

MÉTODO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES TÉRMICAS EN CÁMARAS DE AIRE ATRAVESADAS CON CALOR ASCENDENTE

Vicente Leonardo Volantino, Edgar Jorge Cornejo
Unidad Técnica Habitabilidad Higrotérmica, CECON, INTI
Casilla de correo 157 (1650) San Martín Prov. Buenos Aires ARGENTINA
Fax: (011) 4753-5784 - E-mail: vvolanti@inti.gov.ar, edcorne@inti.gov.ar

RESUMEN: Se presenta una metodología de ensayo que permite determinar la resistencia térmica de una cámara de aire horizontal, sometida a una diferencia de temperatura tal que el flujo de calor que la atraviesa resulte ascendente. Lo original del trabajo reside en el hecho de haber utilizado para tal fin, un equipo que mide las propiedades térmicas de materiales de construcción bajo condiciones de calor descendente. Se desarrolla el procedimiento previo que permite avalar la inversión del flujo de calor, la calibración y validación correspondiente del método. Esta técnica de ensayo posibilita la aplicación a los espacios de aire existentes en techos de viviendas cuando se encuentren sometidos a condiciones de invierno.

PALABRAS CLAVES: resistencia térmica, cámara de aire horizontal, calor ascendente, cerramiento horizontal, condición invernal, techo.

INTRODUCCION

En un trabajo anterior (Volantino, Cornejo, 1999), se describió el fenómeno de transferencia de calor que ocurre a través de un espacio de aire existente dentro de un sistema constructivo. En esa oportunidad, se hicieron determinaciones para un espacio de aire dispuesto horizontalmente y con flujo de calor descendente; es decir, el caso de un techo en condiciones de verano. En el Instituto y más precisamente en la Unidad Técnica Habitabilidad Higrotérmica del CECON (Centro de Investigación y Desarrollo en Construcciones), se cuenta con un equipo que mide las propiedades térmicas de los materiales de construcción, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C 518. Este equipo posee, debido a su modo normal de operación, un sistema de medición diseñado para ensayar probetas dispuestas en posición horizontal y sometidas a un flujo de calor descendente. Pero también es posible la realización del ensayo de flujo de calor ascendente, que consiste en controlar la denominada cara fría del calefactor a una mayor temperatura que la de la cara caliente del mismo.

Debido a requerimientos solicitados por clientes externos, tales como los fabricantes de materiales utilizados en techos livianos, surge la necesidad de determinar las propiedades térmicas en un espacio de aire pero con flujo de calor ascendente, situación que se presenta en un techo para condiciones de invierno.

Por lo tanto, para poder realizar dichas determinaciones, se estudió la posibilidad de invertir el normal funcionamiento de las placas calefactora y enfriadora del equipo de ensayo, sin descuidar los factores que pueden modificarse debido a los cambios introducidos. Si bien el hecho de invertir el sentido del flujo de calor, no tiene una incidencia significativa en los materiales sólidos, la situación es diferente cuando se trata de espacios de aire. Tales espacios o cámaras de aire, son muy frecuentes en la constitución de techos, tales como aquellos que poseen cubiertas de chapa metálica o de fibrocemento, de tejas, etc., razón que justifica haber encarado este trabajo

MÉTODO DE MEDICIÓN

Tal como se mencionó precedentemente, el equipo de medición utilizado es el denominado "Aparato medidor del flujo de calor", que se rige de acuerdo con lo establecido en las normas ISO 8301 y ASTM C 518 (Figura 1). Dicho aparato basa su funcionamiento en la generación de un flujo de calor unidireccional, bajo un régimen estacionario, a través de un espécimen contenido entre dos placas planas y paralelas que se hallan a diferentes temperaturas, pero constantes. El equipo está compuesto por dos placas isotérmicas, un transductor de flujo de calor (fluxímetro), dispositivos para medir y controlar las temperaturas, el espesor entre placas y la señal de salida del fluxímetro.

Al estar encontrarse el medidor de calor en la parte inferior, recibe todas las líneas de flujo que atraviesan a la muestra a ensayar. Al invertir el flujo de calor se hace necesario contar con un medidor en la parte superior, para que cumpla la misma función antes descrita. Se hace necesaria una calibración del medidor a incorporar, probando su comportamiento tanto con una probeta sólida como con un espacio de aire estanco, debido a que los fenómenos térmicos que se desarrollan son diferentes.

A dicha probeta se le instaló una red de sensores de temperatura (termocuplas de cobre constantán), dispuesta una en cada cara principal, con el objeto de medir las temperaturas superficiales y obtener el promedio para luego hallar el flujo de calor que la atraviesa. Esta probeta se la ubicó en la parte de arriba del área de ensayo del equipo, en contacto con la placa superior.



Figura 1: Esquema del aparato medidor del flujo de calor

DETERMINACIONES REALIZADAS

Es importante efectuar las mediciones de resistencia térmica considerando los dos sentidos de flujo de calor (ascendente y descendente), en las distintas configuraciones que puede obtenerse del sistema a medir, para lo cual se definieron distintas etapas.

1ª Etapa: Se persigue en esta instancia, conocer el comportamiento térmico de un material sólido cuando es sometido tanto a uno como a otro sentido de transmisión del calor vertical.

2ª Etapa: Se repite la experiencia anterior con el agregado de otro material, cuya variación de la conductividad térmica con la temperatura fue determinada previamente. La intención de utilizar un material adicional es la de emplearlo como medidor de flujo de calor (HFM).

3ª Etapa: Se experimenta con ensayos sobre cámaras de aire sometidas a flujo de calor ascendente, considerando para ello diferentes configuraciones, tales como, cámara de aire exclusivamente (caso a), cámara de aire y material utilizado como HFM en la parte superior (caso b) y cámara de aire, espuma de polietileno con una película reflectante enfrentada a aquella y el material utilizado como HFM (caso c)

4ª Etapa: Se realiza la validación del método desarrollado por dos caminos, uno reemplazando el material utilizado como HFM por otro de tipo comercial, del que se dispone la información correspondiente a su calibración y otro, utilizando las tablas de valores de resistencia térmica de cámaras de aire, publicadas por ASHRAE en su Manual Fundamentals.

1ª ETAPA: PRUEBA DEL MÉTODO EN MATERIALES SÓLIDOS (CALOR ASCENDENTE Y DESCENDENTE)

La experiencia en la utilización del equipo de ensayo descrito, ha sido siempre con probetas constituidas por materiales sólidos y para condiciones de transmisión de calor descendente, que son las correspondientes al modo normal de operación del aparato.

Por lo tanto, la primera prueba que se realizó, fue la de ensayar un mismo material para los dos sentidos de flujo de calor vertical. Para ello se utilizó una muestra de poliuretano rígido (PUR) de espesor mayor a 2'' (0,063m) y se la ensayó en condiciones normales de operación del equipo (calor descendente), para una temperatura de la placa superior o calefactora de 32°C y una temperatura de la placa inferior o enfriadora de 16°C. (Figura 2a)

Estas temperaturas se eligieron en función de lo estipulado en la norma ASTM C 1224, para los ensayos requeridos a las cámaras de aire.

Los resultados obtenidos de las mediciones se observan en la Tabla 1, donde se detalla el material ensayado (PUR), el sentido del flujo de calor (Q), la diferencia de temperaturas entre placas ($\Delta T = |T_1 - T_2|$), la resistencia térmica ($R = \Delta T / Q$) y las variables ambientales del laboratorio (temperatura, humedad relativa y presión atmosférica).



Figura 2: Disposición de probetas del material sólido (PUR), a) calor descendente; b) calor ascendente

Posteriormente, se efectuó la inversión del sentido de transmisión de calor vertical en el equipo, consistente en intercambiar los valores de temperatura controlada sobre cada placa. De este modo, se sometió a la misma muestra de poliuretano rígido a un régimen de calor ascendente (Figura 2b). Los resultados también se pueden observar en la Tabla 1

Material	Sentido Q	Q (W/m ²)	ΔT (°C)	\bar{T} (°C)	R (m ² K/ W)	Condiciones ambientales		
						T _a (°C)	HR (%)	P _a (hPa)
PUR	↓	6,25	15,9	24,4	2,54	23,0	62	995
PUR	↑	6,34	16,3	24,2	2,57	21,2	49	1015

Tabla 1: Determinación de resistencia térmica para material sólido (aislante térmico).

Se verifica con estas experiencias, que con la utilización del equipo descrito, la determinación de la resistencia térmica de un sólido homogéneo, es independiente del sentido de transmisión del calor.

2ª ETAPA: CALIBRACIÓN DEL MÉTODO

Esta etapa consistió en la determinación de la resistencia térmica del material utilizado en la 1ª etapa, con el agregado de una muestra, que será empleada como medidor del flujo de calor. Para tal fin, se seleccionó un material con cierta rigidez, con terminación superficial muy lisa en sus caras principales, de mínimo espesor y de propiedades térmicas de fácil determinación experimental. El mismo consistió en una placa de poliestireno expandido (EPS) de 25kg/m³ de densidad aparente y 9,4 mm de espesor. La disposición y las condiciones de ensayo implementadas para cada sentido del flujo de calor, son las que se presentan en la Figura 3, siendo (a) para el caso de calor descendente y (b) para el ascendente



Figura 3: Disposición de las probetas con medidor de flujo de calor adicional, a) calor descendente; b) calor ascendente

Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 2, donde aparece ΔT_{EPS} , que es el gradiente de temperatura medido sobre el medidor de flujo de calor adicional e igual a $|T_1 - T_i|$, que debe diferenciarse del ΔT correspondiente a la diferencia de temperatura entre placas caliente y fría del equipo de medición. T_i es la temperatura de la cara inferior de la placa de EPS.

Sentido Q	Q (W/m ²)	T ₁ (°C)	T _i (°C)	T ₂ (°C)	ΔT (°C)	\bar{T} (°C)	R _T (m ² K/ W)	ΔT_{EPS} (°C)	Condiciones Ambientales
↓	5,60	32,2	30,6	16,3	15,9	24,2	2,84	1,6	22°C 60%HR 1006 hPa
↑	6,03	16,3	18,0	32,2	15,9	24,3	2,64	1,7	20°C 55%HR 1007 hPa

Tabla 2: Mediciones obtenidas para el conjunto compuesto por material sólido (PUR) y el medidor de flujo de calor adicional (EPS).

Por otra parte, R_T en $m^2 K/ W$, representa la resistencia térmica total del conjunto (muestra de PUR más muestra de EPS) y que es la determinada por el equipo medición.

Para la calibración del método, se determinó la conductividad térmica de la muestra de EPS, que oficia de medidor adicional de flujo de calor, a los mismos valores de temperatura media con que opera en cada caso ensayado. Esto es, se efectuó la prueba con flujo de calor descendente a la temperatura media de $31,4^\circ C$ y para flujo de calor ascendente a $17,1^\circ C$; éstos surgen de calcular el valor medio entre T_1 y T_i informados en la Tabla 2.

Las mediciones realizadas para ambas situaciones se detallan en la Tabla 3, con valores de temperatura media lo más próximo posible a tales condiciones. También se realizó para otro valor de temperatura media, con el objeto de tener la variación de la conductividad térmica con la temperatura más acotada.

\bar{T} ($^\circ C$)	ΔT ($^\circ C$)	Q (W/m^2)	λ ($W/m K$)
31,1	16,2	28,76	0,034
16,9	16,7	27,93	0,032
4,8	20,4	32,60	0,032

Tabla 3: Mediciones de conductividad térmica de EPS a distintas temperaturas.

Con estos datos obtenidos a partir de las mediciones efectuadas se realiza el ajuste en las correspondientes al conjunto PUR más medidor de flujo de calor adicional, y los resultados se presentan en la Tabla 4:

El flujo de calor que atraviesa el EPS, se obtiene como:

$$Q'_{EPS} = \frac{\Delta T_{EPS}}{R_{EPS}} \quad (1)$$

Sentido Q	Q (W/m^2)	R_T ($m^2 K/ W$)	ΔT_{EPS} ($^\circ C$)	Q'_{EPS} (W/m^2)	ΔT_{PUR} ($^\circ C$)	R_{PUR} ($m^2 K/ W$)
↓	5,58	2,84	1,6	5,72	14,3	2,50
↑	6,03	2,64	1,7	5,65	14,3	2,52

Tabla 4: Calibración del flujo de calor para las mediciones de la Tabla 2

Se puede observar que los flujos de calor medidos por el equipo es levemente diferente a los Q' calculados con el EPS. Esto permite inferir que existe una pequeña pérdida de calor sobre las paredes que encierra al volumen de medición. La comparación indica que el flujo de calor entrante a la probeta de ensayo es mayor al saliente, en ambos sentidos de flujo de calor.

3ª ETAPA: MEDICIONES DE CÁMARAS DE AIRE

Se procedió a ensayar diferentes tipos de cámaras de aire sometidas a un flujo de calor ascendente. Las pruebas se realizaron para un espacio de aire de altura constante e igual a 4cm.

En primer lugar, se efectuó la determinación de la resistencia térmica del espacio de aire que queda encerrado entre las placas calefactora y enfriadora del dispositivo de ensayo (Figura 4a).

Luego, se incorporó el medidor de flujo de calor adicional y como se describió anteriormente, ubicado en la parte superior del espacio, es decir, en contacto con la placa superior (Figura 4b).

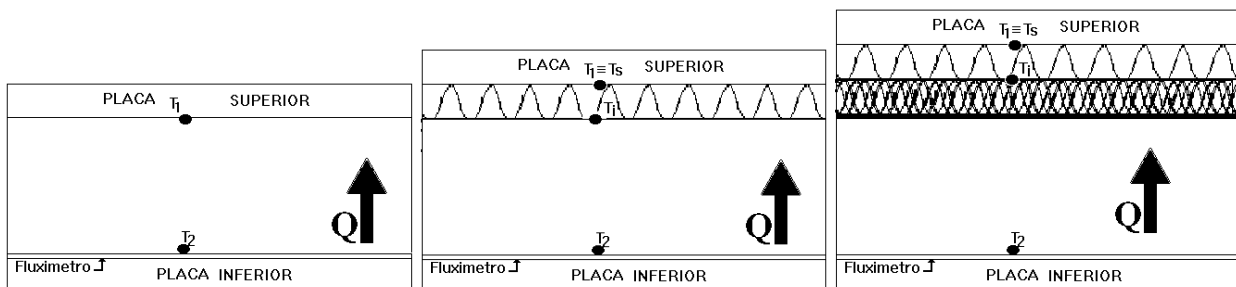


Figura 4: a) Esquema de medición para cámaras de aire de 4cm; b) agregando en la cara superior EPS; c) agregando en la cara superior una espuma de polietileno con foil de aluminio y EPS

Finalmente, se agregó un material consistente en espuma de polietileno con terminación de foil de aluminio en la superficie enfrentada a la cámara de aire (Figura 4c), con el objeto de modificar la emittancia efectiva de la misma. Para tener la misma configuración de medición del equipo que con flujo de calor descendente se coloca en la parte superior una placa de poliestireno expandido de λ conocido que actuará de medidor de flujo de calor. El análisis de la amplitud de las oscilaciones en las mediciones de flujo de calor quedan determinadas por su desviación estándar.

Los resultados que se obtuvieron son los que se presentan en la Tabla 5

Caso	Q (W/m ²)	σ_{n-1} (W/m ²)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T _i (°C)	Q' (W/m ²)	σ_{n-1} (W/m ²)	ΔT_{ca} (°C)	\bar{T}_{ca} (°C)	R _{ca} (m ² K/W)
Figura 4a	117,7	2,8	16,3	32,3	-	-	-	16,1	24,3	0,136
Figura 4b	66,9	1,1	3,1	32,0	22,1	64,9	0,7	10,0	27,0	0,140
Figura 4c	44,4	1,1	-3,8	31,9	21,3	43,4	0,3	12,7	25,6	0,292

Tabla 5: Determinación de resistencia térmica en cámaras de aire con calor ascendente

Del análisis de la Tabla 5 se deduce, que si bien la cámara de aire de los casos descritos en las Figuras 4a y 4b, presentan las mismas características y están ensayadas bajo condiciones de temperatura media similares, el resultado obtenido en la segunda variante se ajusta más exactamente a los valores tabulados en la bibliografía (ASHRAE). En el tercer caso, la resistencia térmica es mayor debido a la menor emisividad que posee una de las superficies que encierran a la cámara de aire.

4ª ETAPA: VALIDACIÓN DEL MÉTODO

a) La validación se realiza reemplazando el material usado como medidor de flujo de calor (EPS) en la Figura 4c, por un transductor de flujo de calor convencional, cuyo esquema de medición se puede observar en la Figura 5. Se determina la resistencia térmica de la cámara de aire R'_{ca} utilizando los valores medidos de Q_F y ΔT_{ca} . Los datos procedentes de este ensayo son los que se presentan en la Tabla 6.

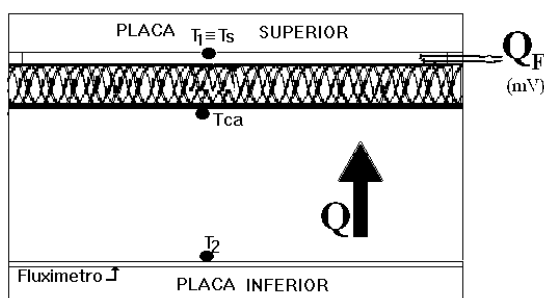


Figura 5: Esquema de medición con fluxímetro convencional.

Q (W/m ²)	σ_{n-1} (W/m ²)	T ₁ (°C)	T _{ca} (°C)	T ₂ (°C)	Q _F (W/m ²)	σ_{n-1} (W/m ²)	ΔT_{ca} (°C)	R' _{ca} (m ² K/W)
50,42	1,2	2,6	19,0	31,7	44,78	0,4	12,6	0,282

Tabla 6: Determinaciones realizadas con fluxímetro convencional.

b) La verificación del método se realiza mediante la tabla de ASHRAE, si se cumple que la resistencia térmica de la cámara de aire medida con calor descendente y la correspondiente a calor ascendente se encuentran dentro del mismo intervalo de emisividad, debido a que ésta no varía con el sentido del flujo de calor.

Para tal fin, se ingresa con los datos de temperatura media, diferencia de temperatura y espesor medidos sobre la cámara de aire, obteniéndose los valores de resistencia térmica que encierran al determinado experimentalmente. Tales resistencias tabuladas corresponden a sendas emittancias efectivas del espacio de aire.

El procedimiento se realiza en forma independiente para ambos sentidos del flujo de calor. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7, donde R_{AS} representa la resistencia térmica para una cámara de aire plana, extraída de la Tabla 3 del Capítulo 24 del Manual ASHRAE, mientras que R_{ca} es la determinada por ensayo, como así también los valores de Q, \bar{T} y ΔT .

Caso	Sentido Q	\bar{T} (°C)	ΔT (°C)	R _{ca} (m ² K/W)	R _{AS} (m ² K/W)	
					$\epsilon=0,05$	$\epsilon=0,20$

Figura 4c	⇓	11,9	15,6	0,74	0,986	0,554
Figura 6	⇑	25,6	12,7	0,29	0,356	0,267

Tabla 7: Comparación con ASHRAE.

Los datos correspondientes al ensayo con calor ascendente son los detallados en la Tabla 5, para el caso de la Figura 4c. En cambio, los datos del ensayo con calor descendente, se obtuvieron de la determinación realizada según el esquema de medición de la Figura 6, para la misma cámara de aire y agregando en la cara superior de ésta, una espuma de polietileno con terminación de foil de aluminio enfrentada a dicho espacio de aire.

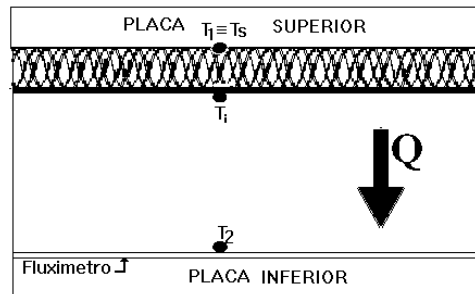


Figura 6: Esquema de medición de cámara de aire con calor descendente.

CONCLUSIONES

Lo interesante de este método es que para determinaciones con calor ascendente, se puede utilizar un material como medidor de flujo de calor (del que se conoce la variación de la conductividad térmica con la temperatura media), con sólo medir la diferencia de temperatura entre sus caras, obtenidas mediante un conjunto de termocuplas.

En el conjunto de datos que se obtuvieron con calor ascendente, las mediciones del flujo de calor que brinda el equipo de ensayo, presentaron una mayor desviación estándar que el flujo de calor determinado mediante el uso de la placa de EPS.

Por esta razón, resulta importante ubicar el medidor de flujo de calor en el lado opuesto al que se halla la fuente de calor. Esta consideración, no se pone tan de manifiesto en la determinación sobre un sólido como sí lo hace con una cámara de aire.

AGRADECIMIENTOS

Se quiere dejar expresado el agradecimiento por la colaboración prestada para la realización de este trabajo, al Sr. Wenceslao Moreno (en la ejecución de las mediciones), al Sr. Víctor Moruga y a la Srta. Zulema Villarroel, integrantes de la Unidad Técnica Habitabilidad Higrotérmica del CECON-INTI

REFERENCIAS

ASHRAE, Handbook of Fundamentals. Chapter 24 (1997)

ASTM C518-98 (1998) Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus.

ASTM C1224-99 (1999) Standard Specification for Reflective Insulation for Building Applications.

Volantino V. L. y Cornejo E. J. (1999). Determinación de resistencia térmica por radiación en cámaras de aire con materiales reflejantes en techos. XXII Reunión de Trabajo de ASADES. Tucumán.

ABSTRACT: We introduce an essay methodology which allows to determine an horizontal air cavity thermal resistance, under such a temperature difference that the heat flux that passes through it is upward. The original part of the present work is the fact of having used an equipment that measures the thermal properties of building materials under downward heat conditions. The previous procedure is developed, which allows to guarantee the heat flux inversion, calibration and validation of the method. This essay technique enables its application to existing air spaces in houses roofs when they are under winter conditions.