

## DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PENETRACIÓN DE VAPOR DE AGUA EN UN DOBLE VIDRIADO HERMETICO Y SU CONSTANTE DE TIEMPO

Edgar Jorge Cornejo Siles, Vicente Leonardo Volantino  
 Unidad Técnica Habitabilidad Higrotérmica, CECON, INTI  
 Casilla de correo 157 (1650) San Martín Prov. Buenos Aires ARGENTINA  
 Fax: (011) 4753-5784 - E-mail: [vvolanti@inti.gov.ar](mailto:vvolanti@inti.gov.ar), [cecon@inti.gov.ar](mailto:cecon@inti.gov.ar)

### RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología para determinar el rendimiento del sellado de un doble vidrio hermético (DVH) que está vinculado con el consumo de energía.

La evaluación de un Índice (I) que se efectuó a través de mediciones de los contenidos de vapor de agua adsorbido por el tamiz molecular deshidratante utilizada dentro de los perfiles separadores de la cámara de aire, considerando su estado inicial, su estado final o posterior a variaciones de temperatura y alta humedad a que fueron sometidos, y su máximo contenido de vapor que pudo adsorber.

Con los parámetros determinados se pudo evaluar cual sería el tiempo de vida útil de estos paneles sin que se llegue a alcanzar un estado de saturación de humedad dentro de la cámara de aire. Este estado puede generar riesgos de condensación de humedad cuando está instalado en un edificio, con la consiguiente mayor pérdida de energía.

**PALABRAS CLAVE:** Doble vidriado hermético, tamiz molecular deshidratante, índice de penetración de vapor de agua, durabilidad.

### INTRODUCCIÓN

Un vidrio simple posee un coeficiente de transmitancia térmica  $K=5.8 \text{ W/m}^2\text{K}$  siendo éste un valor 3 veces superior al de un muro de ladrillo común de 30 cm de espesor, por lo tanto a igualdad de superficies, y por cada grado de diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, el vidrio perderá tres veces más energía que el muro.

Para mejorar esta situación, una primera medida consiste en usar un doble vidrio dejando una cámara de aire de 12mm, el coeficiente K puede bajar a aproximadamente a  $3 \text{ W/m}^2\text{K}$  pero sigue siendo un valor alto; si se quiere seguir bajando este valor es necesario considerar las propiedades espectrales del vidrio y el contenido de la cámara de aire.

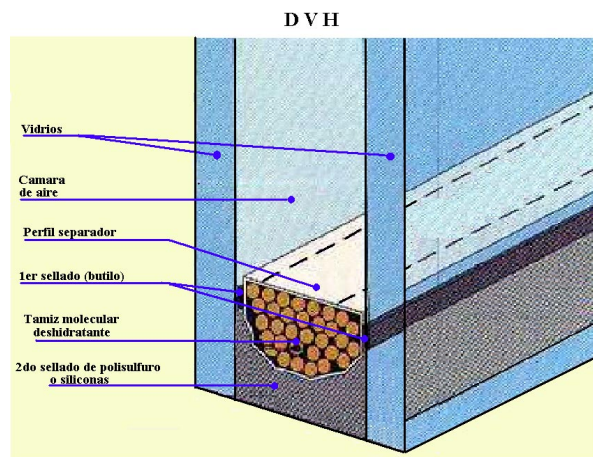


Figura 1: Detalle constructivo de un doble vidriado hermético

Si se baja la emisividad del vidrio se mejorará transmitancia térmica.

Como contenido de la cámara, en principio se utilizó nitrógeno pero no se mejoró en gran manera; luego se trató con fluoruro de carbono, pero era inestable dando una coloración desagradable al vidrio; también se trató de utilizar  $\text{CO}_2$  pero éste era altamente corrosivo y finalmente se usó gases inertes como el Ar, Kr, etc. que son más aislantes que el aire, pero requieren una mejor tecnología en su llenado. Para mejorar la aislación térmica de la cámara de aire que además contiene vapor de agua, es importante eliminarlo, lo cual se consigue utilizando tamiz molecular deshidratante, que posee una capacidad de absorción limitada, que termina cuando se llega a la saturación. Por consiguiente es importante sellar dicha

cámara y evaluar la hermeticidad de la misma, conformándose un doble vidriado hermético (DVH). Esto se efectúa sometiendo a variaciones de temperatura y humedad, siguiendo los lineamientos de la Norma IRAM 12598-2, en la que se especifica como determinar el Índice de Penetración del vapor de agua (I) y cuales son sus requisitos. En ella se establece que el índice de penetración medio lav sobre cinco muestras de ensayo no deberá exceder de 0.20 y además, que el índice de penetración (I) más alto permitido para cada unidad, no deberá exceder de 0.25

Esta manera de evaluar el comportamiento de un DVH, permite inferir su tiempo de vida útil y le asigna además, un modo de clasificarlo para poder comparar su performance con las diferentes alternativas del mercado. El conocimiento de dicho índice, constituye un medio para seleccionar productos y en algunos casos, para dejar fuera de competencia a aquellos que no cumplen con los requisitos establecidos.

En este trabajo se presenta el procedimiento empleado para la determinación del índice de penetración sobre probetas de DVH, como así también la incidencia que ofrecen sobre el ahorro energético.

## EQUIPAMIENTO UTILIZADO

El laboratorio de ensayo deberá mantener una temperatura ambiente de  $(23 \pm 2)$  °C y una humedad relativa de  $(50 \pm 5)$  % HR. Se deberá disponer además de una cámara de simulación ambiental para efectuar los cambios de humedad y temperatura exigidos por la Norma; una balanza digital con precisión de  $\pm 0,001$  g; un horno de secado con capacidad de llegar a 1.000 C; un recipiente deshumectador; una celda de enfriamiento para clasificación de los DVH y vasijas de porcelana de 70ml de capacidad con tapa.

## PROBETAS PARA ENSAYOS

Se necesita una cantidad mínima de 12 paneles de DVH para la determinación del Índice I, cuya fabricación corresponde a una misma producción. Las muestras a ensayar se componen de dos paños de 4 mm de vidrio float transparente de  $502 \pm 2$  mm de longitud y  $352 \pm 2$  mm de ancho. El espesor de la cámara de aire es de 12 mm. Las 12 muestras del ensayo fueron almacenadas durante dos semanas en las condiciones ambientales del laboratorio para su acondicionamiento.

## CLASIFICACION DE LAS PROBETAS

Para la clasificación se utilizó una celda de enfriamiento, presionándose ésta sobre la superficie de la muestra en el centro de la unidad, se colocó unas pocas gotas de etanol entre el vidrio y la superficie espejada de la celda de frío para asegurar una conducción de calor óptima. Se posicionó el sensor de temperatura en la celda de enfriamiento, y se llenó la misma con etanol hasta una altura de 30 a 35 mm. Se introdujo el dióxido de carbono sólido en trozos gradualmente en el etanol, de modo de provocar un descenso de temperatura de 20 °C por encima de la temperatura de rocío y con una variación no mayor que 2 °C/min. Se observó continuamente la superficie interna del vidrio enfrentada al espejo. Tan pronto como apareció la condensación se registró la temperatura del líquido indicado por el termómetro. Esa temperatura se tomó como la de rocío.

El número que se les asignó a las muestras de DVH, dependió de su valor de punto de rocío, siendo N° 1 la que obtuvo el valor más alto de temperatura de rocío y la N° 12, el más bajo de temperatura. Una vez establecido el orden, se seleccionaron las unidades según lo que se indica en la Tabla 1.

Número de las Unidades	Detalle del uso de las Unidades
5, 6, 7, 8	Medición del contenido de humedad inicial del tamiz molecular deshidratante ( $T_i$ )
2, 3, 4, 9, 10	Medición del contenido final de humedad del tamiz molecular deshidratante sometido a las pruebas climáticas ( $T_f$ ).
12	Unidad de repuesto que reemplaza a aquella que se rompe para medición del contenido de humedad final del tamiz molecular deshidratante ( $T_f$ ) (después del ensayo climático). Esta unidad se colocó en forma conjunta con las unidades anteriores.
1 y 11	Medición de la capacidad estándar de adsorción del tamiz molecular deshidratante ( $T_c$ ).

Tabla 1: Designación de números a las unidades de DVH

## DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO INICIAL Y FINAL DE VAPOR DE AGUA

Se limpió el recipiente (vasija de porcelana) y su tapa, lavándolas con agua destilada y se secaron por calentamiento a 120 °C, hasta que alcanzaron un peso constante. Luego se enfriaron a la temperatura del laboratorio y se pesaron sin la tapa. Se designó al valor de la masa obtenida como  $m_0$ . Este método se aplicó a todos los recipientes al comienzo de todas las series de pesadas.

A las unidades se les removió el tamiz molecular deshidratante, siguiendo el procedimiento que se describe a continuación:

- 1) Se removió el sellador del DVH sobre una superficie que permitió colocar una plantilla metálica, a aproximadamente 60 mm de la esquina.
- 2) Se colocó dicha plantilla y se realizó un agujero de 10 mm, sobre el perfil espaciador de aluminio, con una mecha de diámetro similar al agujero de la plantilla, y se colocó un tope a la máquina de agujerear, para evitar el traspaso a la cámara de aire.
- 3) Se vertió el tamiz molecular deshidratante en la vasija, habiéndose descartado los primeros 3 a 5 g. de disecante, para evitar la contaminación de otros materiales.
- 4) Se retuvo entre 20 y 30 g de la cantidad total del tamiz molecular deshidratante, y se mezcló cuando fue necesario.
- 5) Se evitaron todo resto de virutas u otros materiales en el tamiz molecular deshidratante.
- 6) Se colocó la tapa sobre la vasija y se transportó a la sala de pesaje.
- 7) Se pesaron las vasijas con el tamiz molecular deshidratante, sin la tapa y se determinaron  $m_i$  para  $T_i$  y  $m_f$  para  $T_f$ .

Luego, se colocaron las tapas sobre las vasijas y se transportaron hasta la sala del horno, asegurándose que no haya ingresado polvo adicional en la vasija y también, que no se caiga tamiz molecular deshidratante de la misma. Se retiraron las tapas de las vasijas y se colocaron en el interior del horno. El horno elevó su temperatura desde la del ambiente hasta 950 °C, al cabo de 60 min. En esas condiciones, el horno se mantuvo a (950±50) °C durante (120±5) min.

Al finalizar el calentamiento, se colocaron las tapas a las vasijas y se ubicaron dentro de un desecador, dejándolas enfriar a temperatura ambiente. Una vez alcanzado el equilibrio térmico, se pesó cada vasija con el tamiz molecular deshidratante, pero sin la tapa ( $m_r$ )

El contenido de humedad inicial  $T_i$  se determinó haciendo la relación

$$T_i = \frac{m_i - m_r}{m_r - m_o} \quad [1]$$

Vasija correspondiente al DVH N <sup>a</sup>	Peso de vasija vacía $m_o$ (g)	Peso de vasija más tamiz molecular inicial $m_i$ (g)	Peso de vasija más tamiz molecular seco $m_r$ (g)	Coefficiente de contenido inicial de humedad $T_i$
5	36,6191	56,9000	56,1085	0,04361
6	32,2169	49,4140	48,6194	0,04844
7	34,4481	53,3076	52,5431	0,03858
8	32,4931	50,9433	50,2124	0,04221

Tabla 2: Determinación del contenido inicial de humedad.

El coeficiente medio del contenido inicial de humedad resultó ser  $\bar{T}_i = 0,0432$ .

Para el procedimiento de alta humedad y temperatura se consideraron dos etapas. La primera consistió en 56 ciclos de temperatura de 12 horas desde (-18±2)°C a (+53±1)°C con pendientes de (14±2)°C/h; mientras que la segunda parte se efectuó a temperatura constante de (+ 58±0.5)°C durante 7 semanas, con humedad relativa mayor a 95%

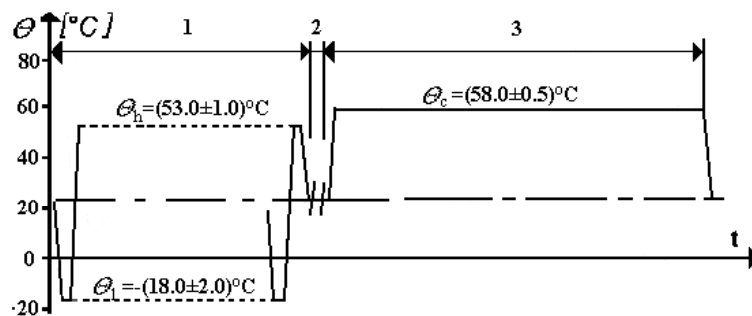


Figura 2a: Relación temperatura vs. tiempo y humedad vs. tiempo durante el ciclado.

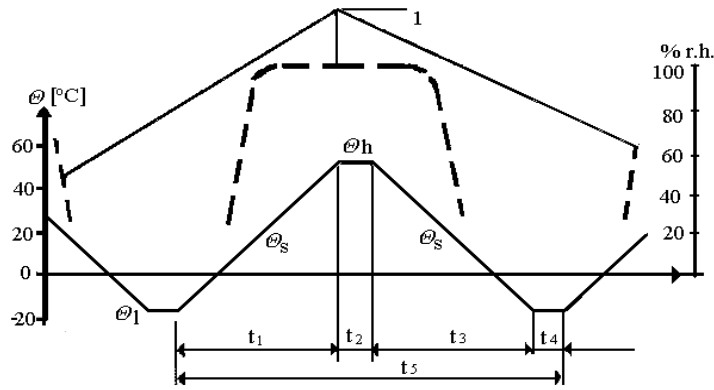


Figura 2b: Detalle de los tiempos del ciclado de temperatura y humedad relativa.

En la Figura 2b, los intervalos de tiempo indicados son:  $t_1 = 5$  hs,  $t_2 = 1$  h,  $t_3 = 5$  hs,  $t_4 = 1$  h, siendo el tiempo total del ciclo de 12 hs

Después de ser sometidas las muestras de DVH a las variaciones mencionadas y siguiendo el mismo procedimiento anterior de remoción del tamiz molecular deshidratante y de pesadas se determinó, el coeficiente del contenido final de humedad  $T_f$ , como:

$$T_f = \frac{m_r - m_o}{m_r - m_o} \quad [2]$$

Vasija correspondiente al DVH N <sup>a</sup>	Peso de vasija vacía $m_o$ (g)	Peso de vasija más tamiz molecular inicial $m_r$ (g)	Peso de vasija más tamiz molecular seco $m_r$ (g)	Coficiente de contenido final de humedad $T_f$
2	33,9865	68,7575	66,2057	0,0792
3	34,9096	67,0149	64,6287	0,0802
4	32,0850	69,9340	66,2115	0,1090
9	36,2405	68,7076	66,5746	0,0703
10	31,8930	64,3998	62,1857	0,0730

Tabla 3: Determinación del contenido final de humedad.

#### DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD ESTÁNDAR DE ADSORCIÓN DE HUMEDAD

Se separaron de 20 a 30 g del tamiz molecular deshidratante de las unidades marcadas para ese fin. Se colocó la vasija conteniendo el tamiz molecular deshidratante, sin la tapa, asegurándose que exista un flujo libre de aire del ambiente del laboratorio. Se pesó nuevamente las vasijas con el tamiz molecular deshidratante, hasta llegar a una diferencia de pesadas sucesivas de 0.005 g, considerándose al último valor de pesada como el de saturación del tamiz molecular deshidratante. Esta masa constante se designó como  $m_c$ .

Se colocaron las tapas a las vasijas y se llevaron al horno de secado, asegurándose que no ingrese polvo adicional, ni que se pierda tamiz molecular deshidratante de las vasijas. Luego, se siguió el procedimiento de secado y su posterior pesaje, mencionados anteriormente, considerándose estas masas como  $m_r$ , cuya variación se presenta en la Tabla 4. De esta manera, se pudo determinar el coeficiente de la capacidad estándar de adsorción de humedad, según la expresión [3].

$$T_c = \frac{m_c - m_r}{m_r - m_o} \quad [3]$$

Día	Vasija 1	Vasija 11	Día	Vasija 1	Vasija 11	Día	Vasija 1	Vasija 11
11	62.6619	62.9724	27	65.5966	65.7259	48	65.9537	66.0924
12	63.1215	63.4180	33	65.7246	65.8486	49	65.9718	66.1076
13	63.5420	63.8132	34	65.7474	65.8715	53	66.0022	66.1193
14	63.9055	64.1827	35	65.7552	65.8831	54	66.0098	66.1217
15	64.2208	64.4911	36	65.7751	65.9054	55	66.0127	66.1257
19	65.0135	65.2221	40	65.8238	65.9456	56	66.0135	66.1273
20	65.1505	65.3454	41	65.8411	65.9756	57	66.0140	66.1278
21	65.2483	65.4329	42	65.8614	65.9955	58	66.0142	66.1281
22	65.3455	65.5174	43	65.8916	66.0271	59	66.0143	66.1282
25	65.5239	65.6650	46	65.9248	66.0521	60	66.0143	66.1282
26	65.5627	65.6969	47	65.9317	66.0752			

Tabla 4: Variación de la masa de las vasijas con tamiz molecular deshidratante para determinar  $T_c$

Vasija Doble Vidriado hermético N <sup>a</sup>	Peso de vasija vacía m <sub>o</sub> (g)	Peso de vasija más tamiz molecular inicial m <sub>c</sub> (g)	Peso de vasija más tamiz molecular seco m <sub>r</sub> (g)	Coefficiente de capacidad estándar de adsorción T <sub>c</sub>
1	31,8930	66,0143	59,2818	0,2457
11	33,98,65	66,1282	59,4947	0,2600

Tabla 5: Determinación del coeficiente de capacidad estándar de adsorción

El coeficiente medio de la capacidad estándar de adsorción de humedad resultó ser  $\bar{T}_c = 0,2528$

Con los valores medios de los coeficientes de contenido de humedad inicial y de la capacidad estándar de adsorción de humedad obtenidos, y considerando el contenido de humedad final de cada DVH tratado, se pudo determinar el índice de penetración de vapor de agua individual I<sub>i</sub>, de acuerdo con la expresión [4]:

$$I_i = \frac{Tf - \bar{T}_i}{Tc - \bar{T}_i} \quad [4]$$

Doble vidriado hermético N	Índice de penetración I <sub>i</sub>
2	0,171
3	0,176
4	0,314
9	0,129
10	0,142

Tabla 6: Determinación del índice de penetración de vapor de agua individual I<sub>i</sub>

El índice de penetración de vapor de agua promedio de las cinco muestras de DVH, resultó ser de 0,1864, valor que es inferior al máximo estipulado por la Norma (0,20). No obstante, analizando la Tabla 6, se observa que una de las muestras (N° 4), no cumple con la restricción normativa, ya que su índice de penetración individual supera el límite de 0,25. Por lo tanto, este resultado inhibe el buen comportamiento de las otras y también la evaluación global de las muestras.

#### DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DE TIEMPO DE LA SATURACIÓN DE LA SAL DESHUMECTANTE.

Con los índices encontrados podemos evaluar el sellado de los DVH.

Todo proceso de saturación se puede expresar mediante la función [5].

$$T = Tc(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad [5]$$

Para el estado inicial se tiene que:

$$T_i = Tc(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau}}) \quad [6]$$

operando

$$\frac{T_i - Tc}{Tc} = e^{-\frac{t_i}{\tau}} \quad [7]$$

Para el estado final se tiene bajo la misma consideración que:

$$\frac{T_f - Tc}{Tc} = e^{-\frac{t_f}{\tau}} \quad [8]$$

Operando con ambas ecuaciones [7] y [8], se puede despejar la constante de tiempo  $\tau$

$$\tau = \frac{t_f - t_i}{\ln\left(\frac{T_i - Tc}{T_f - Tc}\right)} \quad [9]$$

El intervalo de tiempo considerado fue el tiempo de ensayo y trabajando con los valores promedios de los coeficientes hallados, se encontró que este valor es de 270 días. Como el valor de saturación se alcanza en cinco veces la constante de tiempo, se puede decir que el tiempo de vida útil de los DVH ensayados, podría ser de 1350 días, es decir, menos de 4 años, una duración que resulta por demás escasa para la prestación que debe brindar.

### **INCIDENCIA SOBRE EL AHORRO ENERGÉTICO**

Se hicieron determinaciones sobre muestras de DVH de normal fabricación y sobre otras a las que ex profeso no se les incorporó el tamiz molecular deshidratante, con el objeto de provocarles un estado de condensación de humedad en el interior de la cámara de aire. Esto se consiguió, sometiéndolas a un ensayo de condensación [3].

A ambos conjuntos de probetas se les realizaron determinaciones de transmitancia espectral visible y de resistencia térmica. El primero de ellos se obtuvo mediante la utilización de un espectrofotómetro de doble haz con esfera integradora [4], mientras que el segundo, se halló con el empleo de un equipo medidor de transferencia de calor según el método del medidor de calor [5]. Los resultados obtenidos permitieron encontrar que se produjo una disminución del 20% de la transmitancia visible en el panel de DVH que presentaba condensación en su cámara de aire. Por otra parte, en éste último también se determinó que su resistencia térmica disminuyó en un 5%.

Para calcular la pérdida de energía que esto ocasiona, se obtuvieron para ambas situaciones de los DVH, el factor solar de los mismos, que se halla mediante la expresión:

$$F = (\alpha \cdot (K/he) + \tau) \quad [10]$$

Los resultados encontrados mediante la expresión de F, nos indican que el factor solar disminuye en un 24%. Esto infiere que para condiciones de invierno o de bajas temperaturas del aire exterior, el aporte de calor por radiación es menor y por lo tanto, se requerirá de mayor consumo de energía para calefaccionar.

### **CONCLUSIONES**

Esta metodología de evaluación de los paneles de doble vidriado hermético, es un proceso bastante delicado en el que se deben extremar todas las precauciones, para evitar que exista alguna posibilidad de contaminación y por ende, que altere los resultados. Esta determinación es muy necesaria para contar con una información referida al proceso de sellado y su posterior comportamiento en la aplicación real. La factible ocurrencia de fenómenos de condensación en un DVH, acarrea no sólo un problema de tipo estético (su transmisión visible disminuye en un 20%), sino que también se ve afectado su aislación térmica, ya que la misma puede disminuir en forma importante y por lo tanto, mayores serán las pérdidas energéticas por su superficie. El método presentado permite conocer un índice que se encuentra vinculado a la calidad de fabricación del producto. También posibilita estimar el tiempo de vida útil del mismo una vez instalado en un edificio.

### **REFERENCIAS**

Norma PrEN 1279-2 (1999) Long term test method and requirements for moisture penetration..

IRAM 12598-2 (2003) Doble vidriado hermético Parte 2: Determinación del índice de penetración de humedad. Requisitos y métodos de ensayo (en discusión pública).

IRAM 12577. (1994) Doble Vidriado Hermético. Método de ensayo de condensación.

ASTM E 424. Standard test method for solar energy transmittance and reflectance (terrestrial) of materials.

IRAM 1860 (2002) Método de ensayo de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario, mediante el aparato de medición de flujo de calor / ASTM C518 , ISO 8301. Thermal insulation. Determination of steady-state and thermal resistance and related properties. Heat flow meter apparatus

ASHRAE HANDBOOK OF FUNDAMENTALS (1997)

### **ABSTRACT**

This work introduces a methodology for stipulating efficiency of an insulated glazing unit (IGU) sealing, in relationship with energy consumption.

The index (I) evaluation was made through measurements of water vapor contents adsorbed by a molecular dehydrating sieve used inside the air cavity separating profiles, taking into account its initial stage, final stage or after temperature and high humidity exposure variations, and its maximal adsorbed vapor content.

The evaluation could be made with the stipulated parameters to see IGU lifetime before reaching humidity saturation state inside the air cavity. This state can lead to moisture condensation risks when these panels are put in a building, with an increased energy loss.