

INCIDENCIA DE LA TEMPERATURA Y LA HUMEDAD RELATIVA SOBRE LAS MEDICIONES DE PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA EN MATERIALES CERAMICOS

Vicente Leonardo Volantino, Edgar Jorge Cornejo

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

El objetivo de este trabajo es determinar la relación existente entre la permeabilidad al vapor de agua en materiales cerámicos procedentes de ladrillos huecos y las condiciones higrotérmicas del ambiente. Para ello, se efectuaron mediciones utilizando el método del recipiente ("cup method"), para diferentes condiciones de humedad relativa y de temperatura de la atmósfera de ensayo, determinándose sendas expresiones matemáticas. Asimismo, se presenta la experiencia efectuada con un espacio de aire contenido entre dos capas de material cerámico, hallándose la permeancia del conjunto y su relación con la evolución en el tiempo de la humedad relativa de la cámara de aire.

INTRODUCCION

Una de las patologías que más inquietudes ha provocado en la industria de la construcción es el problema que los efectos de la humedad produce sobre la envolvente de los edificios. Como resultado del análisis realizado en distintos casos en el mundo, se ha encontrado que algunas de las fallas edilicias, se deben a la incapacidad que poseen los edificios, en eliminar el exceso de vapor de agua introducido en la estructura, ya sea exterior o interiormente. Los estudios de campo han demostrado que la interacción de la humedad con los materiales de construcción, han causado varias formas de degradación tanto en la estructura como en la aislación térmica. Específicamente el exceso de humedad dentro de paredes y techos provoca daños tales como delaminación prematura de pinturas y revestimientos, formación de moho e ineficiencia energética.

Se han desarrollado recientemente modelos matemáticos para predecir el fenómeno combinado de transferencia de calor y humedad, en sistemas constructivos multicapas que evolucionan bajo condiciones de régimen no estacionario. La utilización de estos modelos requieren como variable de entrada, entre otros, los datos de permeabilidad al vapor de agua de los materiales de construcción. Cuando se utilicen datos confiables de esta característica, se podrá optimizar los resultados de los modelos, permitiendo definir las recomendaciones constructivas que minimizan la acumulación de humedad en la construcción, reduciendo por lo tanto, los problemas de degradación por efecto de la humedad.

En la literatura, se carece en general, de valores de permeabilidad adecuados para el uso de los modelos de transferencia de humedad. Un factor de contribución a esta situación, es debido a que los métodos de ensayo normalizados (por ejemplo, ASTM E 96 e IRAM 1735 [1]), especifican mediciones de permeabilidad bajo dos condiciones: método seco y método húmedo. Se utiliza un elemento disecante o agua destilada, respectivamente, en la parte inferior del recipiente que contiene a la probeta bajo ensayo. La ganancia o pérdida de peso, es proporcional a la transferencia de vapor de agua en el espécimen, estando la atmósfera del ambiente en 50 % de humedad relativa. Para ambos métodos, se mantiene la misma diferencia de humedad entre las caras opuestas de la probeta (0 - 50 %HR y 100 - 50 %HR), pero los resultados obtenidos para la misma muestra son diferentes, siendo mayores los correspondientes al método húmedo. En una situación real, los materiales componentes de un sistema constructivo, pueden hallarse en condiciones de humedad que difieren de los utilizados en los métodos de ensayo de permeabilidad. Por tal motivo, es importante conocer la variación de esta característica con la humedad.

Por otra parte, también la temperatura requiere de un tratamiento similar, ya que los ensayos se realizan habitualmente a 23°C, y las condiciones reales pueden llegar a ser muy distintas de este valor.

Los objetivos de este trabajo son : 1) hallar la expresión de la permeabilidad al vapor de agua en función de la humedad relativa, en el material cerámico utilizado en ladrillos huecos; 2) ídem en función de la temperatura; y 3) estudiar el efecto sobre la humedad relativa en el interior de una cavidad de aire, que se halla contenida entre probetas cerámicas.

Se ha considerado efectuar la investigación sobre este material, en primer lugar por el uso masivo que presenta en la construcción tradicional de nuestro país, y en segundo lugar, por la falta de antecedentes en la bibliografía. El presente es parte de un proyecto de investigación y desarrollo sobre "Caracterización higrotérmica de materiales", habiéndose expuesto en anteriores reuniones de ASADES, trabajos en los que éste se sustenta [2], [3].

FUNDAMENTOS TEORICOS

El flujo de vapor de agua (G) a través de un material está gobernada por una relación, que es derivada de la ley de Fick:

$$G = - \delta (\phi, t) \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1)$$

siendo $\delta (\phi, t)$, la permeabilidad al vapor de agua del material, P es la presión del vapor de agua y x es la distancia.

Cuando los materiales están sujetos a gradientes de presión de vapor y de temperatura simultáneamente, esta relación es aceptada generalmente como válida si la difusión es el mecanismo dominante en la transferencia de humedad. En aplicaciones isotérmicas, la expresión (1) puede escribirse utilizando al contenido de humedad γ , como el potencial de la transferencia de humedad:

$$G = -\rho_d \cdot D_\gamma (\gamma, t) \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial x} \quad (2)$$

donde ρ_d es la densidad seca del material y $D_\gamma (\gamma, t)$ es la difusividad de humedad, la que se relaciona con la permeabilidad según la siguiente relación:

$$D_\gamma = \frac{\delta \cdot P_{vs}}{\rho_d \cdot \frac{\partial f}{\partial \phi}} \quad (3)$$

siendo P_{vs} , la presión de saturación del vapor de agua. Cuando la permeabilidad (δ) y la función isotérmica de absorción (f) son conocidas, resulta inmediato el cálculo de la difusividad.

La experiencia a la fecha muestra que los efectos de la temperatura es una cantidad moderada, a tal punto que para algunos propósitos, la diferencia con la temperatura a la cual se hacen los ensayos pueden ser ignoradas. No obstante, se han intentado correcciones para la temperatura con cierto éxito, mediante el uso de la ecuación basada sobre la teoría de la energía de activación [4]:

$$\delta = \delta_0 \cdot \exp\left(\frac{-E}{R \cdot T}\right) \quad (4)$$

siendo, δ_0 la permeabilidad para temperatura igual a infinito, R es la constante de los gases (8.31 kJ/mol.K), E es la energía de activación y T es la temperatura absoluta.

Esta ecuación se aplica principalmente a materiales tales como polímeros, cauchos y resinas, en los que las moléculas de agua ingresan y se mueven dentro de una estructura molecular conocido como energía de activación. Este criterio se puede aplicar también a otros materiales, obteniéndose resultados con buena aproximación.

METODO EXPERIMENTAL

El recipiente de ensayo está construido de chapa de hierro galvanizado, con soldadura de estaño de manera que sea resistente a la corrosión e impermeable al vapor de agua y de tales dimensiones que pueda contener una probeta de 0.28 m por 0.28 m. Las probetas deben presentar las caras lo más planas y paralelas posibles a fin de minimizar el error en la determinación del espesor. Posteriormente se efectuó la pesada correspondiente para la determinación de su densidad. El material higroscópico a utilizar debe tener una granulometría comprendida entre 2.36 mm y 600 μ m y con capacidad de absorber vapor de agua para lo cual debe ser acondicionado previamente a 90 °C durante 48 horas. Cuando se utiliza material higroscópico de color azul, este tono deberá ser intenso para asegurar la capacidad de absorción requerida. Se deposita una cierta cantidad de material higroscópico en la parte inferior del recipiente, de manera tal que quede un espacio de aire de aproximadamente 0.01 m entre la cara inferior de la muestra y la superficie libre del material higroscópico. Luego se monta la probeta sobre el portamuestra de manera tal de cubrir el material higroscópico, y se sella con una cinta adhesiva de papel aluminizado que permita fijar una superficie de penetración del flujo de vapor igual a la superficie libre del material higroscópico. Esta operación se realiza para 5 (cinco) probetas similares simultáneamente.

Las sucesivas pesadas del conjunto recipiente - probeta se grafican en función del tiempo, hasta que seis mediciones consecutivas estén correlacionadas linealmente. El flujo de vapor (G) se determina a partir de la porción lineal de esta gráfica. La permeancia (Δ) del material se halla con la siguiente expresión:

$$\Delta = \frac{1}{\frac{A \cdot P_{vs} (\phi_1 - \phi_2)}{G} - R_a} \quad (5)$$

donde ϕ_1 y ϕ_2 , son las humedades relativas a que se encuentran las caras superior e inferior del espécimen, respectivamente. Por su parte, A representa el área expuesta de la probeta y R_a es la resistencia a la transferencia al vapor de agua del espacio de aire en contacto con la probeta, cuya determinación está explicada en la normativa específica [1].

Cuando se trata de materiales homogéneos (como en este caso), la permeabilidad δ del material, se halla haciendo el producto de la permeancia por el espesor de la probeta. La permeancia (y en este caso también la permeabilidad), varía con la humedad relativa media del espécimen, según la expresión determinada por Burch et al. [5]:

$$\delta = \exp(C_1 + C_2 \cdot \phi + C_3 \cdot \phi^2) \quad (6)$$

donde los coeficientes C_1 , C_2 y C_3 , se determinaron mediante un análisis de regresión.

RESULTADOS OBTENIDOS

Se efectuaron mediciones diarias (cada 24 hs.) debiéndose calibrar la balanza previo al pesaje del conjunto de probetas. La balanza utilizada posee una incertidumbre de ± 0.01 g. Las determinaciones de permeabilidad al vapor de agua se realizaron a temperatura constante, 23 °C ± 0.5 °C (condición normalizada) y para tres condiciones de humedad relativa diferentes, a saber,

40%, 50% (condición normalizada) y 60%. Los resultados hallados se pueden observar en la Tabla 1, identificados respectivamente como mediciones 1 a 3, y que se representan en la Figura 1 junto a la función $\delta = F(\phi)$.

Medición	Temperatura °C	HR %	Presión hPa	G g/h.m ²	Permeancia g/h.m ² .kPa	Permeabilidad g/h.m.kPa	Observaciones
1	22.9	43.4	1015.2	0.7596	0.6329	0.00776	C.N.de T
2	22.8	50.1	1021.4	0.9515	0.6882	0.00821	C.N.de T y de HR
3	22.9	61.1	1023.1	1.2136	0.7191	0.00882	C.N.de T
4	11.1	50.1	1019.1	0.485	0.6873	0.00818	C.N.de HR
5	37.0	50.2	1018.6	2.1696	0.6957	0.00826	C.N.de HR

TABLA 1

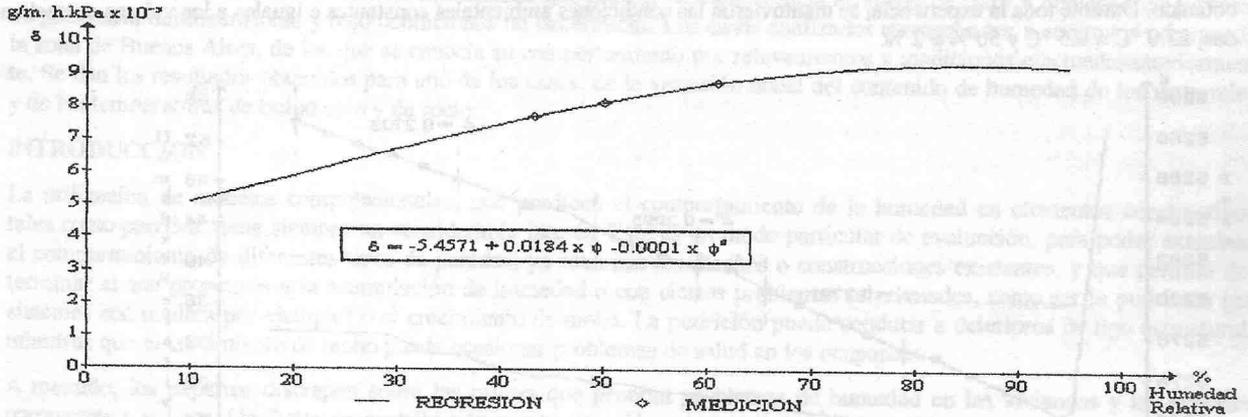


Figura 1 : Permeabilidad al vapor de agua en función de la humedad relativa ambiente.

Asimismo, se efectuaron mediciones a humedad relativa constante del ambiente de ensayo e igual a $(50 \pm 2)\%$ HR, condición normalizada, y para diferentes condiciones de temperatura del aire, 10 °C y 37 °C. Los resultados se presentan en la Tabla 1, como mediciones 4 y 5, las que junto a la medición 2 se muestran en la Figura 2 y se representa la función $\delta = F(T)$.

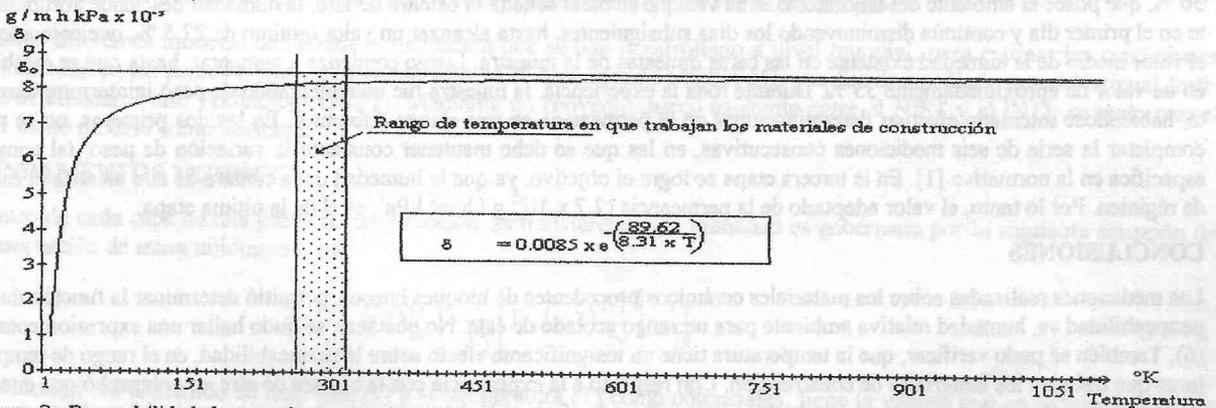


Figura 2 : Permeabilidad al vapor de agua en función de la temperatura y rango de operación de los materiales de construcción

DISCUSION

Si bien se hicieron mediciones en un rango reducido de humedad relativa ambiente, el objetivo planteado para esta instancia era verificar la validez del método para otras condiciones de ensayo. La aplicación de la expresión (6) a las mediciones dió un resultado satisfactorio y permitió conocer los coeficientes que caracterizan esta propiedad para el material cerámico procedente de bloques huecos. Estos coeficientes fueron los siguientes: $C_1 = -5.4571$; $C_2 = 0.0184$ y $C_3 = -0.0001$.

Por su parte, el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad es muy pequeño en los materiales cerámicos, como se informa en el presente trabajo, principalmente en el rango de temperaturas de trabajo de los materiales de construcción. Esta característica, que también se halla en la bibliografía para otros materiales [5],[7], determina que, en general, la incidencia de la temperatura es despreciable o nula, según el caso. Sin embargo, la utilización de la teoría de la energía de activación [4], permitió determinar el valor máximo que puede alcanzar este material, para una humedad relativa constante e igual a 50 %. Es decir, la permeabilidad del material analizado tiene una cota superior de 8.5×10^{-3} g/h.m.kPa.

EXPERIENCIA CON LAS CAMARAS DE AIRE

Si bien en un trabajo anterior [3], se midió el flujo al vapor de agua del material descrito, debido a su procedencia (bloque cerámico hueco) el mismo forma parte de un elemento compuesto también por huecos. Con el objeto de conocer la incidencia que presentan la existencia de dichos huecos, se prepararon muestras de ensayo constituidas por dos probetas separadas por una cámara de aire.

Las probetas se reagruparon de a pares, de manera tal que posean densidades lo más parecido posible.

El montaje de la muestra de ensayo es similar al descrito anteriormente, en una primera parte, es decir, una vez montada la primera probeta se coloca en la cara superior unos separadores de aluminio en la parte perimetral cuyas dimensiones delimitan una superficie libre igual a la superficie expuesta de la probeta. Los separadores utilizados conformaron una altura de 2 cm. para cada cámara de aire. Luego se coloca la 2° muestra conformando la cámara de aire y se termina sellando con cinta de papel aluminizado como en todos los casos.

Previo al sellado definitivo, se introdujo en la cámara de aire, un sensor de humedad del tipo capacitivo.

Una vez que se hallaron acondicionadas las muestras, se efectuó el proceso de medición de la variación de peso, y simultáneamente se fue registrando la evolución de la humedad relativa en la cámara de aire. En la Figura 3 se puede observar el resultado obtenido. Durante toda la experiencia, se mantuvieron las condiciones ambientales constantes e iguales a los valores normalizados, $23.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $50\% \pm 2\%$.

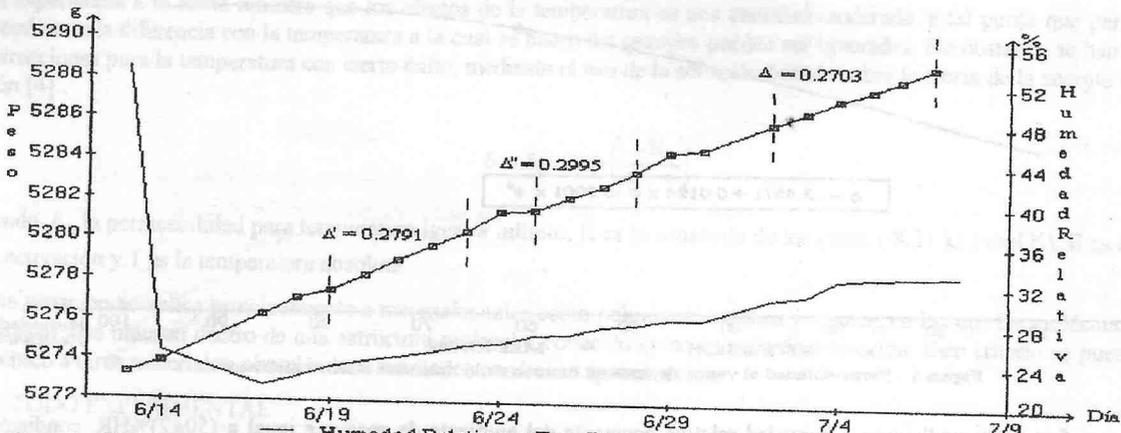


Figura 3 : Evolución de la Humedad Relativa de la cámara de aire y la variación de la permeancia ($\Delta = \text{g/m}^2\text{h.kPa}$) del conjunto

Como se observa en la Figura 3, la evolución de la humedad relativa de la cámara de aire, tiene inicialmente un valor próximo a 50 %, que posee el ambiente del laboratorio. Una vez que se halla sellada la cámara de aire, la humedad desciende abruptamente en el primer día y continúa disminuyendo los días subsiguientes, hasta alcanzar un valor mínimo de 22.5 %, que coincide con el valor medio de la humedad existente en las caras opuestas de la muestra. Luego comienza a aumentar, hasta que se estabiliza en un valor de aproximadamente 33 %. Durante toda la experiencia, la muestra fue incrementando de peso ininterrumpidamente, habiéndose intentado efectuar determinaciones de la permeancia en tres etapas diferentes. En las dos primeras, no se pudo completar la serie de seis mediciones consecutivas, en las que se debe mantener constante la variación de peso, tal como se especifica en la normativa [1]. En la tercera etapa se logra el objetivo, ya que la humedad de la cámara de aire alcanza el estado de régimen. Por lo tanto, el valor adoptado de la permeancia ($2.7 \times 10^{-2} \text{ g / h.m}^2.\text{kPa}$), es el de la última etapa.

CONCLUSIONES

Las mediciones realizadas sobre los materiales cerámicos procedentes de bloques huecos, permitió determinar la función de la permeabilidad vs. humedad relativa ambiente para un rango acotado de ésta. No obstante, se pudo hallar una expresión como la (6). También se pudo verificar, que la temperatura tiene un insignificante efecto sobre la permeabilidad, en el rango de temperaturas que trabajan los materiales de construcción. Con respecto a la experiencia con la cámara de aire, se comprobó que cuando la humedad de la cavidad alcanza el estado de régimen, se pudo efectuar la determinación de la permeancia del conjunto.

REFERENCIAS

1. ASTM E-96, "Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials", Vol. 4.06, p 688-695 (1990) / Norma IRAM 1735. Método de ensayo de la permeabilidad al vapor de agua de materiales de construcción (1992).
2. V.L. Volantino, E. J. Cornejo, E.N. López, J. V. Moruga, L. Rayson, M. Messing. Desarrollo e implementación de un sistema para la determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los materiales. 15^{ta}. R.T. ASADES, Catamarca, p201-208 (1992).
3. V.L. Volantino, E. J. Cornejo, E.N. López, J. V. Moruga, L. Rayson, Medición del flujo al vapor de agua en materiales cerámicos. 17^{ta}. R.T. ASADES, Rosario p 621-628 (1994)
4. ASHRAE. Handbook of Fundamentals. Chapter 19 "Moisture in Buildings" (1989).
5. D.M.Burch, W.C.Thomas, A.H.Fanney. Water vapor permeability measurements of common building materials. ASHRAE Transactions 98., p486-494 (1992).
6. R.F.Richards, D.M.Burch, W.C.Thomas, Water vapor sorption measurements of common building materials. ASHRAE Transactions 98, p475-485 (1992).
7. A.Tveit. Measurements of moisture sorption and moisture permeability of porous materials. Report N° UDC 532.685, Norwegian Building Research Institute, Oslo (1966).