

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE TRANSPORTE DE CALOR Y MASA EN MATERIALES CONSTRUCTIVOS.

Tramaglia, J. A., Polito, E. D. y Guerrero, J. L.
C.E.V.Eq.U.

Universidad Nacional del Comahue - Facultad de Ingeniería
Buenos Aires 1400 - (8300) - Neuquén - Argentina
Fax (54 99) 488308 E-mail epolito @ uncoma.edu.ar

RESUMEN

La norma Iram N° 11.625/91 considera la condensación del vapor de agua transportado en los cerramientos edilicios, por el gradiente de presión de vapor. Frente a las condiciones climatológicas de nuestra región en época invernal, puede ocurrir el congelamiento del agua ocluida proveniente de la condensación, situación no contemplada en la norma. Además, es necesario la determinación de los parámetros de transporte de calor y masa correspondientes a materiales de construcción de origen local. El modelo experimental permite determinar las conductividades térmicas de dichos materiales, secos y húmedos, la variación de las mismas con diferentes porcentajes de humedad y las permeabilidades al pasaje de vapor de agua. Estas mediciones son necesarias para el diseño de un modelo de predicción del riesgo de congelamiento. Describimos el equipo experimental y adjuntamos las tablas correspondientes a las determinaciones.

INTRODUCCIÓN

Se toma en consideración un cerramiento edilicio constituido por dos medios de distinto espesor y conductividades térmicas (λ), para el cual se asume que la propagación de calor se produce en condiciones estacionarias, y en la dirección normal a esa superficie por sus características constructivas. El transporte de aire húmedo que tiene lugar entre el medio interior y el exterior es directamente proporcional al gradiente de presiones entre dichos medios y a las permeabilidades de los materiales constitutivos del sistema (π). El inicio de la condensación del vapor de agua, que acompaña al aire que atraviesa el sistema, tiene lugar en un punto dentro de uno de los materiales componentes del cerramiento, cuando la presión de vapor coincide con la presión de vapor saturado (temperatura de rocío). Es sabido, a través de la bibliografía vinculada a este tema, que las conductividades térmicas se incrementan sensiblemente con la cantidad de agua ocluida en el material, aumentado desde un 20 % a un 55 % dependiendo del tipo de material y de su estructura interna [1]. La cantidad de calor transferido se modifica en el tiempo a partir con el incremento del valor de la conductividad térmica, para un dado espesor de dicho material y por efecto de la humedad. Es importante determinar de que forma varía la conductividad térmica en función del porcentaje de humedad para los distintos materiales de construcción. Esta situación de condensación, bajo determinadas condiciones de temperatura en el exterior, podrá provocar congelamiento en el cerramiento. Además, para el diseño de un modelo de predicción del citado riesgo, es necesario determinar las conductividades térmicas del material seco y las permeabilidades al transporte de vapor de agua.

DISEÑO DE LOS ENSAYOS

Se desarrollaron tres tipos de ensayos, los que fueron exitosos luego de algunos cambios.

- a) Ensayo térmico. Medición de la conductividad térmica (λ).
- b) Ensayo másico. Medición de la permeabilidad al vapor de agua (π).
- c) Ensayo térmico húmedo. Variación de la conductividad térmica con el porcentaje de humedad (λ_h).

DESCRIPCIÓN DEL CRITERIO DE SELECCIÓN

La metodología considera la selección de una serie de materiales de uso común en la construcción de cerramientos. Para la zona se determinó que el elemento de uso más común en la región es el ladrillo de barro cocido en horno a leña, en medidas 8x30x15 cm moldeado a mano y con barro arcillosos propios de la zona de bardas de la ciudad de Allen (Río Negro). En la elección del material a ensayar se tuvo en cuenta que los elementos (ladrillos) sean extraídos del horno por los investigadores, eligiendo los ubicados en el centro de la pira, considerando esta ubicación como promedio y representativa del total. Se ha encontrado que el proceso tecnológico utilizado para la fabricación es casi artesanal y no difiere del estándar de otras zonas del país. Se establecen medidas y formas de las muestras de manera de normalizar ensayos actuales y futuros de este material, y otros a considerar dentro de este desarrollo. Tal consideración lleva a fijar la conveniencia de una geometría cilíndrica, la cual comprobamos como la más adecuada al transporte de calor y masa, que además facilita la construcción de equipos y la accesibilidad de datos medidos. La muestra se mecanizó en un torno y otras se construirán con matrices.

ENSAYO PARA LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (λ)

Los ensayos para la medición de λ se realizan partiendo de la ecuación en coordenadas cilíndricas de transferencia de calor en estado estacionario. Teniendo en cuenta la forma cilíndrica y hueca adoptada para la muestra, se toma comocriterio que su longitud frente al espesor de pared, dé como resultado que los valor del seno y la tangente del ángulo entre un extremo del cilindro y el otro para el máximo espesor de pared, tengan aproximadamente la misma magnitud. Bajo este criterio se considera que la variabilidad de temperatura en la dirección z y φ son aproximadamente nulas. (fig. 1).

VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN CONDICIONES ESTACIONARIAS EN COORDENADAS CILÍNDRICAS

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0$$

de acuerdo con la característica de la muestra

$$\frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} = 0; \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0; \frac{\partial t}{\partial \varphi} = 0; \frac{\partial t}{\partial z} = 0$$

por lo tanto se considera: $\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = 0$

resultandopara el cálculo de la conductividad térmica:

$$\lambda = [Q \ln(r_e/r_i) / 2\pi L (\theta_1 - \theta_2)] \text{ (wats/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)} \quad [2] \quad [3].$$

PREMISAS DE LA CONCEPCIÓN EXPERIMENTAL

Se midieron las dimensiones del cilindro y sus características másicas. Asimismo se determinó la porosidad de la muestra, que se reiterará en las futuras mediciones. Para distintos materiales, se verificará su influencia en los valores de conductividad de muestras del mismo material pero de distinto origen. Para la medición de la conductividad térmica se debe registrar la temperaturas interior y exterior, al mismo tiempo que se mide la potencia entregada por la fuente de calor que en este caso, es una resistencia eléctrica ubicada en el interior de la muestra. Se evitó tener en cuenta las capas limites tanto en el interior como en el exterior, poniendo en contacto el elemento calefactor directamente con la pared interior y midiendo la temperatura exterior sobre la muestra. La temperatura máxima de trabajo interior se estableció entre 50°C y 55°C dado que, temperaturas mayores a pesar de facilitar las determinaciones, no son representativas para las condiciones en cerramientos y puede alterar los a los mismos, sobre a todo los aislantes. Dicha temperatura máxima se logró a través de potencias generadas de aproximadamente un watt. La muestra se conecta al sistema generador de potencia con sus caras normales al eje de la misma aisladas con poliestireno expandido. El sistema generador de potencia consta de un variador de voltaje de 0 - 250 volts, corriente máxima 4 amp, un multímetro digital para la medición de voltaje y corriente sobre la resistencia instalada en el interior de la muestra y un medidor de temperaturas, mediante termocuplas, de 10 canales (fig. 2).

ENSAYO PARA LA MEDICIÓN DE LA PERMEABILIDAD (π)

La medición del valor de la permeabilidad del material (ladrillo común) se calcula con una expresión similar a la conductividad, dado que la muestra tiene igual geometría que la utilizada en la determinación del parámetro mencionado. La diferencias de temperaturas en este caso es suplida por el gradiente de presiones de vapor de agua y, el calor, por el flujo másico pasante a través del material.

VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN CONDICIONES ESTACIONARIAS EN COORDENADAS CILÍNDRICAS

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0$$

de acuerdo con la característica de la muestra

$$\frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} = 0; \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0; \frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0; \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad \text{por lo tanto se considera en diferenciales totales:}$$

$$\frac{d^2 p}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp}{dr} = 0 \text{ resultando}$$

$$G_v = \pi \frac{2\pi L (p_{v1} - p_{v2})}{\ln(r_e/r_i)} \quad \text{donde} \quad \pi = [G_v \ln(r_e/r_i) / 2\pi L (p_{v1} - p_{v2})] \quad \text{(m Kg/N s)}$$

figura 1. Detalle de la muestra.

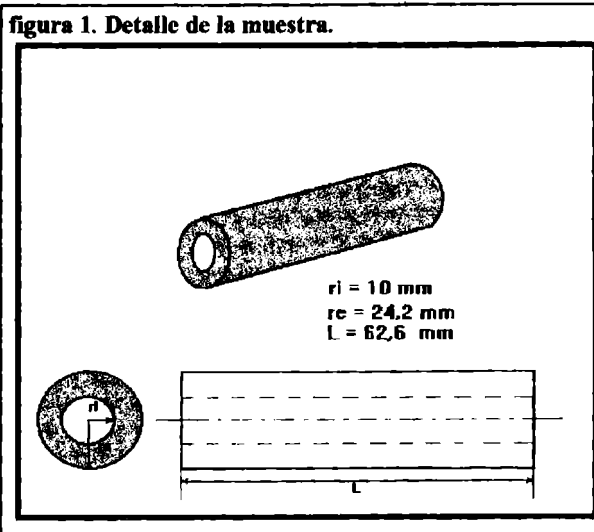
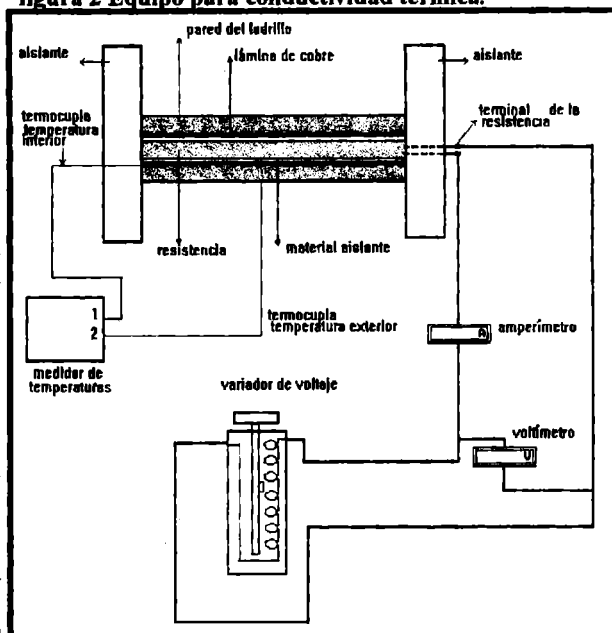
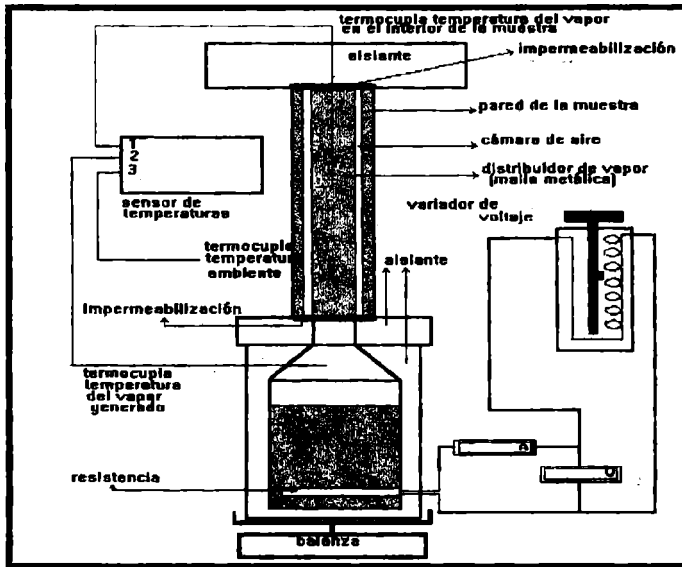


figura 2 Equipo para conductividad térmica.



Ecuación que se utiliza para el cálculo de la permeabilidad [3] [4]

PREMISAS DE LA CONCEPCIÓN EXPERIMENTAL



Los ensayos se realizan a presión atmosférica midiendo además temperatura ambiente y humedad, para determinar luego, mediante relaciones psicrométricas, la presión parcial de vapor correspondiente a dichas condiciones. Para el interior de la muestra se considera la presión de vapor saturado a la temperatura de trabajo. La cantidad de vapor de agua que atraviesa la muestra es medida por la pérdida de masa de todo el sistema (muestra, mas sistema calefactor). Se mantuvo el mismo criterio que en el caso de la medición de conductividad térmica para la temperatura de vapor en el interior de la muestra (50 a 55 °C). Se miden las temperaturas, tanto en la generación de vapor como en el interior de la muestra, mediante termocuplas.

figura 3. Equipo para determinar permeabilidad.

MEMORIA DEL EQUIPO EXPERIMENTAL.

El sistema generador de potencia es el mismo utilizado en la medición de la conductividad térmica. El equipo se completa con un generador de vapor construido en polipropileno, que tiene como elemento calefactor una resistencia conectada al generador de potencia y una cantidad de agua previamente medida. La temperatura del vapor en la generación se mide para conocer la pérdida de carga desde la generación al interior de la muestra, lo que permitirá el mejoramiento futuro del equipo. Para una más homogénea distribución del vapor en la muestra, se coloca un cilindro de malla metálica perforada con el extremo superior con un pequeño orificio para introducir por él la termocupla de medición de temperatura de vapor que atraviesa la muestra. El conjunto, generador de vapor aislado y con su carga de agua, la muestra con el difusor de vapor y su conexión al generador también aislada, se colocan sobre una balanza para medir a diferentes tiempos durante el ensayo la pérdida de masa de agua. (fig 3).

VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA CON LA HUMEDAD.

Utilizando el mismo equipamiento descrito, se humedece totalmente la muestra de ladrillo y se mide: la variación del peso en el transcurso del tiempo, la potencia suministrada y los valores de temperatura interior y exterior a partir de los cuales se determina la conductividad λ que se corresponde con los diferentes porcentajes de humedad de la muestra [1]. Dicha variación se muestra en el gráfico siguiente.(fig 4)

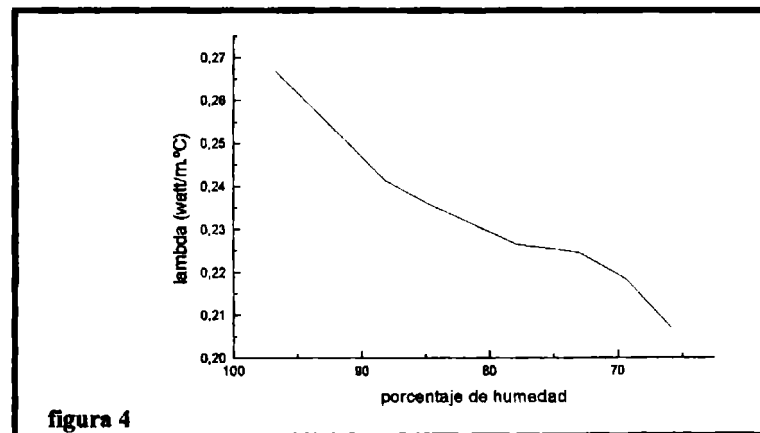


figura 4

CONCLUSIONES

De las mediciones realizadas sobre una muestra de ladrillo de fabricación local se ha determinado que la conductividad térmica difiere de los valores publicados, como así también el valor hallado de la permeabilidad al pasaje del vapor de agua. Por otra parte la variabilidad de la conductividad térmica con el porcentaje de humedad, al no ser tenido en cuenta en

el diseño de los cerramientos, introduce importantes errores en los cálculos de aislaciones, pues como se muestra en la figura 4, el incremento de la conductividad por efecto de la humedad es alto.

El correcto conocimiento de estos parámetros permite la formulación de un modelo de predicción de riesgo de congelamiento que responda a todas las situaciones locales.

TABLAS

Permeabilidad.			Conductividad seca.			Conductividad húmeda.				
ΔP_v	G_v	π	Potencia	$\theta_{int.} - \theta_{ext.}$	λ	Q	$\Delta\theta$	humedad	% humedad	λ_h
N/m^2	Kg/s	m Kg /N s	vatio	°C	W/m. °C	watt	°C	g	---	w/m°C
$\times 10^2$	$\times 10^{-7}$	$\times 10^{-11}$								
11,9	3,495	6,59	0,0910	0,9	0,227	---	---	57,34	100	---
14,03	3,61	7,4	0,2536	3,4	0,168	1,855	15,6	55,49	96,77	0,2672
12,58	3,39	6,05	0,7755	10,7	0,163	1,837	17,1	50,52	88,11	0,2414
			1,276	16,2	0,177	1,867	17,8	48,47	84,53	0,2357
						1,885	18,7	44,63	77,83	0,2265
						2	20,0	41,9	73,07	0,2246
						2,043	21	39,78	69,37	0,2187
						2,117	23,0	37,76	65,85	0,2068

REFERENCIAS

- [1] - O' Callaghan P.W. - Building for Energy Conservation - Pergamon Press - Oxford, England - 1978.
- [2] - Ocón García, Joaquín - Tojo Barreiro, Gabriel - Problemas de Ingeniería Química . Tomo 1 - Aguilar SA de ediciones - España - 1980.
- [3] - Holman, J.P. - Transferencia de Calor - Compañía Editorial Continental SA - México - 1977.
- [4] - Isachenko V., Osipova, V., Sukomel, A. - Transmisión del calor - Marcombo SA de Boixareu Editores - Barcelona - España - 1973.