *estado estable* o permanente.
- El tiempo requerido para alcanzar el *estado estable* varía de acuerdo al tipo de muestras y estará en función de su espesor y de las condiciones de la prueba.

c) Procesamiento de datos

Los valores obtenidos del monitoreo que serán útiles para determinar la conductividad térmica son: tiempo, voltaje, amperaje, y temperaturas durante el periodo transitorio y a intervalos de 10 minutos hasta llegar al *estado estable*. En la Tabla 2 se muestra el tiempo transcurrido en las tres muestras para llegar al *estado estable*.

Considerando dentro del *estado estable* los promedios de temperaturas y las diferencias de éstas en ambas superficies, el espesor y el flujo térmico para los dos muestras, como es el caso aquí tratado, la conductividad térmica promedio de las muestras se determina con la Ecuación de Fourier modificada (ASTM C 518, 1991):

Donde los subíndices se refieren a las dos muestras. El área de sección

Tabla 2. Duración de cada corrida en las tres muestras y valores de voltaje y amperaje

Tipo de muestra	Horas/ minutos	Minutos	Voltaje (Volts)	Corriente (Ampers)
YESO				
Corrida 1	6 hrs. y 28 min.	388	5.2	0.5
Corrida 2	6 hrs. y 14 min.	374	9.8	1
Corrida 3	5 hrs. y 53 min.	353	15.8	1.7
Corrida 4	7 hrs. y 05 min.	425	20	2.2
MADERA DE PINO				
Corrida 1	7 hrs. y 02 min.	422	4.8	0.5
Corrida 2	12 hrs.	720	10.4	1
Corrida 3	11 hrs. y 30 min.	690	14.6	1.5
Corrida 4	11 hrs. y 45 min.	705	19.5	2
FIBRAS LEÑOSAS				
Corrida 1	11 hrs. y 20 min.	680	4.6	0.5
Corrida 2	10 hrs.	600	13.1	1
Corrida 3	10 hrs. y 30 min.	630	14.2	1.5
Corrida 4	6 hrs. y 45 min.	405	18.7	2

Banco de pruebas

$$k_P = \frac{Q \cdot (L_1 + L_2)}{2A \cdot (\Delta T_1 + \Delta T_2)} \quad (1)$$

medida A, es (STM C 177, 1997):

$$A = A_m + (A_g / 2) \quad (2)$$

d) Análisis de resultados

Con los valores obtenidos del procesamiento de datos, se determinan los siguientes resultados promedio: La conductividad térmica y la tempera-

tura de prueba. En las Tablas 3, 4 y 5 se muestran dichos resultados mediante análisis experimental y matemático. Por este último se entiende como aquél que se determina a partir de valores obtenidos por regresión lineal encontrada experimentalmente. En la Tabla 6 se muestra la comparación de los valores de la conductividad térmica determinada experimentalmente con respecto a los reportados en la bibliografía. Asimismo, en la Figura 1 se observa el comportamiento de la conductividad con respecto a la temperatura de prueba.

Tabla 3. Resultados experimentales, análisis matemático y ecuación de “k” para el yeso

No. Corrida	Temperatura de prueba (°C)	k_{promedio} (W/m °C)	
		Análisis	
		Experimental	Matemático
1	23.59	0.321	0.3406
2	29.944	0.386	0.3611
3	42.57	0.414	0.4071
4	50.22	0.426	0.4339

Ecuación obtenida por regresión lineal para el Yeso: $k_{\text{promedio}} = 0.0035 T_{\text{prueba}} + 0.2581$

Tabla 4. Análisis experimental y matemático y ecuación de “k” para la madera de pino

No. Corrida	Temperatura de prueba (°C)	k_{promedio} (W/m °C)	
		Análisis	
		Experimental	Matemático
1	27.14	0.140	0.1475
2	37.55	0.163	0.1694
3	43.97	0.203	0.1828
4	62.02	0.211	0.2207

Ecuación obtenida por regresión lineal para madera de pino: $k_{\text{promedio}} = 0.0021 T_{\text{prueba}} + 0.0905$

Tabla 5. Análisis experimental y matemático y ecuación de “k” para las fibras

No. Corrida	Temperatura de prueba (°C)	k _{promedio} (W/m °C)	
		Experimental	Matemático
1	27.28	0.209	0.2559
2	33.51	0.329	0.2653
3	43.88	0.272	0.2808
4	57.71	0.293	0.3016

Ecuación obtenida por regresión lineal para Fibras Leñosas: $k_{promedio} = 0.0015 T_{prueba} + 0.215$

Tabla 6. Comparación de los valores de “k” determinados experimentalmente con los valores reportados en la bibliografía

Valores obtenidos experimentalmente			Valores obtenidos en la bibliografía		
Material	Densidad (kg/m³)	k _{promedio} (W/m °C)	Material	Densidad (kg/m³)	k (W/m °C)
Yeso	1343.5	0.321 - 0.426	Yeso	850 - 1440	0.24 - 0.64
Madera de pino	599.3	0.140 - 0.211	Madera de pino [†]	546	0.140
Fibras leñosas*	1070.8	0.209 - 0.293	Fibras leñosas*	*	*

*Para este material, por ser nuevo, no existen datos en la bibliografía técnica.

[†]Madera de pino a través de las fibras (Quinto, 1989).

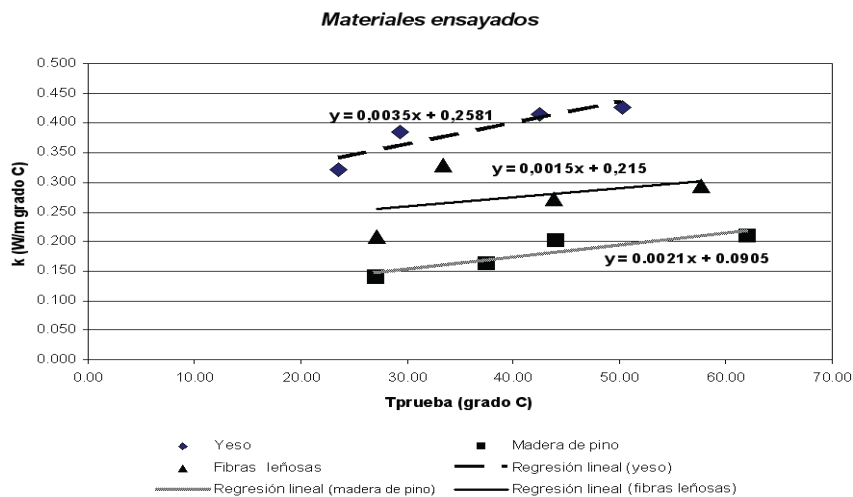


Figura 1. Valores de “k” de los materiales ensayados en el dispositivo de placa caliente guardada

COMPARACIÓN CON MATERIALES CONSTRUCTIVOS

En base a lo anterior, si se compara el comportamiento térmico de la fibra leñosa con otro material utilizado en sistemas constructivos, como es el concreto (Bojórquez et al., 2002; Bojórquez et al., 2003), aplicado a un muro poniente de 10 m² de una edificación, bajo condiciones de verano en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo 34 °C, con una temperatura de diseño interior de 25 °C, más un factor de ganancia de calor por efecto de la radiación solar (ES) de 6 °C para ese muro de espesor (L) de 0.101 m y despreciando los efectos convectivos, la ganancia de calor aplicando la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{k \cdot A \cdot (\Delta T + ES)}{L} \quad (3)$$

Para la fibra leñosa con $k = 0.295$ W/m °C sería de 438 W con respecto a la ganancia de calor del material de concreto con $k = 0.998$ W/m °C (STM C 177, 1997), sería de 1482 W. Esto implica que el uso de este material alterno genera una diferencia de 1 044 W, lo que a su vez implica una reducción de 70.4% de ganancia térmica contra el muro de concreto (Flores, 2004).

CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra el uso de un dispositivo de placa caliente guar-

dada para determinar las propiedades térmicas, específicamente la conductividad térmica de materiales como el yeso, madera de pino y base de fibras leñosas.

El diseño y construcción de este dispositivo se basa en las normas ASTM-C 177 y el cálculo de la conductividad en la norma ASTM-C 518. De acuerdo a los valores obtenidos para los materiales comunes como el yeso y la madera, comparados con los valores de la bibliografía técnica, se puede decir que los resultados son confiables.

Entre las ventajas principales están: El costo del equipo, el cual resulta relativamente accesible, del orden aproximado de 25,000 pesos, incluyendo el térmico Variac y monitor de termopares. Con respecto a equipos comerciales, el costo es por lo menos de 150,000 pesos; facilidad de construcción y disposición de ensamble y desensamble. Asimismo, con la disposición de la resistencia eléctrica se logran temperaturas controladas en los materiales de hasta 120 °C, lo que permite ampliar el rango de operación en la determinación de la conductividad térmica a diferentes temperaturas. Precisamente el voltaje y amperaje ensayados en las pruebas nos permitió tener de manera implícita las temperaturas que una edificación lograría normalmente en un lugar característico del sureste mexicano, con alto nivel de insolación y elevada humedad relativa.

Una de sus desventajas principales en la operación será lograr el estado estable, ya que se requieren tiempos relativamente largos (varias horas)

para algunos materiales.

De acuerdo a la comparación entre los materiales de block de concreto y de fibra leñosa, para éste último, al hacer el análisis en el muro, el requerimiento de enfriamiento es significativamente menor para contrarrestar la carga térmica ganada hacia el interior. Esto implica que los sistemas de acondicionamiento de aire serían de menor capacidad; en consecuencia, habrá una disminución notable en el consumo eléctrico. Por lo tanto, se puede decir que la fibra leñosa es un material alternativo que de acuerdo a su respuesta térmica coadyuvaría en la optimización energética de edificaciones del trópico húmedo.

BIBLIOGRAFÍA

- Kern, D. 1965, *Procesos de transferencia de calor*, Continental, México.
- STM C 177 1997, Standart Test Method for Steady State Heat Flux Measurement and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot Plate Apparatus.
- ASTM C 518 1991, *Steady State Heat Flux Measurement and Thermal Transmission Properties by Means of the Flow Meter Apparatus*.
- Flores, F. et al., 1999a, *Determinación de la conductividad térmica de materiales de construcción mediante un banco de pruebas*. Memoria XXIII Semana Nacional de Energía Solar, Morelia, Michoacán; México. pp 400-405.
- Flores, F. et al., 1999b, *Construcción de un banco de pruebas de conductividad térmica de materiales*. Memorias: 2° Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, IPN-ESIME-SEPI, México. pp 367-374.
- Flores, F. et al., 2004, *Conductividad térmica de materiales a base de fibras leñosas para sistemas constructivos*. CII-24. Memorias: 2° Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET 04. Cuernavaca, Morelos, México. The Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE).
- Bojórquez G. et al., 2002, *Simulación del comportamiento térmico de materiales constructivos a base de fibras leñosas*. ERE 01-19. Memorias: XXVI Semana Nacional de Energía Solar. Chetumal, Quintana Roo; México, pp 69-72, Asociación Nacional de Energía Solar.
- Bojórquez I. et al., 2003, *Resistencia a la compresión de compuestos a base de desperdicios de origen orgánico*. Revista: Ingeniería de la construcción. Pontificia Universidad Católica de Chile, vol. 18 núm. 2, pp 87-92.
- Llovera E., 2003, *Diseño y construcción de un banco de pruebas de conductividad térmica para materiales empleados en sistemas constructivos*. Tesis de Licenciatura, Universidad de Quintana Roo, Ingeniería en Sistemas de Energía.
- Quinto P. et al., 1989, *Transmisión de calor por conducción y convección*. Predicción. Editorial de la Sección de Graduados e Investigación ESIME-IPN. México.

NOMENCLATURA

- A: Área de transferencia de calor.
Área de sección medida, transversal al flujo térmico, en m².

Banco de pruebas

- A_m : Área de la muestra, en m^2 .
 A_g : Área de guarda, en m^2 (Área de placa de aluminio menos área de la muestra).
I: Intensidad de corriente, en Amperes.
 K_p : Conductividad Térmica de la muestra, en $W/m^{\circ}C$.
 L_1 : Espesor de pared de la muestra 1 en dirección del flujo de calor en m.
 L_2 : Espesor de pared de la muestra 2 en dirección del flujo de calor, en m.
Q: Flujo de calor a través de la pared de la muestra, generado por la resistencia eléctrica, en W.
 ΔT_1 : Diferencia de temperaturas entre las dos caras de la muestra 1, en $^{\circ}C$.
 ΔT_2 : Diferencia de temperaturas entre las dos caras de la muestra 2, en $^{\circ}C$.
V: Voltaje, en Volts.