

La permeabilidad al vapor de agua δ_p la permeancia W_p y el factor de resistencia μ

Introducción

En instalaciones con temperatura inferior a la del ambiente, no sólo existe el riesgo de la condensación, sino que el vapor de agua puede penetrar en el aislamiento provocando serios daños en la

instalación y reduciendo las características del material aislante.

En esta información técnica estudiaremos los conceptos básicos sobre permeabilidad al vapor de agua, dejando para una

posterior la influencia que la humedad tiene en el coeficiente de conductividad, y por consiguiente en el aislamiento.

Conceptos generales

Al modo de aproximación y de forma esquemática, describiremos los siguientes conceptos:

La presión atmosférica es la "suma" de las presiones parciales de los distintos gases que la componen; aunque es variable en función de la altitud y el clima, tiene un valor comúnmente aceptado de 760 mm de Hg (101325 Pa).

El vapor de agua aporta una presión parcial al ambiente en función de la concentración, que viene dada en tanto por ciento y que llamamos humedad relativa. El valor máximo, el 100%, es el punto de saturación o de rocío. Como puede verse en la tabla 1, el contenido máximo de humedad varía con la temperatura.

Tabla 1. Presión máxima del vapor de agua para diferentes temperaturas.

° C	mm de Hg	kg/cm ²	Pascales
0	4,58	0.0062	610.6
5	6.51	0.0088	867.9
10	8.94	0.0121	1191.9
15	12.67	0.0172	1689.2
20	17.50	0.0238	2333.1
40	55.10	0.0749	7346.1

Al analizar la tabla podemos deducir que si en un compartimento estanco, con el ambiente saturado y a 10 °C, aumentamos su temperatura a 20 °C tendremos una humedad relativa de:

$$HR = 1191.1/2333.1 = 51\%$$

Concentrándonos sólo en la influencia de la presión parcial del vapor de agua, si un recinto similar al anterior, también a 20 °C pero

con HR del 75% (presión parcial de 2333.1 · .75 = 1749.8), y lo enfriamos a 10 °C, se producirá condensación de una parte del vapor de agua y una caída de presión de 1749.8 – 1191.9 = 557.9 Pa que provocaría un flujo de vapor si existiese alguna pared "permeable".

Permeabilidad al vapor de agua

Para evitar el problema del ejemplo anterior en el caso de una instalación, el aislamiento debe aportar una efectiva barrera de vapor.

Antes de estudiar definiciones y fórmulas sobre flujo de vapor de agua, digamos que son similares a

las de flujo de calor y que el equivalente a la conductividad es la permeabilidad.

La permeabilidad al vapor de agua la explicaremos recurriendo a la figura 1 (un esquema de cómo se obtiene su valor según UNE 92226) y a las unidades en que normalmente se daba:



$$\frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{m}^2 \cdot \text{día} \cdot \text{mm Hg}}$$

Fig. 1.

Podemos decir que la permeabilidad al vapor de agua es la cantidad de vapor (gramos) que pasa por unidad de superficie (m²) de un material de espesor unidad (cm) por unidad de tiempo (día) cuando entre sus paredes existe una diferencia de presión unitaria (mm Hg).

Pero al analizar las unidades dadas en (1), comprobamos que gramo, centímetro, día y milímetro de mercurio no son unidades aceptadas en la normativa internacional. El hecho de que hayamos encontrado publicadas más de una veintena de unidades creemos que supone un flaco favor en cuanto a la comparación de resultados, lo que indirectamente repercute en el esclarecimiento de este concepto.

La norma ISO 9346 aceptada como posible norma europea y ya traducida al castellano como UNE 92001 Parte 2, da el siguiente símbolo y unidades para la permeabilidad al vapor de agua:

Símbolo: δ_p

Unidades: Kg/(m·s·Pa)

Con el inconveniente de que los valores dados en estas unidades son tan pequeños que incluso otra norma ISO (1663) prefiere usar un submúltiplo del kg, dando el ng/(m·s·Pa) y la UNE 92225 de ensayo para la determinación de la permeabilidad al vapor de agua en coquillas por el método del desecador, por razones prácticas fija el kg/(m·h·Pa).

Para relacionar los valores en las distintas unidades, hemos preparado la tabla nº 2 donde solo se recogen las unidades más dispares, añadiendo luego una relación de conversiones simples.

Esta tabla de conversión esta contrastada con otras publicadas (ejemplo BS 4370 parte 2), pero es más amplia y creemos que más

Conversiones simples

En la tabla 2 no se han incluido las siguientes conversiones simples:

$1 \text{ g} \cdot \text{m} / (\text{MN} \cdot \text{s}) \times 10^{-9} =$	$1 \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}).$
$1 \text{ ng} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}) \times 10^{-12} =$	$1 \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}).$
$1 \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}) / 3600 =$	$1 \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}).$
$1 \text{ g} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}) / 3600000 =$	$1 \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}).$
$1 \text{ mg} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}) / 3.6 \times 10^9 =$	$1 \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}).$
$1 \text{ g} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{bar}) / 3600 =$	$1 \text{ g} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{bar})$
$1 \text{ mg} \cdot \text{m} / (\text{N} \cdot \text{h}) / 3600 =$	$1 \text{ g} \cdot \text{m} / (\text{MN} \cdot \text{s})$
$1 \text{ g} \times \text{cm} / (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}) \times 24 =$	$1 \text{ g} \cdot \text{cm} / (\text{m}^2 \cdot \text{día} \cdot \text{mmHg})$
$1 \text{ g} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}) =$	$1 \text{ g} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$

Ejemplo nº 1:

Aceptando para AF/Armaflex una permeabilidad al vapor de agua de 0.0315 g · cm / (m² · día · mmHg) podemos calcular su valor en kg / (m · s · Pa):

Buscamos las unidades conocidas en la columna de la izquierda (4º) y las que queremos conocer en la fila superior (1º).

El coeficiente multiplicativo lo obtenemos en la cuadrícula intersección (0.86813 x 10⁻¹²):

$$0.0315 \text{ g} \cdot \text{cm} / (\text{m}^2 \cdot \text{día} \cdot \text{mmHg}) \cdot 0.086813 \cdot 10^{-12} = 2.735 \cdot 10^{-14} \text{ kg} / 8 \text{ m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}.$$

precisa. La exactitud de algunas conversiones se puede mejorar teniendo en cuenta que:

$$1 \text{ Pa} = 0.00750062627 \text{ mm Hg}$$

Para pasar de un valor en las unidades de la columna izquierda a otro en las unidades de la fila superior, ha de multiplicarse el primero por el coeficiente de la cuadrícula intersección.

Ejemplo nº 2:

Para obtenerlo ahora en mg / (m · h · Pa):

De la quinta conversión simple:

$$2.735 \cdot 10^{-14} \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}) \cdot 3.6 \cdot 10^9 = 9846 \cdot 10^{-5} \text{ mg} / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}).$$

La Permeabilidad es un valor que en la práctica hemos de asociar con el espesor, por lo que continuando con la similitud entre flujo de calor y flujo de vapor, busquemos ahora el equivalente de la conductancia:

	$\frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$	$\frac{\text{g}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}}$	$\frac{\text{g}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{bar}}$	$\frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{m}^2 \cdot \text{día} \cdot \text{mmHg}}$	$\frac{\text{gn} \cdot \text{in}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{inHg}}$
$\frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}$	1	$479.96 \cdot 10^6$	10^8	$1.1519 \cdot 10^2$	$0.68823 \cdot 10^{12}$
$\frac{\text{g}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}}$	$2.0835 \cdot 10^{-9}$	1	0.20835	2400	1433.9
$\frac{\text{g}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{bar}}$	10^{-8}	4.7996	1	11519	6882.3
$\frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{m}^2 \cdot \text{día} \cdot \text{mmHg}}$	$0.86813 \cdot 10^{-12}$	$0.4167 \cdot 10^{-3}$	$86.813 \cdot 10^{-6}$	1	0.59747
$\frac{\text{g in}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{inHg}}$	$1.453 \cdot 10^{-12}$	$0.69738 \cdot 10^{-3}$	$0.1453 \cdot 10^{-3}$	1.6737	1

Tabla 2. Conversión de Unidades de Permeabilidad al vapor de agua.

LA PERMEANCIA AL VAPOR DE AGUA W_p

La permeancia al vapor de agua es la cantidad de vapor que pasa por unidad de superficie de una muestra de espesor dado en un tiempo unitario y cuando entre sus paredes se establece una diferencia de presión unitaria.

En otras palabras, la permeancia no es más que la permeabilidad para un material de espesor conocido.

Símbolo: W_p

Unidades: $\text{kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$

En términos algebraicos diríamos que:

$$W_p = \frac{p^+}{d}$$

donde d es el espesor del aislamiento en m .

Si tenemos dos aislamientos planos, con distinta permeabilidad, podemos obtener el espesor equivalente para que su comportamiento sea similar:

$$W_p = \frac{p^+}{d} = \frac{p'}{d'}$$

Ejemplo nº 3:

Queremos conocer la permeancia al vapor de agua de una plancha AF/Armaflex de 25 mm de espesor:

$$W_p = \frac{2.735 \cdot 10^{-14}}{0.025} = 1.094 \cdot 10^{-12} \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$$

La NBE-79, acepta como barrera de vapor todo material cuya permeancia sea inferior a:

$$0.1 \text{ g} \cdot \text{m} / (\text{MN} \cdot \text{s}) = 10^{-10} \text{ Kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$$

De lo dicho deducimos que el comportamiento en la instalación de un material aislante no sólo dependerá de su coeficiente de permeabilidad, sino también del espesor de aislamiento, es decir de su permeancia para que pueda considerarse como efectiva barrera de vapor.

Un concepto menos empleado es el de la resistencia al vapor de agua que es la inversa de la permeancia:

Símbolo: Z

Unidades $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} / \text{Kg}$

Huelga decir que necesitaríamos dos tablas de conversión similares a la de la permeabilidad, lo que complica algo más el asunto, por lo que recurriremos al concepto siguiente:

EL FACTOR DE RESISTENCIA A LA DIFUSIÓN DEL VAPOR DE AGUA: μ

El problema de tan complejas y variadas unidades puede solucionarse recurriendo a un valor relativo.

Imaginemos que en la probeta de la figura anterior damos por concluido el ensayo con un aumento de peso A . Preparamos nuevamente la probeta pero sin recubrirla con la muestra a ensayar, sino que la dejamos al descubierto en las mismas condiciones de ensayo de 23 °C y 50% de humedad relativa. El nuevo ensayo nos da un aumento de peso B .

La magnitud μ queda definida mediante la relación:

$$\mu = \frac{B}{A} = \frac{\text{aire}}{\text{material}}$$

Es decir el factor μ de resistencia a la difusión del vapor de agua es la relación entre la permeabilidad del aire y la del material a ensayar. Dado que es una relación entre magnitudes de las mismas unidades, es adimensional.

La obtención de este factor tiene algunas dificultades, cuya resolución queda en manos de los laboratorios especializados, porque la temperatura y humedad puede mantenerse constante en la cámara de ensayo, pero como dijimos al principio, la presión varía con la altitud, por lo que para homogeneizar resultados, hemos de poner el valor del aire a esa presión.

El gráfico siguiente (tomado del Doc. CEN 88 WG 1 N-448) nos da los valores de la permeabilidad del aire para distintas presiones. Al valor de presión normal dado al principio de 101325 Pa le correspondería una permeabilidad aproximada de 0.7 mg / (m · s · Pa). En el artículo posterior que mencionamos al principio, veremos que por aplicación de la fórmula de Schirmer el valor sería de 0.7026 para las mismas unidades, que convertido a otras usuales, sería:

$$\text{aire} = 0.7026 \text{ mg}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})$$

$$1.952 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$$

$$224 \text{ g} \cdot \text{cm}/(\text{m}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{mmHg})$$



Fig. 2. Permeabilidad al vapor de agua del aire a 23 °C.

Este valor adimensional nos permite identificar la calidad de los aislamientos por simple comparación de los valores dados y caso de ser necesario podemos obtener la permeabilidad o la permeancia.

$$\mu = \frac{a_s}{\mu}$$

$$W_p = \frac{p}{d}$$

Ejemplo nº 4

Tomando cualquiera de los valores del ejemplo n.º 1, podemos calcular el factor m para AF/Armaflex:

$$\mu = \frac{224}{0.0315} = 7.100$$

El espesor de capa de aire equivalente a la difusión del vapor de agua, nos indica el espesor de capa de aire en reposo que tiene el mismo factor de resistencia al vapor de agua que la muestra de aislamiento con un espesor d.

Símbolo: d_a

Unidades: m

Analíticamente lo expresariamos como:

$$d_a = \mu \cdot d$$

Ejemplo nº 5

El espesor de capa de aire equivalente para la plancha AF/Armaflex de 25 mm citada en el ejemplo nº 3 sería:

$$d_a = 7100 \cdot 0.025 = 177.5 \text{ m}$$

ENSAYOS

Anteriormente hemos recurrido en varias ocasiones a los ensayos para medir el flujo de vapor de agua que estás recogidos en las siguientes normas UNE:

UNE 9225 EXP

Materiales aislantes térmicos.

Determinación de la permeabilidad al vapor de agua en coquillas.

Método del desecador.

UNE 9226 EXP.

Materiales aislantes térmicos.

Determinación de la permeabilidad al vapor de agua en planchas.

Método del desecador.

En ambos casos el fundamento consiste en preparar unas muestras que se sellarán adecuadamente y que hacen de barrera de vapor entre dos ambientes con distinta humedad relativa. En el interior se pone un desecante apropiado que lo mantiene al 0% de HR mientras que en la cámara se controla una humedad del 50 % y una temperatura de 23 °C, lo que crea una diferencia de presión de 1400 Pa. Pasado un tiempo de estabilización, las probetas se irán pesando periódicamente para determinar la cantidad de vapor de agua transferida y absorbida por el desecador.

Una vez obtenido el aumento de peso y conocida la superficie expuesta, que en el caso de coquillas será la media geométrica, calcularíamos la permanencia. Conocido el espesor determinamos la permeabilidad y obtenido el factor de resistencia del aire, deducimos el factor m del aislamiento.

Estos ensayos suelen dar una sensible tolerancia. Se acaban de realizar unos ensayos interlaboratorios de distintos países europeos y la media de error oscilaba entre $\pm 20\%$.

Los resultados del laboratorio español participante han estado muy próximos al valor medio.

Esta situación obliga al fabricante a mantener un gran control interno (autocontrol), así como frecuentes ensayos en laboratorios homologados (supervisión).

RESUMEN

Aunque hemos dejado para una información técnica posterior un detallado análisis de la influencia de la permeabilidad al vapor de agua en el comportamiento de los materiales aislantes, digamos que el buen funcionamiento de una instalación con temperatura interior del fluido inferior a la de rocío del ambiente, es decir instalaciones aisladas de frío industrial, refrigeración y aire acondicionado, depende en buena medida de una alta resistencia a la difusión de vapor de agua del aislamiento, la forma más segura de garantizar un comportamiento uniforme y continuo de la instalación.



www.armacell.com
info.es@armacell.com



Armacell Iberia, S.A.

SERVICIO DE VENTAS:

BEGUR (ESPAÑA)
Apartado de Correos, 2
Tel. +34 972 61 34 19/20
Fax: +34 972 30 03 83
17200 PALAFRUGELL
(ESPAÑA)

DELEGACIONES DE VENTAS ESPAÑA Y PORTUGAL*

Madrid Tel. +34 913 14 77 67
Barcelona Tel. +34 934 25 23 25
Sevilla Tel. +34 954 64 29 73
Bilbao Tel. +34 944 47 43 10
Valencia Tel. +34 963 46 70 12
*Vigo Tel. +34 986 22 08 89

BRASIL

Praça Dom Epaminondas, 52
Pindamonhangaba-SP
CEP 12421-020
Tel.: +55 12 3648 6900
Fax: +55 12 3648 5113
(BRASIL)

PACTO ANDINO

Avda. Principal -
Res. San Rafael, casa 1
Urbanización la Floresta
Tel. & fax: +58 212 2847215
CARACAS 1060
(VENEZUELA)

CONO SUR

Ladines, 2913
Tel. & fax: +54 11 4572 1415
C 1419 EYK BUENOS AIRES
(ARGENTINA)