

DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA  
PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD AL VAPOR  
DE AGUA DE LOS MATERIALES

Vicente Volantino\*, Jorge Cornejo\*, Eduardo López\*,  
Victor Moruga\*, Luis Rayson\*. Marcelo Messing\*

RESUMEN

En este trabajo, se presenta la descripción del método y el sistema de ensayo implementado por la División Habitabilidad del INTI.

El mismo consiste en colocar la probeta (placa plana) del material a ensayar sobre un recipiente que contiene una sustancia higroscópica o una solución acuosa de una sustancia química adecuada. La acción de ésta en el interior del recipiente, mantiene constante en el tiempo la presión parcial de vapor de agua.

Se coloca el conjunto en un ambiente donde tanto la temperatura como la presión parcial de vapor de agua se mantengan controladas y constantes en el tiempo. El recipiente se encuentra de esta manera,

en un ambiente donde la humedad relativa es constante y diferente de la existente en su interior, con el objeto de provocar un flujo de vapor que atraviese la probeta en dirección normal al plano principal de la misma.

Se efectúan pesadas periódicas del conjunto (el recipiente, la sustancia contenida en él y la probeta), con el fin de determinar la masa de vapor que ha atravesado la probeta en régimen estacionario. Esta cantidad de vapor corresponde a una variación constante de la masa por unidad de tiempo de todo el sistema.

La permeancia al vapor de agua se determina a partir de la relación entre la densidad de flujo de vapor (flujo de vapor por la superficie de ensayo de la probeta) y la diferencia de presiones parciales de vapor de agua, sin dejar de considerar la resistencia a la difusión del aire en reposo existente dentro del recipiente.

La permeabilidad al vapor de agua se obtiene como el producto de la permeancia por el espesor medio de la probeta.

El sistema utilizado para la ejecución de los ensayos se compone de una cámara de ambiente acondicionado, que mantiene constantes los valores de temperatura y humedad relativa del aire y dentro de los

\* División Habitabilidad - Depto. Construcciones  
INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial)  
CC 157 - CP 1650 - San Martín - Prov. Bs.As.

límites de tolerancia permitidos ( $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $\pm 2\%$ HR); una balanza electrónica de precisión; una computadora personal interconectada con un sistema de adquisición de datos, para control y medición de las variables del ensayo; sensores de temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y velocidad del aire.

También se muestran los resultados correspondientes a las determinaciones hechas sobre los primeros materiales ensayados.

En base a la consideración de los antecedentes internacionales mencionados y a la experiencia efectuada en el laboratorio, se participó activamente en el comité de IRAM y se pudo generar una norma nacional que establece el método de ensayo referido [5].

## 1. INTRODUCCION

Existe una gran extensión de nuestro país (más del 50 % de su superficie), en la que se presentan características de clima frío. Para estas zonas, la patología que habitualmente se manifiesta en la construcción es el fenómeno de la condensación. Para evitar o corregir dicho problema deben tomarse las decisiones adecuadas en la etapa de diseño, para lo cual es necesario conocer las características higrotérmicas de los materiales a utilizar.

Una de ellas, es la permeabilidad y/o permeancia al vapor de agua (según se trate), cuyos valores se hallan tabulados [1]. Estos datos fueron extraídos de bibliografía extranjera de distintos orígenes, pudiendo existir en algunos casos diferencias en las características de los materiales respecto a los que se emplean en la industria de la construcción nacional. Tales diferencias pueden deberse ya sea por su dosificación, o por su proceso de fabricación o por el tipo de materia prima que se utilice. Por ejemplo, en el caso de los hormigones, no se aclara con precisión, el dosaje y la composición, lo cual resta exactitud a los valores de tabla.

Por estas razones, se consideró necesario realizar el desarrollo e implementación de un sistema que permita determinar las propiedades que caracterizan la difusión de vapor de agua a través de los materiales de construcción, basado en un método de ensayo normalizado [2],[3],[4].

## 2. PREPARACIONES PREVIAS

### 2.1. Cámara de Ensayo

Para la ejecución del ensayo, se dispone de una cámara de ensayo donde es posible mantener la temperatura del aire entre  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  y la humedad relativa entre  $\pm 2\%$ . Ambas magnitudes se controlan muy frecuentemente, registrándose las con continuidad.

En la cámara de ensayo el aire circula sin interrupciones para mantener uniformes las condiciones termohigrotérmicas del ambiente de ensayo.

El aire que circula sobre la superficie superior de la probeta lo hace con velocidad lo suficientemente elevada para que el coeficiente de transporte de masa entre el aire y la superficie sea aumentado al valor de la permeancia de la muestra.

En ningún caso, la velocidad es mayor a 2,5 m/s.

## 2.2. Condiciones de Ensayo

De acuerdo con las condiciones de uso del material, la experimentación se lleva a cabo utilizando alguna de las condiciones de ensayo especificadas en la Norma IRAM 1735.

Para este trabajo, se adoptaron los valores correspondientes a un ensayo en campo seco, es decir, 23 C de temperatura ambiente y, 0 % y 50 % de humedad relativa de los lados seco y húmedo, respectivamente.

## 2.3 Recipiente de ensayo

El recipiente de ensayo está construido de chapa de hierro galvanizada, con soldadura de estaño, de manera que sea resistente a la corrosión e impermeable al vapor de agua. En la figura 1, se muestra las características y dimensiones del mismo.

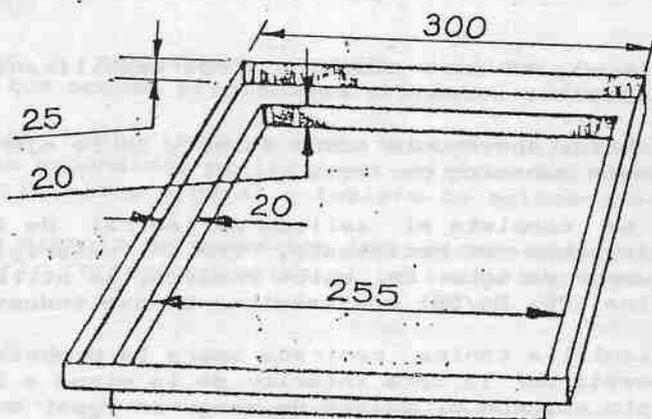


FIGURA 1

## 2.4. Probetas de ensayo

Las dimensiones de las probetas se adecuaron a las características geométricas del recipiente para asegurar el sellado. En esta instancia, estas se construyeron de 0,28 m de lado por 0,02 m de espesor.

Las probetas presentan superficies lo más planas y paralelas posibles, con el fin de minimizar el error en la determinación del espesor de la muestra, ya que esta magnitud se utiliza para el ulterior cálculo de la permeabilidad al vapor de agua.

La cantidad de vapor que atraviesa las probetas de algunos materiales (en general de origen animal o vegetal: madera, etc.) puede depender de las condiciones ambientales a las que se expuso la probeta. En este caso, con el fin de evitar fenómenos de histéresis, se acondicionaron estos materiales en atmósfera controlada a 23°C y humedad relativa del 50 %, hasta la obtención de masa constante.

luego, se efectuaron las pesadas para determinar la densidad de las muestras.

## 2.5. Sustancias Higroscópicas

Para el lado seco de la probeta, se utiliza gel de sílice anhidro, sustancia que permite alcanzar 0 % de humedad relativa de equilibrio.

Previamente, se la somete a un proceso de deshidratación, colocándola en estufa a temperatura constante de 90 C, hasta que no se observe más disminución en su peso.

## 3. MONTAJE

En primer lugar, se deposita una determinada cantidad (500 gramos) de sustancia higroscópica en la parte inferior del recipiente. Esta cantidad, es la necesaria para ocupar un volumen propio de tal manera que permita dejar una cámara de aire de 1 cm, por debajo de la probeta.

Luego, se aplica un adhesivo elástico impermeabilizante sobre la pestaña del recipiente.

Se coloca la probeta, apoyándola sobre éste, y se le ejerce presión hasta que una logre adhesión perfecta.

Posteriormente, se completa el sellado perimetral de la probeta, para su ensamble sobre el recipiente, con un material altamente impermeable al vapor de agua. En estos ensayos, se utiliza por una mezcla de parafina (PF: 56/58) con vaselina de uso industrial.

Se coloca una plantilla cónica centrada sobre la probeta, de igual área que la expuesta por la cara inferior de la misma a la sustancia higroscópica. Esto es, con el objeto de asegurar igual superficie de transmisión del flujo de vapor de agua en las caras opuestas de la muestra.

La plantilla se mantiene presionada sobre la muestra y luego, se procede al sellado total de la parte libre de la muestra.

Una vez que el sellador se ha solidificado, se retira la plantilla, teniendo la precaución de no deteriorar el sello.

Por último, se realiza una limpieza del conjunto (recipiente y probeta), de todo material suelto o que se pueda desprender del mismo, para evitar posteriores errores en la medición.

## 4. MEDICION

### 4.1. Balanza

Para las mediciones de peso, se utiliza una balanza digital cuya capacidad máxima es de 6000 gramos y una precisión de  $\pm 0,1$  g.

La misma posee salida para interfase RS 232 e IEEE 488, lo que permite su conexión a una computadora para el procesamiento de la información.

Se calibra la balanza, cada vez que se realizan las pesadas para minimizar el error debido a la variación de la presión de aire.

#### 4.3. Pesadas

Se efectúa la pesada del conjunto completo, es decir, el recipiente conteniendo la sustancia higroscópica, la probeta y el sellador. Durante la misma, el aire que rodea la zona de medición, debe permanecer estanco, ya que el movimiento del aire incide en la variación de peso.

Juntamente con cada pesada, se miden las condiciones ambientales, esto es la temperatura, humedad relativa y precisión atmosférica del aire en el sector de la medición.

La frecuencia con que se realizan las pesadas es de cada 24 horas, para obtener la variación del peso por día.

#### 5. RESULTADOS

Para llevar a cabo este trabajo, se eligieron en principio, materiales que poseen propiedades aislantes térmicas.

Las primeras experiencias se hicieron sobre muestras de: poliestireno expandido, poliuretano rígido, poliestireno espumado, lana de vidrio, lana mineral y tablero de aglomerado ureico.

A título de ejemplo se presentan los valores obtenidos de variación de peso diario correspondientes al poliestireno expandido.

TABLA NRO. 1

DIA	VARIACION DEL PESO (g)			
	Probeta Nro.1	Probeta Nro.2	Probeta Nro.3	Probeta Nro.4
0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2.1	2.0	1.5	1.8
2	1.9	2.0	1.7	1.8
3	2.1	2.2	1.7	1.6
4	1.8	1.8	1.5	1.6
5	1.9	1.9	1.6	1.8
6	1.9	2.0	1.5	1.5
7	1.7	1.6	1.3	1.6
8	----	---	---	1.6
9	----	---	---	1.5
10	----	---	---	1.6

El flujo de vapor que atraviesa la probeta en régimen estacionario se determina por interpolación gráfica a numérica. Mediante interpolación gráfica se construye el gráfico de la variación de masa en función del tiempo. Cuando se puede interpolar adecuadamente una recta, sobre los puntos determinados experimentalmente, se

comete que el proceso de difusión de vapor alcanzó el régimen estacionario y la pendiente de la recta representa el flujo de vapor.

La densidad de flujo de vapor  $g$  se calcula mediante la relación entre el flujo de vapor (gramos por segundo) por la superficie de ensayo de la probeta ( $m^2$ ),

$$g = G / A$$

La permeancia al vapor de agua se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\Delta = \left( \frac{P_{vs} (U1 - U2)}{g} - \frac{h_a}{\delta_a} \right)^{-1}$$

donde  $\Delta$  es la permeancia al vapor de agua, en  $g/m^2 \cdot h \cdot kPa$

$P_{vs}$ : la presión de saturación del vapor a la temperatura de ensayo [kPa].

$U1$  y  $U2$ : las humedades relativas del aire en los dos ambientes controlados a ambos lados de la probeta (en por ciento)

$h_a$ : la distancia media, dentro del recipiente de ensayo, entre la muestra y la sustancia higroscópica (en metros).

$\delta_a$ : la permeabilidad al vapor de agua del aire en reposo, que se determina según:

$$\delta_a = \frac{10^6 \cdot D}{R_d \cdot T}$$

donde:  $R_d$  la constante característica del vapor (igual a 462 N.m/kg.K).

$T$ : la temperatura absoluta del sistema (K)

$D$ : el coeficiente de difusión del vapor de agua en el aire en reposo ( $m^2/h$ ), el que se calcula a través de:

$$D = 0,083 \cdot \frac{P_o}{P} \cdot \left( \frac{T}{273} \right)^{1,81}$$

donde  $P_o$ , la presión atmosférica normal y  $P$ , la presión del aire (HPa)

Por lo tanto la permeabilidad al vapor de agua se determina como:

$$\delta = \Delta \cdot e$$

donde e es el espesor medio de la muestra (en metros).

Los resultados promedios obtenidos para cada material ensayado son los que se muestran en la Tabla Nro.2.

TABLA NRO.2

MATERIALES Y CARACTERISTICAS	Flujo de Vapor medio $\frac{G}{G}$ (g/día)	Permeancia $\Delta$ (g/m <sup>2</sup> hkPa)	Permeabilidad al vapor de agua $\delta$ (g/mhkPa)
Poliestireno expandido $\rho = 17.6 \text{ kg/m}^3$ $\lambda = 0,036 \text{ W/mK}$	1,76	0,75	$1,5 \times 10^{-2}$
Poliuretano rígido $\rho = 36,4 \text{ kg/m}^3$ $\lambda = 0,018 \text{ W/mK}$	0,69	0,318	$6,37 \times 10^{-3}$
Poliestireno Espumado (Polyfan) $\rho = 41,8 \text{ kg/m}^3$ $\lambda = 0,033 \text{ W/mK}$	0,59	0,286	$7,45 \times 10^{-3}$
Lana de Vidrio $\rho = 141,7 \text{ kg/m}^3$ $\lambda = 0,033 \text{ W/mK}$	15,65	8,625	0,172
Lana mineral $\rho = 309,8 \text{ kg/m}^3$ $\lambda = 0,042 \text{ W/mK}$	24,3	15,179	0,379
Tablero de Aglomerado Ureico $\rho = 656 \text{ kg/m}^3$ $\lambda = 0,11 \text{ W/mK}$	2,63	1,19	$2,38 \times 10^{-2}$

La conductividad térmica se determinó por el método del medidor de flujo de calor, según Norma ASTM C518.

## 6. ANEXO

Como trabajo adicional, también se presenta una experiencia realizada sobre dos tipos de asfalto aplicados sobre un sustrato de poliestireno expandido, con el fin de obtener en forma comparativa el comportamiento a la difusión del vapor de agua.

Para ello, se hicieron las mismas determinaciones que las explicadas precedentemente, sobre el material de soporte (poliestireno expandido) y sobre los dos conjuntos; el primero compuesto por una capa de pintura asfáltica disuelta en agua aplicada sobre el sustrato y la segunda, por una capa de pintura asfáltica disuelta en solvente también aplicada sobre el mismo sustrato.

Los valores hallados de permeabilidad al vapor de agua de cada conjunto resultaron: 0,014 g/hmKPa para el primer caso, y 0,0048 g/hmKPa para el segundo.

A partir de estas determinaciones y de la correspondiente al sustrato (presentado en el punto anterior), se pueden obtener analíticamente los valores de permeabilidad al vapor de agua de cada capa de barniz o película (en este caso asfáltica), mediante la utilización de la siguiente ecuación:

$$R_{vt} = \frac{e_1 + e_2}{\delta_{12}} = \frac{e_1}{\delta_1} + \frac{e_2}{\delta_2}$$

donde  $R_{vt}$  es la resistencia total al vapor de agua del conjunto,

$\delta_{12}$  : la permeabilidad al vapor de agua del mismo.

$e_1$  y  $e_2$  : los espesores de la película y del sustrato, respectivamente.

$\delta_1$  y  $\delta_2$ : las permeabilidades al vapor de agua de la película y del sustrato.

Los espesores se pudieron determinar mediante el empleo de un microscopio óptico Leitz con un alcance desde 50 hasta 1000 aumentos.

De esta manera, se obtuvieron los siguientes guarismos  $1,3 \times 10^{-3}$  g/hmKPa para el asfalto en solución acuosa y  $8 \times 10^{-5}$  g/hmKPa, para el asfalto en solución solvente.

#### REFERENCIAS

[1] Norma IRAM 11601. Propiedades térmicas de los materiales para la construcción. Tabla XI

[2] UNI 9233. Determinazione della proprietà di trasmissione del vapore acqueo di materiali da costruzione ad isolanti termici.

[3] DIN 52615. Testing of thermal insulating materials. Determination of water vapour permeability of construction and insulating materials.

[4] ASTM E96. Standard test methods for water vapour transmission of materials.

[5] Norma IRAM 1735. Método de ensayo de la permeabilidad al vapor de agua de materiales de construcción.