

# Desarrollo de un prototipo para la caracterización térmica de los materiales de construcción regionales

María Milagrosa Pérez Sánchez<sup>1</sup>, Roberto Centeno Lara<sup>2</sup> y Fernando Lazcano Serrano<sup>1</sup>

## RESUMEN

En los últimos años se ha tomado una mayor conciencia en la necesidad de ahorrar energía y de proporcionar confort a las edificaciones, lo que ha generado una demanda del conocimiento de datos propios a una región, en particular, de las propiedades termofísicas de los materiales de construcción. Dos de estas propiedades, la conductividad y la difusividad, caracterizan la difusión del calor en un sólido al imponerle un gradiente de temperatura.

En el presente trabajo se presenta el diseño y el montaje experimental de un dispositivo para medir las propiedades térmicas de los materiales mencionadas en el párrafo precedente. El sistema experimental permite cuantificar la conductividad y la difusividad térmica de placas confeccionadas con los materiales más usuales en la industria de la construcción regional. Estos parámetros son calculados a partir de valores experimentales realizados en régimen estacionario utilizando el planteamiento analítico de la transferencia de calor.

Finalmente se evalúan las características de dos muestras de concreto con el fin de calibrar el sistema y la operatividad del mismo, obteniendo resultados semejantes a los de la bibliografía.

**Palabras clave:** Térmica de materiales, placa caliente, conductividad, difusividad

## INTRODUCCIÓN

La utilización de materiales de construcción adecuados al clima es muy importante en la aplicación y seguimiento de programas de ahorro de energía y confort térmico en nuestro país.

Para saber si los materiales son adecuados para la construcción de edificios y viviendas confortables y económicas en el aspecto energético, es necesario conocer las propiedades termofísicas de los materiales utilizados para su edificación.

En los países desarrollados se efectúa sistemáticamente la evaluación de estas características y existen catálogos de materiales en documentos normativos, generalmente certificados por organismos que acreditan la calidad del material y de los procedimientos constructivos. En España, por ejemplo, se cuenta con una Norma básica de edificación, perteneciente al Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo la cual provee las características térmicas de los materiales más usuales de ese país (NBE-CT-79, 1979). Asimismo existe en Francia un Documento Técnico editado por diferentes organismos de ese país (N.F.X. 10-021, 1970), en Bélgica la norma B.62 201 (B62.201, 1996) y en Estados Unidos de América, el manual del ASHRAE

<sup>1</sup> Profesor Investigador del Cuerpo Académico de Ingeniería Física Aplicada de la Facultad de Ingeniería UADY.

<sup>2</sup> Profesor Investigador, Coordinador de la Maestría en Construcción, FIUADY

(American Society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers, Inc) (ASHRAE, 1997); este último es bastante popular en México por contener las características termofísicas de una gran diversidad de materiales de construcción existentes en las diferentes regiones de los Estados Unidos de América, dicho manual es comúnmente usado por calculistas y diseñadores de equipos de acondicionamiento ambiental.

En México apenas se comienzan a implantar prácticas de control de características térmicas de materiales y dada la diversidad en las diferentes regiones de nuestra república sería necesario contar con laboratorios especializados en ésta área en diferentes regiones; a la fecha actual existen algunos dispositivos de medición desarrollados en Laboratorios nacionales tales como el del Centro Nacional de Investigación y desarrollo Tecnológico (Lira y col., 1998) y el de la Universidad Autónoma de Baja California (Gallegos y col., 1996). Es preciso mencionar que la reglamentación térmica en la edificación apenas está en fase de propuesta, en ella existen algunas características de materiales, sin embargo todavía se carece de medios para estudiar su comportamiento térmico (NOM-020-ENER, 1999).

En este trabajo se propone un instrumento para medir características térmicas de los materiales homogéneos (aislantes, concretos, maderas, etc.) Las propiedades que caracterizan térmicamente al material son la conductividad y la difusividad.

La determinación de la conductividad térmica, se efectúa generalmente en régimen estacionario, utilizando el sistema de las normas arriba mencionadas. Sin embargo, como el régimen permanente solamente es posible de alcanzar en laboratorio, algunos autores han propuesto procedimientos en los que el material es sometido ya sea a un régimen periódico (Roucoult y col., 1990), o a un régimen variable (Devisme, 1982).

El sistema propuesto esta basado en el método de la placa caliente guardada que sirve para medir la conductividad térmica de un material en régimen permanente. Sin embargo, como el conocimiento de la conductividad térmica no es suficiente para caracterizar térmicamente un local en régimen variable se propone una variante del sistema de medición que permite determinar, además de la conductividad, un parámetro característico del régimen variable, la difusividad térmica.

Los parámetros a evaluar, la conductividad y la difusividad, permiten caracterizar térmicamente al

material, tanto en régimen estacionario como en régimen variable. Los resultados de nuestro trabajo permitirán conocer el comportamiento térmico de los materiales tanto en régimen estacionario, necesario para diseñar equipos de acondicionamiento ambiental, como en régimen variable, para el estudio en régimen dinámico del comportamiento térmico de los locales.

Con el conocimiento de las propiedades térmicas de los materiales, se podrá racionalizar el uso de ellos para la construcción de viviendas confortables y poco consumidoras de energía.

### Definición Y Justificación De Los Parámetros.

La conducción del calor a través de un sólido, en régimen dinámico esta regida por la ley de conducción del calor llamada ley de Fourier que relaciona los parámetros siguientes: temperatura, tiempo, variables de espacio y características térmicas de los materiales en la forma unidimensional, sin pozo ni fuente de calor, dicha ley se escribe de la siguiente manera:

$$(1) \quad \nabla^2 T_1(x,t) = \frac{1}{a_1} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t}$$

El parámetro  $a$  representa la **difusividad térmica** del material y es definida de la siguiente manera:

$$(2) \quad a = \frac{k}{\rho c}$$

Donde  $k$  representa la conductividad térmica,  $\rho$  la densidad y  $c$  el calor específico del material.

El segundo parámetro que se utilizará es la **conductividad térmica  $k$** , que se deduce de la misma ley de Fourier pero en régimen permanente:

$$(3) \quad k = -q_x \frac{\Delta x}{\Delta T}$$

donde  $q_x$  representa el flujo unitario de calor unidimensional,  $\Delta x$  el espesor del material y  $\Delta T$  la diferencia de temperaturas entre ambas superficies del material.

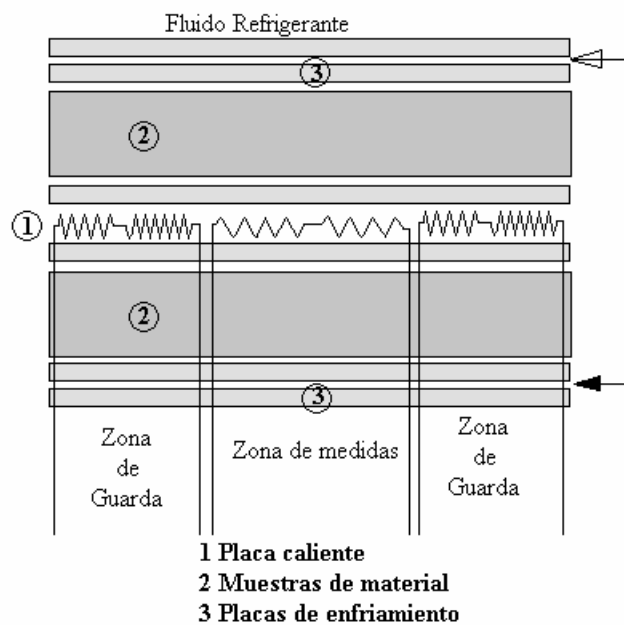
## METODOLOGÍA

### Diseño y montaje del sistema

El prototipo propuesto para la caracterización de los materiales de la construcción se basa en el principio de la placa caliente guardada

### Principio general

El instrumento para determinar la conductividad y la difusividad térmica consta de un sistema de placas con una zona central donde se efectúan las mediciones y una zona de guarda donde se aplica un flujo de calor que compensa el flujo lateral de la primera zona, con ello se establece la unidireccionalidad del flujo de calor.



**Figura 1. Esquema del sistema de medición de las características térmicas de los materiales**

En la Figura 1 se muestra un esquema del montaje experimental propuesto, el sistema está compuesto de los siguientes elementos: una placa caliente (1), las muestras del material (2), dos placas frías a ambos lados del sistema (3), sistema de montaje y una cámara de aislamiento y los mecanismos de regulación y de medición. El diseño se hizo simétrico con el fin de repartir a ambos lados el calor que sale de la placa caliente.

#### La placa caliente de guarda

La placa caliente de guarda está conformada por dos placas de aluminio de 0.003 m de espesor y de 0.50 x 0.50 m que encierran en su interior resistencias eléctricas generando un flujo de calor. Las resistencias eléctricas son dos: una en la parte central y la otra en la periferia, en la llamada zona de

guarda, esta última tendrá temperaturas mayores que la de la central para asegurar la unidireccionalidad del flujo térmico.

#### Las placas frías

Las placas frías son del mismo material que la placa caliente, cada una de ellas está compuesta por dos placas en cuyo interior circula un fluido refrigerante.

#### El sistema de montaje y la cámara de aislamiento

El conjunto de elementos: placa caliente, muestra y placas frías, se mantiene estable gracias al sistema de montaje constituido por un marco de metal y tornillos que mantienen la simetría del conjunto.

Solo la placa caliente permanece fija debido a que las muestras del material pueden ser de diferentes espesores y las placas frías pueden trasladarse lateralmente, deslizándose a través del marco. El conjunto de elementos se aísla térmicamente del ambiente colocándolo dentro de paredes de poliestireno.

#### ***Los instrumentos de regulación y de medida***

Los instrumentos de regulación están constituidos por resistencias eléctricas generando calor en el interior de la placa caliente, un voltímetro y un amperímetro que miden la diferencia de potencial y la intensidad de corriente y un termostato que mantiene las condiciones de temperatura en las dos placas frías.

Para la medición de las temperaturas se utilizan termopares de 0.2 mm de diámetro del tipo K (cobre-constantan) que son los más adecuados para el rango de temperaturas en las que se trabaja (dominio llamado de bajas temperaturas). Estos sensores se

colocan de manera diferencial en ambas caras de las muestras; también se colocaron termopares en serie entre la zona central de medida y la zona de guarda que sirven para controlar la unidireccionalidad del flujo. En las figuras 2 y 3, se puede apreciar el montaje experimental de este sistema.

#### **Determinación de la conductividad térmica**

El valor de la conductividad térmica, **k**, se deduce la ley de Fourier en régimen permanente:

$$k = -\frac{q_x}{S(\Delta T_1 + \Delta T_2)} \quad [W/m^0C] \quad (4)$$

$\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  son la diferencia de temperatura entre las dos caras de las muestras, medidas diferencialmente con los termopares y **S** es el área de las muestras.



**Figura 2. Sistema de placas y control con muestras de concreto**



Figura 3. Sistema de caracterización térmica con equipo de adquisición de datos

#### Determinación de la conductividad térmica

El valor de la conductividad térmica,  $k$ , se deduce la ley de Fourier en régimen permanente:

$$k = -\frac{q_x}{S(\Delta T_1 + \Delta T_2)} \quad [W/m^0C] \quad (4)$$

$\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  son la diferencia de temperatura entre las dos caras de las muestras, medidas diferencialmente con los termopares y  $S$  es el área de las muestras.

El flujo de calor  $q_x$ , generado por la resistencia eléctrica es determinado por medio de la expresión del efecto Joule:

$$q_x = V \frac{I}{2S} \quad [W/m^2] \quad (5)$$

Donde:

V: diferencia de potencial (Volts)  
I : intensidad de corriente (Amperes)

S: superficie de una placa de muestra ( $m^2$ )

A partir de las expresiones (4) y (5) se determina el coeficiente de conductividad térmica de las muestras ( $k$ ), o bien la resistencia térmica  $R$ :

$$R = \frac{e}{k} \quad [m^2^0C/W] \quad (6)$$

La determinación de la conductividad térmica se efectúa midiendo en régimen permanente los siguientes parámetros:

- Espesor ( $e$ ) y área de la muestra ( $S$ ).
- Potencia eléctrica suministrada ( $I$  y  $V$ )
- Diferencia de temperatura entre la superficie de las muestras

#### Determinación de la difusividad térmica

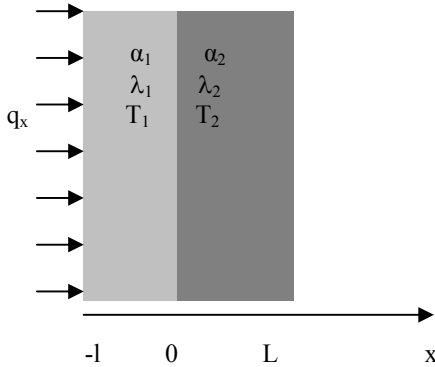
Para determinar la difusividad térmica nos basamos en la medida de la temperatura de la superficie caliente de la muestra, al igual que para el cálculo de la conductividad. La hipótesis supone que

el flujo de calor es unidireccional y que las placas de aluminio y las muestras son homogéneas.

(8)

### Formulación matemática.

La formulación matemática del problema se representa con base en la notación representada en el esquema de la figura 4.



**Figura 4. Representación esquemática de la placa caliente y la muestra**

El campo de temperaturas  $T_1(x, t)$ , de la placa caliente, es solución de la siguiente ecuación

$$\Delta T_1(x, t) = \frac{1}{a_1} \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial t} \quad (7)$$

Y el campo  $T_2(x, t)$ , de la muestra es solución de:

$$T_1(0, t) = T_2(0, t) \quad \Delta T_2(x, t) = \frac{1}{a_2} \frac{\partial T_2(x, t)}{\partial t}$$

Para  $-1 \leq x \leq 0$

$$T_1(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n (\cos \beta_n x - \tan \beta_n l \operatorname{sen} k_n x) e^{-a_1 \beta_n^2 t} \quad (12)$$

Para  $0 \leq x \leq L$

$$T_2(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \left[ \cos \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \beta_n x - \cot \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \beta_n L \operatorname{sen} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} k_n x \right] e^{-a_1 \beta_n^2 t} \quad (13)$$

Donde  $\alpha_1$  y  $k_1$  representan la difusividad y la conductividad de la placa caliente,  $\alpha_2$  y  $k_2$  la

El parámetro  $\alpha$  representa la difusividad térmica del material.

La condición inicial considera constante la temperatura del conjunto placa caliente, placa fría y muestras:

$$T_1(x, t) = T_2(x, 0) = T_0 = 0 \quad (9)$$

Las condiciones a los límites son las siguientes:

En  $x = -1$  el flujo es constante

$$-k_1 \left[ \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial x} \right] = q_x \quad (10)$$

En  $x = 0$  existe continuidad de temperaturas e igualdad de flujo

$$k_1 \left[ \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial x} \right]_{x=0} = k_2 \left[ \frac{\partial T_2(x, t)}{\partial x} \right]_{x=0}$$

en  $x = L$  la temperatura permanece constante

$$T_2(L, t) = T_0$$

La solución del problema esta dada por las siguientes ecuaciones:

difusividad y la conductividad de la muestra del material.

Los valores de  $\beta_n$  representan los polos de la ecuación trascendental y  $B_n$  se determina de tal manera que satisfaga la condición inicial.

Para determinar esos parámetros se considera la evolución de la temperatura de la fase caliente de la muestra cuya expresión teórica es:

$$T_2(o, t) = T_\infty + \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-a_1 \beta_n^2 t} \quad (14)$$

donde  $B_n = N/D$

$$N = \rho_1 c_1 \left[ \frac{q_x}{k_1} \frac{1}{\beta_2} \left( 1 - \frac{1}{\cos \beta l} \right) - \frac{q_x}{k_2} \frac{L}{\beta} \tan \beta l \right] + \rho_2 c_2 \left[ \frac{q_x}{k_2} \left( \frac{L}{\beta'} \cot \beta' L - \frac{1}{\beta'^2} \right) \right] \quad (15)$$

$$D = \frac{\rho_1 c_1}{2} \left( \frac{l}{\cos^2 \beta l} + \frac{\tan \beta l}{\beta} \right) + \frac{\rho_2 c_2}{2} \left( \frac{L}{\sin^2 \beta' L} - \frac{\cot \beta' L}{\beta} \right) \quad (16)$$

donde  $\beta = \beta_n$

$$\beta' = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \beta_n \quad T_\infty = \frac{Q}{S} \frac{L}{k_2}$$

Los polos  $\beta_n$  son soluciones de la ecuación trascendente (17):

$$\frac{k_1}{k_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} (\tan \beta l) (\tan \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \beta L) = l \quad (17)$$

#### Determinación de las características de la placa caliente

Para determinar las características de la muestra del material es necesario determinar primero las características de la placa caliente. Para ello se miden las temperaturas de la superficie caliente de las dos muestras ( $T_c(0, t)$  y  $T_2(0, t)$ ), se minimiza la diferencia entre estas dos temperaturas de tal manera que  $T_c(0, t)$  y  $T_2(0, t) = F(a_1, \lambda_1, l, a_2, \lambda_2)$  en cuatro instantes  $t_1, t_2, t_3, t_4$ , para un espesor dado de placa.

#### Determinación de la difusividad de las muestras

Conociendo las características de la placa de caliente y aproximando los valores experimentales con los valores teóricos se determina la difusividad de la muestra.

Experimentalmente es necesario establecer el régimen permanente para establecer las condiciones de frontera:

Flujo constante en  $x = -l$   
Temperatura constante en  $x = L$

Esto nos permite calcular la conductividad térmica de la muestra. A continuación se interrumpe la calefacción en la zona central pero manteniéndola en la zona de guarda para que no se formen fugas laterales.

El registro de temperaturas durante el enfriamiento de la superficie caliente de la muestra nos permite determinar la difusividad. Así para determinar un tiempo suficientemente grande, la serie:

$$\sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-a_1 \beta_n^2 t} \quad (18)$$

se puede asimilar a su primer término midiendo las temperaturas  $T_1(0, t_1)$  y  $T_2(0, t_2)$  a los instantes  $t_1$  y  $t_2 = 2t_1$ , se tiene:

$$\beta_1^2 = \frac{1}{a_1(t_1 - t_2)} \ln \left[ \frac{T_2(0, t_2) - T_\infty}{T_2(0, t) - T_\infty} \right] \quad (19)$$

La resolución de la ecuación  $\tan y = 1/\alpha B$  permite calcular la difusividad térmica  $\alpha_2$  con las fórmulas siguientes:

$$a_2 = \frac{\beta^{(2)}}{y^{(2)}} \quad (20)$$

$$\beta = \sqrt{a_1} k_1 L \quad (21)$$

$$\alpha = \frac{k_1}{k_2} \tan \beta_1 l \frac{1}{\sqrt{a_1}} \quad (22)$$

### Procedimiento experimental

Con el fin de calibrar el equipo se evaluaron las características de dos muestras de concreto con agregados de la región preparadas en forma de placas de 0.50 x 0.50 m con 0.05 m de espesor, la densidad del concreto es de 2030 kg/m<sup>3</sup>.

El procedimiento para realizar una prueba en la que se determinan la conductividad y la difusividad de un material se efectúa en cuatro etapas:

- Preparación de la muestra e instalación en el sistema.
- Establecimiento del estado permanente térmico.
- Adquisición de datos.
- Determinación de las características de los materiales por el método expuesto.

Las muestras fueron preparadas con las medidas mencionadas, se puso especial cuidado en la rugosidad de las superficies con el fin de evitar una resistencia térmica al ponerlas en contacto con las placas frías. En los casos en los que las superficies sean demasiado rugosas será necesario utilizar algún material rasante de la superficie, poco conductor del calor, tal como el plexiglas.

Para alcanzar el régimen permanente se pusieron en operación la placa caliente y las placas frías durante varias horas, aproximadamente 24 horas,

hasta que se estabilizaron las temperaturas; para la obtención del régimen permanente fue necesario aislar el sistema del medio ambiente utilizando placas de poliestireno expandido.

Las mediciones se efectúan durante el enfriamiento del sistema, después de la obtención del régimen permanente, ya que se observó que las placas frías son más estables en esta fase que durante la calefacción.

Los datos adquiridos son los de la potencia eléctrica y las temperaturas superficiales de las muestras, medidas en el área central de la placa, fuera del área de guarda.

Con estos datos se calculó la conductividad térmica de las muestras y se obtuvo un valor de 1.16 W/m °C, el cual es acorde con valores obtenidos por Sublet (Sublet y col., 1978) y Marechal (Marechal y Brignol, 1984).

La determinación de la difusividad térmica se realizó con los registros de temperatura,  $T_M(0, t)$ , de la superficie caliente de las muestras, las cuales fueron registradas durante el enfriamiento de las placas y graficadas (Fig. 5).

La prueba de las placas de concreto permitió comprobar el funcionamiento del equipo y la obtención de valores.

De los valores medidos se calcularon las temperaturas  $T_2(0, t)$ , por el método matemático descrito y con ellas se determinó la difusividad térmica  $\alpha$  cuyo valor fue de  $6.1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , valor similar al obtenido por Sublet ( $6.4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ) (Sublet y col., 1978).

### CONCLUSIONES

El diseño del prototipo presentado cumple con las expectativas ya que resulta fácil de construir y relativamente económico.

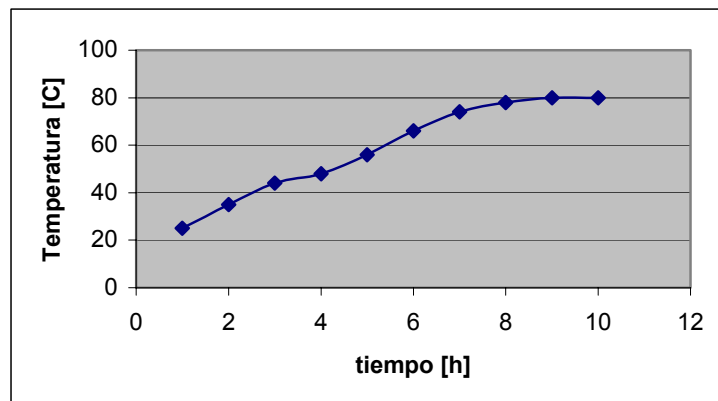
En lo concerniente al proceso experimental se observó que el dispositivo construido es de fácil operación, el monitoreo no requiere la presencia del operario ya que las mediciones se efectúan de manera automática y se almacenan en la computadora.

Con respecto a las muestras, son de fácil realización ya que son solamente placas del material a estudiar en las que solamente es necesario cuidar el

estado de las superficies para lograr un buen contacto térmico.

El equipo diseñado y construido puede ser utilizado para otros materiales existentes y para la evaluación de materiales alternativos, sin embargo es necesario considerar algunos aspectos con el fin de

hacer las mediciones más confiables. A pesar de que el sistema de mediciones fue calibrado debidamente, el equipo fue forjado sin control de calidad y por ello es necesario contar con una muestra patrón que permita realizar los ajustes necesarios al sistema para determinar su incertidumbre con el fin de observar las fuentes de error.



**Figura 5. Registros de temperatura de la superficie caliente de la muestra**

#### AGRADECIMIENTOS

El sistema presentado fue parte del proyecto “Caracterización térmica de los materiales de construcción regionales” financiado por el Consejo

Nacional de Ciencia y Tecnología por medio del convenio D1250-A9201. Participó como colaborador el Ing. Francisco Duarte.

#### REFERENCIAS

- A.S.T.M. C 1777 63 (Norma U.S.A.). (1993) Standard method of test for thermal conductivity materials by means of the guarded hot plate. U.S.A.
- ASHRAE (1997). Fundamentals, ASHRAE Handbook Atlanta, GA.
- B.62 201 (Norma belga). (1996) Détermination à l'état sec de la conductivité thermique des matériaux de construction par la méthode de la plaque chauffante à anneaux de garde. Belgique.
- MARECHAL J.C., BRIGNOL R. (1984) Détermination expérimentale des coefficients de la transmission thermique. Cahiers du Centre experimental du batiment et des Travaux Publics. p. 471-485.
- SUBLET J.C., DEPECKER P., BRAU J. (1978). Mesure de la conductivité des matériaux de construction et de la diffusivité thermiques des bétons. Journées Bilan et Perspectives Génie Civil, Lyon, France.
- SACADURA J.F. (1984). Initiation aux transferts thermiques. Sciences et Techniques, Paris, France.
- DEVISME J.M., MARECHAL J.C., DUTHOIT B. (1982). Détermination de la résistance thermique d'une paroi en régime quelconque. Matériaux de Construction Vol 15, No 88.

ROUCOULT J.M., DEVISME J. M., LANGLET T. (1985). Mesure simultanée de la diffusivité et de la l'effusivité thermiques des matériaux de construction. Annales de l'ITBTP, série RM/202.

ROUCOULT J.M, LANGLET T., DEVISME J.M. (1990). Détermination simultanée de trois caractéristiques thermophysiques des matériaux de construction par une méthode de régime périodique. Annales de l-ITBTP, série EM/226.

PEREZ SÁNCHEZ M., CENTENO LARA R. (1991). Diseño de un medidor de características térmicas de materiales de construcción. II Simposio Nacional sobre Materiales de construcción. Mérida, Yucatán.

N.F. X 10-021 (norma Francesa). (1970). Détermination de la conductivité Thermique. Méthode de la plaque chaude gardée avec échantillons symétriques. Association Française de normalisation, AFNOR, Paris, France.

NBE-CT-79. (1979). Norma básica de la edificación. Condiciones Térmicas en los edificios. Dirección General de Arquitectura y vivienda. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid, España.

NOM-020-ENER. (1999). Anteproyecto de la Norma Oficial Mexicana, eficiencia energética en edificaciones. Envolvente de edificios residenciales hasta de tres niveles. Comisión Nacional para el ahorro de Energía. México, D.F.

BECKER R. (1983) Resistance to heat flow of built-up section by means of the heat-flow-meter test method. *Materiaux et Constructions*, Vol 16, No. 94.

GALLEGOS R., LUNA A., BOJÓRQUEZ J. (1996). Estimación experimental de conductividad térmica en materiales de construcción. Memorias de la XXI Semana de Energía Solar. Asociación Nacional de Energía Solar, Chihuahua, Chi. Mex.

CASAS V., CABANILLAS R., PEREZ J., RIOS T. (1996). "Desarrollo de un medidor de conductividad térmica". Memorias de la XXI Semana de Energía Solar. Asociación Nacional de Energía Solar, Xalapa, Ver. Mex.