

2022 INFORME



Proyectos

“AISMAT”

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE MATERIALES POROSOS (II)

INFORME DE RESULTADOS

Número de proyecto: 22200006

Expediente: IMAMCA/2022/2

Duración: Del 01/01/2022 al 31/12/2022

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

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

ÍNDICE

1	<i>Introducción, objetivos del proyecto.</i>	3
2	<i>Resultados obtenidos</i>	5
3	<i>Actividades realizadas, desarrollo del proyecto.</i>	57
4	<i>Alcance, colaboradores y público objetivo.</i>	58
5	<i>Acciones de difusión y transferencia.</i>	59
6	<i>Resumen y conclusiones.</i>	60
7	<i>Anexos y bibliografía.</i>	62



“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

1 Introducción, objetivos del proyecto.

El concepto de aislamiento térmico está asociado al concepto de capacidad de control de la transmisión de calor cuando se desea que no exceda ciertos límites. Un producto aislante térmico es un producto que reduce la transmisión de calor a través de la estructura sobre la que, o en la que se instala [1].

En el ámbito de la edificación, los aislantes térmicos contribuyen a limitar el consumo energético mejorando el confort y la sensación de bienestar higrotérmico de los usuarios. Para ello, evitan pérdidas de calor cuando la temperatura externa es fría, y limita las ganancias de calor cuando en el exterior se alcanzan altas temperaturas. Además, los aislantes térmicos limitan la aparición de humedades y condensaciones intersticiales, es decir, aquellas que se producen en el interior de los elementos constructivos debido a una caída brusca de temperatura entre uno de sus lados, caliente y el otro que se encuentra mucho más frío. Por otra parte, contribuyen a mejorar el aislamiento acústico reduciendo el ruido procedente del exterior o de los propios vecinos.

El comportamiento de los aislantes térmicos es fundamental para satisfacer las limitaciones del consumo energético de los edificios marcados por la normativa, como las establecidas en el Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) del Código Técnico de la Edificación (CTE), que indica las prestaciones técnicas que deben satisfacer los edificios. De este modo, los aislantes disminuyen las emisiones con efecto invernadero derivadas tanto del uso de calderas de gas, derivados del petróleo o carbón, como de la generación de la producción de la electricidad.

La celulosa es un aislante **ecológico y renovable** que se fabrica a partir de papel reciclado. Es altamente efectivo para reducir la transferencia de calor y es capaz de **reducir la transmisión de sonido**. Además, el aislante de celulosa correctamente formulado es **resistente al fuego, evita la formación de hongos y mohos** y tiene una larga vida útil.

Además, la celulosa es un **material económico y fácil de instalar**, lo que hace que sea una opción muy recomendable para la renovación del parque de viviendas existentes.

Los aislantes de celulosa tienen una **huella de carbono relativamente baja** en comparación con otros materiales aislantes. Esto se debe en gran medida al hecho de que la celulosa se fabrica a partir de papel reciclado, lo que significa que se utiliza menos energía y recursos en su producción en comparación con otros aislantes.

Además, la celulosa es un material renovable y biodegradable, lo que significa que cuando se desecha, se degrada naturalmente en el medio ambiente sin causar daños significativos. La producción de aislantes de celulosa también requiere menos energía que otros materiales de aislamiento, lo que ayuda a reducir su huella de carbono.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Otras opciones de aislantes comunes incluyen la fibra de vidrio, lana de roca o la espuma de poliuretano, cada uno con sus propias ventajas y desventajas. Sin embargo, la celulosa es una opción atractiva para quienes buscan una solución ecológica y de bajo costo para la renovación de su hogar.

En función del uso y el proceso de aplicación (insuflado, proyectado o proyección húmeda), la densidad de aplicación recomendada varía tal y como puede verse en la siguiente tabla, que recopila información de diversas fichas técnicas de productos comerciales

Tabla 1. Densidades aplicación recomendadas fabricantes aislantes de celulosa

Densidad aplicación recomendada (kg/m ³)	55-65 (insuflado) 28-35 (proyectado) 40-50 (proyección húmeda)	35-65 (insuflado) 28-40 (proyectado)	30-60	Densidades mínimas: 50 (insuflado) 40 (techos inclinados) 30 (cavidades de techos horizontales)
------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------	-------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------

El proyecto **AISMAT**, que se integra en la línea estratégica **APLICACIONES AVANZADAS DE LOS MATERIALES** de I+D de AIDIMME, busca profundizar en el conocimiento acerca de los **productos empleados en el aislamiento**, especialmente en el caso de los empleados a granel como relleno, estudiando la relación existente entre su estructura y las prestaciones térmicas, acústicas y mecánicas ofrecidas. El proyecto se ha centrado en la investigación de los **aislantes de celulosa a granel**, opción ecológica, sostenible y eficaz a la hora de aislar térmica y acústicamente las viviendas.

El objetivo general del proyecto AISMAT es estudiar la relación existente entre la estructura y las propiedades de los aislantes térmicos para permitir el desarrollo de materiales avanzados. Por otra parte, el proyecto persigue potenciar la participación del centro y de las empresas en proyectos de ámbito nacional, europeos e internacionales.

Entre los objetivos específicos del proyecto se encuentran: analizar la relación entre la porosidad y compacidad de los materiales en relación con sus propiedades mecánicas, estudiar la influencia de su estructura con el confort térmico y acústico, mejorar del aislamiento térmico proporcionado por los materiales aislantes, y permitir el desarrollo y optimización de materiales compuestos.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

2 Resultados obtenidos

A. FABRICACIÓN DE AISLANTE DE CELULOSA

Para desarrollar y completar la investigación de los aislantes de celulosa, una de las tareas del proyecto consistió en la fabricación propia del producto con el objetivo de evaluar sus prestaciones y permitir su comparativa con los productos comerciales.

El proceso de fabricación de aislante de celulosa implicó la trituración y desfibrado de papel de periódico reciclado para crear fibras de celulosa.



Figura 1. Detalle fabricación aislante de celulosa mediante un molino de martillos en AIDIMME

La celulosa es un material inflamable, por lo que se suele aditivar antes de utilizarlo como relleno y como aislante térmico en las paredes de los edificios. Normalmente se emplean sales de boro para prevenir la combustión y ácido bórico para evitar la propagación [2]. Además, estos aditivos permiten eliminar insectos y le confiere a la celulosa resistencia al moho y al crecimiento bacteriano [3].

Según aparece en la bibliografía, el bórax y el ácido bórico se añaden en porcentajes que varían del orden del 8 al 25 % en relación a la celulosa [2] [4] [5] [6] [7] [8]. En el proyecto se estudiarán distintas formulaciones y su efecto en relación con las prestaciones en lo relativo al crecimiento de hongos y su reacción frente al fuego.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Para determinar los porcentajes óptimos de los aditivos en la formulación, se realizó un diseño de experimentos tipo superficie de respuesta, variando el porcentaje total de sales a incluir en el aislante entre valores del 10 al 25% y con ratios de ácido bórico frente al bórax comprendidos entre 0,2 y 0,5%.

Tabla 2. Proporciones de celulosa y sales según el diseño de experimentos.

Preparación probetas					
Nº	Celulosa (g)	Contenido sales (g)	Ácido bórico (g)	bórax (g)	Ratio (ac.bórico:bórax)
1	52,065	5,21	1,74	3,47	0,50
2	52,065	9,11	2,36	6,75	0,35
3	52,065	13,02	3,37	9,64	0,35
4	52,065	9,11	2,36	6,75	0,35
5	52,065	13,02	2,17	10,85	0,20
6	52,065	13,02	4,34	8,68	0,50
7	52,065	9,11	3,04	6,07	0,50
8	52,065	9,11	1,52	7,59	0,20
9	52,065	5,21	0,87	4,34	0,20
10	52,065	5,21	1,35	3,86	0,35
11	52,065	9,11	2,36	6,75	0,35
12	52,065	9,11	2,36	6,75	0,35
13	52,065	9,11	2,36	6,75	0,35
14	52,065	5,21	1,74	3,47	0,50
15	52,065	9,11	2,36	6,75	0,35
16	52,065	13,02	3,37	9,64	0,35
17	52,065	9,11	2,36	6,75	0,35
18	52,065	13,02	2,17	10,85	0,20
19	52,065	13,02	4,34	8,68	0,50
20	52,065	9,11	3,04	6,07	0,50
21	52,065	9,11	1,52	7,59	0,20
22	52,065	5,21	0,87	4,34	0,20
23	52,065	5,21	1,35	3,86	0,35
24	52,065	9,11	2,36	6,75	0,35
25	52,065	9,11	2,36	6,75	0,35
26	52,065	9,11	2,36	6,75	0,35

A partir de la información obtenida en el diseño de experimentos se prepararon las formulaciones mediante agitación mecánica, hasta conseguir homogeneizar las mezclas de los aditivos con las fibras de celulosa.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Figura 2. Proceso de mezclado y homogenización de la celulosa y aditivos.

En el proyecto se ha tratado de evaluar la combinación óptima que permita obtener unas buenas prestaciones frente al fuego y a su vez permita la inhibición de crecimiento de mohos. El uso de boratos en los aislantes de celulosa impide la formación de hongos ya que generan un ambiente alcalino, y son letales para termitas, hormigas arañas o cucarachas (asimismo favorecen la ausencia de alimento), siendo al mismo tiempo seguros para las personas, animales domésticos y el ambiente. Esto se debe a que actúan por ingestión y no por contacto o inhalación. Adicionalmente, los boratos presentan propiedades ignífugas, se vitrifican a temperaturas relativamente bajas (300-400 °C) impidiendo al oxígeno reaccionar en el proceso de combustión. [9].

Cabe considerar que existen otras alternativas que pueden ser de interés como el sulfato de aluminio, el aluminio trihidrato, el fosfato de amonio o el sulfato de amonio entre otras, no contempladas en el presente proyecto. En este sentido, existe cierta controversia y limitaciones en el uso de unos u otros. Por ejemplo, mientras que el ácido bórico ha sido sustituido en algunos lugares por sales de amonio debido a sus posibles efectos tóxicos sobre el sistema reproductivo humano, éste último a su vez fue prohibido en Francia en el año 2013 [10].

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

B. ESTUDIO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Se considera material aislante térmico aquel material que tiene una conductividad térmica menor que $0,060 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ y una resistencia térmica mayor que $0,25 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ [11] . Aunque los valores típicos de la conductividad térmica para los aislantes de celulosa insuflada están alrededor de $0,040 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, sus propiedades y prestaciones pueden variar en función del proceso de fabricación, la fuente del papel y el método de instalación [2].

Dentro del proyecto, se ha estudiado la conductividad térmica que ofrecen cuatro tipos de aislante de celulosa, analizando en cada uno de ellos la influencia de la densidad de aplicación en sus propiedades aislantes. En todos los casos, las muestras se acondicionan hasta masa constante en una cámara climática a $23 \text{ }^\circ\text{C}$ y 50% de humedad relativa previamente a su medida.

- *Celulosa industrial convencional pasada por máquina de insuflar*
- *Celulosa industrial convencional*
- *Celulosa industrial de papel blanco reciclado*
- *Celulosa de fabricación propia*



Figura 3. Material aislante de celulosa industrial pasada por máquina a), aislante celulosa sin por máquina b), aislante celulosa de papel blanco reciclado c), y aislante celulosa de fabricación propia d)

Para evaluar las propiedades aislantes que ofrece el material, se determina la conductividad térmica, λ (medida en W/mK), empleando un equipo FP2C (Neotim™), ver Figura 4, el cual emplea el método del hilo caliente (ASTM D5930-17). Este método se basa en la transferencia de calor generado por una fuente controlada (sonda Figura 5. Detalle de sonda del y el material a medir, que se encuentra a una temperatura más baja. Durante la medición, se genera una cantidad precisa de calor en un hilo resistivo incrustado en la muestra, en un entorno de temperatura constante, monitorizando la temperatura medida por un termopar emplazado en su proximidad. El análisis de la evolución de la temperatura en este transitorio permite estimar la conductividad térmica.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

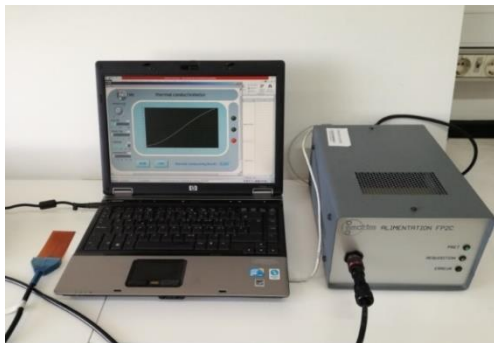


Figura 4. Equipo de medición de conductividad térmica

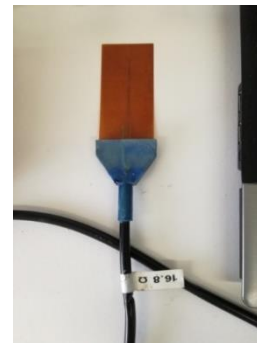


Figura 5. Detalle de sonda del equipo de conductividad térmica

Para una caja de dimensiones dadas (240 mm × 135 mm × 83 mm), se calcula las cantidades de aislante que se debe introducir en la misma para diferentes densidades.

Tabla 3. Densidades de aplicación y las masas determinadas

Densidad (kg/m ³)	25	35	45	50	55	60	65
Peso (g)	67,230	94,122	121,014	134,460	147,906	161,352	174,798



Celulosa industrial convencional pasada por máquina de insuflar



Celulosa industrial convencional



Celulosa industrial de papel blanco reciclado



Celulosa de fabricación propia

Figura 6. Proceso de medida conductividad térmica

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

A continuación, en la Tabla 4 y Figura 7 a 8 se presentan los resultados obtenidos de conductividad térmica para cada tipo de muestra y densidades.

Tabla 4. Valores de conductividad térmica (W/mK) en función de la densidad y la muestra

Muestra / Densidad (kg/m ³)	25	35	45	50	55	60	65
Aislante de celulosa industrial (pasada por máquina)	0,029	0,031	0,032	-	0,033	-	0,033
Aislante de celulosa industrial	0,029	0,030	0,029	-	0,031	-	0,033
Aislante de celulosa industrial papel blanco	-	-	0,033	0,036	0,038	0,036	0,037
Aislante de celulosa de fabricación propia	0,029	0,032	0,031	-	0,033	-	0,035

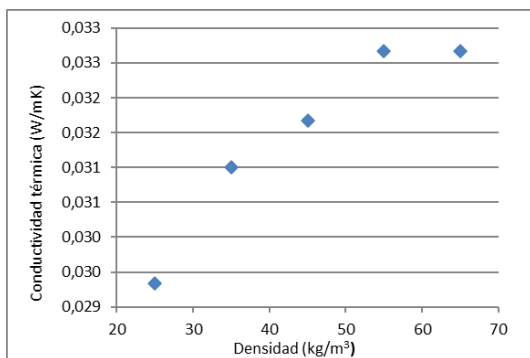


Figura 7. Aislante celulosa pasada por máquina

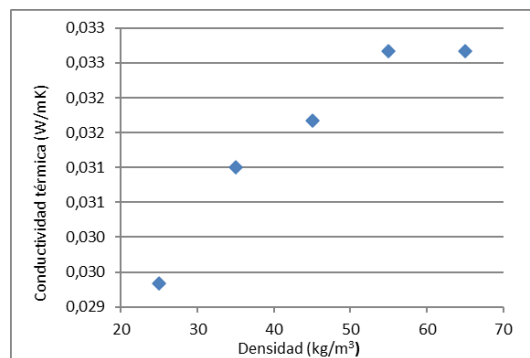


Figura 8. Aislante celulosa sin pasar por máquina

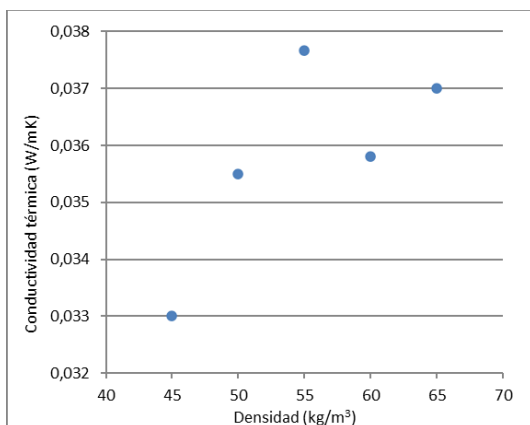


Figura 9. Aislante celulosa papel blanco reciclado

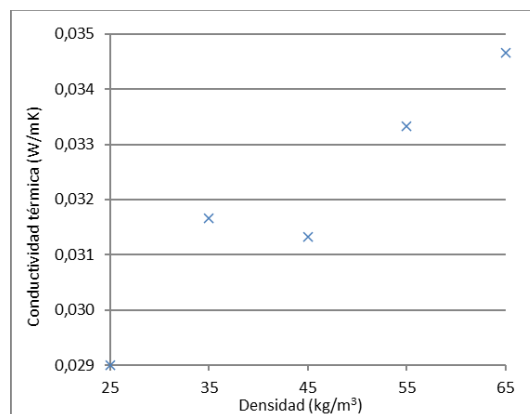


Figura 10. Aislante celulosa de fabricación propia

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

En el caso del aislante de papel blanco reciclado, la densidad mínima de aplicación viable que ofrece el material aislante de papel blanco es 45 (kg/m³), ya que a menores densidades de aplicación no se consigue ocupar la totalidad del volumen de la caja. Por este motivo, se realizaron mediciones en el rango de densidades comprendido entre 45 y 66 kg/m³.

Como puede observarse en los resultados, de forma general, existe una relación inversa entre densidad y aislamiento térmico. Esto significa que a medida que la densidad del aislante de celulosa aumenta, su conductividad térmica aumenta. Esto se debe a que la celulosa es un material poroso, y la baja densidad permite que se formen más bolsas de aire en el aislante, lo que ayuda a reducir la transferencia de calor a través del material. Por lo tanto, los aislantes de celulosa de baja densidad suelen tener una mejor capacidad aislante que los de alta densidad. No obstante, la horquilla en la que se mueve el valor de la conductividad térmica es relativamente estrecha.

En cuanto al tipo de material, se observa que la conductividad térmica en los aislantes de celulosa presenta valores similares tanto antes como después de pasar por la máquina de insuflado, y en comparación con el aislante de celulosa de fabricación propia. Por su parte, el aislante de celulosa fabricado con papel blanco exhibe valores ligeramente superiores, efecto que podría explicarse principalmente por el menor grado de desfibramiento que presenta el producto, efecto asociado a su propio proceso de fabricación.

En las siguientes fotografías se puede apreciar como el grado de desfibramiento de la muestra del aislante de celulosa industrial de papel blanco presenta un menor grado de desfibramiento respecto a la muestra de aislante de celulosa de fabricación propia.

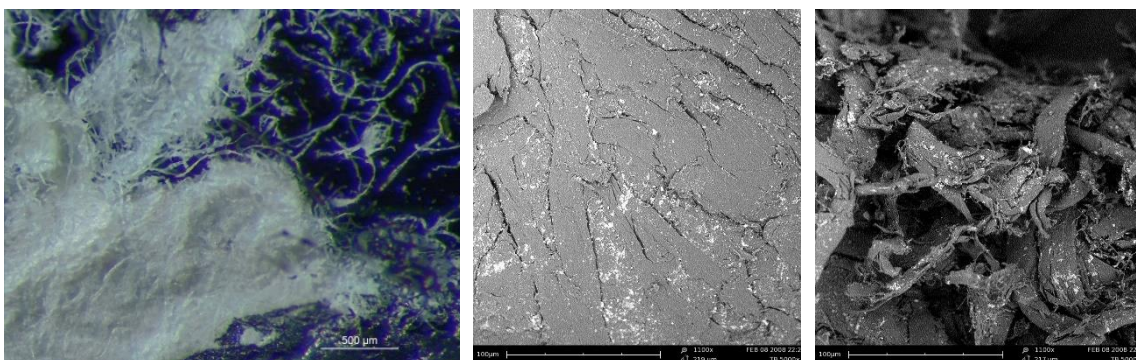


Figura 11. Aislante celulosa papel blanco reciclado

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

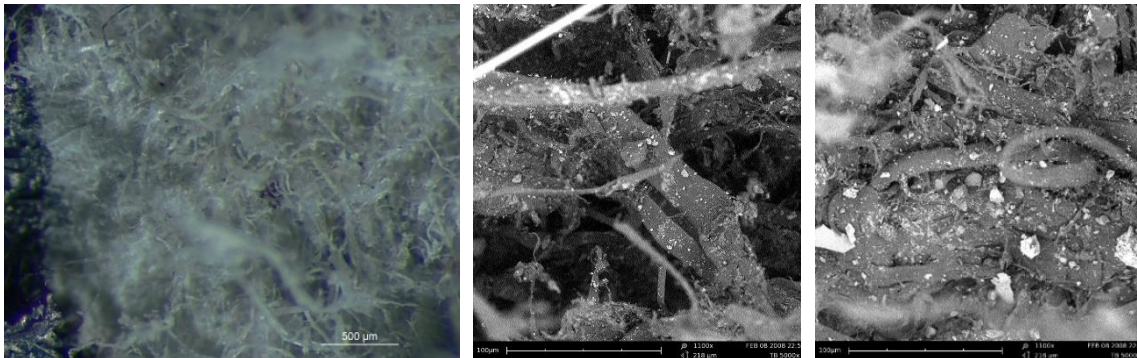


Figura 12. Aislante celulosa de fabricación propia

Los valores obtenidos serían acordes a lo encontrado en la bibliografía. Para un sistema aislante de celulosa convencional, aplicado a una densidad de 50 kg/m^3 , presentaría valores de conductividad térmica en torno a $0,040 \text{ W/mK}$ [2], pudiendo variar ligeramente en función del proceso de fabricación e instalación de este.

En este proyecto se han obtenido materiales aislantes de celulosa con propiedades aislantes similares a los productos industriales. Este hecho, nos indica que la elaboración de aislantes de celulosa no es particularmente difícil, aunque puede presentar algunos desafíos. Uno de los principales desafíos es la necesidad de triturar y procesar correctamente el papel o cartón reciclado para producir el aislante. El material debe ser procesado de manera que las fibras queden sueltas y bien distribuidas, lo que requiere equipos especializados y una cuidadosa regulación del proceso.

Otro reto asociado con la elaboración de aislantes de celulosa es la necesidad de asegurar que el material esté libre de contaminantes, como por ejemplo adhesivos, que podrían afectar la calidad y seguridad del producto final. Esto implica un proceso de selección y clasificación de los materiales de desecho que se utilizan en la producción del aislante. Además, es importante que el aislante de celulosa esté correctamente instalado para que funcione de manera efectiva. La instalación debe ser uniforme y debe evitar la formación de bolsas de aire o huecos en el aislante, lo que podría reducir su capacidad aislante.

Finalmente, aunque los aislantes de celulosa son altamente efectivos y sostenibles, también es importante asegurarse de que sean resistentes al fuego y a la humedad, lo que puede requerir tratamientos adicionales o aditivos especiales para mejorar su resistencia y durabilidad.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

C. RESISTENCIA AL FLUJO DE AIRE

La norma de referencia para los aislantes de celulosa es la UNE-EN 15101-1:2015+A1:2019 “*Productos de aislamiento térmico para edificios. Productos formados in-situ a partir de celulosa (LFCI). Parte 1: Especificaciones para los productos antes de su instalación*”. En esta norma se indica que la determinación de resistencia al flujo de aire deber realizarse en base a lo indicado en la norma EN 29053 Método A (norma anulada por la UNE-EN ISO 9053-1:2020) y lo indicado en el anexo G de la propia norma [12].

La resistencia al flujo de aire (R), expresada en pascales segundo por metro cúbico, mide la dificultad de una corriente de aire para fluir a través del material por unidad de espesor de este.

$$R = \frac{\Delta p}{q_v}$$

Donde

Δp es la diferencia de presión del aire, en pascales, entre ambos lados de la probeta en relación a la atmosférica;

q_v es el caudal volumétrico de aire, en metros cúbicos por segundo, que atraviesa la probeta.

La resistencia específica al flujo de aire, R_s , expresada en pascales segundo por metro, se define como:

$$R_s = R \cdot A$$

Donde, A, es el área de la sección de la probeta, en metros cuadrados.

Finalmente, la resistividad al flujo de aire, r , expresada en pascales segundo por metro cuadrado, si el material es homogéneo se define por:

$$r = \frac{R_s}{d}$$

Donde, d, es el espesor de la probeta, en metros, en la dirección del flujo.

La resistividad al flujo de aire se puede usar para predecir la capacidad de aislamiento acústico del material, ya que da una idea de la pérdida de energía que se produce en el interior de este. Valores demasiado bajos de este parámetro no proporcionan la amortiguación acústica necesaria, mientras que si son muy altos el material es demasiado rígido. Por ejemplo, el intervalo de resistencia específica al paso de aire comprendido entre 5 y 50 kPa·s/m² permite un óptimo aislamiento en el caso de la lana mineral [13].

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

La resistencia al flujo de aire de la celulosa puede variar dependiendo de varios factores, como el tipo de celulosa, su densidad y espesor, entre otros. En el estudio realizado se analizó esta propiedad distintas densidades y tipos de aislantes de celulosa fijando el espesor empleado en las determinaciones.

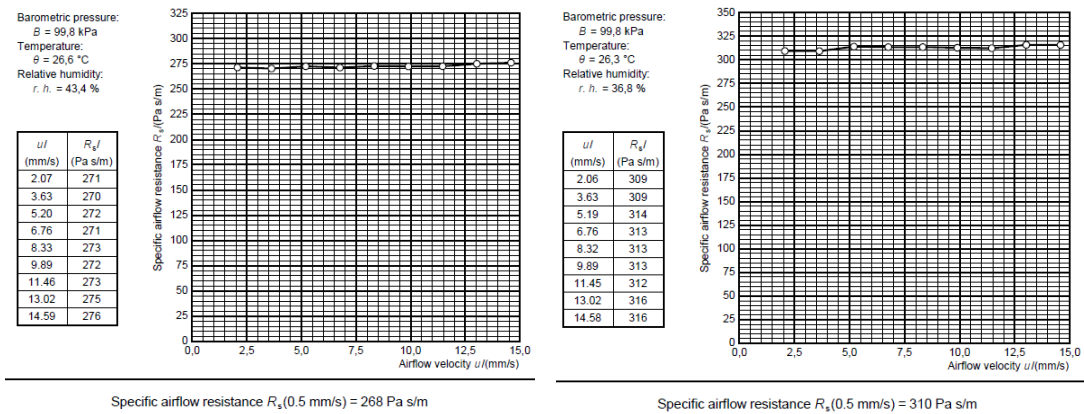


Figura 13. Ejemplo determinaciones resistencia específica al flujo de aire (R_s) en muestras de celulosa de fabricación propia

Tabla 5. Valores resistencia al flujo de aire aislante celulosa pasada por máquina insuflar

Densidad (kg/m ³)	25	35	45	55	65
Rs (0,5 mm/s) (Pa·s/m)	50	219	178	166	148
r (kPa·s/m ²)	0,2	0,9	0,7	0,7	0,6
R (Pa·s/m ³)	7054	30896	25112	23419	20880

Tabla 6. Valores resistencia al flujo de aire aislante celulosa papel blanco reciclado

Densidad (kg/m ³)	55	65	75	85	95
Rs (0,5 mm/s)	165	202	213	176	187
r (kPa·s/m ²)	0,7	0,8	0,9	0,7	0,7
R (Pa·s/m ³)	23278	28498	30050	24830	26382

Tabla 7. Valores resistencia al flujo de aire aislante celulosa papel blanco reciclado

Densidad (kg/m ³)	25	35	45	55	65	75	85	95
Rs (0,5 mm/s)	268	310	164	308	307	238	248	215
r (kPa·s/m ²)	1,1	1,2	0,7	1,2	1,2	1,0	1,0	0,9
R (Pa·s/m ³)	37809	43735	23137	43452	43311	33577	34988	30332

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Los valores de resistencia específica al flujo aire caracterizan la capacidad de absorción acústica del aislante. En su seno, debido al entrelazamiento de sus fibras y su porosidad, se provoca una disminución de la energía acústica de la onda acústica debido a fricciones de las ondas, de manera que se evita que éstas reboten o atraviese el material. Se observa que los valores obtenidos son en todos los casos sensiblemente inferiores a los recogidos en bibliografía.

D. ESTUDIO DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO

Con el objetivo de disponer de información aproximada sobre el aislamiento proporcionado por los aislantes de celulosa, se realizaron determinaciones en base a un método interno que se basa en un diseño de dos cámaras reverberantes inspirado en la norma UNE-ISO 140-1, pero adaptada para realizar ensayos a escala reducida.

Para estimar aislamiento acústico, se mide la presión sonora (L_{eqT}) que provoca un ruido rosa en el local receptor (emisión a una intensidad cercana a 90 dBA), tanto para el blanco (sin muestra entre el local emisor y receptor, L_{eqT0}), como para las diferentes muestras una vez colocadas entre el local emisor y el receptor (L_{eqT}), en las bandas de tercio de octava entre 250 Hz y 8 kHz.

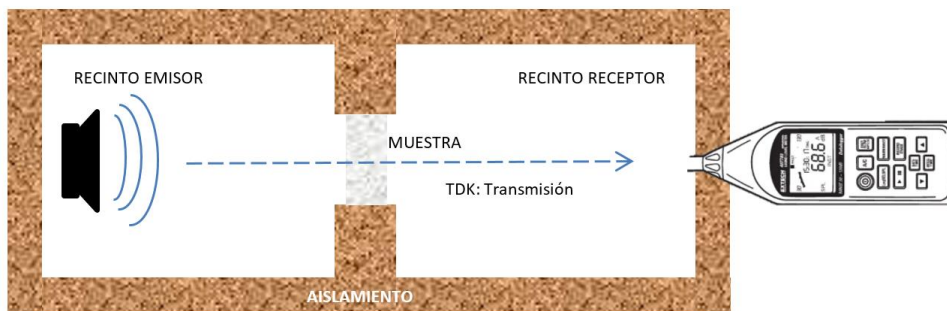


Figura 14. Esquema fundamento método interno

Se calcula el aislamiento acústico específico global de cada muestra como:

$$D = L_{eqT0} - L_{eqT}$$

Para el cálculo de aislamiento acústico global (D_{global}) se hace la media de todos los aislamientos acústicos específicos de cada una de las frecuencias, de manera que se obtiene un valor para cada material que permite su comparación, de modo que cuanto mayor es el valor del aislamiento acústico global de un material, mayor aislamiento acústico presenta el mismo.

Para las muestras de celulosa, al tratarse de un material suelto a granel, para contener el producto entre las cámaras, se diseñó un marco de EPS de 80 mm de espesor con un par de rejillas de cada lado.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos



Figura 15. Detalle marcos para contener la celulosa y equipo de medida

Tabla 8. Resultados ensayo aislamiento acústico aislante celulosa pasada por máquina de insuflar

	Frecuencia (Hz)	250	500	1000	2000	4000	8000	
Medición sin material entre foco emisor y receptor	Réplica 1	91,00	94,70	96,60	90,20	97,40	95,40	
	Réplica 2	89,90	94,60	96,30	90,10	97,40	95,30	
	Réplica 3	90,90	94,70	96,40	90,10	97,40	95,40	
	Réplica 4	91,60	94,90	95,90	90,20	97,20	95,40	
	Réplica 5	90,90	94,70	96,30	90,10	97,30	95,30	
	Promedio	90,86	94,72	96,30	90,14	97,34	95,36	94,12
	Desviación	0,61	0,11	0,25	0,05	0,09	0,05	0,20
Aislante celulosa pasada por máquina de insuflar 65 kg/m ³	Réplica 1	80,70	82,90	80,10	66,00	63,90	53,00	
	Réplica 2	80,00	82,70	79,90	65,70	63,80	52,90	
	Réplica 3	80,80	82,70	80,10	65,90	63,80	53,00	
	Réplica 4	79,20	82,90	79,90	65,60	63,90	52,80	
	Réplica 5	80,40	82,00	79,80	65,50	63,90	53,10	
	Promedio	80,22	82,64	79,96	65,74	63,86	52,96	70,90
Aislamiento	10,64	12,08	16,34	24,40	33,48	42,40	23,22	

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Tabla 9. Resultados ensayo aislamiento acústico aislante celulosa sin pasar por máquina de insuflar

	Frecuencia (Hz)	250	500	1000	2000	4000	8000	
Medición sin material entre foco emisor y receptor	Réplica 1	86,40	91,30	93,60	87,00	94,40	90,20	
	Réplica 2	86,00	90,90	93,50	87,50	94,50	90,10	
	Réplica 3	86,10	91,10	93,60	87,60	94,40	90,20	
	Réplica 4	86,10	91,30	93,40	87,60	94,20	90,10	
	Réplica 5	86,00	91,00	93,50	87,20	94,50	90,10	
	Promedio	86,12	91,12	93,52	87,38	94,40	90,14	90,45
	Desviación	0,16	0,18	0,08	0,27	0,12	0,05	0,15
Aislante celulosa sin pasar por máquina de insuflar 65 kg/m ³	Réplica 1	80,70	80,70	74,40	62,40	61,10	48,40	
	Réplica 2	80,30	80,30	74,20	61,70	61,00	48,20	
	Réplica 3	80,70	80,70	74,40	62,40	61,00	48,40	
	Réplica 4	80,70	80,70	74,30	62,30	61,00	48,40	
	Réplica 5	80,70	80,70	74,30	62,40	60,90	48,40	
	Promedio	80,62	74,32	62,24	61,00	61,00	48,36	64,59
Aislamiento	5,50	16,80	31,28	26,38	33,40	41,78	25,86	

Tabla 10. Resultados ensayo aislamiento acústico aislante celulosa papel blanco

	Frecuencia (Hz)	250	500	1000	2000	4000	8000	
Medición sin material entre foco emisor y receptor	Réplica 1	89,3	90,7	88,7	87,4	92,4	94,2	
	Réplica 2	89,9	90,8	88,6	87,5	92,4	94,4	
	Réplica 3	89,5	90,8	88,6	87,4	92,4	94,4	
	Réplica 4	89,7	91,0	88,6	87,4	92,4	94,3	
	Réplica 5	89,5	90,6	88,7	87,4	92,3	94,4	
	Promedio	89,6	90,8	88,6	87,4	92,4	94,3	90,5
	Desviación	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1
Aislante de celulosa papel blanco 65 kg/m ³	Réplica 1	83,0	85,0	81,7	77,4	81,1	77,3	
	Réplica 2	83,2	85,2	81,7	77,4	81,1	77,4	
	Réplica 3	82,6	84,9	81,7	77,4	81,3	77,1	
	Réplica 4	83,2	85,0	81,8	77,5	81,1	77,4	
	Réplica 5	83,0	85,0	81,7	77,6	81,1	77,3	
	Promedio	83,0	85,0	81,7	77,5	81,1	77,3	80,9
Aislamiento	6,6	5,8	6,9	10,0	11,2	17,0	9,6	

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Se puede comprobar como la celulosa de papel blanco, que posee un menor grado de desfibramiento, es menos eficaz a la hora de proporcionar aislamiento acústico en comparación con las otros aislantes de celulosa. El efecto de pasar la celulosa por la máquina de insuflar no conlleva cambios significativos en el comportamiento del producto.

A partir de los valores de resistividad al flujo de aire (r), y el espesor del aislante, se puede estimar el coeficiente de absorción del material situado frente a un soporte rígido (como por ejemplo una pared rígida) con la posibilidad opcional de contar con un espacio de aire entre el absorbente y el soporte si procede. Para ello, puede emplearse el modelo de *Allard & Champoux* [14] [15] [16].

En este caso, se estableció en cero la distancia entre el aislante y el soporte rígido, y se fijaron un ángulo de incidencia normal y un espesor de 250 mm para realizar las comparativas.

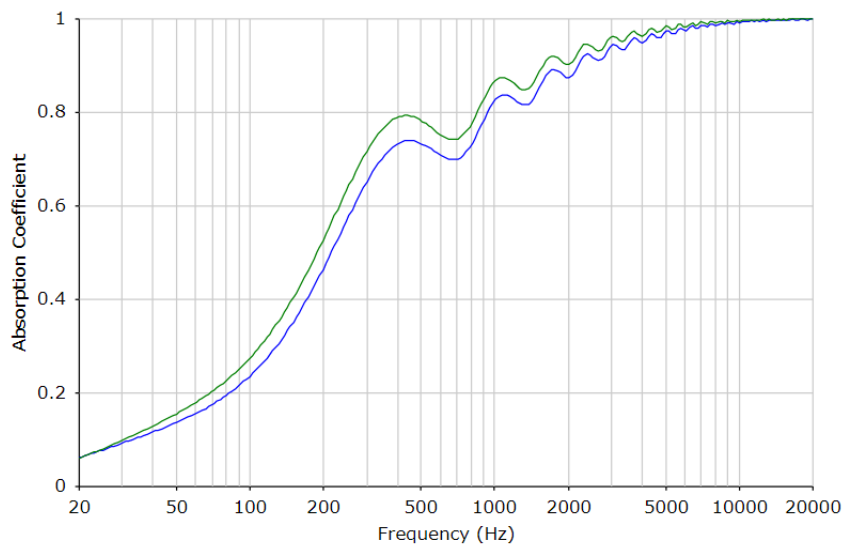


Figura 16. Simulación coeficiente absorción aislante celulosa pasado por máquina de insuflar (azul) versus aislante de celulosa papel blanco reciclado (verde)

También se realiza una simulación de aislante de celulosa pasado por máquina en comparación con un aislante de celulosa comercial, con valores de resistividad al flujo de aire (r) de 44 kPa.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

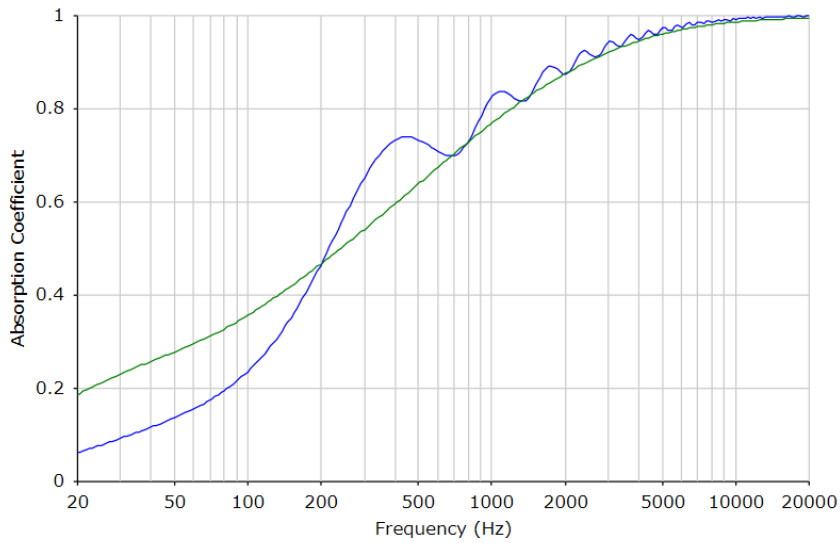


Figura 17. Simulación coeficiente absorción aislante celulosa pasado por máquina de insuflar(azul) versus aislante de celulosa comercial (verde)

Cabe considerar, que, entre otras limitaciones de la simulación, ésta no contempla la densidad del material. Es por ello, que los valores deben tratarse con precaución y pueden diferir ligeramente en la realidad.

E. PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA

Los materiales más transpirables contribuyen al confort de los ocupantes, ya que permiten que la humedad se seque del material y evita que se acumule con el tiempo. En este sentido, los aislantes procedentes de fuentes renovables exhiben un mejor comportamiento que los aislantes inorgánicos y con los aislantes con origen petroquímico [17].



Figura 18. Detalle probetas y ensayo de permeabilidad al vapor de agua

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Se realizan ensayos para la determinación del factor de resistencia a la difusión de vapor de agua según la norma EN 12086 (condición climática A; 23-0/50, con medidas cada 24 horas). En este caso se realizaron ensayos en los extremos del rango de aplicación de las densidades de aplicación (25 y 65 kg/m³).

Los resultados de este ensayo se expresan en base a los siguientes parámetros:

- Coeficiente de transmisión de vapor de agua, WDD. Expresado en gramos por metro cuadrado por 24 horas.
- Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua, μ (adimensional).
- Espesor de la capa de aire equivalente a la difusión del vapor de agua, Sd. Expresado en metros

El factor de resistencia a la difusión del vapor de agua indica la magnitud de la resistencia del producto al vapor de agua con relación a una capa de aire estacionario del mismo espesor a la misma temperatura. Se expresa mediante la letra μ , es adimensional y se calcula como el cociente formado por la permeabilidad al vapor de agua del aire y la permeabilidad al vapor de agua del material o producto homogéneo.

$$\mu = \frac{\delta_{aire}}{\delta_{material}}$$

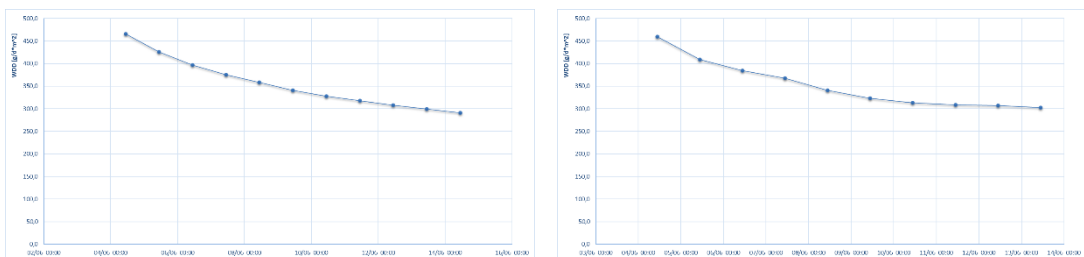


Figura 19. Detalle coeficiente transmisión vapor de agua (WDD) aislante celulosa densidad 25 kg/m³

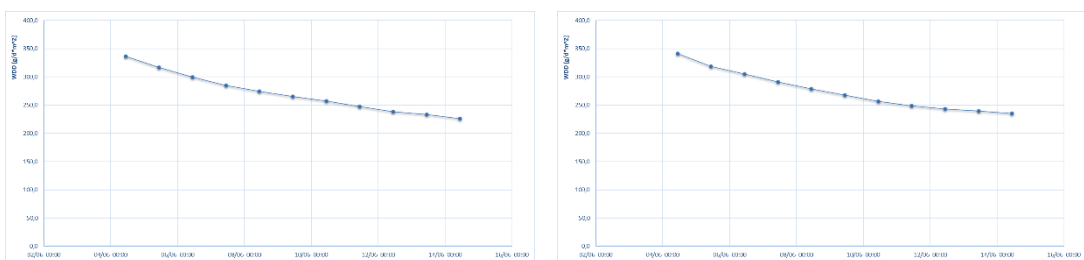


Figura 20. Detalle coeficiente transmisión vapor de agua (WDD) aislante celulosa densidad 65 kg/m³

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos
Tabla 11. Resultados ensayo permeabilidad al vapor de agua

Densidad (kg/m ³)	25	65
WDD (g/m ² /24 h)	310	244
Sd (m)	0,054	0,072
μ	1,8	2,4

La permeabilidad al vapor de agua puede variar entre otros según la densidad del material, el fabricante o las condiciones de instalación. No obstante, independientemente de la densidad ensayada, se obtienen valores que indican que se trata de un material altamente permeable.

F. ESTUDIO COMPORTAMIENTO REACCIÓN AL FUEGO

De acuerdo con la norma de referencia de los aislantes de celulosa a granel, la caracterización de su comportamiento frente al fuego se determina realizando el ensayo de pequeño quemador según la UNE EN ISO 11925-2:2021.

Previo al ensayo, las 6 probetas a ensayar se acondicionan a una temperatura de (23 ± 2) °C y una humedad relativa del (50 ± 5) % tal y como se indica en la Norma EN 13238.

Procedimiento de ensayo

Se comprueba la distancia del quemador a la muestra con el útil espaciador del quemador para la aplicación de llama en superficie. Se enciende el quemador en posición vertical y se espera a la estabilización de la llama. Se ajusta el quemador con el útil de altura de llama para verificar la llama. Una vez ajustada la llama, se inclina el quemador a 45° respecto a su eje vertical. Se empuja el quemador hasta el punto de aplicación de llama, en este caso para la aplicación de la superficie expuesta es a 40 mm sobre el borde inferior de esta. Se pone en marcha el cronómetro y se aplica 30s la llama sobre la dicha superficie. La duración total del ensayo son 60 segundos, transcurrido este tiempo se apaga la inflamación si se hubiera producido, y se comprueba si se ha alcanzado la línea de medición.

Expresión de los resultados

Se registra la posición de aplicación de la llama. Para cada muestra de ensayo se registra:

- Si se produce ignición
- Si la parte superior de la llama alcanza 150 mm sobre el punto de aplicación y el instante en el que ocurre (s).
- Si se produce ignición del papel de filtro debido a la presencia de partículas o gotas en llamas.
- Observaciones del comportamiento físico de la muestra de ensayo.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porososCondiciones particulares de la muestra

Al tratarse de un material de relleno celulósico, se utiliza el portaprobetas para materiales de relleno tal y como indica la propia norma.

Además, se deberá tener en cuenta:

- Cuando se fabrican probetas para el ensayo, la superficie de las probetas de material de relleno suelto debe ser tan uniformes como sea posible.
- Se debe usar un pasador de alambre, para retener la probeta si los materiales caen desde el portaprobetas. Se debe usar el material de relleno suelto en su sitio. El pasador tendrá la forma del arpa.
- Si el material es una mezcla de granos de diferentes tamaños, la caída de pequeñas partículas desde la superficie central abierta no justifica el uso del arpa.
- Se considera suficiente realizar los ensayos aplicando la llama sobre la superficie del material inflamable. No son necesarios ensayos aplicando la llama sobre los bordes del material inflamable.

Resultados

Se realiza el ensayo de la muestra referenciada como “blanco” tal y como se detalla anteriormente, el resultado es que no hay inflamación en la muestra.

Se decide aumentar el tiempo de exposición de la llama a 60 segundos y posteriormente a 90 segundos obteniendo como resultado no inflamación en ambos casos.

Al no obtener resultados concluyentes que nos permita discriminar entre las distintas muestras, se propone un método alternativo, basado en el método de ensayo para el transporte de mercancías peligrosas de las Naciones Unidas, concretamente en la prueba N.1 método de prueba para las sustancias que entran fácilmente en combustión, que nos permitirá medir varios parámetros, dando lugar a un análisis más exhaustivo de la muestra con respecto a su comportamiento frente a la reacción al fuego y que nos posibilite extraer conclusiones más relevantes.

Método adaptado

Se acondicionan las muestras a una temperatura de (23 ± 2) °C y una humedad relativa del (50 ± 5) %. Se utiliza como bastidor un perfil de acero inoxidable en U de 15 mm en su cara interna y 100 mm de longitud (ver imagen Figura 21)



"AISMAT" - Investigación y desarrollo de materiales porosos



Figura 21. Bastidor

Se enciende la llama de butano y se espera hasta que alcance la estabilización y 40 mm de longitud.

Se rellena el perfil con 1,5 gramos de muestra y se pesa, posteriormente se le aplica la llama en el borde exterior del perfil en U, tal y como se muestra en las fotografías adjuntas, durante un tiempo de 360 segundos.

Se mide la propagación (mm) y el tiempo (s) que la muestra permanece inflamada tras retirar el tubo quemador o la combustión progresiva de la misma.

Se anotarán los siguientes sucesos:

- Tiempo (s) de inflación con llama tras retirar el tubo quemador
- Tiempo (s) de combustión progresiva tras retirar el tubo quemador.
- Propagación de la muestra (por inflamación o combustión progresiva) expresada en mm.
- Masa de la muestra tras el ensayo (g)

Se calcula:

- Velocidad de combustión/inflación (mm/s)
- Pérdida de masa de la muestra (%)

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Resultados del ensayo

Tabla 12. Resultados ensayo adaptado reacción al fuego

Muestra	Tiempo de combustión progresiva (s)	Distancia recorrida (mm)	Masa Inicial de la muestra(g)	Masa final muestra(g)	Pérdida de masa %	Velocidad de combustión (mm/s)
Blanco	360	40	1,5421	1,3759	10,8	0,11
1	0	15	1,5144	1,446	4,5	0,04
2	0	16	1,5072	1,4373	4,6	0,04
3	0	15	1,5427	1,4772	4,2	0,04
4	0	20	1,5147	1,4276	5,8	0,06
5	0	15	1,5242	1,4631	4,0	0,04
6	0	17	1,5684	1,4995	4,4	0,05
7	0	14	1,5596	1,4977	4,0	0,04
8	0	17	1,5124	1,4282	5,6	0,05
9	0	15	1,5717	1,4883	5,3	0,04
10	0	14	1,5098	1,4433	4,4	0,04
11	0	15	1,5895	1,4878	6,4	0,04
12	0	18	1,547	1,4649	5,3	0,05
13	0	17	1,5663	1,4804	5,5	0,05
14	0	16	1,5328	1,4538	5,2	0,04
15	0	15	1,5725	1,5054	4,3	0,04
16	0	13	1,5932	1,5085	5,3	0,04
17	0	16	1,5361	1,481	3,6	0,04
18	0	15	1,5625	1,513	3,2	0,04
19	0	15	1,5597	1,5139	2,9	0,04
20	0	12	1,5138	1,4078	7,0	0,03
21	0	14	1,5636	1,4409	7,8	0,04
22	0	15	1,5628	1,4871	4,8	0,04
23	0	18	1,5715	1,5142	3,6	0,05
24	0	16	1,5552	1,4821	4,7	0,04
25	0	15	1,5481	1,4748	4,7	0,04
26	0	14	1,5762	1,5354	2,6	0,04

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

La muestra referenciada como “blanco” sí que presenta una combustión progresiva de 360 segundos, tras los 360 segundos de aplicación de la llama, obteniendo una velocidad de combustión de 0,11 mm/s, un 39% más que la media de las velocidades de las muestras de la 1 a la 26. Por el contrario, en las muestras referenciadas del 1 al 26 no se aprecian diferencias significativas, la distancia recorrida medida es aquella que se produce mientras la muestra está en contacto con la llama, tras la retirada del tubo quemador ninguna de ellas presenta combustión progresiva como ocurría en la muestra referenciada como “blanco”.

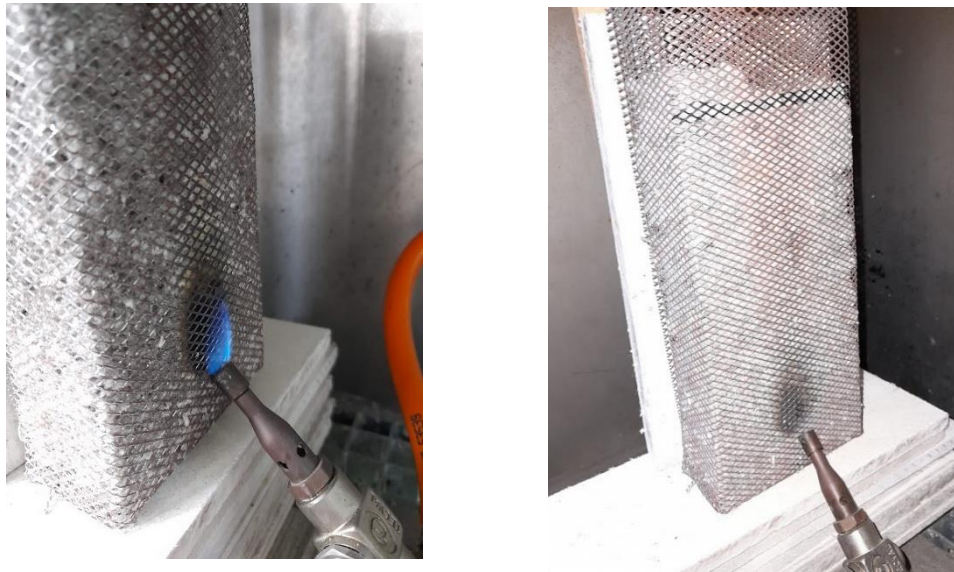


Figura 22. Ensayo pequeño quemador. Aplicación de la llama (izquierda) y tras la finalización del ensayo



Figura 23. Ensayo adaptado. Aplicación de la llama (izquierda) y tras la finalización del ensayo

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

G. RESISTENCIA A LA FORMACIÓN DE HONGOS

Preparación muestras para test microbiológicos

Con el objetivo de disponer de probetas adecuadas para su ensayo en lo relativo a su resistencia a la formación de hongos, se preparan muestras de 50 mm x 50 mm mediante prensada. Para ello, se emplearon moldes de madera en combinación papeles antiadherentes. Una vez se introduce en el molde la cantidad adecuada de celulosa o celulosa aditivada (1 gramo), se ejerce una presión de $10 \cdot 10^4$ N durante 10 minutos.



Figura 24. Montaje molde para prensar muestras.

Se preparan diferentes muestras, con el objetivo de comprobar el efecto de las sales de boro y el ácido bórico en la actividad microbiológica del aislante de celulosa. En concreto se prepara una muestra de referencia (sin aditivar) y nueve combinaciones de papel de celulosa de fabricación propia con diferentes proporciones de bórax y ácido bórico.

Tabla 13. Combinaciones de celulosa aditivada

Ejecución	Contenido (%)	Ratio (ac.bórico:bórax)	Preparación probetas (g)			
			Celulosa (g)	Contenido sales (g)	Ácido bórico (g)	Bórax (g)
Blanco	-	-	-	-	-	-
1	10	0,5	52,065	5,21	1,74	3,47
2	17,5	0,35	52,065	9,11	2,36	6,75
3	25	0,35	52,065	13,02	3,37	9,64
5	25	0,2	52,065	13,02	2,17	10,85
6	25	0,5	52,065	13,02	4,34	8,68
7	17,5	0,5	52,065	9,11	3,04	6,07
8	17,5	0,2	52,065	9,11	1,52	7,59
9	10	0,2	52,065	5,21	0,87	4,34
10	10	0,35	52,065	5,21	1,35	3,86

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Figura 25. Detalle muestras prensadas

Resistencia al crecimiento de hongos según adaptación de la norma ISO 15101-1**A. Metodología****1. Cepas de ensayo**

La determinación de la resistencia de la muestra a las siguientes cepas de hongos:

- *Aspergillus niger* van Tieghem ATCC 6275
- *Penicillium funiculosun* Thom CMI 114933
- *Paecilomyces variotii* Bainier ATCC 18502
- *Gliocadium virens* Miller et al. ATCC 9645
- *Chaetomium globosum* Kunze: Fries ATCC 6205

Los cultivos stock son proporcionados por la CECT (Colección Española de Cultivos Tipo).

2. Resistencia frente a hongos

Las muestras de ensayo son puestas en contacto con la mezcla de esporas de los hongos de ensayo en presencia de un medio nutritivo completo (con una fuente de carbono) en un ambiente de H.R. $\geq 95\%$, de forma que los hongos pueden desarrollarse sobre las probetas, aunque no contengan ningún elemento nutritivo, los productos de su metabolismo pueden atacar el material de ensayo metabolizando el medio agar nutritivo.

Toda inhibición del crecimiento sobre las muestras de ensayo o en medio agar nutritivo (zona de inhibición) muestra la actividad fungistática del material o la presencia de un tratamiento fungicida.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Con el fin de mostrar un efecto cualitativo básico de un biocida en el material de ensayo, se incluyen probetas libres de fungicida que se emplean como material comparativo para la evaluación final y no la madera de haya o albura de pino. Así pues, solo si estas probetas libres de biocidas muestran mayor crecimiento que las muestras que contienen los biocidas, se puede determinar cualitativamente la eficacia fungistática o fungicida del material de ensayo tratado.

La viabilidad de la suspensión de esporas se comprueba inoculando una pieza de papel de filtro blanco esterilizado en medio de crecimiento completo. También se lleva a cabo la viabilidad de las esporas de cada uno de los hongos de ensayo por separado en medio de crecimiento PDA (Patata Dextrosa Agar).

2.1. Preparación de las muestras

Seis probetas, de 50 mm × 50 mm × 2 mm, por cada uno de los tratamientos son tomadas para ser inoculadas con la mezcla de esporas de los hongos.

2.2. Preparación de la suspensión de esporas

Cada uno de los hongos de ensayo es incubado en tubos de ensayo inclinados hasta que, en el momento de esporulación, son sometidos a tres lavados consecutivos con 15 mL de una solución mineral-humectante para poder desprender y recuperar las esporas. El contenido obtenido es filtrado y la solución resultante es centrifugada a 3.000 r.p.m. durante 5 min. Se descarta el sobrenadante y el pellet es resuspendido con 25 mL de una solución mineral. Mediante las diluciones pertinentes se ajusta la concentración de esporas a una concentración de 10^6 esporas/mL.

La viabilidad de las esporas se comprueba incubando a 29 °C durante 5 días, una alícuota de la suspensión de esporas en un medio agar completo de crecimiento y en medio PDA.

2.3. Inoculación de las muestras de ensayo

Las probetas de ensayo son inoculadas con 0,1 mL de la suspensión de esporas mediante pulverización. Tras el sellado de las placas, las probetas son incubadas a (28 ± 2) °C a una H.R. $\geq (95 \pm 4)$ %, durante al menos 4 semanas.

2.4. Evaluación de resultados

Se realiza un examen visual (o mediante microscopio estereoscópico hasta 50 aumentos) de las probetas de ensayo una vez finalizado el período de incubación, determinando la intensidad del crecimiento de los hongos a través de la siguiente tabla de evaluación tomada de la norma ISO 15101-1:

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Tabla 14. Criterios de clasificación

{A1▶ } Categoría { ◀A1} BA	<i>Intensidad de crecimiento en relación con material comparativo</i>
0	No presenta moho visible en la superficie de la probeta ni con un microscopio de luz reflejada de ampliación × 50
1	Crecimiento de moho no visible o apenas visible, pero claramente visible con un aumento de × 50
2	Crecimiento claramente visible al ojo humano - considerablemente menor que el material comparativo
3	Crecimiento claramente visible al ojo humano de igual o mayor crecimiento que el material comparativo

B. Resultados

Tabla 15. Resultados resistencia crecimiento hongos

	Réplica	Descripción	Evaluación
Tratamiento 1	1	Sin crecimiento.	0
	2	Crecimiento en probeta 80%.	3
	3	Crecimiento en probeta 75%.	3
	4	Sin crecimiento en probeta. Crecimiento en bordes.	1
	5	Crecimiento en probeta 80-90%.	3
	6	Sin crecimiento en probeta. Crecimiento en bordes.	1

	Réplica	Descripción	Evaluación
Tratamiento 2	1	Sin crecimiento en la probeta.	0
	2	Sin crecimiento en la probeta. Contaminación fúngica con halo alrededor.	0
	3	Sin crecimiento en la probeta.	0
	4	Sin crecimiento en la probeta. Crecimiento en el borde.	0
	5	Sin crecimiento en la probeta. Crecimiento en el borde.	0
	6	Sin crecimiento en la probeta.	0

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

	Réplica	Descripción	Evaluación
Tratamiento 3	1	Sin crecimiento en la probeta.	0
	2	Sin crecimiento en la probeta.	0
	3	Sin crecimiento en la probeta.	0
	4	Sin crecimiento en la probeta.	0
	5	Sin crecimiento en la probeta.	0
	6	Sin crecimiento en la probeta.	0

	Réplica	Descripción	Evaluación
Tratamiento 5	1	Sin crecimiento en la probeta.	0
	2	Sin crecimiento en la probeta.	0
	3	Poco crecimiento en la probeta <5%.	2
	4	Sin crecimiento en la probeta, en los bordes si 10-20%.	2
	5	Crecimiento en probeta 70-80%.	3
	6	Crecimiento en probeta 70%.	3

	Réplica	Descripción	Evaluación
Tratamiento 6	1	Sin crecimiento en la probeta.	0
	2	Crecimiento 15-20% en la probeta.	2
	3	10% de crecimiento en la probeta.	2
	4	15% de crecimiento en los bordes de la probeta.	2
	5	Crecimiento en los bordes de la probeta.	1
	6	Crecimiento 5-10% en la probeta.	2

	Réplica	Descripción	Evaluación
Tratamiento 7	1	Sin crecimiento en la probeta.	0
	2	Sin crecimiento en la probeta.	0
	3	Crecimiento en probeta 20%.	2
	4	Sin crecimiento en la probeta.	0
	5	Sin crecimiento en la probeta.	0
	6	Crecimiento en la probeta 95%.	3

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

	Réplica	Descripción	Evaluación
Tratamiento 8	1	Crecimiento 20-30%.	2
	2	Crecimiento 20-30%.	2
	3	Sin crecimiento.	0
	4	Crecimiento 35%.	2
	5	Sin crecimiento.	0
	6	Sin crecimiento.	0

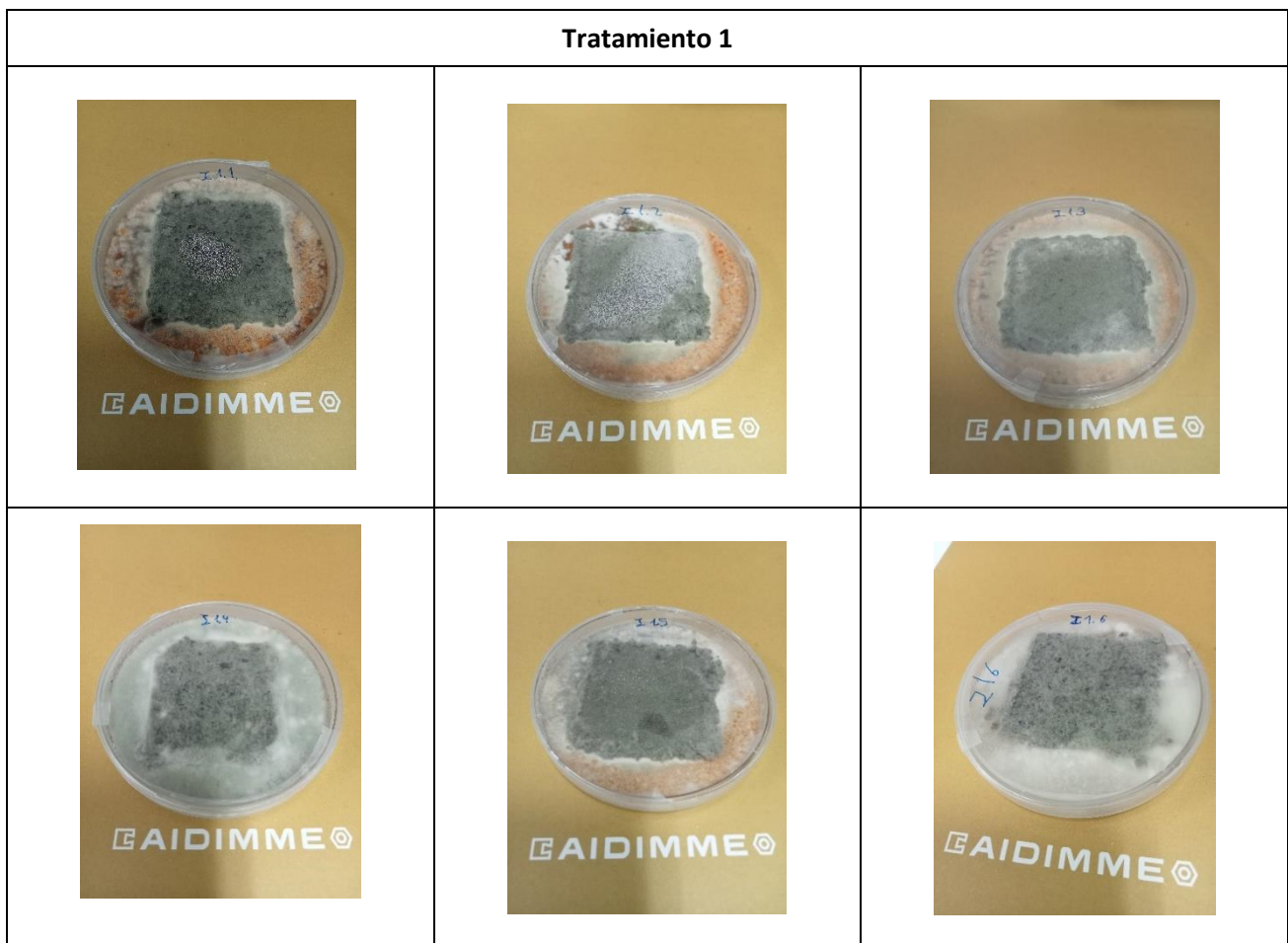
	Réplica	Descripción	Evaluación
Tratamiento 9	1	Sin crecimiento en la probeta.	0
	2	Crecimiento en probeta 40%.	2
	3	Crecimiento en probeta 30%.	2
	5	Crecimiento en la probeta 100%.	3
	6	Crecimiento en la probeta 95%. Halo de inhibición circular.	3

	Réplica	Descripción	Evaluación
Tratamiento 10	1	Crecimiento 90%.	3
	2	Crecimiento 100%.	3
	3	Crecimiento 100%.	3
	4	50% sobre probeta. En el agar una esquina sin crecimiento.	2
	6	Crecimiento en bordes de la probeta 20-30%.	2

	Réplica	Descripción	Evaluación
Control (sin biocida) como material comparativo	1	Crecimiento en probeta 100%.	3
	2	Crecimiento en probeta 100%.	3
	3	Crecimiento en probeta 100%.	3

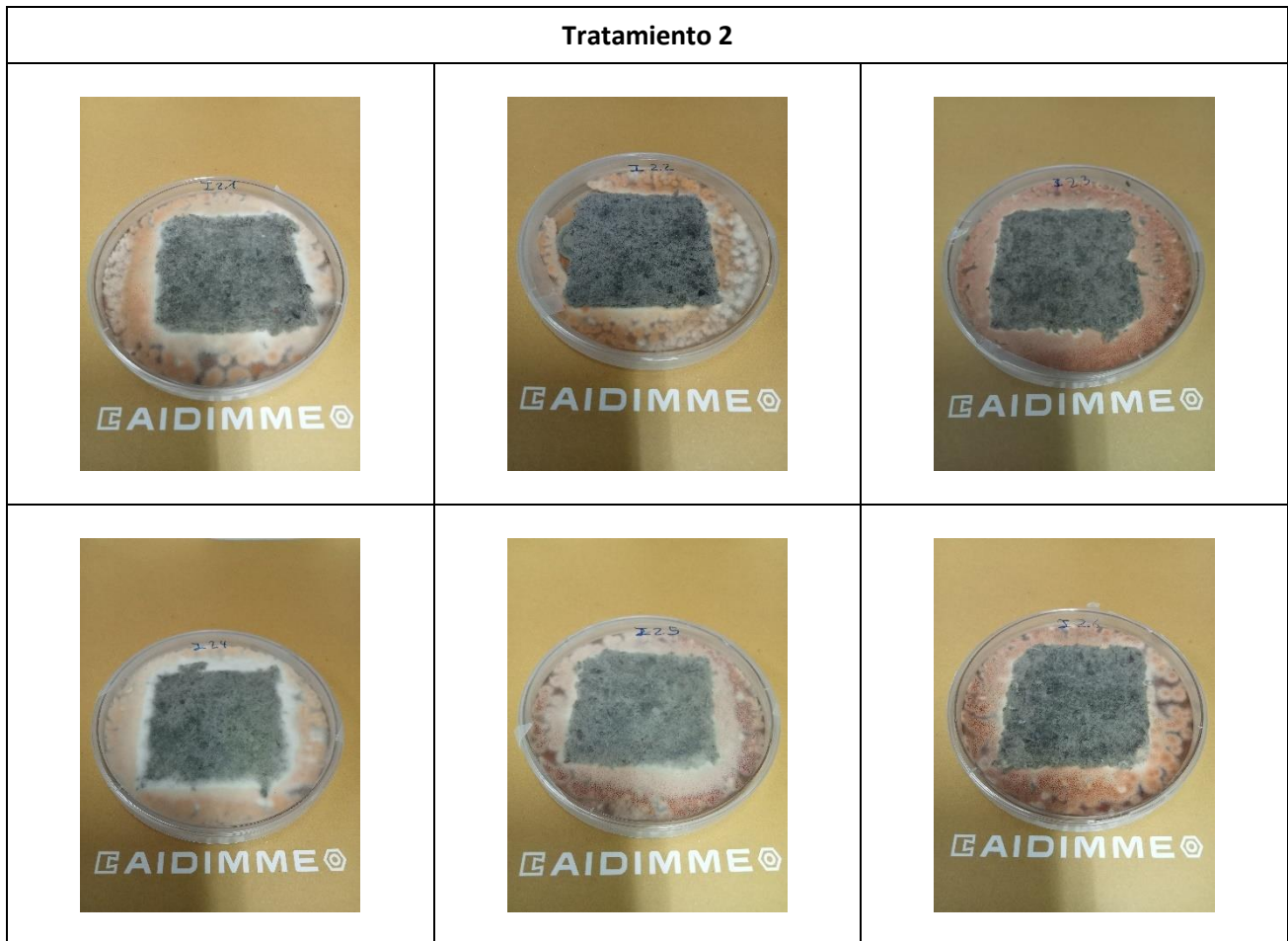
“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Tabla 16. Fotografía muestras tras ensayo (tratamiento 1)



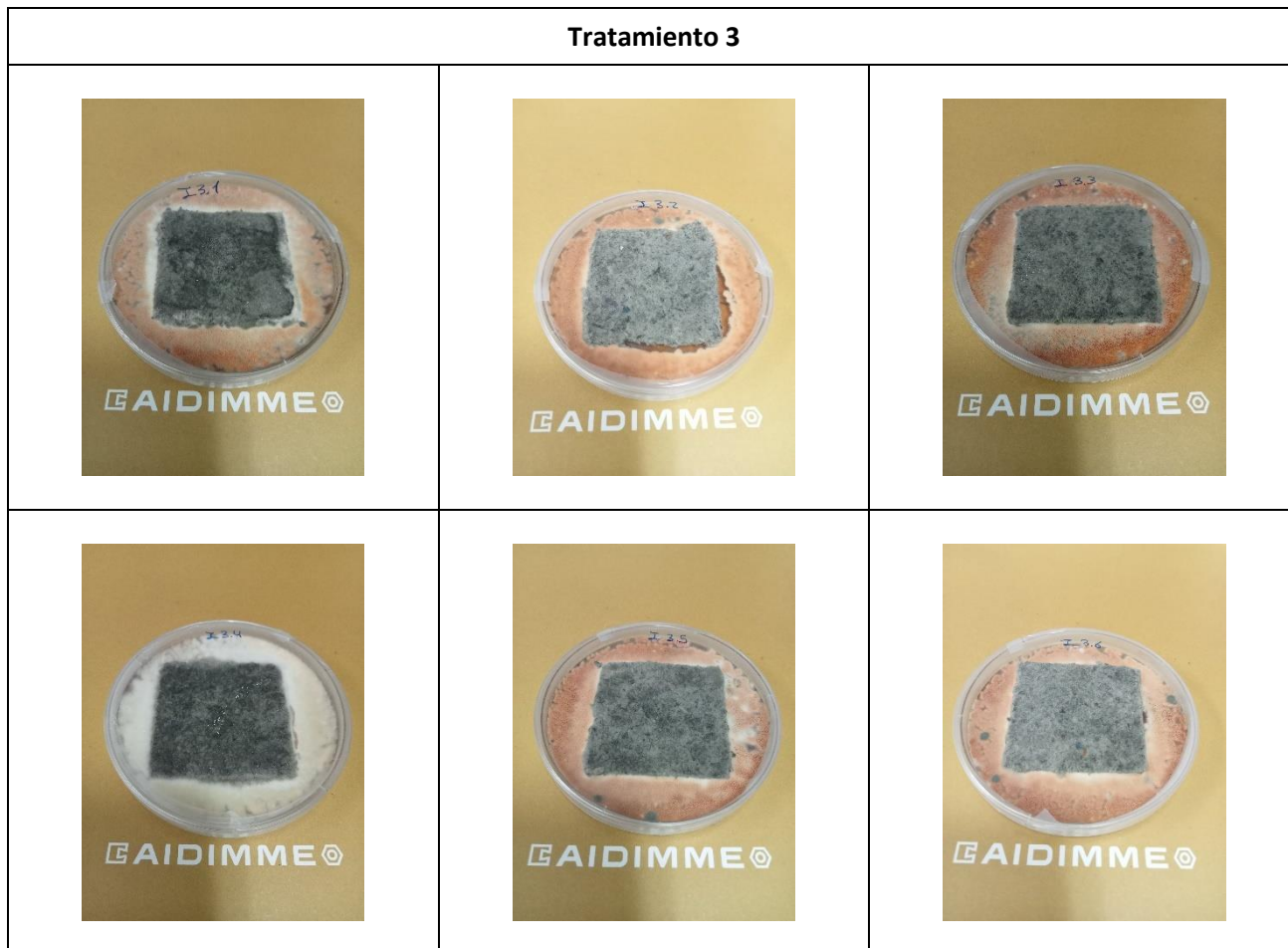
“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Tabla 17. Fotografía muestras tras ensayo (tratamiento 2)



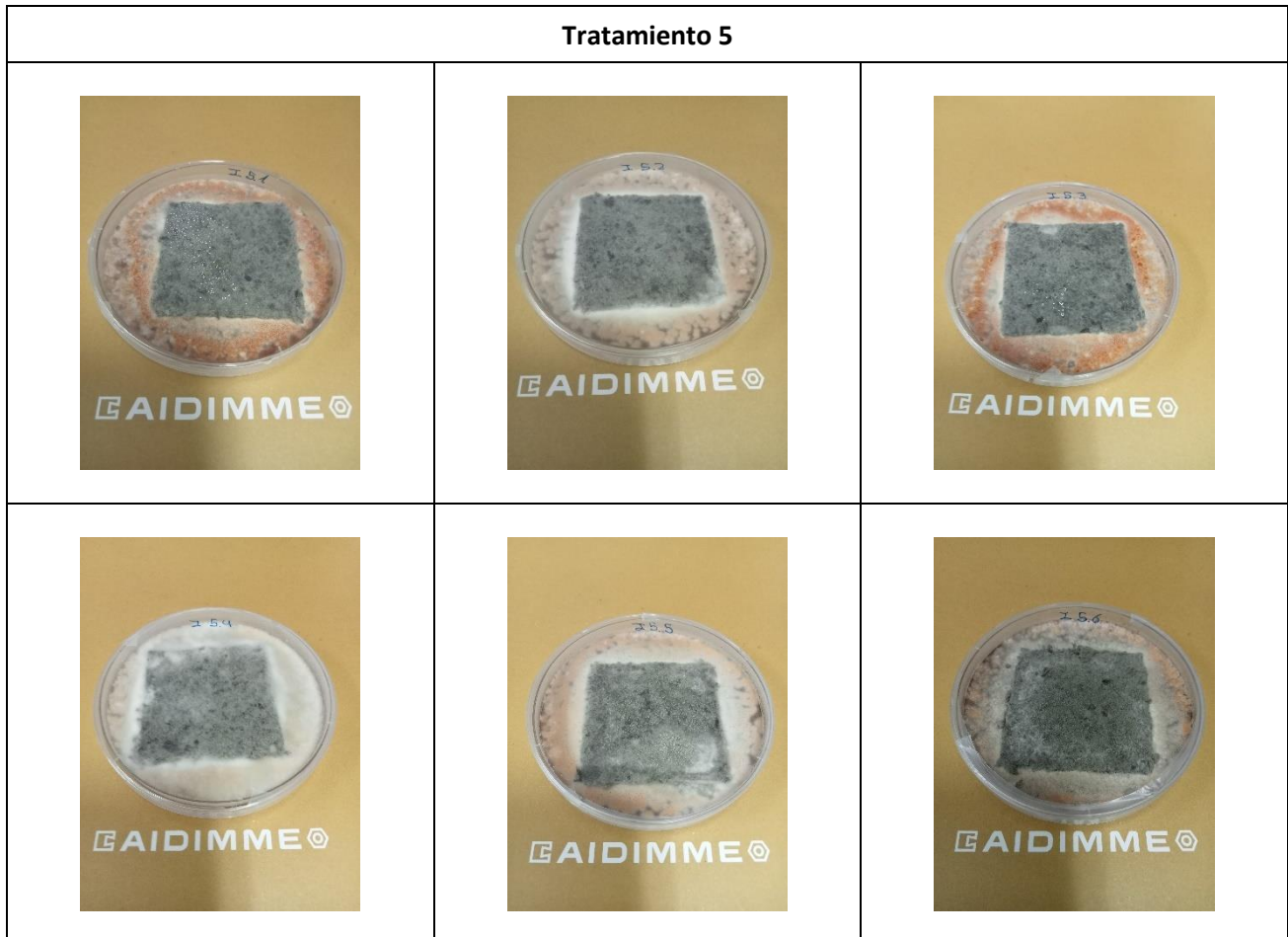
“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Tabla 18. Fotografía muestras tras ensayo (tratamiento 3)



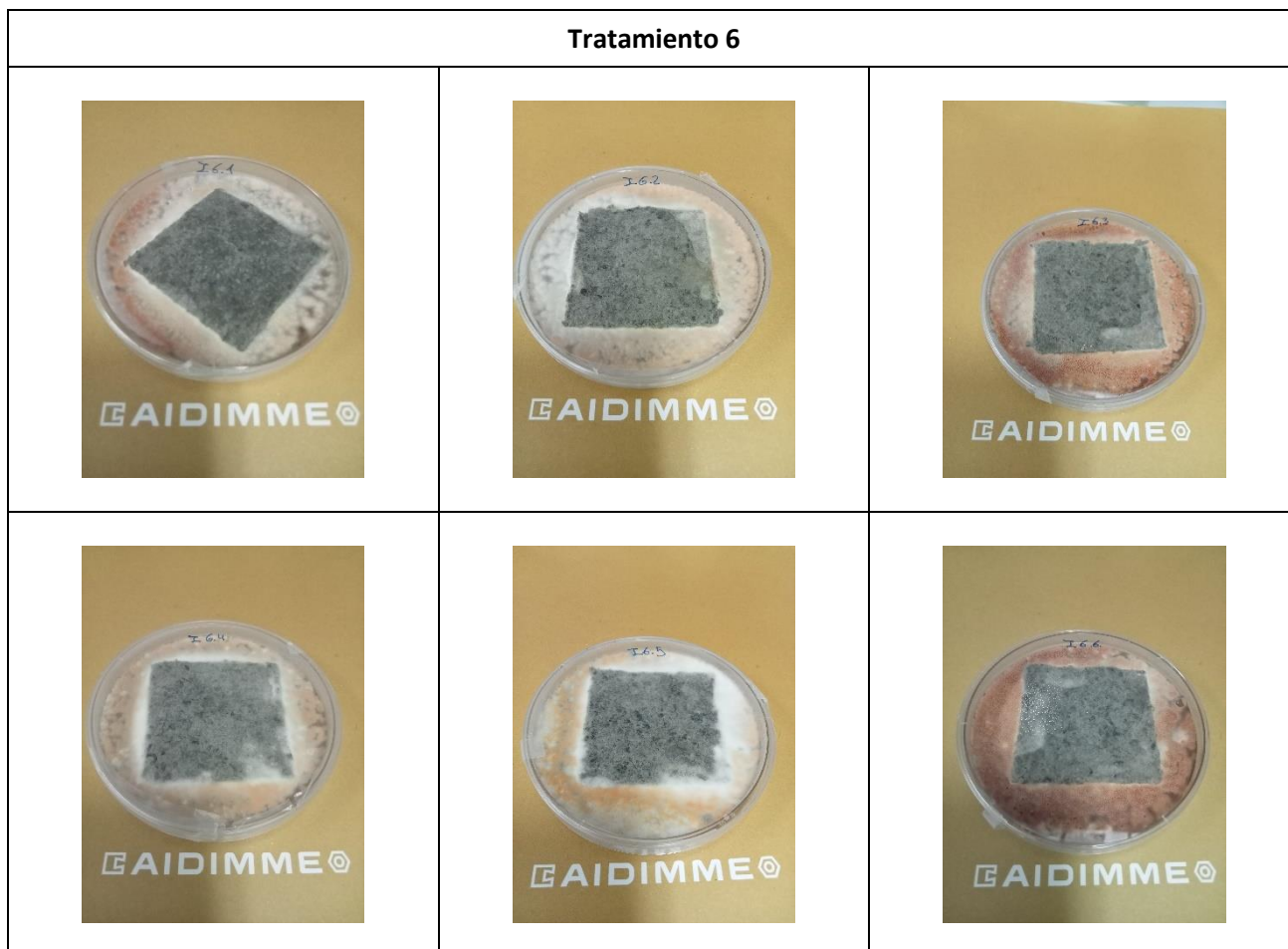
“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Tabla 19. Fotografía muestras tras ensayo (tratamiento 5)



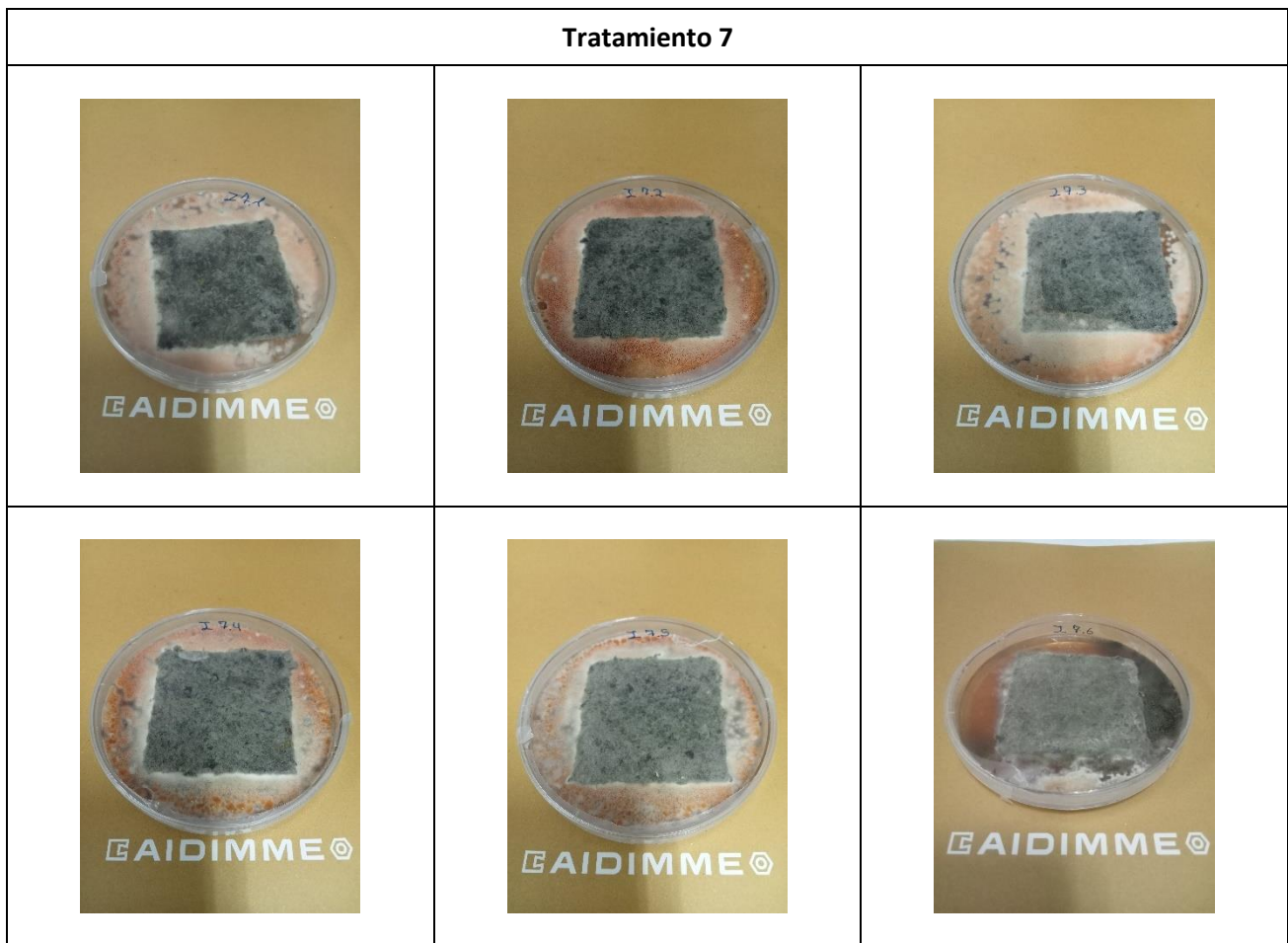
“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Tabla 20. Fotografía muestras tras ensayo (tratamiento 6)



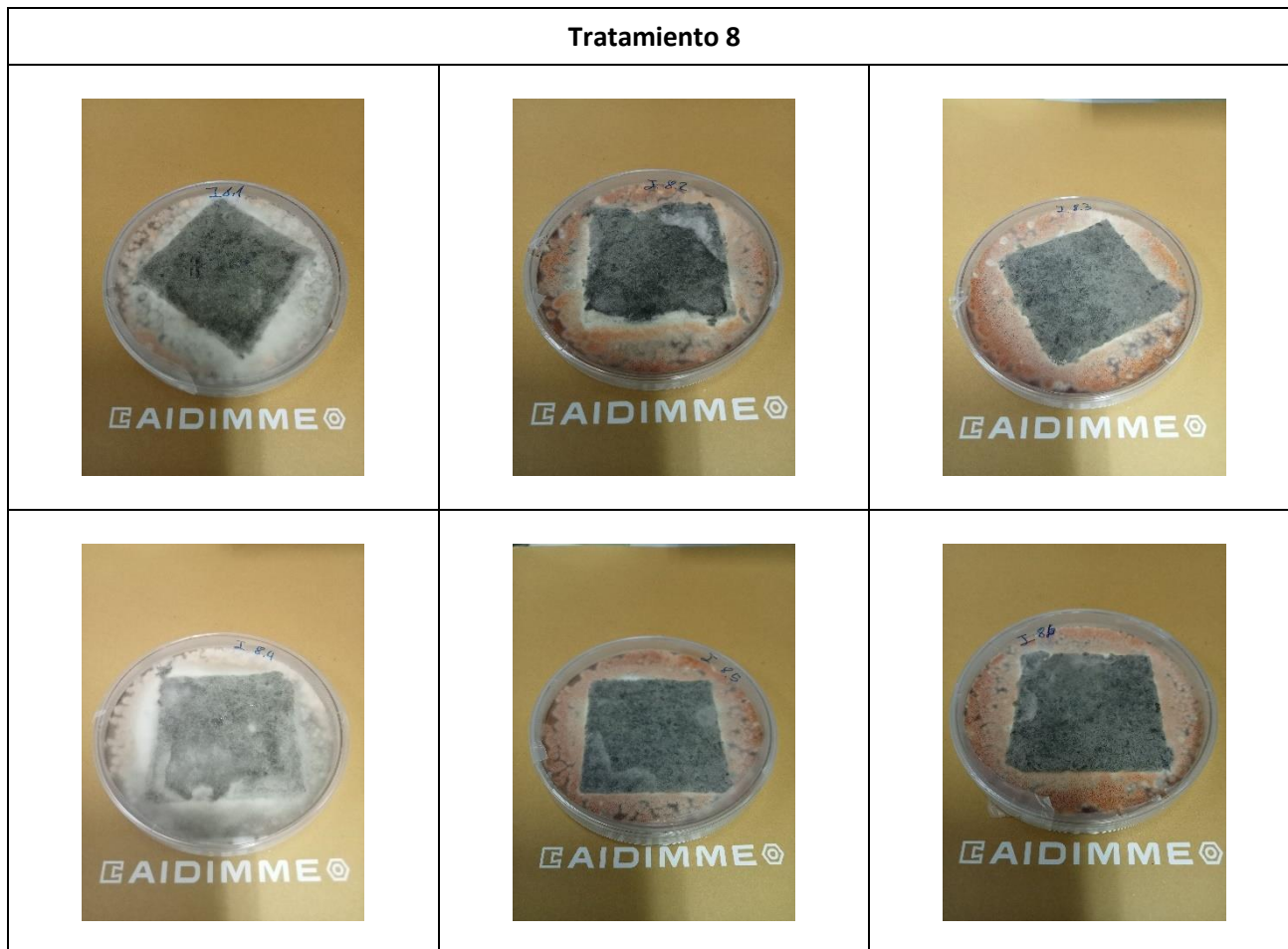
“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Tabla 21. Fotografía muestras tras ensayo (tratamiento 7)



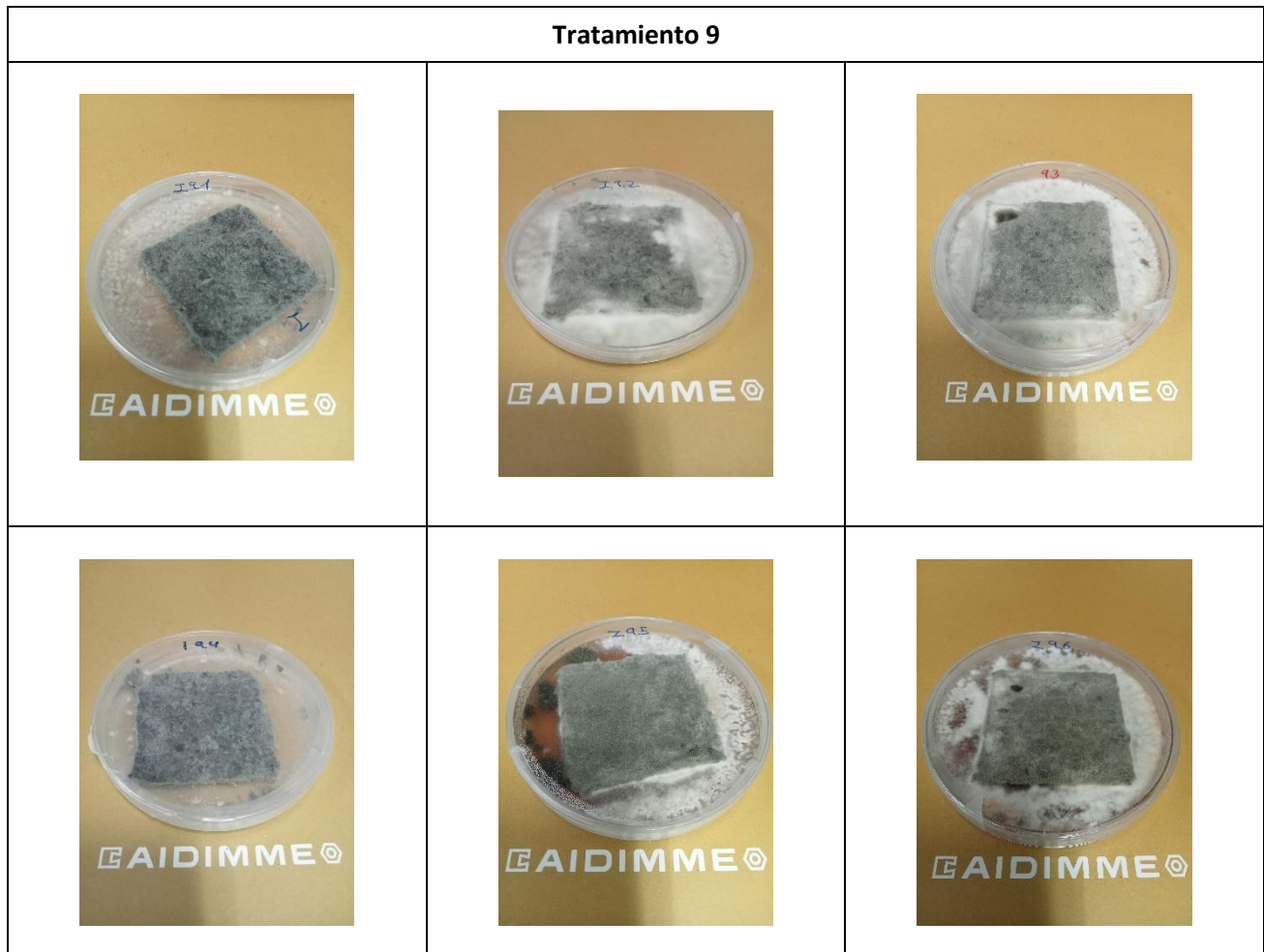
“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Tabla 22. Fotografía muestras tras ensayo (tratamiento 8)



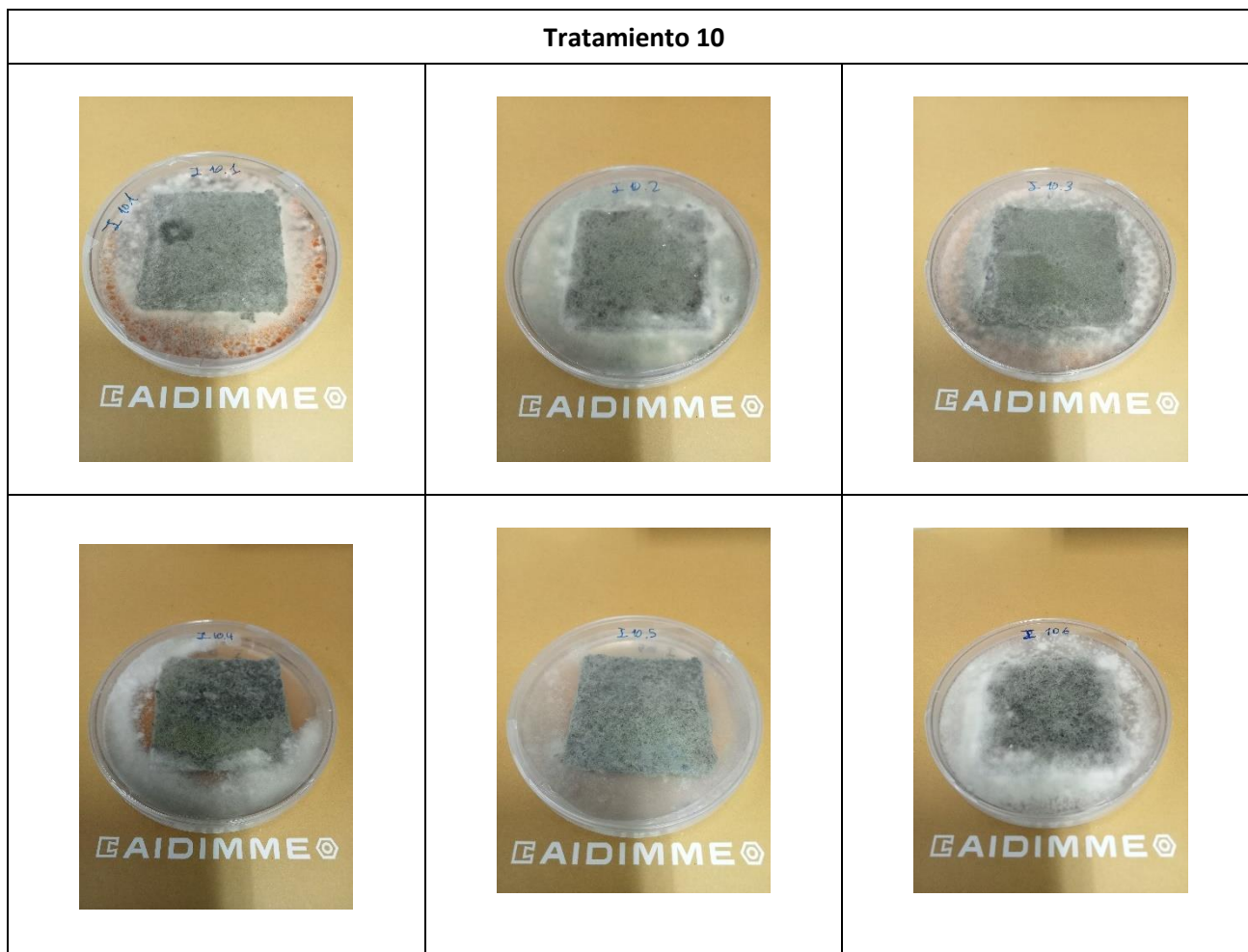
“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Tabla 23. Fotografía muestras tras ensayo (tratamiento 9)



“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Tabla 24. Fotografía muestras tras ensayo (tratamiento 10)

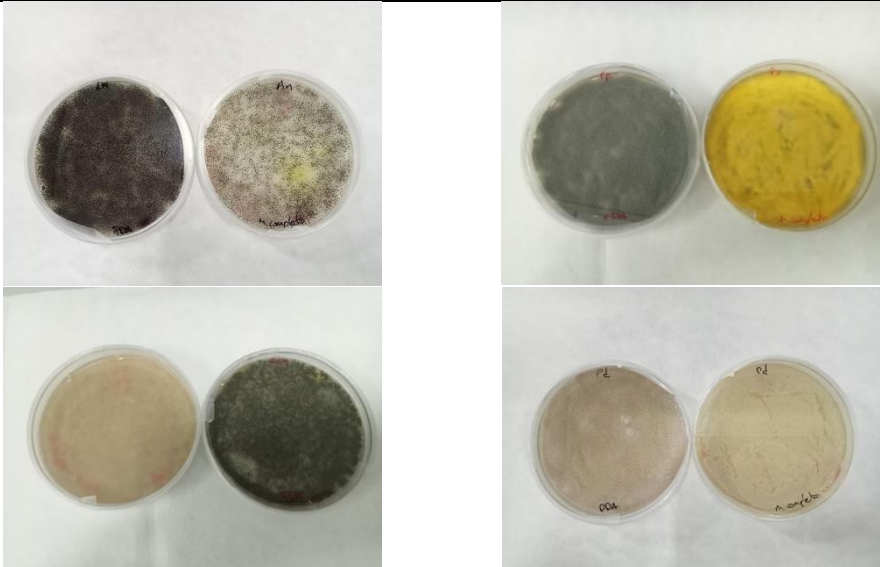


“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos


Tabla 25. Fotografía muestras controles tras ensayo



Tabla 26. Control viabilidad hongos

Viabilidad esporas	Evaluación
	<p>Correcto crecimiento de la suspensión de esporas de cada uno de los hongos de ensayo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <i>Aspergillus niger</i> <i>Penicillium funiculosum</i> <i>Chaetomium globosum</i> <i>Paecilomyces variotii</i> <i>Trichoderma virens</i>

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

			
			<p>Correcto crecimiento de la suspensión de esporas de ensayo</p>

C. Conclusiones

Tras la evaluación de las muestras se observa que los tratamientos 2 y 3 son los que mejores prestaciones ofrecen en cuanto a resistencia frente al crecimiento de hongos. A continuación, los tratamientos 7 y 8 ofrecerían una resistencia moderada y, por último, el resto de los tratamientos se caracterizarían por una nula eficacia frente al crecimiento de hongos.

El REACH (Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias Químicas) es un reglamento europeo que tiene como objetivo principal mejorar la protección para la salud humana y el medio ambiente frente al riesgo que puede conllevar la fabricación, comercialización y uso de las sustancias y mezclas químicas.

En relación con el bórax, es considerado como una sustancia de preocupación debido a su toxicidad para los organismos acuáticos y su posible impacto en la salud humana. Por lo tanto, se han establecido restricciones para su uso en algunos productos y aplicaciones. De acuerdo con el REACH, el bórax no debe ser utilizado en productos de limpieza doméstica que se utilicen en contacto con agua y no se permite su uso en productos alimenticios. También se requiere un etiquetado especial y se establecen límites de exposición en el lugar de trabajo. Además, se requiere una Autorización para ciertas aplicaciones específicas, como la fabricación de cerámica y vidrio, y se prohíbe su uso en pinturas y barnices. Es importante tener en cuenta que estas restricciones son específicas para el uso del bórax dentro de la Unión Europea y pueden variar en otros países.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

H. ESTUDIO RESISTENCIA AL ASENTAMIENTO

El asentamiento se define como la reducción del espesor del aislante de celulosa instalado en áticos, o de la altura en cavidades y tabiques ligeros bajo vibración, humedad, condiciones climáticas cíclicas y tiempo, expresada como un porcentaje del espesor de aislamiento instalado inicial. En este sentido, cabe señalar que diferentes aplicaciones requieren distintas clases de asentamiento. Diferentes artículos estudian como influye en el asentamiento factores como diferentes condiciones climáticas [18], y la naturaleza del material que se emplea como relleno [19] [20]. La norma EN 15101-1 establece una clasificación en función del uso final del producto tal y como puede verse en las siguientes tablas:

Tabla 27. Aplicaciones de proyectado horizontales en áticos y suelos. Método de ensayo anexo B.1 (ciclos de temperatura y humedad)

<i>Clase</i>	<i>Requisito</i>
SH 0	Asentamiento no medible ($\leq 1\%$)
SH 5	$\leq 5\%$
SH 10	$\leq 10\%$
SH 15	$\leq 15\%$
SH 20	$\leq 20\%$
SH 25	$\leq 25\%$
SH 30	$> 25\%$

Tabla 28. Aplicaciones de insuflado en cavidades, estructuras ligeras tabiques interiores y tabiques ligeros. Método de ensayo anexo B.2 (vibración)

<i>Clase</i>	<i>Requisito</i>
SC 0	Asentamiento no medible ($\leq 1\%$)

En el proyecto se realizará una investigación acerca de la resistencia al asentamiento de la celulosa pasada por máquina de insuflar, de la celulosa sin pasar por máquina, la celulosa de fabricación propia y celulosa de papel blanco reciclado. Para ello, se empleará un montaje experimental diseñado a pequeña escala basado en el anexo B2 de la norma UNE EN 15101-1.

El montaje empleado se muestra en la Figura 26 . El equipo consiste en un prisma rectangular fabricado de tablero contrachapado excepto una de sus caras laterales, que cuenta con una lámina transparente de poli metacrilato, de forma que sea fácil evaluar de manera visual cómo disminuye la altura del aislante durante el ensayo. El conjunto se encuentra unido a una mesa en el un motor asíncrono vibratorio. El diseño cuenta con tres compartimentos individuales. La dimensión de cada uno de los compartimentos es (600 × 210 × 100) mm, aunque el área de relleno es (500 × 210 × 100) mm, con el objetivo que exista un margen superior y se evite que el material aislante rebose por la tapa superior cuando tenga lugar la vibración.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos



Figura 26. Montaje ensayo asentamiento



Figura 27. Motor de vibración

Procedimiento de ensayo

En primer lugar, se acondicionan las muestras de celulosa antes de realizar el ensayo, al menos 6 horas a (23 ± 2) °C y (50 ± 5) % de humedad relativa. Conociendo el área de relleno, se determina la masa a introducir en función de la densidad.

Tabla 29. Densidades de aplicación y las masas determinadas

25	30	35	45	55	60	65	75	85	kg/m ³
260	312	364	468	572	624	676	780	884	g

Según la densidad, se llena el compartimento con la masa de celulosa correspondiente. Se compacta con ayuda de una tapa para que la altura siempre sea de 500 mm.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos



Figura 28. Relleno de cavidades del montaje y compactación de la celulosa.

Se prueban diferentes densidades y se emplean dos tipos de vibraciones, baja y media. Se mide la variación de altura tras un tiempo de 2 horas de ensayo, y posteriormente se calcula el porcentaje de asentamiento. A continuación, se muestran imágenes de la realización del ensayo (Figura 29, Figura 30, Figura 31 y Figura 32) con diferentes tipos de celulosa.



Figura 29. Prueba de asentamiento de celulosa pasada por máquina



Figura 30. Prueba de asentamiento de celulosa sin pasar por máquina



Figura 31. Prueba de asentamiento de celulosa de fabricación propia.

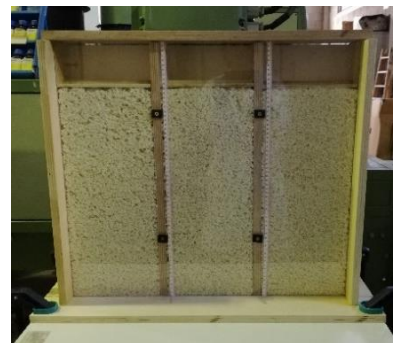


Figura 32. Prueba de asentamiento de celulosa de papel blanco

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

La fórmula para calcular el porcentaje de asentamiento (S_d) es la siguiente:

$$S_d (\%) = \frac{S_2}{H} \times 100$$

Siendo:

S_2 : Profundidad medida del material aislante (mm) medida desde la parte superior de la caja de muestras.

H: Altura cavidad (mm)

Los resultados del ensayo de asentamiento según el tipo de celulosa y vibración se resumen en la Tabla 30:

Tabla 30. Valores de porcentaje de asentamiento en función del tipo de celulosa y densidad.

	Densidad (kg/m ³)								
	25	30	35	45	55	60	65	75	85
Celulosa pasada por máquina. Vibración baja	10	-	0	0	0	-	0	-	-
Celulosa pasada por máquina. Vibración media	9	6	0	0	0	-	0	-	-
Celulosa sin pasar por máquina. Vibración baja.	-	-	1	0	0	-	-	-	-
Celulosa sin pasar por máquina. Vibración media.	-	-	10	0	0	-	0	-	-
Celulosa de papel blanco. Vibración baja.	-	-	-	-	-	14	8	0	0
Celulosa de papel blanco. Vibración media	-	-	-	-	-	13	8	1	0
Celulosa fabricación propia. Vibración baja.	5	0	0	0	-	-	-	-	-
Celulosa fabricación propia. Vibración media.	10	2	0	0	-	-	-	-	-

Nota: No es posible ensayar el % de asentamiento en densidades más bajas en las muestras de celulosa sin pasar por máquina y celulosa de papel blanco, debido a que las densidades de aplicación iniciales de estas celulosas no permiten alcanzar la altura requerida para realizar el ensayo.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Se observa que la intensidad de la vibración afecta al asentamiento obtenido. A mayor vibración, la celulosa es capaz de rellenar los posibles huecos que quedan tras el insuflado y favorecer este fenómeno de asentamiento. Tal como se muestra en la bibliografía [21], se comprueba que a medida que aumenta la densidad del relleno de celulosa en montajes verticales, existen menos huecos disponibles para la recolocación del material y se evita el asentamiento, bajo vibración baja y media.

La celulosa pasada por máquina y la de fabricación propia presentan un comportamiento muy similar, dejando de producirse asentamiento a partir de una densidad de 30 kg/m³, para vibración baja, y 35 kg/m³, para vibración media. En cambio, la celulosa sin pasar por máquina ha de tener como mínimo una densidad de 45 kg/m³, en vibración baja y media, para que no tenga lugar este fenómeno.

La celulosa de papel blanco a simple vista presenta una estructura de laminillas planas, muy diferente a la estructura desfibrada de los otros tipos de celulosa ensayados. La celulosa de papel blanco no se logra ensayar a densidades pequeñas porque al ser tan compacta no llega a una altura de 500 mm, como en los anteriores casos, el cual es un requisito para que los resultados sean comparativos. De modo que la densidad mínima para que no se produzca asentamiento, es de 75 kg/m³ y de 85 kg/m³, en vibración baja y media, respectivamente. Esto significa que para lograr evitar el asentamiento en este tipo de material se necesitará mucha más cantidad de materia prima para alcanzar las condiciones óptimas de aislamiento, en comparación con los otros materiales insuflados en la pared vertical.

Por lo tanto, la densidad mínima utilizable para su instalación en paredes verticales, para las vibraciones estudiadas, sería de 35 kg/m³ para la celulosa pasada por máquina y la celulosa de fabricación propia. La celulosa sin pasar por máquina requeriría de una densidad mínima de 45 kg/m³ y para la celulosa de papel blanco sería necesaria una densidad de 85 kg/m³.

I. ESTUDIO CELULOSA ESTABILIZADA

En la bibliografía se encuentran estudios donde realizan tratamientos sobre las fibras de celulosa para aportarles una mayor estabilidad y consistencia, disminuyendo con ello el asentamiento. En el artículo [22], citan varios métodos de instalación de aislamientos de fibras de celulosa en interior de cavidades. El primero de ellos, y más común, es el método de instalación por insuflado de las fibras sueltas, ya estudiado en el apartado anterior. Otro método citado, consiste en el insuflado de las fibras de celulosa a las que se les rocía pequeñas cantidades de agua, o una mezcla de adhesivo y agua. El adhesivo estabiliza mecánicamente las fibras de celulosa, evitando con ello el efecto del asentamiento, y el secado de éstas tiene lugar en el interior de la cavidad. En el citado artículo no especifican naturaleza ni cantidades de adhesivo necesarias para evitar el asentamiento de las fibras. Otro método existente, es el de instalación de las fibras húmedas, en el que las fibras de celulosa se aplican con elevadas cantidades de agua o agua y adhesivo, incluso en cantidades del 50 a 100% en peso. Este método se aplica sobre muros abiertos, donde se secan y posteriormente se cierran.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

En otro artículo [23], estudian la cáscara de arroz como material aislante, y lo comparan con el sistema de aislamiento de celulosa CFI. Se recoge que los sistemas aislantes de celulosa pueden perder hasta un 25% de altura debido al asentamiento. Por ello, afirman la necesidad del uso de adhesivos de naturaleza acetato de polivinilo y acrílicos.

Otro estudio [2], indica que, con la celulosa estabilizada, en la cual se dosifican pequeñas cantidades de agua, menos del 20% en masa, se previene el asentamiento en aplicaciones horizontales. Recogen que en aplicaciones de celulosa estabilizada en aplicaciones horizontales se reduce el asentamiento alrededor del 5%. En este estudio no especifican condiciones a seguir para la fabricación de la celulosa estabilizada, pero se comenta que debe profundizarse en su comportamiento estudiando la relación del ligante sobre la densidad y el asentamiento.

En base a la información obtenida tras la búsqueda bibliográfica, se decide emplear como adhesivos para estabilizar las fibras de celulosa cuatro aglutinantes de diferente naturaleza. Acetato de polivinilo, un adhesivo en spray y dos bioadhesivos de origen vegetal, uno de almidón y otro de dextrina.

El adhesivo de acetato de polivinilo, también conocido como PVA, es un tipo de adhesivo sintético que se utiliza comúnmente en aplicaciones de carpintería, manualidades, y en la fabricación de papel. Se compone de polímeros de acetato de vinilo y agua, lo que le confiere una consistencia blanca y lechosa. Es un adhesivo no tóxico, de bajo olor y fácil de usar.

El adhesivo en spray, es un adhesivo libre de silicona y disolventes clorados apto para superficies porosa y no porosas. Los disolventes que contienen ayudan a mantener el adhesivo en un estado líquido, facilitando su aplicación. Las resinas sintéticas son los ingredientes principales que proporcionan la capacidad adhesiva del producto, ya que se adhieren a la superficie de los materiales a unir y se endurecen para crear una unión fuerte y duradera.

El adhesivo de almidón en base acuosa tiene origen vegetal y su uso está extendido en la industria alimentaria para el pegado de etiquetas de papel y cartón. Presenta una alta viscosidad y un aspecto amarillo intenso.

La dextrina es un oligosacárido de poco peso molecular producido por la hidrólisis del almidón, diseñado para su uso en encolado de papeles y cartones, entre otros. Aspecto marrón y con alta viscosidad.

Procedimiento de estabilización de celulosa

El estudio del comportamiento de la celulosa estabilizada frente al asentamiento bajo vibración ha sido realizado principalmente con la fibra de celulosa de fabricación propia, obtenida a partir de periódicos reciclados. En ensayos anteriores de asentamiento bajo vibración (ver Tabla 30), se observa que la celulosa de fabricación propia, a la densidad de instalación más baja en la cavidad de 25 kg/m³, se registró asentamiento.

Por lo tanto, en este estudio se comparará el comportamiento entre la fibra de celulosa de fabricación propia sin ningún tipo de tratamiento, y una vez estabilizada con el uso de adhesivos, previamente seleccionados, a una densidad de aplicación de 25 kg/m³.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

La incorporación de los adhesivos sobre las fibras de celulosa se realizó empleando una pistola aerográfica y a una presión de 0,5 bar. Los adhesivos de acetato de polivinilo, almidón y dextrina fueron diluidos en agua debido a su elevada viscosidad, hasta alcanzar una viscosidad que permitió su aplicación a pistola aerográfica. El adhesivo en spray se aplicó directamente sobre las fibras de celulosa.

Una vez preparada la mezcla ligante, esta se incorpora sobre la fibra de celulosa, asegurando una incorporación homogénea, mezclando de forma manual y continua. Se realizan varias etapas de aplicación del adhesivo ligante, seguido de una etapa de homogeneización manual, hasta incorporar la cantidad de adhesivo ligante deseado.

Los adhesivos de naturaleza acetato de polivinilo, dextrina y almidón se pulverizaron sobre la celulosa (Figura 33). Durante la pulverización se observó como poco a poco la celulosa se aglomeraba entre sí, perdiendo el aspecto esponjoso debido a la hidratación de las fibras. En la aplicación del adhesivo en spray, este desprende una red de adhesivo, que se homogeneiza e incorpora mediante homogeneización manual. En este caso, no se observó hidratación de las fibras de celulosa, y una menor aglomeración y compactación de la celulosa (Figura 34).



Figura 33. Aplicación del adhesivo ligante sobre las fibras de celulosa a pistola aerográfica (izquierda) y con spray (derecha)



Figura 34. Detalle aplicación del adhesivo ligante sobre las fibras de celulosa pulverizado a pistola (izquierda) y con spray (derecha).

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Se han llevado a cabo un total de 10 pruebas de celulosa de fabricación propia estabilizada, combinando diferentes adhesivos y porcentajes de incorporación. La siguiente tabla muestra, para cada prueba realizada, el tipo de adhesivo empleado y la dilución con agua, si procede, para disminuir su viscosidad. Por otra parte, se especifica la cantidad de ligante (mezcla de agua y adhesivo) incorporado a la celulosa y el porcentaje únicamente de adhesivo incorporado (sin contabilizar el agua incorporada). También se muestra porcentaje de humedad que presenta la celulosa estabilizada en el momento de su instalación en el interior de la cavidad.

Tabla 31. Ensayos celulosa fabricación propia estabilizada.

Prueba	Tipo adhesivo	Relación mezcla Agua : Adhesivo	Relación mezcla Celulosa : Ligante	% Adhesivo	% Humedad celulosa estabilizada
FP-1	Acetato de polivinilo	100 : 25	100 : 13,7	2,7	10,6
FP-2	Acetato de polivinilo	50 : 50	100 : 14,2	7,1	10,0
FP-3	Acetato de polivinilo	50 : 50	100 : 24,9	12,5	17,1
FP-4	Acrílico	-	100 : 1,3	1,3	0,0
FP-5	Acrílico	-	100 : 3,2	3,2	0,0
FP-6	Acrílico	-	100 : 11,7	11,7	1,7
FP-7	Dextrina	30 : 100	100 : 11,7	9,0	2,0
FP-8*	Dextrina	30 : 100	100 : 11,7	9,0	2,0
FP-9	Almidón	60 : 40	100 : 7,5	3,0	2,7
FP-10	Almidón	60 : 40	100 : 3,2	1,3	2,6

*El secado de la celulosa estabilizada tuvo lugar fuera de la cavidad del montaje de ensayo.

Con el adhesivo de naturaleza acetato de polivinilo, adhesivo común y muy extendido en el mercado, se realizaron tres pruebas, variando el porcentaje de adhesivo aplicado. Para su aplicación a pistola, se tuvo que diluir con elevadas cantidades de agua. Por tanto, debido a la incorporación de importantes cantidades de agua, la celulosa estabilizada presentó porcentajes de humedad notables, en las pruebas FP-1 y FP-2 el porcentaje de humedad fue de aproximadamente el 10%, y en la prueba FP-3 del 17%.

Para el adhesivo en formato spray, adhesivo también extendido en el mercado, se realizaron un total de tres pruebas, variando el porcentaje de adhesivo aplicado. El adhesivo se pulverizó directamente, no siendo posible ni necesaria su dilución con agua. El porcentaje de humedad de la celulosa estabilizada con adhesivo acrílico, en las pruebas FP-4, FP-5 fue nula, debido a los bajos porcentajes de adhesivo aplicado, o muy baja a mayores cantidades de adhesivo aplicado, prueba FP-6.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Con el adhesivo dextrina, adhesivo empleado mayoritariamente en la industria alimentaria, se llevaron a cabo dos ensayos, variando el proceso de instalación de la celulosa, incorporando el mismo porcentaje de adhesivo. Para la incorporación del adhesivo fue necesaria su dilución con agua, hasta una viscosidad media, pero suficiente para su aplicación a pistola. Minimizando la cantidad de agua en la mezcla ligante se consiguieron porcentajes de humedad de la celulosa estabilizada bajos. En la prueba FP-8 se modificó el proceso de instalación. Tras fabricación de la celulosa estabilizada, esta no se instaló en la cavidad del ensayo, como se procede habitualmente, si no que el secado tuvo lugar fuera de la cavidad del montaje de ensayo, procediendo a su instalación pasadas 48 horas desde su fabricación.

Por último, se realizaron dos ensayos con el adhesivo almidón, ampliamente utilizado tanto en la industria alimentaria como adhesivo en papel y cartón. Se emplearon dos porcentajes de adhesivo aplicado diferentes. Debido a la alta viscosidad fue necesaria la adición de cantidades de agua importantes para obtener una viscosidad media, que permitiera su aplicación a pistola aerográfica. Aún con la importante cantidad de agua en la mezcla ligante, los porcentajes de humedad de la celulosa estabilizada fueron aproximadamente del 3,0%, debido, seguramente, a que los porcentajes de mezcla ligante incorporada fue máximo del 7,5%.

Como es lógico, de forma generalizada se observa que, a mayor porcentaje de agua en la mezcla ligante, mayor porcentaje de humedad presenta el conjunto de la celulosa estabilizada.

Evaluación del asentamiento bajo vibraciones.

Tras preparación de la celulosa estabilizada, esta se introduce, todavía húmeda, en el interior de la cavidad de la caja de ensayo (a excepción de la prueba FP-8), tal y como se procedió en ensayos anteriores de asentamiento. Tras instalación en el interior de la cavidad, se estableció un periodo de 48 horas, tiempo, a priori, suficiente para la evaporación del agua y secado del adhesivo. Pasado este tiempo, se procedió a la evaluación del asentamiento bajo vibraciones en el equipo pequeña escala descrito anteriormente. Se seleccionó para la realización de los ensayos una vibración media durante un periodo de 1 hora y 30 minutos.

Resultados.

Finalizados los ensayos de asentamiento por vibración de la celulosa de fabricación propia estabilizada preparada según las condiciones especificadas en la Tabla 31, se obtuvieron los siguientes resultados.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Tabla 32. Resultados asentamiento por vibración de la celulosa de fabricación propia estabilizada.

Prueba	Densidad en el momento de la instalación (kg/m ³)	Densidad tras 48h desde su instalación (kg/m ³)	Asentamiento tras 48h de secado (%)	Asentamiento con vibración (%)
FP-1	31	33	5	7
FP-2	32	34	4	7
FP-3	35	38	7	6
FP-4	25	25	0	8
FP-5	25	25	0	8
FP-6	25	27	7	7
FP-7	26	28	6	6
FP-8	25	25	*	7
FP-9	25	27	9	5
FP-10	25	25	6	6

En la tabla se recoge la densidad de la celulosa estabilizada húmeda, en el momento en el que se instaló en el interior de la cavidad. Teóricamente, la densidad a la que se pensó realizar los ensayos de asentamiento, como se ha comentado anteriormente, fue de una densidad de 25 kg/m³. Al incorporar el adhesivo sobre la fibra de celulosa, en algunos casos, se aglomera y apelmaza, perdiendo su esponjosidad, y necesitando una mayor cantidad de material para rellenar la cavidad de ensayo, hasta una altura de 500 – 510 mm. Este hecho se hizo patente en las pruebas FP-1, FP-2, FP-3 y ligeramente en FP-8. Pasadas las 48 horas de secado de la celulosa estabilizada en el interior de la cavidad, se comprobó en las pruebas FP-1, FP-2, FP-3, FP-6, FP-7, FP-9 y FP-10 que tuvo lugar un cierto asentamiento de la celulosa durante el proceso de secado. Esto es debido a que, la incorporación de ligante sobre la celulosa aporta cierto peso al conjunto aislante, dando lugar a un asentamiento por gravedad. Este comportamiento se potencia con el incremento de ligante al conjunto aislante.

Se comprobó que la cantidad de agua incorporada a las fibras de celulosa, ocasionan una mayor densidad en el conjunto de la celulosa estabilizada. Además, se observa que, durante el proceso de secado en el interior de la cavidad, la incorporación de agua al material aislante produce un asentamiento más notorio pasadas las 48 horas de secado.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

En los siguientes gráficos se observa comparativamente el comportamiento frente al asentamiento entre la celulosa de fabricación propia suelta, identificada como “referencia”, y las combinaciones de celulosa de fabricación propia estabilizada. En la celulosa estabilizada se diferencia, por una parte, el asentamiento observado durante el proceso de secado (color azul) y, por otra parte, el asentamiento observado tras proceso de vibración (color naranja). El valor el asentamiento final se considera la suma de ambos, Tabla 33.

$$\text{Asentamiento final (\%)} = \text{Asentamiento durante secado 48h (\%)} + \text{asentamiento por vibración(\%)}$$

En el Gráfico 1 se representa el comportamiento de la celulosa estabilizada con adhesivo de acetato de polivinilo frente a la referencia. Se observó que no reduce o evita el asentamiento.

En el grafico 2 se representa el comportamiento de la celulosa estabilizada con adhesivo en spray frente a la referencia. Se observó que en las pruebas FP-4 y FP-5, en el que se aplicaron 1,3% y 3,2% de adhesivo respectivamente, puede mejorar el asentamiento en un 2% respecto de la referencia.

En el Gráfico 3 se representa el comportamiento de la celulosa estabilizada con bioadhesivo dextrina frente a la referencia. Se observó que en la prueba FP-8, en el que se aplicó 9% de adhesivo sobre la celulosa y secó durante las 48 horas fuera de la cavidad, puede mejorar el asentamiento en un 3% respecto de la referencia. Cabe destacar, que este método se aleja de los procesos habituales de aplicación a nivel comercial. Se comprueba que la instalación de la celulosa estabilizada tras su proceso de secado y curación de la mezcla ligante puede mejorar su comportamiento, reduciendo su asentamiento.

En el Gráfico 4 se representa el comportamiento de la celulosa estabilizada con bioadhesivo almidón frente a la referencia. Se observó que no reduce o evita el asentamiento.

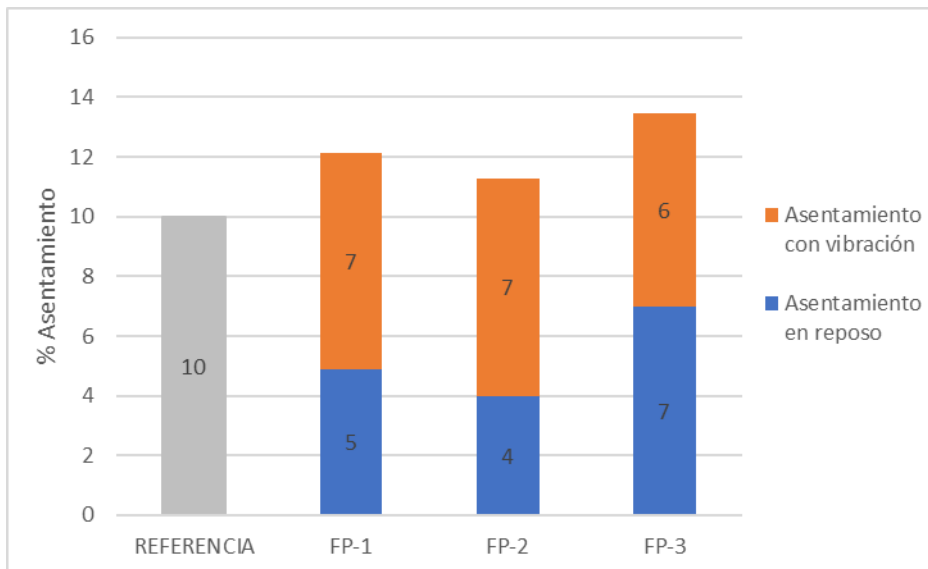


Gráfico 1. Comparativa del asentamiento de la celulosa de fabricación propia de referencia frente a la estabilizada con adhesivo acetato de polivinilo

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

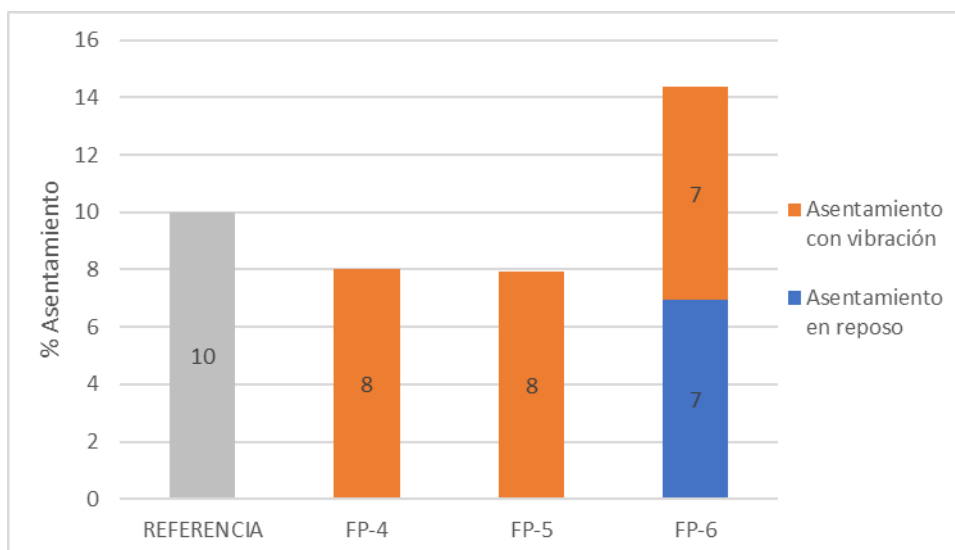


Gráfico 2. Comparativa del asentamiento de la celulosa de fabricación propia de referencia frente a la estabilizada con adhesivo en spray

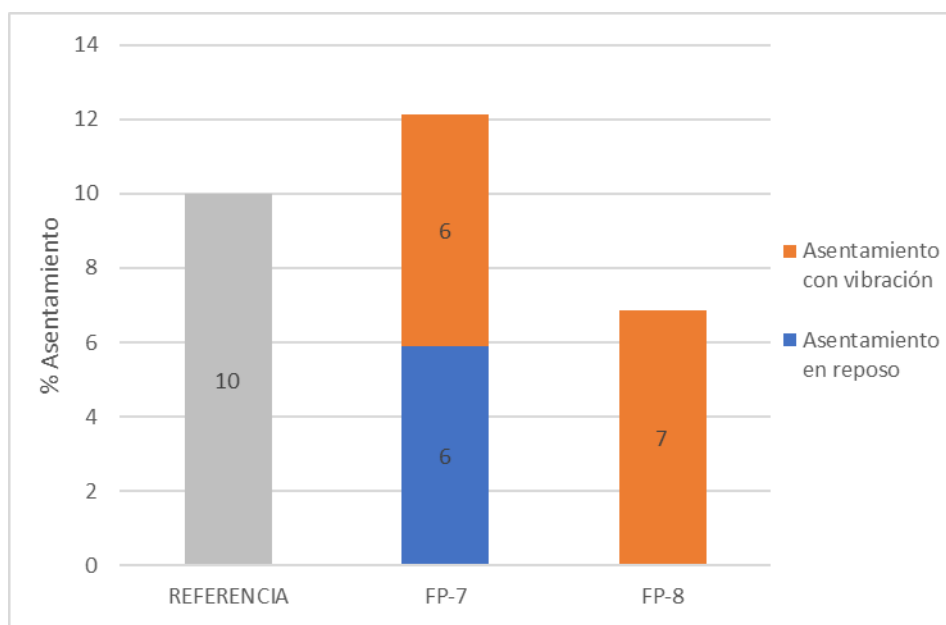


Gráfico 3. Comparativa del asentamiento de la celulosa de fabricación propia de referencia frente a la estabilizada con adhesivo tipo dextrina.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

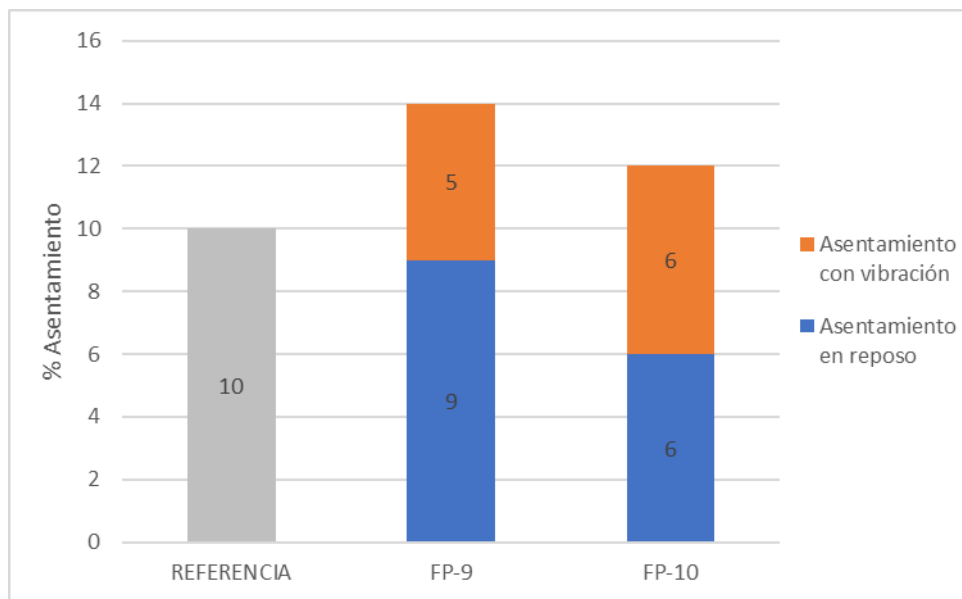


Gráfico 4. Comparativa del asentamiento de la celulosa de fabricación propia de referencia frente a la estabilizada con adhesivo tipo almidón.

Tabla 33. Resultados asentamiento final por vibración de la celulosa de fabricación propia estabilizada.

Prueba	Asentamiento final (%)
FP-1	12
FP-2	11
FP-3	13
FP-4	8
FP-5	8
FP-6	14
FP-7	12
FP-8	7
FP-9	14
FP-10	12

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Finalizados los ensayos se llegan a las siguientes conclusiones:

- La hidratación de la celulosa en exceso favorece al efecto de asentamiento, al menos en la celulosa de papel de periódico reciclado.
- Se observa una mejora en el asentamiento empleado adhesivos que no requieren de su dilución en agua para su incorporación en las fibras de celulosa, tal y como se evidencia en FP-4 y FP-5.
- La aplicación de adhesivo en exceso favorece a un mayor asentamiento. Debe aditivarse el porcentaje de adhesivo suficiente para crear estructuras estables entre fibras de celulosas sin hidratarlas en exceso, que dan lugar a aglomerados de grandes dimensiones que dejan huecos en la instalación.
- La mejor opción fue la celulosa estabilizada con adhesivo spray en las pruebas FP-4 y FP-5, con porcentajes de aplicación de 1,2% y 3,4%.
- El secado de la celulosa fuera de la cavidad evidencia la función estructural que crea el adhesivo, en este caso de dextrina, ente las fibras, obteniendo el menor porcentaje de asentamiento de la totalidad de las pruebas realizadas.

La celulosa de papel reciclado de fabricación propia estabilizada con adhesivo en spray mejora el comportamiento frente al asentamiento. Aun así, no se consigue evitar por completo su efecto.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

3 Actividades realizadas, desarrollo del proyecto.

A lo largo de proyecto se ha realizado un estudio tanto de muestras de celulosa comercial como de celulosa de fabricación propia, analizando la relación existente entre su estructura y las prestaciones térmicas, acústicas y mecánicas ofrecidas. Los trabajos han contemplado distintos parámetros considerados clave en el comportamiento del producto final.

Se ha llevado a cabo un estudio de la conductividad térmica que ofrecen distintos materiales (celulosa fabricación propia, celulosa comercial, celulosa comercial obtenida del reciclado de papel blanco y celulosa pasada por la máquina de insuflar) estudiando la influencia de la densidad de aplicación en sus propiedades aislantes.

Asimismo, se ha estudiado la capacidad de aislamiento acústico del producto en función de la densidad de aplicación. Para ello, se ha analizado el aislamiento acústico mediante un método interno y también a partir de la determinación de la resistencia al flujo de aire, que aporta información acerca de la pérdida de energía de las ondas sonoras que se produce en el seno del material.

Se ha diseñado un método interno para analizar la resistencia al asentamiento de los materiales aislantes empleados a granel. A partir del mismo, se ensayaron distintos aislantes de celulosa, analizando el factor de la densidad de aplicación y empleando aglutinantes para tratar de mejora su resistencia al asentamiento (celulosa estabilizada).

Dado que los aislantes de celulosa necesitan ser aditivados para mejorar sus prestaciones frente al fuego y aumentar su resistencia a la formación de hongos, se han realizado estudios que aportan información acerca su comportamiento frente a distintas formulaciones con sales de bórax y ácido bórico.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

4 Alcance, colaboradores y público objetivo.

El proyecto AISMAT pretende estudiar, generar y difundir nuevo conocimiento relacionado con los aislantes de celulosa a granel con el objetivo de contribuir a una mejor comprensión de la celulosa como material de la construcción.

Entre el público objetivo del proyecto se encontrarían: los fabricantes y comercializadores de materiales aislantes, especialmente aquellos interesados en promover productos respetuosos con el medio ambiente; organizaciones y sellos que promuevan la construcción sostenible y una reducción de los gases de efecto invernadero; empresas de construcción, renovación y prescriptores interesados en el cumplimiento de altos estándares de aislamiento; y también los propietarios de viviendas que buscan mejorar la eficiencia energética de su hogar, reducir las facturas de energía y mejorar su confort térmico.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

5 Acciones de difusión y transferencia.

“FGVA - MATO AISMAT”

AISMAT - INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE MATERIALES POROSOS (II)



DESCRIPCIÓN

Los aislantes térmicos contribuyen a limitar el consumo energético, mejorando el confort y la sensación de bienestar higrotérmico de los usuarios. El proyecto AISMAT busca profundizar en el conocimiento acerca de los productos empleados en el aislamiento, especialmente en el caso de los empleados a granel como relleno, estudiando la relación existente entre su estructura y las prestaciones térmicas, acústicas y mecánicas ofrecidas.

OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto AISMAT es estudiar la relación existente entre la microestructura y las propiedades de los aislantes térmicos para permitir el desarrollo de materiales avanzados.

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Analizar la relación entre la porosidad y compacidad de los materiales en relación a las propiedades mecánicas (compresión, fluencia por compresión, tracción...)
- Estudiar la influencia de su estructura con el confort térmico y acústico.
- Mejora del aislamiento térmico proporcionado por los materiales aislantes
- Desarrollo y optimización de materiales compuestos

Número de proyecto: 22200006

Expediente: IMAMCA/2022/2

Duración: Del 01/01/2022 al 31/12/2022

Coordinado en AIDIMME por: MILLA TAMARIT, JOSE LUIS

Línea de I+D: APLICACIONES AVANZADAS DE LOS MATERIALES

Evalúe nuestro proyecto

NOTICIAS PUBLICADAS

Difusión general

- [https://actualidad.aidimme.es/2023/01/03/fin-proyectos-i/ \(...\)](https://actualidad.aidimme.es/2023/01/03/fin-proyectos-i/)
- [https://actualidad.aidimme.es/2023/01/03/aidimme-resulta \(...\)](https://actualidad.aidimme.es/2023/01/03/aidimme-resulta/)
- [https://actualidad.aidimme.es/2022/11/03/congreso-habita \(...\)](https://actualidad.aidimme.es/2022/11/03/congreso-habita/)
- [https://actualidad.aidimme.es/2022/10/03/aidimme-feria-h \(...\)](https://actualidad.aidimme.es/2022/10/03/aidimme-feria-h/)
- [https://actualidad.aidimme.es/2022/07/19/retos-y-oportun \(...\)](https://actualidad.aidimme.es/2022/07/19/retos-y-oportun/)
- [https://actualidad.aidimme.es/2022/04/18/aidimme-proyect \(...\)](https://actualidad.aidimme.es/2022/04/18/aidimme-proyect/)

Difusión técnica, transferencia

- [https://actualidad.aidimme.es/2022/06/17/inicio-aimat/ \(...\)](https://actualidad.aidimme.es/2022/06/17/inicio-aimat/)

SUBVENCIÓN

3.204.948 € €

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

6 Resumen y conclusiones.

El uso y empleo de aislantes de celulosa reduce la transferencia de calor entre el interior y el exterior de una vivienda, lo que ayuda a mantener una temperatura confortable y a reducir los costos de calefacción y refrigeración. En este sentido, el uso de aislantes de celulosa es beneficioso para el medio ambiente, porque se trata de un material renovable, reciclable y biodegradable, con baja huella de carbono, que ayuda a reducir la cantidad de residuos generados y con buenas propiedades térmicas y acústicas.

El proyecto AISMAT pretende estudiar, generar y difundir nuevo conocimiento relacionado con los aislantes de celulosa a granel con el objetivo de contribuir a una mejor comprensión de la celulosa como material de la construcción.

Aunque el proceso de fabricación de aislante de celulosa no es complicado, requiere de equipos y maquinaria especializados para su fabricación y posterior insuflado. A pesar de ello, el producto puede considerarse como óptimo para como aislante de relleno y como núcleo en soluciones constructivas y paneles compuestas que lo permitan.

De los resultados obtenidos se desprende que el aislante de celulosa posee unos valores de conductividad térmica que oscilan entre aproximadamente 0,03 y 0,04 W/mK, todo ello en función de la naturaleza de la materia prima, el grado de desfibrado obtenido en su proceso de trituración y la densidad de aplicación entre otros.

Finalmente, aunque los aislantes de celulosa son altamente efectivos y sostenibles, también es importante asegurarse de que sean resistentes al fuego y a la humedad, lo que puede requerir tratamientos adicionales o aditivos especiales para mejorar su resistencia y durabilidad.

Se ha estudiado el potencial del producto como aislante acústico a partir de un método interno basado en la norma UNE-ISO 140-1, pero adaptada para realizar ensayos a escala reducida, observándose las bondades del material.

Asimismo, se ha estudiado la capacidad de aislamiento acústico del producto en función de la densidad de aplicación. Para ello, se ha analizado el aislamiento acústico mediante un método interno y también a partir de la determinación de la resistencia al flujo de aire, que aporta información acerca de la pérdida de energía de las ondas sonoras que se produce en el seno del material.

Se ha diseñado un método interno para analizar la resistencia al asentamiento de los materiales aislantes empleados a granel. A partir del mismo, se ensayaron distintos aislantes de celulosa, analizando el factor de la densidad de aplicación y empleando aglutinantes para tratar de mejorar su resistencia al asentamiento (celulosa estabilizada).

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

Dado que los aislantes de celulosa necesitan ser aditivados para mejorar sus prestaciones frente al fuego y aumentar su resistencia a la formación de hongos, se han realizado estudios que aportan información acerca su comportamiento frente a distintas formulaciones con sales de bórax y ácido bórico.

A la vista de los resultados obtenidos, se desprende que la normativa de ensayos europea y americana en lo relacionado con la reacción al fuego de los aislantes de celulosa difieren bastante, no siendo la normativa europea óptima para la clasificación de la reacción al fuego de las distintas formulaciones más allá de su mera clasificación dentro del mismo grupo.

En cuanto a la resistencia a la formación de hongos, se ha efectuado una investigación para determinar el contenido de sales y su relación para obtener eficacia frente al crecimiento de hongos.

Finalmente se ha llevado a cabo investigaciones encaminadas a la obtención de celulosa estabilizada con el objetivo de dotarla de una mayor estabilidad y un menor grado de asentamiento. En este sentido, se requieren investigaciones futuras para obtener resultados más favorables y encontrar soluciones efectivas a los retos que plantean las problemáticas asociadas a la estabilización de la celulosa.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

7 Anexos y bibliografía.

- [1] Andimat, «ANDIMAT (Asociación Nacional de Fabricantes de Materiales Aislantes),» [En línea]. Available: <https://www.andimat.es>.
- [2] P. Lopez Hurtado, A. Rouilly y V. Vandebossche, «A review on the properties of cellulose fibre insulation,» *Building and Environment*, vol. 96, pp. 170-177, 2016.
- [3] Valley Insulation, «How Borate Improves Cellulose Insulation,» 2019. [En línea]. Available: <https://valleyinsulationllc.com>.
- [4] P. Lopez Hurtado, A. Rouilly y C. R. Ra, «The properties of cellulose insulation applied via the wet spray process,» *Building and Environment*, vol. 107, pp. 43-51, 2016.
- [5] İ. E. Karaağaçlıoğlu y M. S. Çelik, «Effect of boric acid on fire retardant properties of compressed mineral added cellulosic insulators,» de *In Proceedings of the XIIIth International Mineral Processing Symposium*, 2012.
- [6] C. Viladot Bel, «Insulation materials. Cellulose fiber and Expanded polystyrene Insulations,» Brno University of Technology, 2017.
- [7] L. A. Issen, «Fire Performance of Loose Fill Cellulosic Insulation in Occupancies - A Progress Report,» National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1980.
- [8] T. H. Wegner y C. A. Holmes, «Efficient application of boron fire retardant to cellulosic loose-fill insulation,» *Thermal Insulation, Materials, and Systems for Energy Conservation in the '80s*, , vol. 100, p. 789, 1983.
- [9] Betula Bio Habitat, [En línea]. Available: <https://betulabiohabitat.com/blog/las-sales-de-boro-en-la-proteccion-y-cuidado-de-la-madera/>.
- [10] ECHA, «Annex XV. Restriction report proposal for a restriction. Ammonium salts in cellulose insulation,» ECHA. European Chemicals Agency, 2014.
- [11] Instituto Valenciano de la Edificación (IVE), «Instituto Valenciano de la Edificación,» [En línea]. Available: <https://www.five.es>. [Último acceso: 2022].
- [12] «UNE-EN 15101-1:2015+A1:2019 Productos de aislamiento térmico para edificios. Productos formados in-situ a partir de celulosa (LFCI). Parte 1: Especificaciones para los productos antes de su instalación,» 2019.
- [13] ISOVER Saint-Gobain, «Las clases de confort acústico Isover. Sin ruidos: una vida mejor».
- [14] Acousticmodelling.com, «<http://www.acousticmodelling.com>,» 2011. [En línea].
- [15] J. Allard y Y. Champoux, «New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 91(6), nº 3346-53.
- [16] J. C. Trevor y P. D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, design and application*, 2nd Edition, Taylor & Francis, 2009.
- [17] G. Yildiz y M. E. Yahia, «Comparative Performance Evaluation of Conventional and Renewable Thermal Insulation Materials Used in Building Envelopes,» *Tehnički vjesnik*, vol. 27, nº 1, pp. 283-289, 2020.
- [18] R. Zaborniak, «Prediction of Long-Term Density of Cellulose Fibre Insulation in Horizontal Spaces of New Residential Houses,» *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, , vol. 13, pp. 21-32, 1989.
- [19] S. Tremly y M. Engelhardt, «Evaluation of settlement behaviour of loose-fill insulation material using relaxation tests,» *Wood Science and Technology*, , nº 47, pp. 343-351, 2012.

“AISMAT” - Investigación y desarrollo de materiales porosos

- [20] A. Böck, , S. Treml y M. Engelhardt, «Long-term settlement behavior of loose-fill cellulose insulation under different types of exposure,» *European Journal of Wood and Wood Products*, nº 73, pp. 705-707, 2015.
- [21] J. Labudek, . J. Teslík, M. Vodičková y Waldstei, «Settlement of Cellulose Insulation. Advanced Materials Research,» pp. 860-863, 1204-1207, 2013.
- [22] D. W. Yarbrough y K. E. Wilkes, «Thermal properties and use of cellulosic insulation produced from recycled paper,» 1996.
- [23] P. Oilivier, «The Rice Hull House,,» *Engineering, Separation & Recycling LLC*.