

MEDICION DE LAS INFILTRACIONES DE AIRE
EN UN PROTOTIPO DE VIVIENDA

Vicente Volantino*, Luis Giobergia*, Fabio Carlo*

INTRODUCCION

En este trabajo se presentan resultados de mediciones de infiltraciones de aire con la posterior determinación de calores sensibles y latentes, mediante la implementación de distintas técnicas.

En nuestro país no se efectúan mediciones in-situ para la determinación de tal fenómeno. El I.N.T.I., en su parque tecnológico cuenta con un prototipo de vivienda, y una unidad meteorológica totalmente instrumentados, los que nos permite conocer la evolución de las variables exteriores e interiores que conjuntamente con los valores de infiltraciones a obtener se calcularán los valores de calor sensible y latente.

La transferencias de calor por convección, radiación y conducción se pueden calcular con relativa precisión, mientras que las infiltraciones de aire producen ganancias y pérdidas de calor en verano e invierno respectivamente, las cuales son más difíciles de predecir y modelar que las componentes nombradas anteriormente.

Por tales razones, los análisis más cuidadosos de los requerimientos energéticos en edificios definen que la incidencia de las infiltraciones de aire son de aproximadamente un 30% de la carga térmica total del edificio. En consecuencia, dicha componente es conveniente determinarla tanto para edificios que evolucionan en forma natural, como en aquellos en los cuales se requiere climatización artificial.

Es de conocimiento general que para el primer caso el valor de las mismas nos permitirán implementar soluciones a fin de minimizar su efecto y por lo tanto mejorar la situación de confort interior. Para el segundo caso reducir las infiltraciones de aire implica una disminución de las capacidades frigoríficas y caloríficas según se trate, con el consiguiente aprovechamiento de energía.

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

Resumiendo, se pueden estimar actualmente las infiltraciones de aire realizando ensayos sobre el elemento constructivo en forma individual y bajo condiciones de laboratorio (ensayo de estanqueidad). En la necesidad de encontrar un método que permita la cuantificación de dichas infiltraciones de aire en condiciones naturales de la vivienda, se han desarrollado técnicas basadas en el uso de gases trazadores de poca concentración en el aire, utilizándose equipamiento existente en el Instituto.

Se aplicaron para el trabajo distintas técnicas de detección:

- Detección por absorción infrarroja utilizándose monóxido de carbono como gas trazador. El valor de las infiltraciones de aire puede ser evaluado inmediatamente después de concluir el experimento.

- Detección por cromatografía gaseosa de dos tipos:

- a) Conductividad térmica utilizando monóxido de carbono.

- b) Captura electrónica utilizando hexafluoruro de azufre.

En ambos casos el valor de las infiltraciones puede ser conocido luego del análisis en el laboratorio.

Los resultados obtenidos por las distintas técnicas, sin llegar a existir simultaneidad entre ellas, fueron comparados para condiciones externas de temperatura y velocidad de viento comprendidas dentro de un cierto rango, observándose concordancia aceptable entre los distintos valores. También se obtuvieron valores teóricos utilizándose el método de la rendija [3], y regresiones múltiples.

PASOS PREVIOS A LA MEDICION DE INFILTRACIONES

Previo a la medición de infiltraciones, se puso a punto una central meteorológica ubicada en las cercanías del prototipo de vivienda.

Esta central posee sensores de velocidad y dirección de viento, humedad relativa y temperatura.

Los datos se toman a intervalos de dos minutos y se los promedia en la hora para las temperaturas y humedades, y cada diez minutos para la velocidad y dirección de viento.

TECNICAS DE MEDICION

La medición de las renovaciones de aire puede ser realizada mezclando gases trazadores con el aire ambiente y midiendo luego su decaimiento en la concentración como función del tiempo.

Un sinnúmero de gases han sido usados para medir infiltraciones de aire. Algunas de las características de un gas trazador ideal son las siguientes:

- La concentración del gas debe ser detectable en su mínima expresión.
- El gas debe ser económico y disponible.
- El gas no debe ser absorbido por paredes y mobiliario.
- Debe ser químicamente estable y no debe descomponerse o reaccionar con superficies de edificios o constituyentes del aire.
- Las concentraciones utilizadas no deben tener efectos adversos para la salud.

- No debe ser inflamable ni explosivo.
- Debe tener una densidad comparable a la del aire.
- No debe estar presente en el aire, y no debe haber ninguna fuente que produzca dicho gas durante el ensayo.

La relación matemática que nos expresa dicho decaimiento es la siguiente:

$$V \frac{dc}{dt} = CO \delta + G - c \delta$$

donde

- V = volumen del espacio ventilado;
- c = concentración del trazador en el espacio ventilado a tiempo t;
- CO = concentración del trazador en el aire exterior;
- δ = proporción en la cual el aire se escapa del espacio ventilado en volumen por unidad de tiempo; y también la proporción en la cual el aire entra al espacio ventilado normalizado a la temperatura interna; y
- G = proporción neta de generación de gas trazador en el espacio ventilado.

Si la concentración del gas en el aire que entra al ambiente es despreciable ($CO=0$), y no existe generación ni absorción del gas en el ambiente, la ecuación anterior se reduce a

$$\frac{dc}{dt} = -(\delta / V) * c$$

la que puede ser resuelta obteniéndose:

$$\ln(c/c_i) = -(\delta / V) * t = -I * t \quad (1)$$

donde

c_i = concentración inicial del gas trazador, e

$I = \delta / V$ = renovaciones de aire por unidad de tiempo o infiltraciones.

En todos los análisis que hemos hecho de las infiltraciones hemos supuesto un mezclado perfecto entre el gas trazador y el aire, de lo contrario deberían hacerse las correcciones correspondientes.

Para los cálculos de calores sensibles y latentes se utilizaron los siguientes pasos:

La cantidad de calor para calentar el aire húmedo viene dada por:

$$q = m * (h_2 - h_1)$$

siempre que el radio de humedad sea constante, siendo m el flujo de masa de aire seco y h_2 y h_1 las entalpías finales e iniciales respectivamente. La entalpía de mezcla de gases ideales (considerando al aire como tal) es igual a la suma de las entalpías parciales de las componentes. De allí que puede ser escrita como:

$$h = h_a + W * h_g$$

siendo h_a la entalpía específica para el aire seco, h_g es la entalpía específica para vapor de agua saturado a la temperatura de

la mezcla y W es la humedad absoluta o tasa de humedades (gramos de agua por gramos de aire seco). Aproximadamente

$$h_a = 0.240 * t \quad (\text{Watt} * \text{h} / \text{kg})$$

y

$$h_g = (540 + 0.444 * t) \quad (\text{Watt} * \text{h} / \text{kg})$$

donde t es la temperatura de bulbo seco en Celsius.* De allí que la entalpía de aire húmedo sea

$$h = 0.240 * t + W(540 + 0.444 * t) \quad (\text{Watt} * \text{h} / \text{kg})$$

siendo 0.285 el calor específico del aire en $\text{Watt} * \text{h} / (\text{kg}) * ^\circ\text{C}$ y 2467705.63 el calor latente del vapor en Joule / kg y 1032.66 es el calor específico del vapor de agua en $\text{Joule} / (\text{kg}) * ^\circ\text{C}$.

La cantidad de calor para enfriar el aire húmedo viene dado por:

$$m_a * h_1 = m_a * h_2 + q + m_w * h_{w2} \quad \text{balance de energías}$$

$$m_a * W_1 = m_a * W_2 + m_w \quad \text{balance de masas}$$

entonces,

$$m_w = m_a * (W_1 - W_2)$$

$$q = m_a * ((h_1 - h_2) - (W_1 - W_2) * h_{w2})$$

siendo m_a y m_w las masas de aire seco y vapor de agua respectivamente, W_i las tasas de humedades que son sacados de la tabla psicrométrica conocidas su temperatura de bulbo seco, la presión atmosférica y su humedad relativa, h_1 y h_2 las definidas anteriormente al igual que q y h_{w2} es la entalpía del agua líquida a la temperatura de condensación.

Para el cálculo de pérdidas de calor debido a las infiltraciones de aire teníamos el sensible y latente.

La energía requerida para elevar la temperatura del aire que penetra debido a las infiltraciones es

$$q_s = 0.240 * I * V * d * (t_i - t_o) \quad (2)$$

fórmula semejante a la de calentar el aire húmedo definida anteriormente, ya que $0.285 * (t_i - t_o) * d$ es la diferencia de entalpías y m_a sería el flujo de masa entrante de aire que en este caso es el debido a las infiltraciones e igual a $I * V$ (siendo I los cambios de aire por unidad de tiempo y el V el volumen del ambiente considerado), y d es la densidad del aire a temperatura t_o que para el aire común es de $1.2 \text{ kg} / \text{m}^3$.

Para el calor latente debido a infiltraciones se encuentra que es

$$q_l = I * V * d * (W_i - W_o) * h_{w2} \quad (3)$$

siendo semejante a la fórmula de enfriamiento del aire húmedo sólo que se toma a temperatura constante, lo cual elimina el término de diferencias de entalpías específicas.

Se asume la misma densidad de aire común y el hw_2 es el mismo que mencionamos antes y su valor es de $540 \text{ Watt}\cdot\text{h}/\text{kg}$.

Para el cálculo de los q mencionados también existe el método de la rendija que es semejante a este, sólo que se deben conocer las diferencias de presiones exterior e interior para conocer el coeficiente que figura en las ecuaciones, y la longitud de la rendija por la cual el aire penetra en el ambiente.

El cambio es reemplazar a $I\cdot V$ por $B\cdot L$, siendo B el coeficiente mencionado en $\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{m}$ lineal de rendija.

Este último surge de los cálculos para coeficiente de flujo de la ventana dado por el fabricante, no obstante en el programa figura un valor para una determinada velocidad de viento.

Luego, las ecuaciones de calores sensibles y latentes por el método de la rendija según ASHRAE son:

$$q_{sr} = 0.240 \cdot B \cdot L \cdot d \cdot (t_i - t_o) \quad (4)$$

$$q_{lr} = B \cdot L \cdot d \cdot (W_i - W_o) \cdot hw_2 \quad (5)$$

El valor del coeficiente de flujo puede ser obtenido mediante cálculos de diferencia de presión o bien utilizar el que da el ASHRAE para una determinada velocidad de viento exterior que es de 11.2 m/s , o lo que es equivalente, una presión de 75 Pa . El valor de B para este caso y para todo tipo de ventanas de madera es de $2.787 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

MEDICION DE INFILTRACIONES POR ABSORCION INFRARROJA

Para esta medición se usa un detector por absorción infrarroja (MIRAN) ubicado en el centro de la habitación y se lo coloca en cero de referencia para poder detectar solamente el gas trazador inyectado en el ambiente.

Se burletean todas las rendijas con masilla para hermetizar el ambiente y de esta manera evitar la inercia de las infiltraciones.

Se homogeneiza el gas inyectado con un ventilador durante 30 ó 60 minutos.

Se desburletea la ventana y se deja en evolución natural durante las horas que se desee hacer el ensayo.

Se puede trabajar con temperatura interior controlada (25°C) o sin controlar, indistintamente.

Medición de infiltraciones de aire por cromatografía gaseosa

a) Conductividad térmica

Se utiliza el CO_2 ya analizado por absorción infrarroja pero las muestras se toman en bolsas de mylar al comienzo y al final de la experiencia, en la parte superior e inferior de la habitación, para detectar posibles estratificaciones.

b) Detector por captura de electrones

Dada la característica de electronegatividad del SF₆ (6 átomos de flúor) este método es el más adecuado para dicho gas.

Los pasos previos a la medición son los mismos que se describieron para el CO, solo que la inyección de dicho gas en el ambiente se realiza con valores de concentración mucho menores que en el caso anterior.

Las variantes utilizadas para el SF₆ fueron:

- Calibración en cada medición del cromatógrafo para conocer su zona lineal y trabajar dentro de ella.
- Burlateo de la ventana una vez terminada la medición.
- Homogeneización del gas al finalizar la medición para contrarrestar las estratificaciones.

Posteriormente se hicieron cinco modelos teóricos de regresión numérica para compararlo con los datos experimentales utilizando las variables climáticas más significativas (dirección y velocidad de viento y la temperatura).

RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS DISTINTAS EXPERIENCIAS REALIZADAS

Los resultados que se presentan a continuación se obtuvieron con programa de infiltraciones de aire. En él se tiene en cuenta que el error en el tiempo es el mínimo intervalo posible que es de dos minutos; el error de la diferencia de temperatura es de 0.1°C y el error en la humedad absoluta fue tomado en 0.0001 unidades.

En el cálculo del volumen del ambiente utilizado para los ensayos se obtuvo con un error de 0.001 m los siguientes valores: Largo del ambiente: 2.92 m, ancho del ambiente: 2.815 m, altura del ambiente: 2.445 m y volumen aproximado de 20 m³.

También para los cálculos es necesario conocer el perímetro de la rendija por donde se producen las infiltraciones de aire, obteniéndose para este caso un valor de 3,91 m.

El error en el sistema de medición por absorción infrarroja es de 0.001 unidades de absorbancia, y en cuanto a los errores sistemáticos de los cromatógrafos, consideramos la dispersión que se produce en los promedios de las áreas que se obtienen.

Suponiendo mezcla perfecta y utilizando la ecuación (1) se obtuvo:

METODO	INFILTRACIONES (1/h)	CALOR SENSIBLE (Watt)	CALOR LATENTE (Watt)
Absorción infrarroja con CO	0.289 ± 0.017	-1.94 ± 0.33	-5.06 ± 0.74
	0.698 ± 0.035	-3.29 ± 0.75	-7.43 ± 1.67
	0.089 ± 0.014	1.08 ± 0.19	-1.88 ± 0.36
	0.176 ± 0.013	-4.72 ± 0.41	-4.63 ± 0.54
	0.159 ± 0.023	-1.29 ± 0.25	-6.96 ± 1.17
	0.211 ± 0.021	15.52 ± 1.53	19.15 ± 1.94
	0.228 ± 0.006	19.25 ± 0.58	20.52 ± 0.77
Conductivi- dad térmica con CO (*)	SUP=0.243±0.049	SUP=12.62±2.55	SUP=9.73±2.05
	INF=0.267±0.035	INF=13.83±1.84	INF=10.65±1.53
Captura electró- nica con SF6(*)	SUP=0.470±0.045	SUP=12.95±1.21	SUP=8.14± 1.30
	INF=0.292±0.041	INF= 7.96±1.17	INF=5.01± 0.99
	SUP=0.047±0.004	SUP= 0.76±0.09	SUP=-2.59±0.29
	INF=0.210±0.003	INF= 3.40±0.23	INF=-11.57±0.5
	SUP=0.094±0.005	SUP=-2.87±0.18	SUP=-4.28±0.31
	INF=0.096±0.005	INF=-2.91±0.19	INF=-4.34±0.33

(*) Ensayos teniendo en cuenta una posible estratificación.

CONCLUSIONES

- El analizador por absorción infrarroja es el único método que permite conocer instantáneamente la concentración del gas en el ambiente con bajo costo, con la posibilidad de aplicar el método de la relación de concentraciones y el conocimiento de la precisión en la determinación de las infiltraciones de aire utilizando el método analítico.

- La técnica de absorción infrarroja nos ofrece una mayor variedad de gases trazadores que la técnica cromatográfica y un conocimiento del valor de las infiltraciones inmediatamente después de finalizada la experiencia.

- Las condiciones de trabajo para obtener un error inferior a un 10 % utilizando absorción infrarroja en el valor de las infiltraciones son evitar que las concentraciones finales estén por debajo de los 30 mg/m³, que su relación de concentraciones sea mayor que dos y que el tiempo de ensayo supere las cuatro horas.

- La detección por conductividad térmica no puede ser aplicada con personas realizando actividades normales dentro del ambiente dadas las altas concentraciones de monóxido utilizadas para que sea posible detectarlas con el cromatógrafo.

- La técnica cromatográfica con detector por captura electrónica tiene la ventaja de que los gases utilizados como el hexafluoruro de azufre tiene escasa presencia en el aire ambiente, ausencia de toxicidad y la inyección de los mismos para la determinación de las

infiltraciones en ambientes es extremadamente inferior a las utilizadas para las otras dos técnicas, determinando una alta durabilidad para realizar una cantidad muy superior de ensayos.

- Se evidencia una dependencia cuadrática con la velocidad de viento y lineal con la temperatura.

- El gas que mejores condiciones posee para estos ensayos es el hexafluoruro de azufre en cuanto a su aspecto tóxico, su presencia en el aire y su escasa inyección en los ambientes. Lo más negativo es su alto peso molecular que causa estratificaciones.

- El cruce de las pendientes observado en algunos de los resultados puede ser debido a que las infiltraciones no son las mismas en la parte superior e inferior de un ambiente dado que la mezcla del gas no es perfecta, decayendo más rápido en una zona que en la otra. (Fig.1).

- Con el análisis por absorción infrarroja se puede conocer la precisión que desea mientras que con la técnica de cromatografía por captura de electrones, sólo puede intuirlo, ya que el análisis de los datos se realiza posteriormente en el laboratorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ASTM STP 719. "Building Air Change Rate And Infiltration Measurements", Hunt, King, Treschel. American Society for Testing And Materials (1980).

- INDOOR AIR. Buildings, Ventilation and Thermal Climate, Volume 5. Swedish Council for Building Research. Stockholm, Sweden 1984. Páginas 411 a 421, 459 a 471, 477 a 483.

- ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1985, Capítulos 2,3,8,13,19,20,21,22 y 26.

- ASTM, Philadelphia. Comité E-6, Performance of Building Constructions; "Standard Practice for Measuring Air Leakage by the Fan Pressurization Method". E 741-83, E 779-81, E 783-84.

- ASTM, "Rate of air leakage through exterior windows, curtain walls, and doors". E 283-73.

- C.Y. Shaw. "The effects of tracer gas on the accuracy of air-change. Measurements in buildings". DBR Paper No. 1252, Division of Building Research. Ottawa. Reimpresión de ASHRAE Transactions Vol. 90, 1984, Part 1A, páginas 212-225.

- Krumar, Ireson, Orr. "An automated air infiltration measuring system using SF6 tracer gas in constant concentration and decay methods". ASHRAE Transactions, Vol. 85, Part 2, Atlanta, 1979.

- Manual para el usuario del detector por absorción infrarroja MIRAN-1A.

- Analytical Chemistry. "Halogenated compound as gaseous meteorological tracer". Stability and ultrasensitive analysis by gas chromatography. Saltzman, Coleman and Clemons. Vol 3, No. 6, Mayo 1966. Páginas 753-757.

- Analytical Chemistry. "Electron absorption detectors and technique for use in quantitative and qualitative analysis by gas chromatography". J.E. Lovelock. Vol. 35, No.4, Abril 1963. Páginas 474-480.

- Manuales para el usuario de los cromatógrafos Hewlett-Packard 5890.