

2020

ENTREGABLE



Difusión

Transferencia de resultados

Proyecto "MATLIG"

DESARROLLO Y APLICACIONES DE MATERIALES LIGEROS Y NUEVOS MATERIALES

Número de proyecto: 22000006

Expediente: IMAMCC/2020/1

Duración: Del 01/01/2020 al 31/12/2020

Coordinado en AIDIMME por: MILLA TAMARIT, JOSE LUIS

Línea de I+D: **APLICACIONES AVANZADAS DE LOS MATERIALES**



**GENERALITAT
VALENCIANA**

iVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL

ÍNDICE

1 *Objetivos*

2 *Actividades realizadas*

3 *Alcance*

4 *Introducción*

5 *Desarrollo del trabajo*

6 *Resumen. Conclusiones*

7 *Bibliografía*

Objetivos

El proyecto MATLIG 2020, que se integra en la línea estratégica APLICACIONES AVANZADAS DE LOS MATERIALES de I+D de AIDIMME busca optimizar los materiales aligerados y sus revestimientos, permitiendo un control de la difusión de vapor de agua y limitando la aparición de condensaciones, evitándose de este modo deterioros y pérdidas en las prestaciones térmicas de los sistemas constructivos.

El proyecto pretende estudiar y desarrollar materiales ligeros adecuados para uso en construcción, especialmente atendiendo a sus propiedades de transmisión de vapor de agua. De forma que se disponga de un conocimiento que permita evaluar la potencialidad de uso de los materiales para adaptarlos a un uso concreto.

Adicionalmente se persigue potenciar la participación del centro y de las empresas en proyectos europeos e internacionales.

Actividades realizadas

Análisis de la reglamentación y normativa relacionada en la determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua aplicable a los distintos tipos de materiales. Recopilación requisitos legales y de mercado.

Investigación y análisis de los factores involucrados en los procesos de transmisión del vapor de agua en los materiales.

Estudio de las propiedades de permeancia y la permeabilidad del vapor de agua bajo condiciones isotermas de diversos materiales que permitan caracterizar y controlar de la difusión de vapor de agua. Caracterización de materiales y evaluación de su respuesta en diversas condiciones ambientales.

Generación de nuevo conocimiento que permita reducir el fenómeno de la condensación intersticial, que es aquella que se produce en el interior de un material o cerramiento, y que es fuente de diversas patologías en la edificación. Estudio y optimización de los revestimientos en lo relativo a sus características en cuanto a la permeabilidad al vapor de agua.

Alcance

La condensación intersticial, que es aquella que se produce en el interior de un material o cerramiento, es fuente de diversas patologías en la edificación. Ésta depende de la cantidad de vapor de agua que atraviese el material, del gradiente de temperatura del mismo, de su propia naturaleza y la disposición de las distintas capas que lo conforman.

Es por ello, que este proyecto pretende estudiar los factores involucrados en estos procesos para optimizar la respuesta de los materiales aligerados, caracterizando y desarrollando nuevos materiales que den solución o minimicen la problemática asociada, evitando deterioros y pérdida de las prestaciones térmicas en los sistemas constructivos.

Introducción

Las diferencias de humedad relativa y temperatura entre el interior y el exterior de un edificio provocan transferencias de temperatura y la humedad a través de sus cerramientos. Los principales mecanismos de transporte de la humedad en los materiales de construcción son la difusión del vapor de agua y el transporte de líquidos bajo la acción de las fuerzas capilares (Krus, 1996).

En invierno, la temperatura interior es más alta que la exterior. Al mismo tiempo, la humedad relativa es mayor en el exterior. Como resultado, el gradiente de temperatura y el gradiente de humedad se oponen. La difusión del vapor de agua entonces tiene lugar de dentro a fuera.

Como consecuencia de lo anterior, se produce una difusión de agua a través de los poros, siendo éstas adsorbidas en su superficie, quedando inmovilizadas por la acción de las fuerzas adhesivas. Además, cuando la humedad aumenta, el número de partículas aumenta y se producen más adsorciones. Finalmente, los poros comienzan a cubrirse con una película de agua. A medida que esta película se convierte más gruesas, las fuerzas adhesivas que sostienen las partículas de agua disminuyen. Algunas de ellas se vuelven más móviles e inician un proceso de difusión superficial. Este proceso implica un transporte de líquido, que circula en la dirección opuesta al flujo de vapor. Esto reduce el flujo de vapor de dentro a fuera. Finalmente, cuando la humedad aumenta, los poros quedan casi saturados y sólo permanece activo el transporte mediante capilaridad. En este punto, el flujo de humedad se revierte (Laure & Zoubair, 2017).

En función del grado de humedad alcanzado en el interior del cerramiento, se favorece la proliferación de hongos, bacterias e insectos, que además de afectar a las personas, reducen las prestaciones de los materiales y aceleran su degradación. Finalmente, la aparición de condensaciones puede causar generar una degradación del cerramiento y una merma importante en las propiedades térmicas de aislamiento materiales.

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

En gran medida, el aislamiento térmico proporcionado por los materiales es el resultado de la capacidad de estos para atrapar el aire en su interior. Contando con que la conductividad térmica del aire es aproximadamente 0,025 W/mK, cuando los materiales absorben humedad, una parte de este aire es reemplazado por agua, cuya conductividad térmica es de 0,6 W/mK, más 20 veces superior, haciendo que la conductividad térmica del material aumente proporcionalmente con el contenido en humedad.

Para comprender evaluar las prestaciones de los materiales ante la humedad, y poder modelizar numéricamente su comportamiento, los valores más importantes son el factor de resistencia al vapor de agua (μ) o el espesor de capa de aire equivalente a la difusión del vapor de agua, s_d (m). En este sentido hay que considerar que obtener valores fiables de dichos parámetros no es tan sencillo y requiere un buen equipo de medición y habilidades (Jan & Kamil, 2016). En este mismo sentido, se pronuncian otros autores, que indican que los modelos de predictivos de transporte de calor y humedad empleados en edificación para la estimación de su balance energético no son fiables dado que parten de datos poco rigurosos. Se señala que éstos serán tomados en gran medida de datos incompletos facilitados por los fabricantes, y en algunos casos fuera de control, máxime tratándose de nuevos productos, no permitiéndose de este modo una comparativa real de los resultados, porque las mediciones de los métodos no se conocen o no son equivalentes (Laure & Zoubeir, 2017).

Desarrollo del trabajo

En el presente apartado se incluye una recopilación de las principales tareas llevadas a cabo durante la ejecución del proyecto con el objetivo de difundir sus resultados.

A. RECOPIACIÓN NORMATIVA DE APLICACIÓN

Las propiedades de transmisión del vapor de agua a través de los materiales se abordan en multitud de normativas, existiendo distintos métodos para su determinación en función del tipo de material. De forma general, la determinación de esta propiedad se determina en base a métodos gravimétricos y métodos basados en análisis de gases con sensores.

Debe considerarse que la transmisión de vapor de agua no es necesariamente función lineal del espesor de la muestra, la temperatura o la diferencia de humedad relativa empleada en el ensayo, por lo que los valores de las determinaciones realizadas bajo unas condiciones no tiene que ser comparable llevada a cabo bajo otras condiciones distintas.

A.1. Métodos gravimétricos

En esencia el método de ensayo consiste en preparar una probeta con la muestra a analizar, o de ésta soportada sobre un sustrato poroso, que se posiciona al borde de una cápsula, que se sella convenientemente, y que se coloca en un recinto que se mantiene una temperatura y humedad controladas, y que contiene en su interior una disolución saturada que genera una humedad de equilibrio constante en el interior de la cápsula (método cápsula o copa húmeda), o que contiene un desecante (método cápsula o copa seca). La norma UNE-EN ISO 12571:2015 “*Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica*” incluye información detallada acerca de la preparación de soluciones adecuadas para la obtención de una humedad relativa dada.

Debido a las diferencias entre las diferentes presiones parciales del vapor de agua en el conjunto de ensayo y en la atmósfera de ensayo, se consigue un flujo de vapor de agua pase a través de la probeta de ensayo.

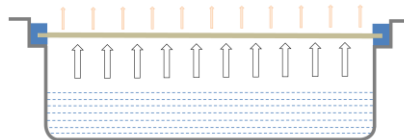


Figura 1. Método copa húmeda

Posteriormente, se determina la velocidad de transmisión agua-vapor del recubrimiento, controlando el peso del conjunto muestra-cápsula con el fin de determinar las propiedades de transmisión de vapor de agua cuando se alcanza el estado estacionario.

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

A partir de los datos recogidos en el ensayo se estiman los siguientes parámetros:

Índice de transmisión de vapor de agua, V ($g/m^2 \cdot día$): Masa de vapor de agua que se transmite durante un periodo de tiempo determinado a través de una probeta de área superficial determinada bajo unas condiciones específicas constantes de humedad en cada cara de la probeta.

Espesor de capa de aire equivalente a la difusión del vapor de agua, s_d (m): Espesor de una capa de aire sin movimiento que tiene, en las mismas condiciones de medición, el mismo índice de transmisión de vapor de agua que la probeta de ensayo de espesor d .

Factor de resistencia al vapor de agua, μ : Factor que indica cuántas veces es superior la resistencia al vapor de agua de un material en comparación con una capa de aire estacionario del mismo espesor a la misma temperatura y presión. Este factor es significativo únicamente si el índice de transmisión de vapor de agua de un material determinado es constante, es decir, que sea independiente del espesor, lo cual, no es habitual en el caso de los recubrimientos.

Los ensayos realizados en estado seco, proporcionan información acerca del comportamiento de los materiales expuestos a bajas humedades, donde la humedad se encuentra dominada por la difusión de vapor. En el caso de los ensayos de copa húmeda, éstos aportan información de los materiales sometidos a altas humedades, en los que los poros se empiezan a llenar de agua, implicando una mezcla de gas y poros rellenos de agua con flujos simultáneos de vapor y líquido.

Pinturas, barnices y productos afines

En pinturas y barnices la norma de referencia es la UNE-EN ISO 7783:2019 “*Determinación de la permeabilidad al vapor de agua. Método de la cápsula*”.

Describe el método para la determinación del índice de transmisión del vapor de agua de recubrimientos soportados sobre un sustrato o sin sustrato/soporte (método de la cápsula para películas libres). En el caso de determinaciones sobre recubrimientos soportados, el material poroso y homogéneo empleado debe poseer un índice de transmisión de vapor de agua superior a $240 g/m^2 \cdot día$.

Condiciones	Condición	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	
			Estado seco	Estado húmedo
Cápsula seca	23-0/50	23 ± 1	0	50 ± 3
Cápsula húmeda	23-50/93	23 ± 1	50 ± 3	93 ± 3

Para asegurar las condiciones uniformes durante el ensayo, se debe provocar que el aire fluya por la superficie exterior de la probeta a una velocidad de entre 0,02 y 0,3 m/s.

Se realizan pesadas hasta que el cambio de masa por unidad de tiempo permanezca constante. Se considera que el ensayo se ha completado cuando tres o más puntos se alinean en una recta.

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

Films de plástico, láminas de caucho, papel, cartón y otros materiales de hoja

DIN 53122-1:2001-08. “Films de plástico, láminas de caucho, papel, cartón y otros materiales con forma de hoja”.

Esta norma aborda la normalización de *WVTR* (*water vapour transmission rate*) en materiales homogéneos (no multicapa o laminados) con matriz uniforme, donde se cumple que el *WVTR* de muestras de diferente espesor es inversamente proporcional al espesor:

$$\frac{WVTR_1}{WVTR_2} = \frac{\text{Espesor}_2}{\text{Espesor}_1}$$

Por otra parte, en el caso de materiales laminados, la fórmula para obtener el *WVTR* a partir de los valores de sus componentes, siempre que se cumpla que cada uno de ellos tenga una matriz uniforme, es:

$$WVTR_{(1+2)} = \left(\frac{1}{WVTR_1} + \frac{1}{WVTR_2} \right)^{-1}$$

De donde se deduce que para un material laminado, disponer de una capa de bajo ratio de transmisión de vapor de agua en combinación con una con alta transmisión, prácticamente determina el valor del *WVTR* por sí solo.

Este método es especialmente adecuado para la determinación de ratios que oscilan entre 1 g/m²d a 200 g/m²día, aunque puede ser adecuada para ratios de alrededor a 0,5 g/m²d bajo condiciones de ensayo muy controladas. Dado que el *WVTR* depende de factores como el espesor y la matriz del material, no es una constante del material. Para muestras de más de 3 mm las muestras deberían ensayarse bajo la ISO 9932. Es importante contar con muestras representativas del producto y que no exhiban daños (grietas, agujeros) y que estén libres de huellas.

La norma trabaja con el método de la copa seca, empleando cloruro de calcio o gel de sílice (humedad relativa por debajo del 1%), y fija las siguientes atmósferas en la cámara de ensayo:

Atmósfera	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Observaciones
A	25 ± 1	90 ± 2	
B	38 ± 1	90 ± 2	Láminas de caucho
C	25 ± 1	75 ± 2	
D	23 ± 1	85 ± 2	Films de plástico o papel laminado, y papel y cartón
E	20 ± 1	85 ± 2	Papel y cartón

El punto final del ensayo se determina cuando en la gráfica masa/tiempo 3 puntos forman una recta.

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

Productos y materiales para la edificación

La norma UNE-EN ISO 12572:2018 “Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua. Método del vaso” es la norma general de referencia en productos de construcción, aplicando a materiales higroscópicos y no higroscópicos, incluidos materiales aislantes y aquellos con recubrimientos y pieles.

En esta norma se indica que un material se considera impermeable a aquel material con un espesor de capa aire equivalente a la difusión del vapor de agua medido superior a 1 500 m.

Se continua con las pesadas hasta que en cinco determinaciones sucesivas la variación de masa por unidad de tiempo para cada probeta sea constante dentro del 5% del valor medio de esa probeta de ensayo (o dentro de $\pm 10\%$ para materiales de permeancia baja con $\mu > 750\ 000$) y hasta que el cambio en el peso del conjunto del plato exceda 100 veces la repetibilidad del procedimiento de pesado.

El ensayo se finaliza de forma prematura cuando:

- En ensayo de vaso seco, el conjunto haya aumentado más de 1,5 g por 25 mL de desecante en el vaso
- En ensayo de vaso húmedo, la pérdida de peso sea la mitad de la masa inicial de la solución en el vaso

Las condiciones de ensayo contempladas en la norma son:

Conjunto	Condición	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	
			Estado seco	Estado húmedo
A	23-0/50	23 \pm 1	0 + 5	50 \pm 5
B	23-0/85	23 \pm 1	0 + 5	85 \pm 5
C	23-50/93	23 \pm 1	50 \pm 3	93 \pm 5
D	38-0/93	38 \pm 1	0 + 5	93 \pm 3
E	23-50/93	23 \pm 1	50 \pm 5	100

La norma recoge indicaciones para materiales autoportantes, materiales a granel, membranas y lámina, masillas y sellantes y pinturas y barnices.

Materiales aislantes térmicos para aplicación en la edificación

La norma de aplicación es la UNE-EN 12086:2013 “Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación de las propiedades de transmisión del vapor de agua”, estando prevista para su uso en materiales homogéneos y productos que puedan contener pieles integrales o recubrimientos de diferente(s) material(es).

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

Conjunto	Condición	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	
			Estado seco	Estado húmedo
A	23-0/50	23 ± 1	0	50 ± 3
B	23-0/85	23 ± 1	0	85 ± 3
C	23-50/93	23 ± 1	50 ± 3	93 ± 3

Cabe señalar que para productos higroscópicos, en los que el resultado es función del conjunto de condiciones seleccionadas, se deberían utilizar los conjuntos A y C.

El ensayo se continua hasta que en cinco pesadas sucesivas la variación de masa por unidad de tiempo para cada probeta de ensayo sea constante dentro del ± 5% del valor medio de esa probeta de ensayo (estado estacionario).

Existen otras normativas aplicables equivalentes o para usos específicos, todas ellas basadas en los mismos principios, como son:

- ASTM E96 / E96M – 16 “Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials”
- ISO 2528:2017 “Sheet materials. Determination of water vapour transmission rate (WVTR). Gravimetric (dish) method”
- DIN 53122-1:2001-08 “Testing of plastics and elastomer films, paper, board and other sheet materials - Determination of water vapour transmission - Part 1: Gravimetric method”.
- UNE 53097:2002 “Materiales en forma de hojas. Determinación del índice de transmisión del vapor de agua. Método gravimétrico”
- UNE-EN 1015-19:1999/A1:2005 “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido”
- UNE-EN 1931:2001 “Láminas flexibles para impermeabilización. Láminas bituminosas, plásticas y de caucho para la impermeabilización de cubiertas. Determinación de las propiedades de transmisión del vapor de agua”
- UNE-EN 1469:2015 “Piedra natural. Placas para revestimientos murales. Requisitos”
- UNE-EN 16354:2019 “Revestimientos para suelo laminado. Suelo base. Especificaciones, requisitos y métodos de ensayo”

A.2. Método con sensores

En esencia, en estos métodos la muestra de material a analizar se interpone para separar una cámara seca, que cuenta con unas condiciones de humedad relativa dadas, y una cámara húmeda, en la que la atmósfera se encuentra saturada con vapor de agua a una temperatura conocida. La variación de humedad en la cantidad de vapor de agua transmitida a través de la probeta que es detectada por un sensor en la cámara seca. El tiempo empleado para que la humedad se incremente una cantidad dada se registra y se convierte en el coeficiente de transmisión de vapor de agua.

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

Las principales normas de aplicación son las siguientes:

- UNE-EN ISO 15106-1:2005 “Plásticos. Películas y láminas de plástico. Determinación de la tasa de transmisión de vapor de agua. Parte 1: Método de detección mediante sensor de humedad”
- UNE-EN ISO 15106-2:2005 “Plásticos. Películas y láminas de plástico. Determinación de la tasa de transmisión de vapor de agua. Parte 2: Método de detección mediante sensor infrarrojo”
- ASTM F1249 - 20 “Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Modulated Infrared Sensor”

También existen métodos basados en sensores electrolíticos que registran la humedad a partir de su absorción y descomposición electrolítica en hidrógeno y oxígeno, estimando la masa de humedad que pasa a través de la probeta a partir de la corriente electrolítica requerida en el ensayo.

- UNE-EN ISO 15106-3:2005 “Plásticos. Películas y láminas de plástico. Determinación de la tasa de transmisión de vapor de agua. Parte 3: Método de detección mediante sensor electrolítico”
- ISO 9932:1990 “Paper and board — Determination of water vapour transmission rate of sheet materials — Dynamic sweep and static gas methods”.

Existen algunas normas que permiten clasificar los materiales empleados en función de su permeabilidad al vapor de agua. En concreto, la norma UNE-EN 1504-2:2005 “Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Definiciones, requisitos, control de calidad y evaluación de la conformidad. Parte 2: Sistemas de protección superficial para el hormigón” establece para los revestimientos la siguiente clasificación:

Método de ensayo	Resultado	Clasificación
EN ISO 7783	$s_D < 5$ m (permeable al vapor de agua)	Clase I
	$5 \text{ m} \leq s_D \leq 50$ m	Clase II
	$s_D > 50$ m (impermeable al vapor de agua)	Clase III

En la misma norma UNE-EN 1504-2 se regula la permeabilidad al agua líquida, que debe ser menor de $0,1 \text{ kg/mm}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ ensayado según la norma UNE-EN 1602-3:2008 Pinturas y barnices. Materiales de recubrimiento y sistemas de recubrimiento para albañilería exterior y hormigón. Parte 3: Determinación de la permeabilidad al agua líquida.

Adicionalmente, la norma UNE-EN 1062-1:2005 “Pinturas y barnices. Materiales de recubrimiento y sistemas de recubrimiento para albañilería exterior y hormigón. Parte 1: Clasificación” ofrece una clasificación de los revestimientos en función de la velocidad de transmisión agua-vapor:

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

Clase	Velocidad de transmisión agua vapor V (g/(m ² ·d))	S _D (m)
V ₀	Ningún requisito	
V ₁ (alta)	> 150	< 0,14
V ₂ (media)	≤ 150	≥ 0,14
	> 15	< 1,4
V ₃ (baja)	≤ 15	≥ 1,4

Por otra parte, existen normativa que sirve de fuente de valores tabulados para materiales estándar comunes, y que especifica métodos para la estimación de los valores declarados y de diseño, como la UNE-EN ISO 10456:2012 *“Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño”*. Cabe señalar que el ensayo de los materiales concretos a ensayar proporciona datos mucho más ajustados.

Para el cálculo de condensaciones, la norma UNE-EN ISO 13788:2016 *“Características higrotérmicas de los elementos y componentes de edificación. Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial. Métodos de cálculo”* ofrece un método simplificado.

Por su parte, el Código Técnico de la edificación (CTE) establece una exigencia relativa a la limitación de condensaciones, figurando en el documento de apoyo al DB-HE Ahorro de energía DA DB-HE/2 procedimientos para la comprobación su comprobación.

Como resultado se obtienen unas líneas correspondientes a la presión de vapor de saturación y la presión de vapor. Mientras estas líneas no se crucen no se espera que aparezcan condensaciones intersticiales.

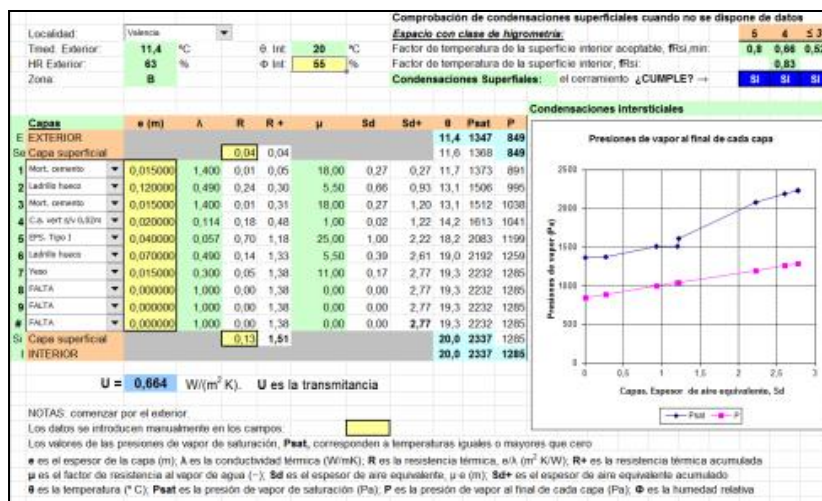


Figura 2. Ejemplo verificación limitación condensaciones según el CTE

B. INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS FACTORES INVOLUCRADOS EN LOS PROCESOS DE TRANSMISIÓN DEL VAPOR DE AGUA EN LOS MATERIALES.

B.1. Factores involucrados en la aparición de condensaciones intersticiales

El riesgo de provocar condensaciones intersticiales depende de las condiciones exteriores e interiores del cerramiento, de la transmitancia térmica del cerramiento (U), de la humedad relativa interior considerada, y de la distribución de temperaturas en el cerramiento, que permite obtener la distribución de presión de vapor de saturación a lo largo del cerramiento y sus capas. Se generan condensaciones intersticiales cuando en algún punto la temperatura en el interior del cerramiento es inferior a la temperatura de rocío. Es por ello, que el riesgo de condensaciones intersticiales depende del gradiente de temperaturas entre el interior y el exterior y la posición del material aislante. La distribución de presión de vapor en el cerramiento se tiene que cuanto mayor es el espesor y/o resistencia a la difusión del vapor de agua del material, mayor diferencia de presión entre el interior y exterior, provocando un mayor riesgo de condensaciones intersticiales.

En este sentido, debe prestarse especial precaución en el posicionamiento dentro del cerramiento del material aislante, máxime si se requiere de una barrera de vapor, ya que en caso contrario se favorecería la aparición de problemas de condensaciones intersticiales. La barrera de vapor, debe posicionarse siempre en el lado caliente del aislante. Muchos productos aislantes, como lanas de roca y de vidrio, se comercializan con barrera de vapor en uno de sus caras, y que se debe instalar siempre de cara al interior de la vivienda (lado caliente). Los aislantes de poliestireno extruido (XPS) constituyen de por sí una barrera de vapor y por tanto no requieren del empleo de barreras de vapor adicionales.

La barrera de vapor es un material poco permeable que se coloca en el lado caliente del cerramiento, y cuya misión, es evitar el paso de vapor desde el lado caliente (interior de la vivienda), al lado frío del cerramiento (exterior), cuando puede generarse la condensación. Debe observarse que las barreras de vapor están diseñadas para evitar las condensaciones, y por lo tanto no son útiles para evitar las filtraciones de agua.

En este sentido, se considera que en el interior de las viviendas en invierno, se puede presentar una alta humedad, y que esta puede pasar a lo largo del cerramiento, pudiendo hacerlo de forma muy rápida, y encontrándose con una temperatura más fría que se alcance el punto de rocío, apareciendo condensaciones que a la larga pueden ocasionar patologías además de una merma en las prestaciones térmicas. Es por ello, que en ocasiones se recurra al uso de barreras de vapor, siempre posicionadas en el lado caliente. Cabe destacar que los problemas de condensaciones en el interior de la vivienda se evitan mediante un buen aislamiento y la necesaria ventilación diaria de las habitaciones.

En verano o con clima cálido, el riesgo de condensaciones intersticiales es inexistente, ya que el aire caliente es capaz de soportar altos grados de humedad, siendo improbable que se encuentre con superficies lo suficientemente frías como para condensar. Por otra parte, el uso de aires acondicionados reduce en gran medida la humedad relativa en los interiores.

B.2. Factores clave en la formulación de revestimientos en relación a la permeabilidad al vapor de agua

La protección de la fachada contra la humedad a partir de un tratamiento adecuado es crucial para favorecer el mantenimiento del edificio. El origen de agua en la fachada puede deberse a multitud de factores, como grietas o defectos en los revestimientos, entrada de agua por capilaridad, filtraciones, o transporte de humedad desde el interior del edificio. Es por ello que un revestimiento adecuado debe limitar la entrada de agua líquida a través de la superficie de la fachada, pero debe mantener una estructura que permita la transpiración del cerramiento de forma que se pueda secar la pared.

La permeabilidad al agua se ensaya en base a la norma EN 1062-3, y también cuenta con una clasificación en base a la norma UNE-EN 1062-1:2005.

Método de ensayo	Clase	Requisito Kg/(m ² ·h ^{0,5})
EN 1062-3	W ₀	Ningún requisito
	W ₁ (alta)	> 0,5
	W ₂ (media)	> 0,1 y ≤ 0,5
	W ₃ (baja)	≤ 0,1

De acuerdo a lo establecido por Künzel (Baera, Szilagyi, & Dico, 2013), la formulación idónea para un revestimiento protector para una fachada pasaría por el uso de un recubrimiento altamente permeable al vapor de agua formulado con ayuda de agentes hidrofóbicos que ofrezcan baja absorción de agua líquida.

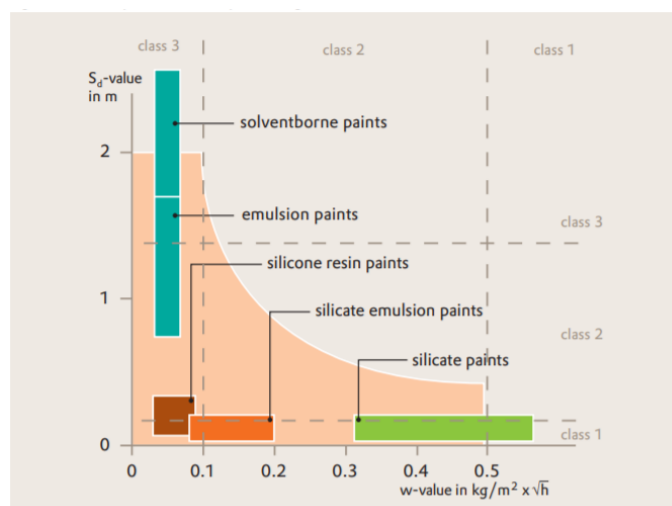


Figura 3. Protección de la fachada de acuerdo a la teoría de Künzel

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

En la formulación de pinturas y barnices, el parámetro más importante que afecta a la absorción de agua y la permeabilidad al vapor de agua es el PVC (concentración de pigmento en volumen), definido como la relación entre el volumen de pigmento y cargas y la suma de los volúmenes de pigmento, cargas y resina. Es decir, el porcentaje de volumen total de pigmento y/o cargas con respecto de dicho volumen más el volumen de vehículo no volátil.

Dentro del rango que varía del 0 al 100% del PVC, aparece la CPVC (concentración crítica de pigmento en volumen), que puede definirse como la concentración pigmentaria en volumen de un sistema pigmento/resina, donde existe justo la cantidad de vehículo (resina) para mojar y empaquetar cada partícula de pigmento y rellenar los espacios vacíos entre ellos (Asbeck, 1949).

El paso por este valor implica un punto de inflexión que representa una variación importante en distintas propiedades de la película seca y del producto líquido. Existen tres grupos de propiedades que se ven afectadas por ligeras variaciones del PVC por encima de la CPVC, considerando que este punto como un punto de transición (Rosa, 1999):

- **Propiedades de transporte:** permeabilidad, porosidad, resistencia al frote, resistencia al manchado, resistencia a la corrosión, ampollamiento, penetración a superficies porosas y resistencia eléctrica. Propiedades que son dependientes del movimiento-transporte de materiales o corriente eléctrica a través del recubrimiento.
- **Propiedades mecánicas:** flexibilidad, resistencia a la tracción, resistencia al "pegado" (*blocking*), temperatura de transición vítrea (T_g), resistencia al frote húmedo y al comportamiento bajo ciclos de frío. Indican el grado de resistencia a fuerzas externas.
- **Propiedades ópticas:** brillo, opacidad, capacidad de tintado.

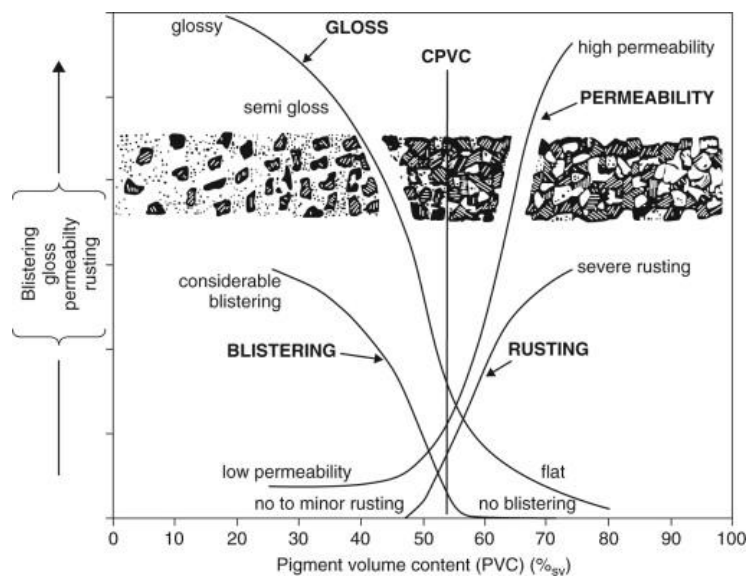


Figura 4. Ejemplo de la variación de las propiedades de las pinturas con el PVC (Meyer, Rosdahl, Saarnak, Säberg, & O., 1997)

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

Tal y como aparece en la fFigura 4, en la película con baja concentración de pigmento, las partículas están totalmente rodeadas del ligante, mientras que a partir del CPVC, no existe suficiente ligante para rodear los pigmentos y/cargas existentes, y la película presenta ciertos huecos que le aportan porosidad. La CPVC no posee un valor fijo para un tipo de recubrimiento, variando en función de tipo y morfología de los pigmentos y resinas y sus posibles combinaciones.

También es importante conocer el impacto de la temperatura en la permeabilidad al vapor de agua de los materiales, así como la necesidad de su control durante los ensayos que se realizan para su determinación, dado que una mayor temperatura conlleva una reducción de las propiedades barrera. Por otra parte, la temperatura de transición vítrea (T_g), que marca el cambio de un polímero amorfo de un estado vítreo a una estructura más gomosa, donde se manifiesta un mayor movimiento de las cadenas y un aumento del volumen libre, también afecta al comportamiento de los revestimientos en cuanto a su permeabilidad. Cabe señalar que con el paso del tiempo y el envejecimiento, especialmente debido a la radiación solar la T_g aumenta, mientras que la absorción de agua y el uso de plastificantes reducen la T_g .

En materiales de naturaleza polimérica, la permeabilidad implica una absorción o solubilidad y una difusión en su seno y desorción. La absorción del vapor de agua en la superficie de la película es rápida. La difusión en el polímero es el paso que limita el tiempo para la absorción ritmo de la película, dado que el polímero puede interactuar con el vapor de agua absorbido (Sven, Markus, Kajetan, & Müllerb, 2018).

En este sentido es importante mencionar el efecto de la estructura molecular, donde una alta cristalinidad, implica un menor volumen libre, lo que implica una reducción del paso o movimiento del vapor de agua.

Asimismo, la orientación de las cadenas, presencia de grupos laterales, densidad de reticulación y su naturaleza química y polaridad también influyen en la permeabilidad (Shahriari, Mohseni, & Yahyaei, 2019). Los polímeros con grupos polares poseen una mayor afinidad por el agua que los polímeros con grupos apolares. No obstante, en zonas con estructuras polares se puede reducir la difusión del agua a causa de una reducción de la movilidad originada por la presencia de enlaces por puentes de hidrógeno. En alguno casos, contando con la naturaleza polar del vapor de agua y del polímero, el vapor se acaba absorbiendo provocando fenómenos de hinchazón.

En el caso de la madera o materiales derivados de la madera, el transporte de vapor de agua se rige por la difusión, donde el movimiento de las moléculas de agua tiende a compensar los gradientes de humedad que puedan estar presentes. En el interior, pueden producirse acumulaciones locales de sustancias hidrófilas, generando concentraciones elevadas de agua. Al tratarse de materiales capaces de absorber gran cantidad de agua, en caso de una entrada excesiva, el revestimiento debe permitir la rápida evaporación para evitar la aparición de velados o defectos entre el material y el recubrimiento.

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

B.3. Estudio de las propiedades de permeancia y la permeabilidad del vapor de agua bajo condiciones isotermas de diversos materiales que permitan caracterizar y controlar de la difusión de vapor de agua. Caracterización de materiales y evaluación de su respuesta en diversas condiciones ambientales

B.3.1. Tableros derivados de la madera

Los tableros de virutas orientadas (OSB) están formados con virutas de madera que se unen entre sí con un aglomerante mediante la aplicación de calor y presión. Durante el proceso de fabricación, las virutas longitudinales se orientan y se prensan de forma continuada para formar placas con tres capas unidas con resina. Las capas externas se orientan longitudinalmente y la capa central se orienta en ángulos rectos con respecto a la dirección de la placa. Gracias a esta orientación, el OSB tiene una alta estabilidad dimensional y una excelente resistencia. La disposición y geometría de las virutas de las capas superficiales, y las condiciones operativas de su proceso productivo contribuyen de forma decisiva a las propiedades físicas y mecánicas del tablero.

Este tipo de tableros encuentra aplicación en nueva edificación, rehabilitación y en el campo de las casas pasivas, donde cumplen usos estructurales dentro de tabique divisorios interiores y para el cerramiento de fachadas, encontrándose también como parte en prefabricados.

Cuando forman parte de un sistema constructivo, y de cara la protección contra la humedad, en cuanto a evitar condensaciones intersticiales, de forma general se indica que el revestimiento interno debe tener un valor de s_D aproximadamente de 10 a 14 veces superior al valor s_D del revestimiento externo. El cumplimiento de esta regla práctica, sin embargo, no exime de la obtención de la prueba técnica precisa. (Sonae Arauco, 2020). En estos elementos, si se requiere de una barrera de vapor, la recomendación indica que estas deben poseer un valor $s_D > 10$ m. (Korsnes, Time, Vågen, Halstedt, Geving, & Holme, 2013).

Partiendo de los datos tabulados para los tableros OSB en la norma UNE-EN 10456 se tienen los siguientes valores:

Densidad Kg/m ³	Conductividad térmica λ W/(m·K)	Factor de resistencia al vapor de agua μ	
		seco	húmedo
650	0,13	50	30

Para los tableros OSB, se ha realizado un estudio encaminado a analizar la relación del espesor y densidad en el comportamiento de la permeabilidad al vapor de agua.

Conjunto	Condición	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	
			Estado seco	Estado húmedo
A	23-0/50	23 ± 1	0 + 5	50 ± 5
C	23-50/93	23 ± 1	50 ± 3	93 ± 5

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

Material	Espesor	Densidad	Permeabilidad copa seca (A)		Permeabilidad copa húmeda (B)	
	(mm)	(kg/m ³)	μ	S _D (m)	μ	S _D (m)
OSB 3	13	651	84	1,09	65	0,85
OSB 3	15	642	86	1,29	79	1,19
OSB 3	18	634	91	1,64	93	1,67
OSB 3	22	622	105	2,31	89	1,96



Figura 5. Ensayo determinación permeabilidad al vapor de agua tableros OSB

Del mismo modo, también se ha llevado a cabo un estudio similar para el caso de los **tableros de partículas**. En este caso, la norma UNE-EN 10456 indica los siguientes valores de referencia:

Densidad Kg/m ³	Conductividad térmica λ W/(m·K)	Factor de resistencia al vapor de agua μ	
		seco	húmedo
300	0,10	50	10
600	0,14	50	15
900	0,18	50	20

Material	Espesor	Densidad	Permeabilidad copa seca (A)		Permeabilidad copa húmeda (B)	
	(mm)	(kg/m ³)	μ	S _D (m)	μ	S _D (m)
T. partículas	13	651	84	1,09	65	0,85
T. partículas	15	642	86	1,29	79	1,19
T. partículas	18	634	91	1,64	93	1,67
T. partículas	22	622	105	2,31	89	1,96

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

A la vista de los resultados se puede concluir que los valores tabulados indicados en la normativa son significativamente menores que los valores medidos experimentalmente. Es por ello, que se recomienda una caracterización de los materiales puestos en obra para obtener controlar y estimar correctamente el comportamiento higrotérmico de los cerramientos empleados en cada caso.

Para estudiar específicamente el efecto de la densidad, se seleccionaron cuatro muestras para un mismo tipo de tablero y con el mismo espesor nominal:

Material	Espesor (mm)	Densidad (kg/m ³)	Permeabilidad copa seca (A)		Permeabilidad copa húmeda (B)	
			μ	S _D (m)	μ	S _D (m)
OSB 3	12	620	78	0,94	63	0,76
OSB 3	12	636	81	0,97	71	0,85
OSB 3	12	654	96	1,15	86	1,03
OSB 3	12	672	135	1,62	105	1,26

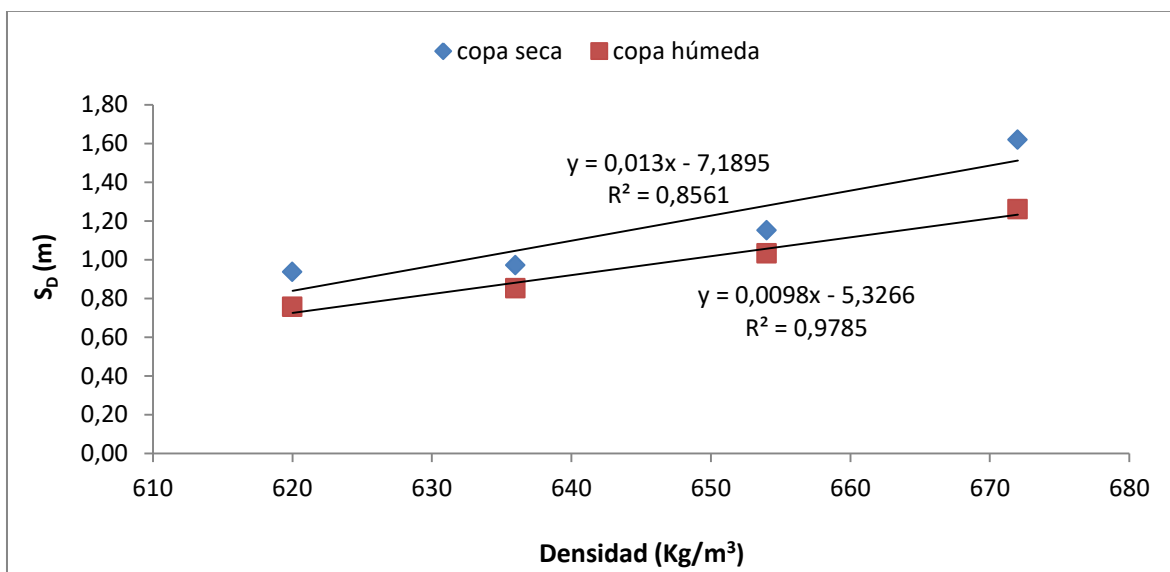


Figura 6. Relación entre la densidad y la permeabilidad al vapor de agua en tablero OSB 3 de 12 mm de espesor nominal

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

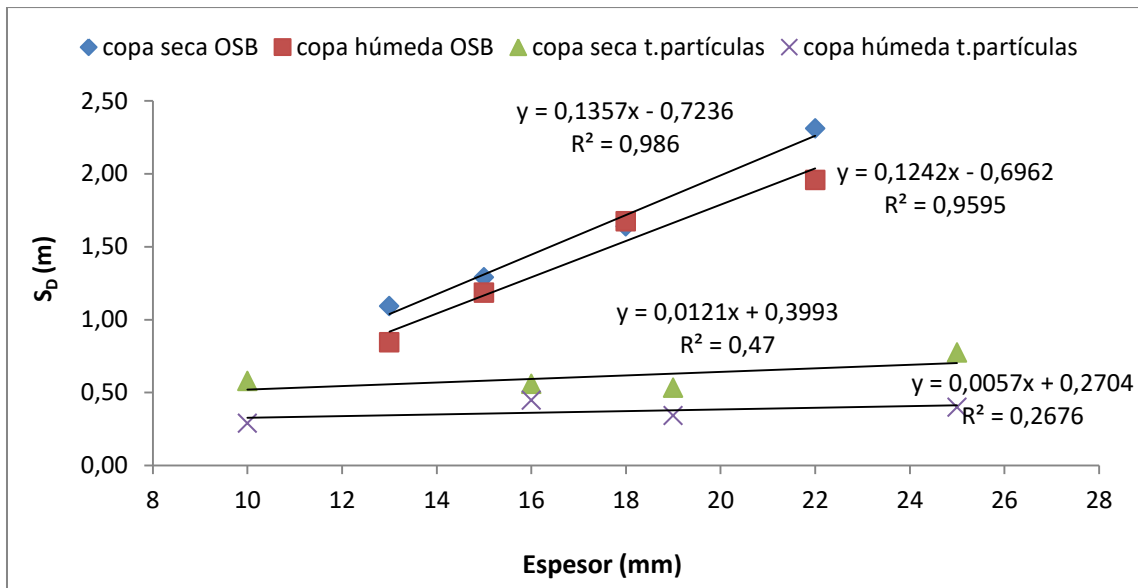


Figura 7. Relació entre el espesor nominal y la permeabilidad al vapor de agua

A la vista de los resultados se puede observar que existe una fuerte dependencia de la permeabilidad al vapor de agua con la densidad de los tableros. En el caso del espesor, para los tableros de partículas, esta relación no se cumple, manteniendo mayor importancia la densidad de los mismos.

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

B.3.2. Madera natural con y sin recubrimientos protectores

Una de las razones más importantes para aplicar revestimientos a la madera es para protegerlos de los posibles efectos perniciosos de la humedad. Por otra parte, como resultado de las regulaciones y las preocupaciones medioambientales, ha habido un cambio hacia los recubrimientos a base de agua, que hacen que los recubrimientos sean intrínsecamente más sensibles al agua (Özlem, Sebastiaan, Hendrik, Huininka, & G.J., 2018).

En este apartado se ha realizado una comparativa tomando madera de pino silvestre en crudo y con diferentes tratamientos protectores en base a la norma EN ISO 7783, empleando las condiciones de copa húmeda.

Condiciones	Condición	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	
			Estado seco	Estado húmedo
Cápsula húmeda	23-50/93	23 ± 1	50 ± 3	93 ± 3

Referencia	Descripción
Pino silvestre	Madera de pino silvestres sin ningún tratamiento ni acabado
Pino silvestre con lasur	Madera de pino silvestre con lasur al agua 1 capa aplicada a brocha con un rendimiento de 10 m ² /L
Pino silvestre barnizado	Madera de pino con un proceso de barnizado consistente en: 1 mano de fondo imprimación a poro abierto, 140 mL/ m ² 2 manos de barniz de dispersión acuosa de copolímero acrílico. Rendimiento 15 m ² /L. Aplicación a brocha
Pino silvestres pintado en blanco	Madera de pino acabada en el siguiente proceso: 1 mano de fondo imprimación a poro abierto, 140 mL/ m ² 2 manos de pintura. Rendimiento 12 m ² /L. Aplicación a brocha

Material	Espesor	Densidad madera	Permeabilidad	
			copa húmeda	
Tipo	(mm)	(kg/m ³)	μ	S _D (m)
Pino	15,1	496	10	0,15
Pino + lasur	15,1	496	12	0,18
Pino + Barnizado	15,2	496	43	0,65
Pino + Pintado	15,2	496	51	0,78

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

Puede observarse como el lasur, recubrimiento de acción impregnante, que no deja capa sobre la superficie de la madera, no afectando prácticamente a la permeabilidad del sustrato. Al tratarse de un acabado a “poro abierto” no impide la salida de vapor de agua de la madera.

Por su parte, tanto el barnizado como la pintura empleada si que tienen una influencia significativa en la permeabilidad al vapor de agua del conjunto. En este caso, la ventaja de este tipo de sistemas, que sí crean una película sobre el sustrato es que reducen la absorción de agua líquida.



“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

B.3.3. Revestimientos protectores del hormigón

En este tipo de revestimientos, regulados por la UNE-EN 1504-2:2005, el objetivo pasa por formular productos que aporten una baja permeabilidad al agua líquida a la vez que ofrecen una buena transpirabilidad al vapor de agua.

Del mismo modo, en materiales pétreos, el flujo de vapor de agua a través de la microestructura porosa, representa un factor crucial en su degradación, es por ello que en estos también se busca una alta hidrofobia y una alta permeabilidad del vapor de agua como requisitos deseables de una película protectora. Este hecho es de suma importancia, especialmente considerando los materiales instalados en el patrimonio cultural (Pia, Corcione, R., Casnedi, & Sanna, 2017).

Los procesos de revestimiento se soportaron par su ensayo en base a la norma EN ISO 7783 sobre fibrocemento de 6 mm de espesor, que es caracterizado previamente mediante su ensayo.



Figura 8. Preparación de probetas e imagen dentro del equipo de ensayo

Referencia	Descripción
Revestimiento acrílico base agua 1	1 mano de fijador diluido en relación 1:1 con agua con un rendimiento de 5 m ² /L del producto diluido aplicado a brocha 2 manos de revestimiento acrílico aplicado a brocha diluido con un 10% de agua y con un rendimiento de 4 m ² /L sobre el producto sin diluir . Aplicación a brocha.
Revestimiento acrílico base agua 2	1 mano de fijador diluido en relación 1:1 con agua con un rendimiento de 5 m ² /L del producto diluido aplicado a brocha 2 manos de revestimiento acrílico aplicado a brocha diluido con un 10% de agua y con un rendimiento de 4 m ² /L sobre el producto sin diluir . Aplicación a brocha.
Revestimiento corcho proyectado resinas copolímeros acrílicos	2 manos de revestimiento de corcho proyectado

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

resina poliuretano

Revestimiento corcho 2 manos de revestimiento de corcho proyectado
micronizado resinas
copolímeros acrílicos
resina poliuretano

Revestimiento caucho 2 manos de revestimiento de caucho
proyectado resinas
acrílicas

Membrana de poliuretano 2 manos de 600 g/m² por capa con un tiempo de repintado de 12
monocomponente horas
impermeabilizante

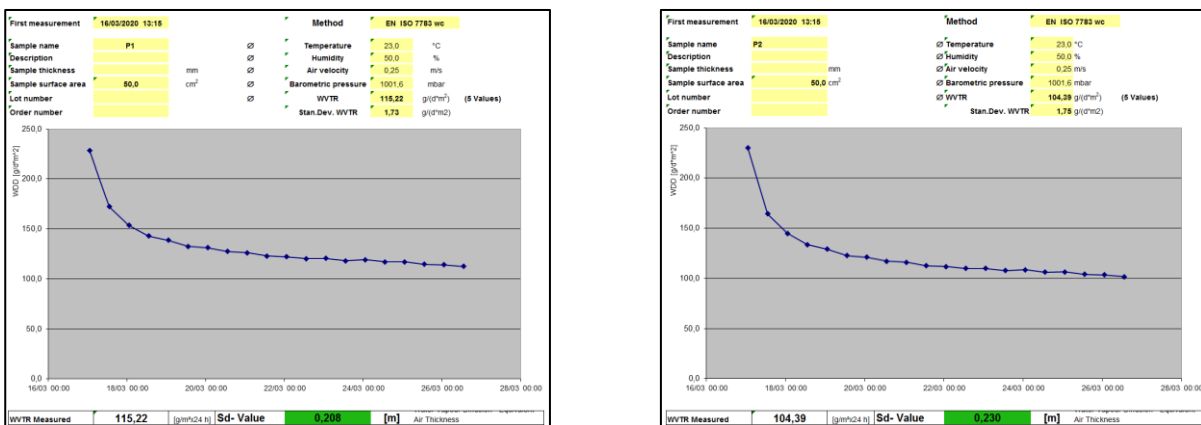


Figura 9. Ejemplo monitorización ensayo hasta régimen estacionario de una probeta en el ensayo de permeabilidad al vapor de agua

Measure	Time	Temperature	Rel. humidity	Air flow [m/s]	Barometric
1	16/03/2020 13:14:30	22,00	50,10	0,25	997,00
2	16/03/2020 13:24:31	22,60	50,10	0,25	997,00
3	16/03/2020 13:34:32	23,10	50,00	0,25	997,00
4	16/03/2020 13:44:33	23,00	50,10	0,25	997,00
5	16/03/2020 13:54:33	23,00	50,00	0,25	997,00
6	16/03/2020 14:04:33	23,00	49,90	0,25	997,00
7	16/03/2020 14:14:35	23,00	49,90	0,25	997,00
8	16/03/2020 14:24:37	23,00	50,00	0,25	997,00
9	16/03/2020 14:34:38	23,00	50,00	0,25	998,00
10	16/03/2020 14:44:38	23,00	49,90	0,25	998,00
11	16/03/2020 14:54:38	23,00	50,00	0,25	998,00
12	16/03/2020 15:04:40	23,00	50,00	0,25	998,00
13	16/03/2020 15:14:42	23,00	50,00	0,25	998,00
14	16/03/2020 15:24:43	23,00	50,00	0,25	998,00
15	16/03/2020 15:34:44	23,00	50,10	0,25	998,00
16	16/03/2020 15:44:44	23,00	50,10	0,25	998,00
17	16/03/2020 15:54:44	23,00	50,00	0,25	998,00
18	16/03/2020 16:04:47	23,00	50,10	0,25	998,00
19	16/03/2020 16:14:48	23,00	50,00	0,25	997,00
20	16/03/2020 16:24:49	23,00	50,00	0,25	998,00
21	16/03/2020 16:34:49	23,00	50,10	0,25	998,00
22	16/03/2020 16:44:49	23,00	50,00	0,25	998,00
23	16/03/2020 16:54:50	23,00	49,90	0,25	998,00
24	16/03/2020 17:04:51	23,00	50,10	0,25	998,00
25	16/03/2020 17:14:52	23,00	50,00	0,25	998,00
26	16/03/2020 17:24:52	23,00	50,10	0,25	998,00
27	16/03/2020 17:34:52	23,00	50,10	0,25	998,00
28	16/03/2020 17:44:54	23,00	49,90	0,25	998,00
29	16/03/2020 17:54:55	23,00	50,10	0,25	998,00
30	16/03/2020 18:04:55	23,00	50,00	0,25	998,00
31	16/03/2020 18:14:57	23,00	50,00	0,25	999,00
32	16/03/2020 18:24:58	23,00	50,10	0,25	999,00
33	16/03/2020 18:34:59	23,00	50,10	0,25	999,00
34	16/03/2020 18:44:59	23,00	49,90	0,25	999,00
35	16/03/2020 18:54:59	23,00	50,00	0,25	999,00
36	16/03/2020 19:05:00	23,00	50,00	0,25	999,00
37	16/03/2020 19:15:01	23,00	50,10	0,25	999,00

Figura 10. Ejemplo extracto registro datos higrométricos tomados durante el ensayo de permeabilidad al vapor de agua

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

Revestimiento	Espesor (μm)	Permeabilidad al agua líquida			Permeabilidad al vapor de agua			
		Resultado	Requisito	Clasificación	Resultado		Clasificación	
	w ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$)	EN 1504-2	EN 1062-1	V ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$)	S_D (m)	EN 1504-2	EN 1062-1	
Acrílico 1	180	0,04	Cumple	W ₃ (baja)	52	0,2	Clase I (permeable)	V ₂ (media)
Acrílico 2	170	0,10	No cumple	W ₂ (media)	354	0,1	Clase I (permeable)	V ₁ (alta)
Corcho proyectado	2300	0,20	No cumple	W ₂ (media)	16	1,3	Clase I (permeable)	V ₂ (media)
Corcho micronizado proyectado	900	0,01	Cumple	W ₃ (baja)	10	2,1	Clase I (permeable)	V ₃ (baja)
Caucho proyectado	2100	0,02	Cumple	W ₃ (baja)	6	3,4	Clase I (permeable)	V ₃ (baja)
Membrana PU	620	0,01	Cumple	W ₃ (baja)	31	0,7	Clase I (permeable)	V ₂ (media)

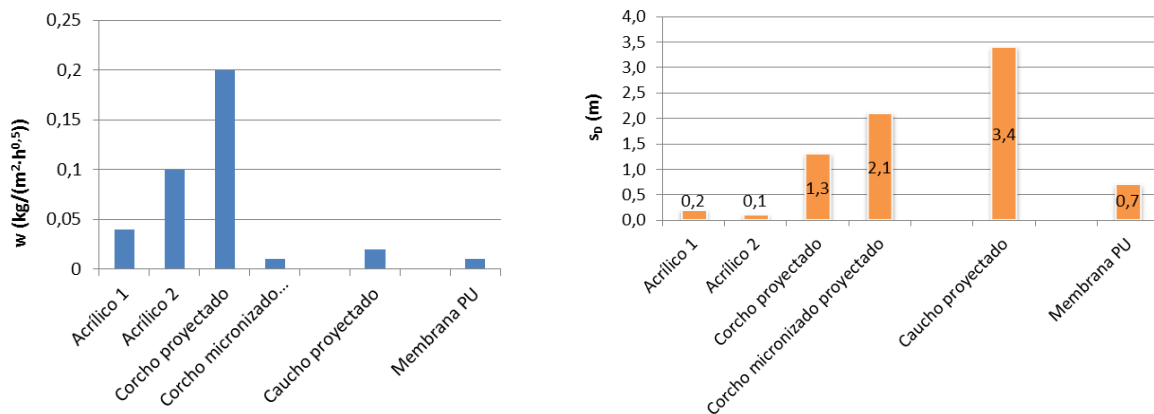


Figura 11. Resultados permeabilidad al agua líquida y al vapor de agua

A pesar de que la naturaleza de la resina empleada en el sistema de revestimiento es importante de cara a conocer los resultados que potencialmente pueden poseer en cuanto a su comportamiento frente al vapor de agua o la absorción de agua, nuevamente estos valores, que pueden encontrarse en la bibliografía, como por ejemplo en la siguiente tabla (Reichel, Hochberg, & Köpke, 2012), deben ser considerados meramente como datos orientativos.

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

	Binders	Solidification/ hardening	Water absorption coefficient W in kg/m²h^{0,5}	Resistance to the diffusion of water vapour μH₂O	Water vapour permeability s_D in m	CO₂ permeability s_D in m
Calcimine	Hydraulic lime	Chemical hardening/carbonation	> 1,0 permeable by water	< 10	< 0,1 m (0,02) permeable by water vapour	< 0,5 m
Silicate Paint	Potassium water glass	Physical drying / chemical hardening silification	> 1,0 permeable by water	< 10	< 0,1 m (0,04-0,08) permeable by water vapour	< 0,5 m
Emulsion-type silicate paint	Potassium water glass/ Polymer emulsion	Physical drying / chemical hardening silification	0,1-2,0 water resistant	100-1000	0,1-0,5 m (0,08-0,6) permeable by water vapour	< 0,5 m
			0,1-0,5 water repellent	100-1000	0,1-2,0 m permeable by water vapour	< 0,5 m
Polymer emulsion paint	Polymer emulsion	Physical drying / coalescence	0,1-2,0 water resistant	1000	0,1-1,5 m permeable by water vapour	1-5 to > 50
			0,1-0,5 water repellent	1000	0,1-2,0 m permeable by water vapour	
Silicone resin emulsion paint	Silicone resin emulsion polymer emulsion	Physical drying / coalescence	< 0,1 watertight	100-1000	< 0,1 m permeable by water vapour	< 0,5 m
Polymerisable resin paint	Synthetic resin	Physical drying / coalescence	0,1-2,0 water repellent	1000-10000	0,5-1,0 m water vapour retarding	> 50 m
			0,1-2,0 water repellent	1000-10000	0,1-2,0 m water vapour retarding	
Hydrophobing agent	Silicone resin	Physical drying / coalescence	< 0,1 watertight		< 0,1 m permeable by water vapour	> 50 m

Propiedades de diferentes tipos de revestimientos en función de la naturaleza del ligante

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

B.3.3. Materiales aislantes térmicos

La lana de roca y la lana de vidrio, ambas lanas minerales, son materiales fibrosos y porosos que actúan como aislantes y barrera contra la humedad. Los dos aislantes poseen una estructura de fibras entrecruzadas, creando una estructura porosa y flexible que retiene fuertemente aire inmóvil en su interior. Son soluciones hidrófobas, que no absorben humedad por capilaridad. Debido a su porosidad abierta deben contar con protección frente al agua líquida, tanto por difusión como por inmersión.

Los aislantes a base de celulosa se fabrican a partir de papel reciclado triturado, al que se añaden aditivos para dotarlo de propiedades ignífugas y contra los hongos, roedores e insectos. Este tipo de aislante posee una estructura fibrosa muy ramificada que le confiere buenas prestaciones térmicas y acústicas.

El aislante a base de poliestireno expandido, es un material plástico espumado compuesto en mayoritariamente por aire, ligero y a la vez resistente, que además ofrece excelentes propiedades como aislante térmico y aislante acústico. El material ofrece una estructura de celda cerrada.

Material	Espesor	Densidad	Conductividad térmica *	Permeabilidad vapor agua copa seca (A)		Permeabilidad agua líquida
	(mm)	(kg/m ³)	W/m °C	μ	S _D (m)	w (kg/(m ² ·h ^{0,5}))
Lana de roca	40	42	0,037	2	0,08	0,004
Lana de vidrio	28	31	0,034	2	0,06	0,025
Poliestireno expandido baja densidad	40	10	0,039	35	1,40	0,001
Aislante de celulosa	20	35	0,045	10,3	0,211	5,5

* Determinada mediante el método del hilo caliente

La permeabilidad al vapor de la lana de roca y la lana de vidrio es similar, que podría encajar con su mismo tipo de estructura, porosidad. La estructura de poro cerrado del EPS muestra una permeabilidad mucho más alta. En el caso del aislante de celulosa, destaca que debido a su carácter higroscópico se obtiene un valor de permeabilidad al agua líquido muy elevado, debiéndose proteger con barreras o aditivos para mejorar su comportamiento.

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

A continuación se estudia la influencia del contenido de humedad en un aislante de lana de roca de tres fabricantes diferentes, empleando como método de humectación la inyección, controlando el grado obtenido mediante gravimetría, de acuerdo con la metodología expuesta por Gusyachkin et al 2019 (Gusyachkin, Sabitov, Khakimova, & Hayrullin, 2019) :

Referencia	Contenido en humedad (%)	Conductividad térmica, λ a 23°C (W/m °C)	Cambio experimentado en %
Lana de roca 1	0	0,035	
	5	0,055	57,1
	10	0,072	105,7
	15	0,121	245,7
Lana de roca 2	0	0,038	
	5	0,051	34,2
	10	0,066	73,7
	15	0,071	86,8
Lana de roca 3	0	0,036	
	5	0,055	52,8
	10	0,063	75,0
	15	0,065	80,6

Por otra parte, también se ha analizado el comportamiento de un material aislante desarrollado como un morteros térmico con reciclado de EPS (poliestireno expandido), en este caso, en base a su normativa específica, la UNE EN UNE-EN 1015-19:1999 y UNE-EN 1015-19:1999/A1:2005.

Esta norma trabaja con disoluciones saturadas de nitrato de potasio para general una alta humedad (93,2% a 20°C), y con una disolución de cloruro de litio para la baja humedad (12,4% a 20°C).



Figura 12. Preparación probetas y ensayo de permeabilidad al vapor de agua

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

Espesor promedio (t) (m)							Espesor promedio (t) (m)						
0,027							0,030						
Diámetro probeta							Diámetro probeta						
0,16 m							0,16 m						
0,0201 m ²							0,0201 m ²						
1207 Pa							1056 Pa						
A _v							A _v						
4,80E+07 Pa m ² s/kg por 10 mm de lámina de aire							4,80E+07 Pa m ² s/kg por 10 mm de lámina de aire						
R _v							R _v						
DISOLUCIÓN KNO₃													
PROBETA 1													
							Condición						
							°C - % RH						
							R ²						
							R ² > 0,999						
							Pendiente (kg/s)						
Tiempo (h)	Tiempo (s)	Masa (g)	R ²	R ² > 0,999	Pendiente (kg/s)		Tiempo (h)	Tiempo (s)	Masa (g)	R ²	R ² > 0,999	Pendiente (kg/s)	
0	0	749,54					0	0	895,42				
24	86400	747,04					24	86400	896,85				
48	172800	744,5	0,99998	Parar	-2,91667E-08		48	172800	898,14	0,99912	Parar	1,57407E-08	
MEDIA (ΔG/Δt) = -2,91667E-08 kg/s						MEDIA (ΔG/Δt) = 1,57407E-08 kg/s							
A _v = -1,14E-09 kg/(m ² ·s·Pa)						A _v = 7,69E-10 kg/(m ² ·s·Pa)							
PROBETA 2													
							Condición						
							°C - % RH						
							R ²						
							R ² > 0,999						
							Pendiente (kg/s)						
Tiempo (h)	Tiempo (s)	Masa (g)	R ²	R ² > 0,999	Pendiente (kg/s)		Tiempo (h)	Tiempo (s)	Masa (g)	R ²	R ² > 0,999	Pendiente (kg/s)	
0	0	799,91					0	0	992,15				
24	86400	791,65					24	86400	993,38				
48	172800	789,21	0,99951	Parar	-2,71991E-08		48	172800	994,57	0,99991	Parar	1,40046E-08	
MEDIA (ΔG/Δt) = -2,71991E-08 kg/s						MEDIA (ΔG/Δt) = 1,40046E-08 kg/s							
A _v = -1,06E-09 kg/(m ² ·s·Pa)						A _v = 6,81E-10 kg/(m ² ·s·Pa)							
PROBETA 3													
							Condición						
							°C - % RH						
							R ²						
							R ² > 0,999						
							Pendiente (kg/s)						
Tiempo (h)	Tiempo (s)	Masa (g)	R ²	R ² > 0,999	Pendiente (kg/s)		Tiempo (h)	Tiempo (s)	Masa (g)	R ²	R ² > 0,999	Pendiente (kg/s)	
0	0	830,3					0	0	895,42				
24	86400	828,04					24	86400	896,85				
48	172800	825,67	0,99981	Parar	-2,6794E-08		48	172800	898,14	0,99912	Parar	1,57407E-08	
MEDIA (ΔG/Δt) = -2,6794E-08 kg/s						MEDIA (ΔG/Δt) = 1,57407E-08 kg/s							
A _v = -1,05E-09 kg/(m ² ·s·Pa)						A _v = 7,69E-10 kg/(m ² ·s·Pa)							
PROBETA 4													
							Condición						
							°C - % RH						
							R ²						
							R ² > 0,999						
							Pendiente (kg/s)						
Tiempo (h)	Tiempo (s)	Masa (g)	R ²	R ² > 0,999	Pendiente (kg/s)		Tiempo (h)	Tiempo (s)	Masa (g)	R ²	R ² > 0,999	Pendiente (kg/s)	
0	0	830,3					0	0	992,15				
24	86400	828,04					24	86400	993,38				
48	172800	825,67	0,99981	Parar	-2,6794E-08		48	172800	994,57	0,99991	Parar	1,40046E-08	
MEDIA (ΔG/Δt) = -2,6794E-08 kg/s						MEDIA (ΔG/Δt) = 1,40046E-08 kg/s							
A _v = -1,05E-09 kg/(m ² ·s·Pa)						A _v = 6,81E-10 kg/(m ² ·s·Pa)							
PROBETA 5													
							Condición						
							°C - % RH						
							R ²						
							R ² > 0,999						
							Pendiente (kg/s)						
Tiempo (h)	Tiempo (s)	Masa (g)	R ²	R ² > 0,999	Pendiente (kg/s)		Tiempo (h)	Tiempo (s)	Masa (g)	R ²	R ² > 0,999	Pendiente (kg/s)	
0	0	749,54					0	0	992,15				
24	86400	747,04					24	86400	993,38				
48	172800	744,5	0,99998	Parar	-2,91667E-08		48	172800	994,57	0,99991	Parar	1,40046E-08	
MEDIA (ΔG/Δt) = -2,91667E-08 kg/s						MEDIA (ΔG/Δt) = 1,40046E-08 kg/s							
A _v = -1,14E-09 kg/(m ² ·s·Pa)						A _v = 6,81E-10 kg/(m ² ·s·Pa)							

Figura 13. Recopilación y cálculos ensayo de permeabilidad al vapor de agua

	Nitrato de plata	Cloruro de litio
Probeta 1	1,14E-09	7,69E-10
Probeta 2	1,06E-09	6,81E-10
Probeta 3	1,05E-09	7,69E-10
Probeta 4	1,05E-09	6,81E-10
Probeta 5	1,14E-09	6,81E-10
Permeanza media (Kg/m ² s Pa)	1,09E-09	7,16E-10
Permeabilidad al vapor de agua (Kg/m s Pa)	2,98E-11	2,15E-11
μ (Coef. Permeabilidad)	6,50	9,04

Del mismo modo, también se analiza la absorción de agua por capilaridad del material en base a la norma UNE-EN 1015-18:2003, obteniendo un coeficiente de absorción de agua de 1,0 (kg/(m²·min^{0,5})).

Resumen. Conclusiones

Para garantizar el confort térmico en la edificación es fundamental contar con cerramientos que aporten un aislamiento térmico adecuado. En este sentido, **es crítico disponer de valores fiables de las propiedades térmicas de los materiales a seleccionar**, como son el factor de resistencia al vapor de agua (μ) o el espesor de capa de aire equivalente a la difusión del vapor de agua, s_d (m), que permitan una correcta modelización.

A partir de los resultados obtenidos, queda patente que **existen discrepancias significativas entre los valores genéricos tabulados que figuran en la normativa respecto de los valores medidos experimentalmente**. Es por ello, que se recomienda una caracterización de los materiales puestos en obra para obtener controlar y estimar correctamente el comportamiento higrotérmico de los cerramientos empleados en cada caso. Cabe señalar que existe un amplio abanico de normativa para la caracterización de los materiales en función de su naturaleza y uso, y que los resultados obtenidos no son comparables en todos los casos.

El **conocimiento de los factores involucrados en los procesos de transmisión del vapor de agua**, así como en todo lo relacionado con la **composición y estructura de los materiales** en relación a la permeabilidad al vapor de agua puede permitir formular y desarrollar materiales innovadores optimizados. De forma general, estos se busca **una alta hidrofobia y una alta permeabilidad del vapor de agua** como requisitos deseables.

Se ha analizado el comportamiento de distintas familias de materiales de interés como los tableros derivados de la madera, recubrimientos de uso en madera, revestimientos protectores de fachada, y aislantes térmicos, permitiendo obtener información acerca de su comportamiento bajo distintas condiciones ambientales.

Bibliografía

- Asbeck, W. K. (1949). Critical Pigment Volume Relationships. *Industrial & Engineering Chemistry*, 41(7), 1470-1475.
- Baera, C., Szilagy, H., & Dico, C. (2013). Moisture transfer through facades covered with organic binder renders. *Constructii n° 1*, 70-79.
- DIN 53122-1:2001-08. Testing of plastics and elastomer films, paper, board and other sheet materials - Determination of water vapour transmission - Part 1: Gravimetric method. (2008).
- Gusyachkin, A. M., Sabitov, L. S., Khakimova, A. M., & Hayrullin, A. R. (2019). Effects of moisture content on thermal conductivity of thermal insulation materials. . *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* , Vol. 570, No. 1, p. 012.
- Jan, R., & Kamil, S. (2016). Measurements of water vapour permeability tightness of fibreglass cups and different sealants and comparison of μ -value of gypsum plaster boards. *Procedia Engineering*, 277 – 283.
- Korsnes, S., Time, B., Vågen, M., Halstedt, H., Geving, S., & Holme, J. (2013). Moisture risk in prefabricated wooden wall elements (TES-elements) with a vapour retarder of OSB/3. . *Passivhus Norden* , 336-348.
- Krus, M. (1996). *Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials. Theoretical Principles and New Test Methods*. Fraunhofer IRB Verlag.
- Labthink. (2020). Recuperado el 10 de 02 de 2020, de www.labthinkinternational.com
- Laure, D., & Zoubeir, L. (2017). Comparative study of hygrothermal properties of five thermal. *Case Studies in Thermal Engineering 10*, 628-640.
- Meyer, H., Rosdahl, G., Saarnak, A., Säberg, & O. (1997). *Notes for the Bachelor Course on Färger og Lacker, Nordiska Ingenjörbyrå för Färg AB*. Sweden.
- Oly, V., & Bernard, P. (2016). Inquiries into the measurement of vapour permeability of permeable. *Construction and Building Materials 102* , 338–348.
- Özlem, G.-K., Sebastiaan, J. E., Hendrik, P., Huininka, L., & G.J., v. d. (2018). Understanding the influence of wood as a substrate on the permeability of coatings by NMR imaging and wet-cup. *Progress in Organic Coatings 114*, 135-144.
- Pia, G., Corcione, C. E., R., S., Casnedi, L., & Sanna, U. (2017). Coating's influence on water vapour permeability of porous stonestypically used in cultural heritage of Mediterranean area:Experimental tests and model controlling procedure. *Progress in Organic Coatings, 102*, 239-246.
- Reichel, A., Hochberg, A., & Köpke, C. (2012). *Plaster, render, paint and coatings: details, products, case studies*. Walter de Gruyter.
- Rosa, J. (1999). Criterios de formulación. *Máster a Distancia en Tecnología de Pinturas Dpt. Ingeniería Química i Metal.lúrgia*.
- Šárka, N., Lukáš, B., Milan, R., & Tomáš, B. (2016). Laboratory verification of water vapour permeability of plaster. *Procedia Engineering 151* , 50 – 57.
- Shahriari, L., Mohseni, M., & Yahyaei, H. (2019). The effect of cross-linking density on water vapor and oxygen permeability of hybrid UV cured nano coatings. *Progress in Organic Coatings, 134*, 66-77.
- Sonae Arauco. (2020). Manual del instalador de OSB. www.sonaearauco.cm.

“MATLIG” – Desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros y nuevos materiales

- Sven, S., Markus, S., Kajetan, & Müllerb. (2018). Comparison of water vapour transmission rates of monolayer films determined by water vapour sorption and permeation experiments. *Food Packaging and Shelf Life* 17, 80-84.
- UNE-EN 12086:2013. Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación de las propiedades de transmisión del vapor de agua. (2013).
- UNE-EN 1504-2:2005 Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Definiciones, requisitos, control de calidad y evaluación de la conformidad. Parte 2: Sistemas de protección superficial para el hormigón. (2005).
- UNE-EN ISO 12571:2015. Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica. (2015).
- UNE-EN ISO 12572:2018 "Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua. Método del vaso". (2018).
- UNE-EN ISO 15148:2003. Comportamiento higrotérmico de los materiales y productos de edificación. Determinación del coeficiente de absorción de agua por inmersión parcial. (2003).
- UNE-EN ISO 7783:2019 Pinturas y barnices. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua. Método de la cápsula. . (2019).

