

## MEDICIONES DE RESISTENCIA TÉRMICA DE SISTEMAS DE TECHO CON CÁMARA DE AIRE

Vicente Leonardo Volantino \*

Unidad Técnica Habitabilidad Higrotérmica, CECON, INTI  
Casilla de correo 157 (1650) San Martín Prov. Buenos Aires ARGENTINA  
Fax: 753-5784 - Email: vvolanti@inti.gov.ar

### RESUMEN

Se presentan determinaciones de la resistencia térmica de sistemas de techo liviano, que poseen cámara de aire, mediante la utilización de una técnica alternativa del método de "placa caliente con placa de guarda". La misma considera la posibilidad de efectuar las mediciones sobre una sola probeta, en vez del par idéntico que habitualmente se emplea. El lugar de la segunda probeta se ocupa con una muestra de referencia. Con este método se puede ensayar las muestras dispuestas horizontalmente, para ambos sentidos de flujo de calor posibles, ascendente y descendente.

Los casos de techo liviano ensayados, estaban contruidos por material cerámico (cubierta de teja), cámara de aire y una plancha de espuma de polietileno de espesor delgado, con diferentes variantes de terminación superficial en su cara superior, con recubrimiento de foil de aluminio nuevo, con polvo ambiental depositado sobre él, correspondiente a después de un año de colocado en obra y sin foil de aluminio.

Los resultados se comparan con los obtenidos para sistemas constructivos similares utilizando distintos materiales aislantes térmicos en reemplazo de la espuma.

### INTRODUCCION

Dentro de la gran variedad de sistemas constructivos que existen, se encuentran aquellos que incluyen espacios de aire internos en su composición. Tales espacios de aire, ofrecen una determinada resistencia al pasaje del calor, que depende del espesor y de ciertas propiedades características de las superficies que lo delimitan.

El flujo de calor a través de un espacio de aire plano, es el resultado de la composición de los tres procesos de transmisión posibles; por radiación, desde la superficie más caliente hacia la más fría y por el efecto combinado de conducción y convección. Existen buenas razones para analizar por separado estas dos formas de transmisión de calor, por un lado radiación y por otra conducción - convección, considerándolas independientes entre sí.

Si el flujo total de calor es considerado como la suma de los componentes independientes, entonces la conductancia térmica  $C$ , es decir, el coeficiente de transferencia de calor total a través del espacio de aire, también puede ser considerado como la suma de dos componentes. Esto significa:

$$C = E \times hr + hc \quad (1)$$

donde  $E \times hr$  es el coeficiente de radiación y  $hc$  es el de convección-conducción. Luego, la resistencia térmica  $R$  de la cámara de aire se determina como la inversa de la conductancia:

$$R = 1/C \quad (2)$$

Con respecto al coeficiente  $hc$ , se quiere mencionar especialmente su variación con respecto a la dirección del flujo de calor. Cuando el espacio de aire es horizontal y su cara inferior posee mayor temperatura que su cara superior (calor ascendente), entonces el aire en contacto con la cara inferior se calienta y disminuye su densidad; esto hace que se eleve a través del espacio y transmita el calor desde la superficie inferior a la superior. Bajo estas condiciones, el coeficiente de convección  $hc$  alcanza su máximo valor y por lo tanto, la resistencia térmica es mínima.

Por su parte, cuando la cara superior es la que posee mayor temperatura (calor descendente), el aire caliente en contacto con esta superficie es de menor densidad, mientras que el aire frío que se halla próximo a la superficie inferior es de mayor densidad que el aire restante en todo el espacio. Esta distribución del aire es por lo tanto estable, haciendo que las corrientes convectivas se inhiban y se formen capas de aire inmóviles de apreciable espesor. Esta situación define un coeficiente de convección mínimo y consecuentemente, la resistencia térmica es máxima. Para espacios de aire verticales, el flujo de calor convectivo tiene una posición intermedia a las dos anteriores.

---

\* Coordinador U. T. Habitabilidad Higrotérmica

## METODO DE MEDICION

La determinación de la resistencia térmica se realizó mediante el método denominado "Placa caliente con placa de guarda", que se ajusta a lo estipulado en las normas ISO 8302, ASTM C 177 e IRAM 11559. Dicho método consiste en generar un flujo de calor conocido que atraviese el material a ensayar, con el objeto de fijar las temperaturas en ambas caras. Cuando el sistema alcanza el estado de régimen estacionario, se puede iniciar con las mediciones de las magnitudes involucradas.

El equipo está compuesto por un calefactor principal dispuesto horizontalmente, rodeado periféricamente por otro denominado de guarda, que se halla separado físicamente por una ranura. Este calefactor de guarda realiza un seguimiento electrónico de la temperatura del calefactor principal, con el objeto de reducir las componentes horizontales del flujo de calor, de manera que la transmisión de calor sea mayoritariamente perpendicular a las caras de las muestras. Como el calefactor principal entrega calor por ambas superficies, se debe colocar dos muestras del material a ensayar, una arriba y otra debajo del calefactor. Esta disposición simétrica requiere de la utilización de dos placas frías, que se hallen en contacto con las otras caras de las muestras.

La característica de este método, permite ensayar sobre probetas de conjuntos multicapas, obteniéndose el valor de conductancia térmica y su inversa, la resistencia térmica. En las determinaciones realizadas para la condición de flujo de calor ascendente, se ubica la probeta del conjunto multicapa en la posición superior, mientras que en la posición inferior se coloca una muestra de referencia (Figura 1). Por el contrario, para la condición de flujo de calor descendente, se ubica la probeta del conjunto multicapa en la posición inferior y la muestra de referencia en la superior (Figura 2).

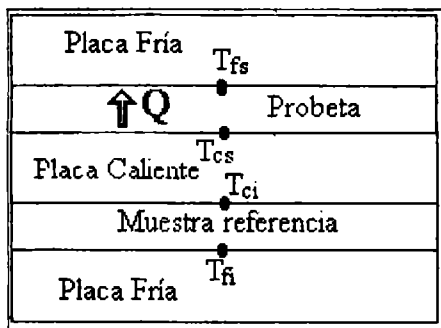


Figura 1: Disposición de la probeta para calor ascendente

### NOMENCLATURA

#### Temperaturas:

Tfs: Placa fría superior

Tcs: Placa caliente superior

Tci: Placa caliente inferior

Tfi: Placa fría inferior

Q↓: Flujo de calor descendente

Q↑: Flujo de calor ascendente

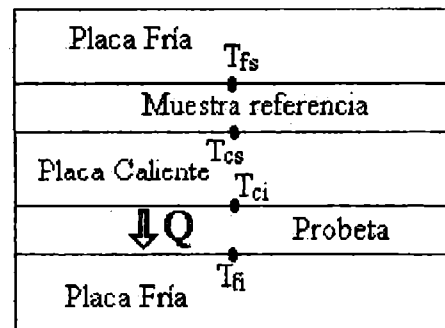


Figura 2: Disposición de la probeta para calor descendente

Tal muestra de referencia, fue previamente ensayada y obtenida su conductancia térmica para las mismas temperaturas media que las establecidas en cada caso.

## DETERMINACIONES REALIZADAS

Se realizaron ensayos a un sistema de techo que se encuentra compuesto por una capa de material cerámico, que representa a una cubierta de teja, cámara de aire y una plancha de 0,005 m de espuma de polietileno con papel aluminizado ubicado en la cara enfrentada a la cámara de aire, según se observa en la Figura 3.

El espesor de la cámara de aire se mantuvo constante, empleándose para ello, separadores constituidos por un marco perimetral externo de madera, para conferirle rigidez y otro interno de espuma de polietileno, para disminuir las pérdidas de calor por las superficies laterales. Las probetas se construyeron de 0,60 m × 0,60 m × 0,047 m de espesor, para cumplir con los requerimientos dimensionales que exige el dispositivo de ensayo.

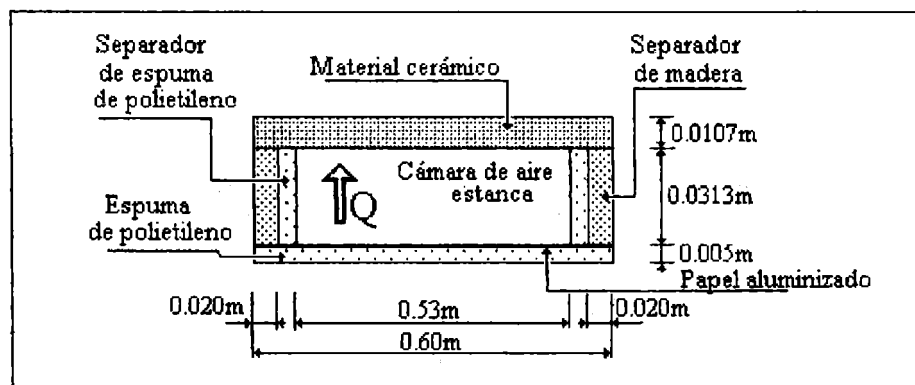


Figura 3: Esquema constructivo de los sistemas de techo ensayados.

Si bien el esquema de la Figura 3 muestra el sentido de flujo de calor ascendente (condición de invierno), la misma también se ensayó con calor descendente (condición de verano).

Para evaluar el comportamiento de la cámara de aire en función de la emitancia efectiva, se realizaron las pruebas para ambas direcciones de flujo, pero habiendo depositado polvo ambiental sobre la superficie del foil de aluminio. Una experiencia adicional consistió en ensayar a la probeta, sin la capa de foil de aluminio, es decir, la superficie que delimita la cámara de aire es, en este caso, la espuma de polietileno.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Las determinaciones realizadas permitieron obtener para cada caso, el valor de resistencia térmica, de superficie a superficie (Rss), del conjunto multicapa. Para hallar la resistencia neta de la cámara de aire (Rca), se recurrió a un método de cálculo basado en la resolución de la ecuación de FOURIER de transmisión de calor, en geometría bidimensional de múltiples materiales, que se obtiene numéricamente por computadora. El método considera la influencia de los puentes térmicos, que en los casos ensayados están representado por los separadores de madera.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de los ensayos correspondientes a transmisión de calor ascendente, para los tres casos analizados: cámara de aire con la superficie inferior de foil de aluminio, con depósito de polvo ambiental sobre ésta y finalmente, sin el foil de aluminio. Se muestran las temperaturas del lado caliente y frío de la probeta y su diferencia, la temperatura media, la conductancia y la resistencia térmica del conjunto. En la última columna se puede observar además, la resistencia de la cámara de aire obtenida mediante el método de cálculo mencionado precedentemente.

Tabla 1 : Mediciones de resistencia térmica con calor ascendente.

Caso	Descripción	Tc (°C)	Tf (°C)	$\Delta T$ (°C)	Tmedia (°C)	C (W/m <sup>2</sup> K)	Rss (m <sup>2</sup> K/W)	Rca (m <sup>2</sup> K/W)
1	con foil	25,0	5,3	19,7	15,2	2,35	0,43	0,28
2	con foil más polvo	25,3	5,6	19,7	15,5	2,62	0,38	0,23
3	sin foil	25,3	5,9	19,4	15,6	3,09	0,32	0,17

Se puede observar que habiéndose mantenido aproximadamente constantes las temperaturas en ambas caras de la probeta y por lo tanto, la temperatura media, la resistencia térmica de la cámara de aire disminuye a medida que aumenta la emitancia efectiva de la misma, como era previsible.

En el Caso 3, muestra que para una cámara de aire encerrada por materiales cuyas superficies tienen alta emisividad ( $\approx 0,9$ ), el valor de resistencia térmica obtenido (0,17 m<sup>2</sup> K/W) es aproximadamente igual al que aparece en las tablas para ese espesor. El Caso 1, da un valor superior (0,28 m<sup>2</sup> K/W), pero no se corresponde con los tabulados, que determinan una resistencia aún mayor para la emisividad efectiva considerada. El Caso 2, permite verificar que el depósito de polvo ambiental sobre la capa de foil de aluminio, disminuye la resistencia de la cámara de aire, en casi un 20%, resultando un valor intermedio entre los dos casos anteriores. La cantidad de polvo que se hallaba depositada, es la que aproximadamente presentaba, según una apreciación visual, un espacio de aire después de un año de haberse construido el techo.

En la Tabla 2, se dan los resultados para los ensayos efectuados con transmisión de calor descendente, para los dos primeros casos de la Tabla anterior, con la salvedad hecha que, en el que posee el foil de aluminio expuesto, se hizo para dos temperaturas del lado caliente diferentes.

Tabla 2 : Mediciones de resistencia térmica con calor descendente.

Caso	Descripción	Tc (°C)	Tf (°C)	$\Delta T$ (°C)	Tmedia (°C)	C (W/m <sup>2</sup> K)	Rss (m <sup>2</sup> K/W)	Rca (m <sup>2</sup> K/W)
1	con foil	44,6	24,7	19,9	34,7	1,82	0,55	0,41
1'	con foil	60,2	24,9	35,3	42,5	2,21	0,45	0,29
2	con foil más polvo	59,8	25,2	34,6	42,5	2,61	0,38	0,24

Los valores de la Tabla 2, destacan dos aspectos, en los ensayos efectuados en la cámara de aire con flujo de calor descendente. En primer lugar, que cuando aumenta la temperatura media del espacio y la diferencia de temperatura entre las superficies enfrentadas, la resistencia térmica de la cámara de aire disminuye. En segundo lugar, que al haber depositado polvo ambiental sobre la cara del foil de aluminio, nuevamente se reduce en casi 20% la resistencia del espacio de aire. Comparando los datos de las Tablas 1 y 2, para el Caso 1 (con foil de aluminio expuesto en la cámara de aire), se observa que se obtiene mayor resistencia con calor descendente (condición de verano) que con ascendente (condición de invierno), de acuerdo con lo expresado anteriormente.

## COMPARACION DEL COMPORTAMIENTO TERMICO ENTRE AISLANTES Y MATERIALES DELGADOS.

Se analizó el comportamiento térmico de otros materiales aislantes, para densidades diferentes y para dos espesores distintos que se utilizan habitualmente: 0,025 y 0,050m. Para cada alternativa planteada se determinó la resistencia térmica del conjunto material más la cámara de aire (de igual espesor que el utilizado para el material de espesor delgado). A cada material se lo consideró con su correspondiente terminación superficial, según se ofrece en el mercado.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3, considerando el comportamiento para el caso de calor descendente (condición de verano). En dicha tabla, se ha agregado también el valor de resistencia térmica correspondientes al conjunto material de espesor delgado más cámara de aire, con el objeto de poder efectuar su comparación.

Cabe aclarar, que debido a los requisitos de ensayo, las mediciones se realizaron con cámaras de aire estancas, las que difieren de la realidad, ya que en los techos de tejas, las mismas no lo son. Por lo tanto, en el espacio de aire se establece una corriente convectiva, que implica una disminución en el valor de la resistencia térmica. Además, el hecho de hallarse abierta la cámara de aire, permite que el depósito de polvo ambiental sobre la superficie inferior, se concrete en poco tiempo, lo que reduce la efectividad de la cara aluminizada.

Tabla 3: Resistencia térmica de sistemas con cámara de aire y distintos materiales, para la condición de verano.

MATERIAL	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	Espesor (m)	Resistencia Térmica (m <sup>2</sup> K / W)	Cara Inferior de Cámara de aire
Lana de vidrio	14	0,02	0,025	0,89	Con Foil de Al
			0,050	1,48	
	25	0,037	0,025	0,97	
			0,050	1,64	
Poliestireno Expandido	15	0,037	0,025	0,86	Sin Foil de Al
			0,050	1,53	
	25	0,035	0,025	0,89	
			0,050	1,61	
Poliuretano Rígido	35	0,022	0,025	1,32	
			0,050	2,45	
Espuma Polietileno	30	0,036	0,005	0,43	Con Foil de Al

NOTA: Los valores de conductividad térmica de los materiales mencionados en la Tabla 3, corresponden a mediciones realizadas en el INTI, por el método del medidor de flujo de calor [7], para la temperatura media de operación en condiciones de verano, para este tipo de techos.

## CONCLUSIONES

Se aplicó una alternativa al método de placa caliente, que permitió efectuar determinaciones sobre sistemas de techo liviano con cámara de aire, pudiéndose considerar en forma independiente las dos posibles direcciones verticales de flujo de calor. Los valores de resistencia térmica de un espacio de aire, fueron obtenidos sobre probetas con superficies planas en las caras enfrentadas y sin prácticamente rugosidad, manteniendo constante su espesor y el aire encerrado se hallaba totalmente estanco. Este tipo de determinaciones ha sido intensamente experimentada en laboratorios reconocidos del extranjero [1] [2] [3] [4], por lo cual este trabajo no pretende ser inédito en el tema. Solamente se intenta presentar mediciones efectuadas en nuestro país, sobre materiales de origen nacional, para condiciones de temperaturas más usuales, ya sea para invierno (calor ascendente), como para verano (calor descendente).

La experiencia permitió verificar que la resistencia térmica de una cámara de aire que posee una superficie de baja emisividad, se reduce en un 20%, cuando en la misma se ha depositado polvo ambiental en el transcurso de un año.

## REFERENCIAS

- [1] National Bureau of Standards. The Thermal Insulating Value of Air Spaces. Housing Research Paper N°32. Housing and Home Finance Agency (HHFA) (1954).
- [2] ASHRAE. Handbook of Fundamentals. Chapter 22: Design Heat Transmission Coefficients (1977).
- [3] Baruch Givoni. Man, Climate and Architecture Building Research Station. Technion, Israel Institute of Technology. Applied Science Publishers Ltd. London (1952).
- [4] Paul D. Close. Building Insulation. 4th Edition. American technical society. (1952)
- [5] ASTM C177, ISO 8302. Thermal insulation. Determination of steady-state and thermal resistance and related properties. Guarded hot plate apparatus. / IRAM 11559 (1994) Acondicionamiento Térmico de Edificios. Método de determinación de la conductividad térmica de los materiales de construcción mediante el aparato de placa caliente.
- [6] SAP Users Group, "TAP 6 Thermal Analyzer Computer Program", University of Southern California, Dept. of Civil Engineering, Los Angeles
- [7] ASTM C 518, ISO 8301, Thermal insulation. Determination of steady-state thermal resistance and related properties. Heat flow meter apparatus