

## VALIDACION EXPERIMENTAL DE UN METODO DE SIMULACION NUMERICA

Vicente Volantino\*, Alicia Maronna\*, Guillermo Ahets Etcheberry\*,  
Luis Giobergia\*, Eduardo N. López\*

### RESUMEN

Se presentan ciertas modificaciones realizadas al aparato para la determinación de transmitancia térmica de paredes, con respecto a lo establecido en Normas, como así también, un nuevo sistema de medición y control de las variables involucradas. Estas variantes introducidas en el equipo de ensayo, permiten conseguir mayor precisión en los resultados.

Con la implementación de este nuevo sistema, se realizó una tarea de contrastación de los valores obtenidos por ensayo, con los resultantes de la simulación numérica efectuada sobre el mismo elemento constructivo utilizando el programa Puentes.

Sobre unos veinte casos analizados se pudo establecer una validación experimental del mencionado método teórico, no superándose en ningún caso una diferencia mayor del 5 % entre ambos resultados (teórico y práctico).

Mediante la utilización de equipos existentes en el laboratorio, que determinan conductividad o conductancia térmica, se pudo conformar una metodología autosuficiente de evaluación del comportamiento térmico de elementos constructivos.

### 1. INTRODUCCION

Desde hace algunos años, el Departamento de Construcciones del INTI efectúa estudios teóricos que permiten evaluar el comportamiento térmico de diversos tipos de elementos constructivos, utilizando para ello un método de simulación numérica por computadora, denominado Programa PUENTES [1],[2].

Este método, que resuelve la ecuación de Fourier de transmisión de energía en forma de calor, en geometría bidimensional de múltiples materiales, y que permite obtener numéricamente el valor del coeficiente de transmitancia térmica  $K$ , fue presentado en ASADES con anterioridad [3].

\* División Habitabilidad Higrotérmica  
Departamento de Construcciones-INTI  
Parque Tecnológico Miguelete  
CC 157 (CP 1650) San Martín, Bs.As.

Simultáneamente, se siguen realizando en el laboratorio, ensayos que determinan, en forma experimental, el mencionado coeficiente K de elementos constructivos dispuestos en posición vertical, de acuerdo al método establecido en las Normas ASTM C 236 [4] e IRAM 11564 [5].

Dicho método, conocido como "caja caliente con caja guarda", consiste en dos cajas, una llamada fría y la otra caliente que se ubican una a cada lado de la pared a ensayar. La caja fría cubre una superficie aproximada de 4 m<sup>2</sup> de la pared, mientras que la caja caliente cubre un área de 1 m<sup>2</sup> de la misma sobre la zona central y se halla rodeada por una caja de protección llamada caja de guarda [Figura 1].

El objetivo de ambas cajas es lograr un gradiente constante de temperatura a través de la pared; la caja de guarda se coloca para seguir la temperatura de la caja caliente y controlar las pérdidas de ésta al exterior.

Por lo tanto, si el gradiente de temperatura sólo se produce a través de la pared, toda la potencia entregada a la caja caliente se utiliza para mantener dicho gradiente entre las cajas fría y caliente.

En el equipo de ensayo se hicieron modificaciones con respecto a lo establecido en la norma IRAM 11564; en la caja caliente se cambió el sentido de circulación del aire para lograr una menor estratificación de las temperaturas en la superficie a medir (Cabe aclarar que con el método anterior de ensayo se llegaba a 3-4 C de diferencia, obteniéndose con el nuevo método una cota máxima de 1 C).

Para ello se colocó el ventilador en la parte superior dando un sentido de circulación al aire en forma descendente en la parte posterior de la caja caliente y ascendente por la superficie de la pared. Se colocaron tres resistencias calefactoras una de 400W en la zona media de la parte posterior, y dos de 130W en la parte inferior. Otra modificación fue colocar el motor del ventilador afuera de la caja caliente para no tener que considerar esa potencia constante dentro de dicha caja. Esto facilita la medición de la transmitancia térmica de cerramientos muy aislantes, ya que se manejan valores de potencia prácticamente nulos [Figura 1].

Otra modificación se realizó en la forma de medición; debido a la imposibilidad de medir con precisión la velocidad del aire en ambas superficies, se decidió cambiar el método de medición y colocar las termocuplas en la superficie de la pared, tanto en la caja caliente como en la caja fría. La determinación del coeficiente de transmitancia térmica se realiza de la siguiente forma:

1) Se calcula la conductancia media a través de una integración por elementos finitos. Las fórmulas a utilizar son las siguientes:

$$C_{med} = \frac{1}{D_i} \frac{\sum (P_i * t_i)}{\sum t_i} \quad (1)$$

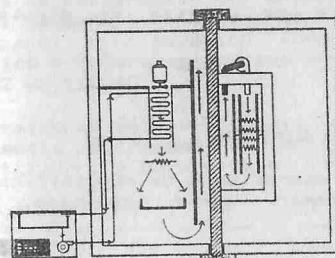


FIGURA 1a  
Disposición del equipamiento de ensayo

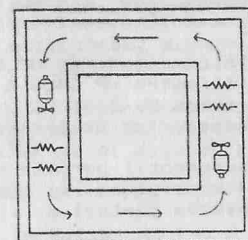


FIGURA 1b  
Circulación de aire en la caja de guarda

donde:  $P_i$  = Potencia aplicada durante el tiempo  $t_i$ ;  $t_i$  = Tiempo elemental (aprox. 4 seg) durante la cual la potencia se mantiene constante;  $D_i$  = Diferencia de temperatura entre la caja fría y la caliente durante el tiempo  $t_i$ .

En nuestro caso el coeficiente se determina cada hora por lo tanto la sumatoria de los  $t_i$  será 3600 segundos.

Cabe aclarar que se busca obtener el máximo valor de  $D_i$ , manteniendo la temperatura promedio entre la caja caliente y la caja fría próxima al ambiente del local de ensayo.

2) Se corrige este valor de conductancia debido a que las paletas del ventilador entregan potencia al aire y no es tenido en cuenta en la fórmula anterior; esto se realiza sumándole el valor de la potencia entregada por las paletas del ventilador dividido por el  $D_i$  promedio del tiempo considerado. El valor de la potencia entregada por las paletas del ventilador se obtiene mediante la calibración del equipo contra un panel de referencia; dicha potencia es de 7 Watts.

3) El coeficiente de transmitancia térmica de la pared será:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{C_{mc}} + \frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_e}$$

donde:  $K$  = Coeficiente de transmitancia térmica de la pared ( $W/m^2.C$ );  $C_{mc}$  = Conductancia media corregida;  $H_i$  = Coeficiente de convección interior (Caja caliente);  $H_e$  = Coeficiente de convección exterior (Caja fría).

## 2. DESARROLLO DEL ENSAYO

En el ensayo de transmitancia térmica se utiliza el siguiente instrumental [Figura 2]:

- 1) Minicomputadora HP 85
- 2) Voltímetro HP 3455 A
- 3) Scanner HP 3495 A
- 4) Transductor de potencia a tensión AUTOTROL

Este instrumental permite realizar las operaciones de adquisición de datos (temperatura y potencia) y tomar, sobre esa base, las decisiones de control.

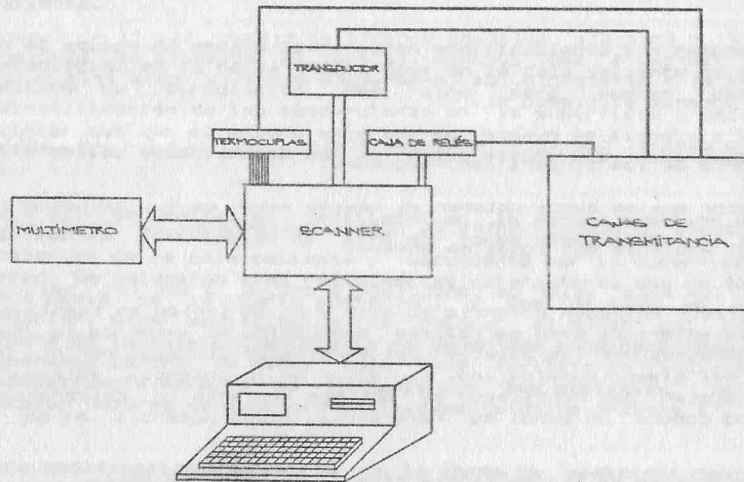


FIGURA 2  
Sistema de medición y control

## 3. CALIBRACION DEL ENSAYO

Para la calibración del ensayo se utiliza un panel de referencia del cual se conoce su valor de transmitancia térmica. Este consiste en un panel tipo sandwich formado por poliestireno expandido en el núcleo y madera aglomerada en ambas caras exteriores, siendo su  $K = 0,82 \text{ Watt/m}^2\text{C}$ .

La calibración del ensayo consiste en la determinación de la potencia entregada a la caja caliente por las paletas del ventilador, y para ello el cálculo a realizar es el siguiente:

$$\frac{1}{K_r} = \frac{1}{C_r} + \frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_e}$$

$K_r = 0,82 \text{ Watts/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$   
 $H_i = 8,14 \text{ Watts/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$   
 $H_e = 23,26 \text{ Watts/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$   
 $C_r = \text{Valor de la conductancia real del panel}$

Este valor de  $C_r$  es obtenido mediante el ensayo de la misma muestra con un equipo de medición de conductancia térmica, por método patrón [6]. De esta manera, con  $C_r$  se obtiene el valor de la potencia entregada a través de la siguiente fórmula:

$$C_r = C_{med} + P_o / D_t$$

donde:  $C_{med}$  = Conductancia medida en el ensayo  
 $P_o$  = Potencia del ventilador  
 $D_t$  = Diferencia de temperatura entre las superficies fría y caliente.

De la fórmula anterior se despeja  $P_o$ , que se utilizará en los ensayos, para corregir el valor de  $C_{med}$  y poder así obtener el valor de  $C_{mc}$  tal como se describe en la primera parte del informe.

## 4. RESULTADOS OBTENIDOS

A partir de la implementación de este nuevo sistema de medición de transmitancia térmica, se efectuaron comparaciones entre los resultados obtenidos a través del ensayo, y aquellos calculados mediante la simulación numérica mencionada precedentemente. El objetivo fundamental fue lograr una validación experimental del método teórico del programa PUENTES.

Así, para cada cerramiento vertical ensayado, se procesó la información descriptiva del mismo (esto es se alimentó al programa referido con los datos físicos y dimensionales correspondientes). Este coeficiente de transmitancia térmica resultante de la simulación por PUENTES, fue comparado con el valor determinado experimentalmente.

Esta tarea pudo realizarse para una veintena de casos, que son los correspondientes a los cerramientos ensayados en los últimos dos años con el nuevo sistema de medición, y de ninguna manera pretenden ser ejemplos representativos de los sistemas más utilizados en el mercado.

El resultado de la comparación (observando la Tabla 1), permite apreciar que la diferencia existente entre los valores, experimentales y teóricos, no supera al 5% para todos los casos presentados.

ESQUEMA	MATERIALES	K EXPERIMENTAL W/m°C	K TEORICA W/m°C	ERRORES RELATIVOS %
	CEMENTOS	1,96	1,86	4,7
	CEMENTOS TRACOS EN ARREDORES	1,87	1,82	2,6
	CEMENTOS	1,67	1,62	0,6
	CEMENTOS TRACOS EN ARREDORES	1,76	1,76	1,8
	CEMENTOS TRACOS EN ARREDORES	1,8	1,76	2,7
	CEMENTOS TRACOS EN ARREDORES	1,86	1,85	0,5
	CEMENTOS TRACOS EN ARREDORES	1,77	1,86	2,6

ESQUEMA	MATERIALES	K EXPERIMENTAL W/m°C	K TEORICA W/m°C	ERRORES RELATIVOS %
	NOY-MACH	2,48	2,26	2,9
	NOY-MACH	2,36	2,25	7
	NOY-MACH TRACOS EN UNA CALA	2,06	1,96	4,8
	NOY-MACH SALICIS EN ARREDORES	1,77	1,87	5
	PIEDRA TIZA	2,17	2,27	4,5
	PIEDRA TIZA VALCUNA EN ARREDORES DE PUNTE	2,27	2,25	4,7

ESQUEMA	MATERIALES	K EXPERIMENTAL W/m°C	K TEORICA W/m°C	ERRORES RELATIVOS %
	ESQUEMA EXPERIMENTAL NOY-MACH	0,866	0,785	5
	NOY-MACH TRACOS EN UNA CALA VALCUNA	0,74	0,71	0
	NOY-MACH TRACOS EN UNA CALA VALCUNA	0,27	0,167	4
	NOY-MACH TRACOS EN UNA CALA VALCUNA	0,82	0,82	0
	NOY-MACH TRACOS EN UNA CALA VALCUNA	0,76	0,76	0
	NOY-MACH TRACOS EN UNA CALA VALCUNA	0,74	0,81	5

TABLA COMPARATIVA

entre valores experimentales y teóricos de Transmittancia Térmica (K)

Cabe aclarar que la simulación numérica efectuada por el programa PUENTES considera transmisión de calor en dos dimensiones, existiendo una diferencia con el ensayo que mide transmisión de calor en las tres dimensiones, siendo por esta razón, que el método experimental del equipo de "caja caliente" arroja un resultado mayor que el teórico.

### 5. CONCLUSIONES

El hecho de haber realizado modificaciones en el ensayo para la determinación de transmitancia térmica existente, tanto en el equipo como en la metodología de medición y control, permitió mejorar los resultados lográndose mayor precisión. Dicha precisión (acotada en alrededor de  $\pm 5\%$ ) varía en función del tipo de probeta a ensayar, ya que siendo una medición por integración de elementos finitos, cuando la pared es muy aislante existe una menor cantidad de elementos activos (potencia conectada), por lo tanto el error de  $\pm$  elemento frente al total es mayor cuanto más aislante es la probeta. En estos casos, se aumenta el periodo de medición y también la diferencia de temperatura entre lado frío y lado caliente, con el fin de minimizar esta oscilación, tal como se desprende de la expresión (1).

Este sistema de medición podría aún mejorarse, si se contara con un sistema activo que permitiera realizar un control proporcional - integral en lugar de un si-no cuantificado como el existente.

En la figura 3, se presenta la variación del coeficiente de transmitancia térmica proveniente de un ensayo desde su comienzo y durante 50 horas, incluyendo la etapa de acondicionamiento previo que, para este caso, demandó 26 horas.

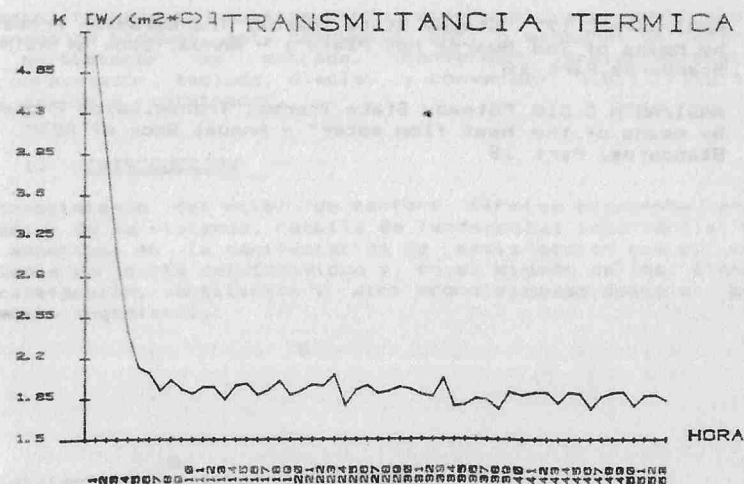


FIGURA 3



Por otra parte, con la implementación del nuevo sistema del ensayo se logra una validación experimental del programa PUNTES. Este programa, como se dijo anteriormente, se alimenta con datos de los parámetros físicos que generalmente son obtenidos en mediciones efectuadas con equipos existentes en el laboratorio, que determinan la conductividad térmica [6], [7]. Por otro lado, se contrastan los resultados de la simulación con los obtenidos del ensayo de transmitancia térmica, cuyo sistema se calibra mediante la utilización de uno de los equipos referidos [6]. Por lo tanto, con este procedimiento queda conformada una técnica de evaluación del comportamiento térmico que resulta autosuficiente.

#### REFERENCIAS

- [1] TAP 6 -"Thermal Analyzer Computer Program"- SAP Users Group, University of Southern California - Department of Civil Engineering, Los Angeles, California, 1979.
- [2] PUNTES -"Programa para el análisis de transmisión de calor en sistemas planos de geometría rectangular".R.R.Réborá - Publicación del Departamento de Construcciones - INTI - 1983
- [3] "Comportamiento Térmico de Cubiertas",L. Giobergia, A. Maronna, V.Volantino, Actas de la 12 Reunión de Trabajo de ASADES 1987
- [4] ANSI/ASTM C 236 "Thermal Conductance and Transmittance of Built - Up Sections By Means of The Guarded Hot Box" - Annual Book of ASTM Standards, Part 18
- [5] Norma IRAM 11564 -"Método de Ensayo para la determinación de la Transmitancia Térmica mediante el aparato de la caja caliente"
- [6] ANSI/ASTM C 177 "Steady State Thermal Transmission Properties by Means of The Guarded Hot Plate": - Annual Book of ASTM Standards,Part 18
- [7] ANSI/ASTM C 518 "Steady State Thermal Transmission Properties by means of the heat flow meter" - Annual Book of ASTM Standards, Part 18