

SISTEMA DE MEDICION IN SITU PARA LA EVALUACION DE PATOLOGIAS HIGROTÉRMICAS EN LA CONSTRUCCION

Vicente Leonardo Volantino, Gabriel Gustavo Carlo

División Habitabilidad Higrotérmica, Depto de Construcciones, INTI
Casilla de correo 157 (1650) San Martín Prov. Buenos Aires ARGENTINA
Fax: 753-5784 - Email : INTI@SPI-CIS.COM

RESUMEN

Se procedió a la calibración y puesta a punto de un instrumental portátil apto para la determinación de conductancia térmica de elementos constructivos, velocidad del viento, humedad relativa y absoluta, punto de rocío del aire interior, etc. Se utilizó en mediciones de campo realizando una primera aplicación del equipo y de nuestros resultados. El objetivo principal está orientado a evaluaciones "in situ" de edificaciones que permitan analizar su comportamiento energético (midiendo la aislación térmica de los elementos componentes de la envolvente), determinar el nivel de confort interior y completar la información necesaria en los casos que existan patologías higrotérmicas (por ejemplo, condensación superficial de humedad).

INTRODUCCION

Los relevamientos de algunos barrios de vivienda que efectúa el Departamento de Construcciones, principalmente situados en la ciudad de Buenos Aires y su conurbano están destinados a una evaluación del tipo de patología constructiva encontrada y la gravedad que la misma presenta hacia los ocupantes. Entre las distintas patologías existentes, se analizan aquellas relacionadas con el comportamiento higrotérmico, la incorrecta utilización del asoleamiento y las debidas a fallas en el diseño urbano que ocasionan ampliación de vientos o turbulencias. En la necesidad de contar con las herramientas adecuadas para elaborar un diagnóstico más preciso se ha adquirido un conjunto de instrumentos portátiles que permiten hacer mediciones de las variables ambientales interiores y de las propiedades térmicas de la envolvente. El equipamiento se completa con una estación meteorológica y un medidor de radiación solar portátiles existentes. El instrumental referido está constituido por un equipo de medición de flujo de calor y temperatura, un sistema anemométrico y un sistema psicrométrico. Los mismos son procedentes de Alemania, fabricados por la firma Ahlborn y se denominan Therm, modelos 2287-8, 2285-2 y 2286-2 respectivamente. El primero de los instrumentos nombrados es capaz de medir densidad de flujo de calor (para lo cual viene provisto con los necesarios medidores de flujo), temperatura (mide hasta 2 canales simultáneamente existiendo diferentes tipos de termocuplas disponibles), humedad relativa y velocidad del aire. Dispone además de un canal virtual en el que se realiza el cálculo de la transmitancia térmica del elemento constructivo. El segundo se adapta especialmente a los registros de velocidad del viento para lo cual cuenta con un anemómetro ideado a tal fin, pudiendo asimismo evaluar la temperatura y la humedad relativa. En el tercer instrumento un detector psicrométrico se conecta a la unidad adquisidora de datos y permite evaluar la humedad relativa y absoluta, temperatura del aire y el punto de rocío. Tanto en este caso como en el anterior es posible efectuar promedios temporales así como sobre una serie arbitraria de datos.

En el caso de la calibración del medidor de flujo de calor se realizó un trabajo basado en la norma ISO 8301 [1] referida a aislación térmica y en especial a este tipo de prácticas. Para llevarla a cabo se utilizó un aparato existente en nuestro laboratorio que responde a la norma ASTM C 518 [2] que consiste básicamente en un paralelepípedo de altura variable (aislado térmicamente) con dos caras (placas) opuestas en las que es posible mantener una determinada temperatura constante. Además de cumplimentar con las directivas de la misma se encaró un análisis más amplio consistente en un relevamiento del factor de calibración como función de la temperatura media y también de la densidad de flujo de calor (variación que se consiguió mediante la alteración de la resistencia térmica por reducción del espesor de la muestra utilizada en el proceso de calibración así como también por variación de la diferencia de temperaturas entre una y otra placa del aparato anteriormente citado y utilización de diferentes materiales). En el caso del anemómetro se consiguió la calibración mediante un túnel de viento proyectado y construido a tal efecto. Como referencia patrón se empleó un transductor de velocidad de aire modelo 8470 de la firma TSI cuya curva de calibración certificada por el NIST estaba disponible. Finalmente, y con el fin de obtener un primer ensayo sobre casos concretos y en las condiciones futuras de utilización de este instrumental se efectuaron mediciones sobre dos sistemas constructivos que se hallan bien diferenciados en lo que hace a su aislación térmica. Se utilizó como base de los ensayos efectuados la norma ISO 9869 [3] referida a aislación térmica de elementos constructivos y más especialmente a medición "in situ" de resistencia y transmitancia térmica. Se midió sobre una pared perteneciente a una cámara climática y sobre una pared de hormigón, con la intención de cubrir un rango comprendido entre dos importantes límites de resistencia térmica y corroborar así la versatilidad de los instrumentos frente a los distintos problemas que puedan surgir tanto en el ámbito industrial como en el de la vivienda.

CALIBRACIONES

En lo referente a la calibración del medidor de flujo de calor se utilizó la relación

$$q = e \cdot f \quad (1)$$

donde q es la densidad de flujo de calor en W/m^2 , e es la fuerza electromotriz de salida generada por el sensor en milivolts y f es el factor de calibración a determinar. Se tomó como referencia la norma anteriormente citada [1] para el caso de dos muestras idénticas entre las cuales se coloca el sensor a calibrar. Para este conjunto en particular se especifica que haciendo un desarrollo de la densidad de flujo de calor como función de la temperatura media se puede deducir la siguiente expresión para el factor de calibración:

$$f = \frac{q}{e} \left[1 + \frac{2 \times \lambda''(t)}{3 \times \lambda m} \times (\Delta T)^2 \right] \quad (2)$$

donde : $\lambda''(t)$ es la segunda derivada con respecto a la temperatura de la conductividad térmica del conjunto, λm es la conductividad térmica media y ΔT es la diferencia de temperaturas entre la placa fría y la caliente del aparato utilizado para efectuar la calibración. Se cumplimentó con el requisito que establece la norma de continuar con la calibración hasta que el término entre corchetes de la expresión (2) difiera de 1 en menos del 0.2%. En la figura 1 se puede observar la disposición del conjunto muestras-sensor. Con este arreglo experimental se consiguió analizar el comportamiento del medidor de flujo de calor en una región representativa de temperaturas medias en un rango comprendido entre -2°C y 30°C . De esta manera se puede disponer de datos precisos acerca del comportamiento del sensor para cada temperatura media y no tener que recurrir a extrapolaciones.

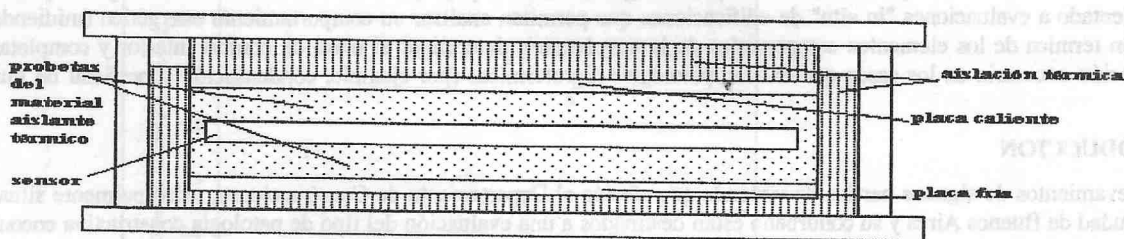


Figura 1: Esquema del dispositivo para la calibración del medidor de flujo

En la figura 2 se puede apreciar el factor f en función de la temperatura media (para diferencia de temperatura entre placas de 5°C y 20°C) utilizando polietileno expandido para construir la muestra de calibración, en la figura 3 el mismo gráfico pero empleando lana de vidrio y para una diferencia de 5°C .

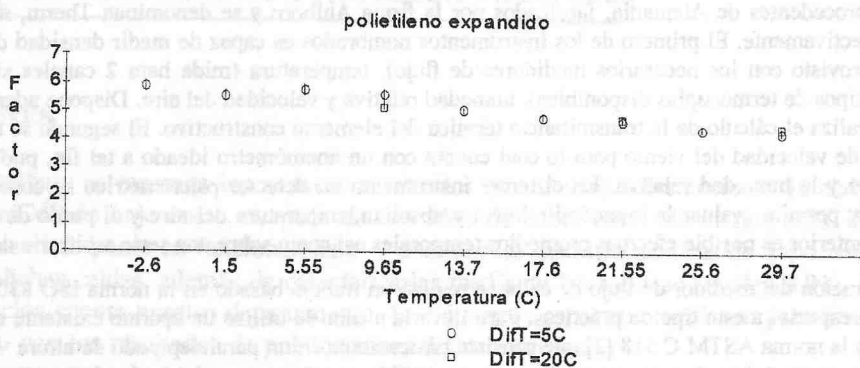


Figura 2: Factor de calibración del sensor de flujo de calor vs. temperatura media de la probeta.

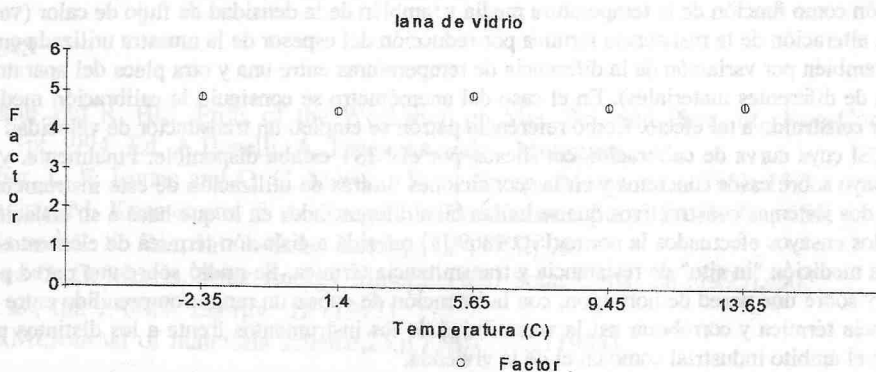


Figura 3: Factor de calibración del sensor de flujo de calor vs. temperatura media de la probeta.

En el primer caso se pudo determinar una ley para el factor de calibración como función de la temperatura media del sensor dado el comportamiento aceptablemente lineal de los datos, $\text{factor} = (-0.053 \pm 0.005)T + (5.8 \pm 0.2)$ W/m² mV (temperatura en grados C o K pero sin unidades), para la muestra confeccionada en lana de vidrio se toma el promedio de los valores con su correspondiente dispersión, $\text{factor} = (4.7 \pm 0.2)$ W/m² mV. En la figura 4 se observa una curva del factor versus la densidad de flujo de calor (variando la resistencia térmica pero manteniendo la temperatura media en 20°C con una diferencia entre placa fría y caliente de 20°C).

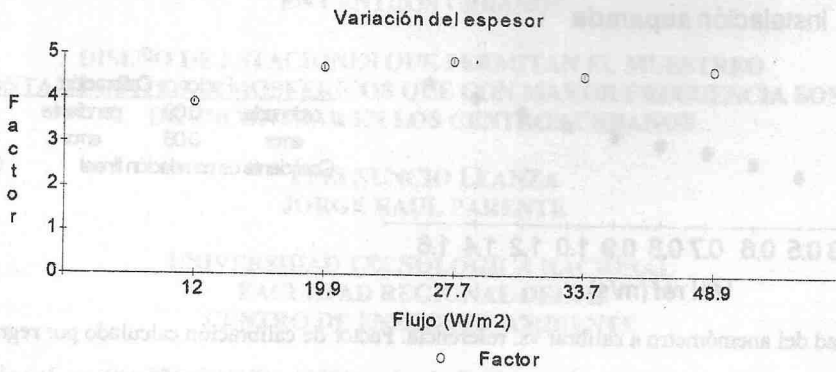


Figura 4: Factor de calibración del sensor de flujo de calor vs. densidad de flujo de calor que atraviesa la probeta.

Se puede observar que en los casos en que se modifica el flujo térmico que atraviesa la muestra variando la diferencia de temperaturas entre la placa caliente y la fría del dispositivo (manteniendo constante la temperatura media) el factor de calibración se mantiene en el mismo valor (dentro de la banda de incerteza). Esto se condice con el espesor del sensor, que es de $(0.00145 \pm 0.00001)\text{m}$. No ocurre así al alterar el espesor o el material de la muestra. La explicación más razonable para este fenómeno es la pérdida de flujo a través del área no cubierta por el medidor (ver figura 1). En dicha zona la conductividad térmica se ve alterada y el flujo de referencia que se obtiene no es el que atraviesa de manera efectiva la zona sensible. Para este último caso se toma un promedio como referencia (aunque para la utilización se recurre a interpolación lineal entre los dos puntos más próximos), $\text{factor}=(4.6 \pm 0.3)\text{W/m}^2 \text{ mV}$.

En lo referido a la calibración del anemómetro se dispuso el diseño y la construcción de un túnel de viento con el fin de reducir al mínimo la inestabilidad en la lectura de los instrumentos producida por la turbulencia. Para tal objeto se embutieron en un conducto cilíndrico de 3 metros de longitud por 15 cm de diámetro el anemómetro a calibrar y el anemómetro de hilo caliente TSI como se muestra en la figura 5.

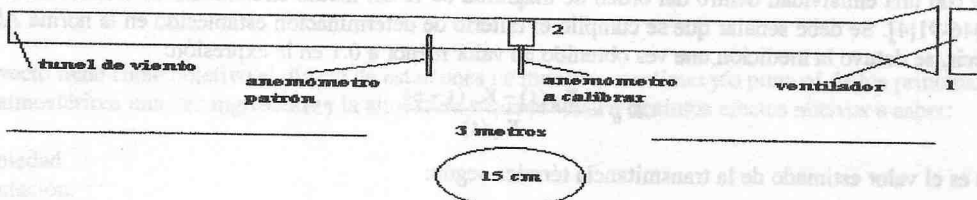


Figura 5: Esquema del túnel de viento y ubicación de los sensores

Como fuente de diferencia de presiones entre los extremos de la tubería se montó un ventilador en la boca del túnel con velocidad fija de rotación. Haciendo uso de la hipótesis estacionaria (el motor del ventilador se supone lo suficientemente estable) y considerando que el aire es un fluido incompresible a velocidades muy por debajo de la velocidad del sonido (y este es efectivamente nuestro caso) la ecuación de continuidad:

$$\partial_t \rho = -\nabla \cdot (\rho \cdot v) \quad (3)$$

donde: ρ es la densidad del aire, $\partial_t \rho$ es la derivada temporal local de la densidad del aire y v es la velocidad del viento, se reduce a la condición:

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (4)$$

donde los subíndices 1 y 2 indican las zonas de la boca y de fijación del anemómetro en el túnel de viento (ver figura 5). De tal forma que variando el área de entrada en la boca del túnel se consiguió variar de la manera deseada la velocidad del aire que fluía a través de él.

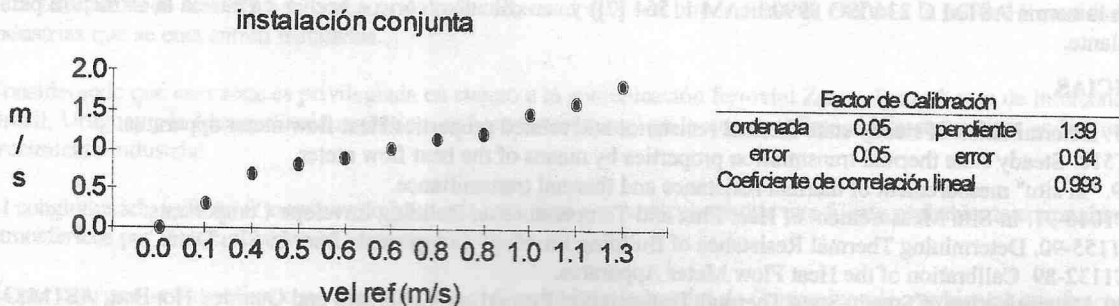
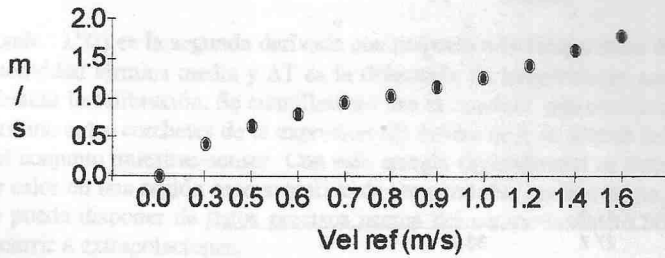


Figura 6: Velocidad del anemómetro a calibrar vs. referencia. Factor de calibración calculado por regresión lineal.

instalación separada



| Factor de Calibración | | | |
|-----------------------------------|------|-----------|-------|
| ordenada | 0.09 | pendiente | 1.1 |
| error | 0.06 | error | 0.04 |
| Coeficiente de correlación lineal | | | 0.987 |

Figura 7: Velocidad del anemómetro a calibrar vs. referencia. Factor de calibración calculado por regresión lineal.

De esta manera se obtuvieron las curvas de la figuras 6 y 7, donde se representa, en ambos casos, la velocidad del viento indicada por el anemómetro provisto con el instrumental versus la que se midió con el de referencia en un rango típico para interiores de vivienda. En la primera de estas figuras se aprecia el resultado de colocar ambos sensores juntos mientras que la otra corresponde a las mismas secciones de entrada del túnel pero con cada uno de los transductores por vez. Dado que el anemómetro a calibrar ejercía una resistencia apreciable al flujo de aire y para asegurarnos que el flujo medido por ambos fuese el mismo se tomó la pendiente de la primera curva como el factor de calibración. La segunda se ofrece a los fines de comparación entre las características de los dos aparatos. Se debe puntualizar que se recurrió a este tipo de construcción para obtener el factor de calibración de manera rápida y con elementos disponibles en nuestros laboratorios, demostrando un nivel aceptablemente bajo de turbulencia como se ve claramente en la banda de incerteza asignada a los puntos (ver figuras 6 y 7).

MEDICIONES

Se procedió a medir sobre una pared aislante que separa dos cámaras climáticas arrojando un valor del coeficiente K (transmitancia térmica) de $0.47 \pm 0.02 \text{ W/m}^2 \text{ C}$ y sobre una pared de hormigón de 0.128 m de espesor ($K=3.2 \pm 0.2 \text{ W/m}^2 \text{ C}$). En la instalación de los sensores se aseguró un contacto efectivo con la superficie de la pared a través de una cinta de gran adherencia y con una emisividad dentro del orden de magnitud de la del medio circundante en concordancia con la norma ASTM C 1046-91[4]. Se debe señalar que se cumplió el criterio de determinación establecido en la norma ASTM C 1155-90 [5], es decir, se detuvo la medición una vez obtenido un valor menor a 0.1 en la expresión:

$$CK_n = \frac{K_e(t) - K_e(t-n)}{K_e(t)} \quad (5)$$

donde $K_e(t)$ es el valor estimado de la transmitancia térmica según:

$$K = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{n} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta T_j}{n} \quad (6)$$

En ambas expresiones el numero n representa el numero de mediciones efectuadas de manera periódica (fue tomado un período de 5 minutos durante aproximadamente 48 horas)

CONCLUSIONES

Las variaciones del factor de calibración del medidor de flujo de calor, tanto en temperatura como en función de la densidad de flujo son algo esperable y contemplado tanto en la norma ISO 8301 [1] como en la norma ASTM C 1132-89, punto 4.3.8[6]. Esto es básicamente fruto de la dependencia de la conductividad y el factor de las termocuplas (termopila) con la temperatura y, en mucho menor medida, con pérdidas laterales (inconveniente que se redujo al mínimo durante la preparación de las muestras de calibración). Las mediciones "in situ" realizadas demostraron un nivel aceptable de concordancia con mediciones efectuadas con anterioridad, en el caso de la pared de hormigón (para la que se había utilizado el método descrito en la norma ASTM C 236/ISO 8990/IRAM 11564 [7]) y con cálculos teóricos hechos en base a la estructura para la pared aislante.

REFERENCIAS

1. ISO 8301. Determination of steady-state thermal resistance and related properties. Heat flow meter apparatus.
2. ASTM C518. Steady state thermal transmission properties by means of the heat flow meter.
3. ISO 9869. "In situ" measurement of thermal resistance and thermal transmittance.
4. ASTM C1046-91. In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components.
5. ASTM C1155-90. Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from In-Situ Data.
6. ASTM C1132-89 Calibration of the Heat Flow Meter Apparatus.
7. ISO 8990. Determination of Steady-State Thermal Transmission Properties. Calibrated and Guarded Hot Box, ASTM C-236 Steady-State Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box e IRAM N° 11564 Determinación de las Propiedades de Transmisión de Calor en Régimen Estacionario de los Elementos de Construcción. Método de la caja caliente con caja de guarda.