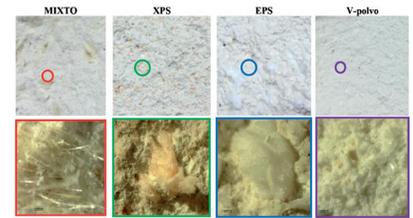


Comportamiento térmico del yeso tradicional con residuos de construcción y demolición



Thermal behavior of traditional lightweight gypsum with construction and demolition waste materials



César Porras-Amores¹, Jaime Santa-Cruz-Astorqui², Mercedes Del-Río-Merino¹, Paola Villoria-Sáez¹ y Carmen Viñas-Arrebola²

Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Edificación, Grupo de investigación TEMA. Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control¹ y Departamento de Tecnología de la Edificación². Avda. Juan de Herrera, 6 - 28040 Madrid.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8983> | Recibido: 25/09/2018 • Inicio Evaluación: 27/09/2018 • Aceptado: 03/12/2018

ABSTRACT

- The Waste to Resources (W2R) project is designing several new materials using waste generated in building rehabilitation works in order to improve energy efficiency. A catalogue of different building construction materials using CDW is developed focused on gypsum and cement conglomerates. This paper shows part of the results obtained in this project related to the thermal behavior of some of the analyzed gypsum compounds containing: expanded polystyrene (EPS), extruded polystyrene (XPS), glass waste and a mixture of glass wool fiber and glass-powder. In addition, a reference sample was prepared for comparing the results. All samples were tested with a thermal conductivity analyzer (Model C-Therm TC™) obtaining the following thermal properties: thermal effusivity, thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity. Results of reference samples were compared with those obtained by other authors in previous researches where other techniques of measurement were used. In addition, a visual exploration was carried out with a Dino-Lite™ digital microscope.
- **Keywords:** Thermal conductivity, Gypsum, Construction and demolition waste, Recycled material.

RESUMEN

El proyecto Waste to Resources (W2R) está diseñando nuevos materiales, fabricados a partir de residuos generados en obras de rehabilitación, para la mejora de la eficiencia energética del edificio. En el proyecto se desarrolla un catálogo de materiales de construcción fabricados con residuos de construcción y demolición (RCD) que son incorporados en matrices de yeso y cemento. Este documento muestra parte de los resultados obtenidos en el estudio. En concreto se analiza el comportamiento térmico de varios tipos de yeso con agregados de poliestireno expandido (EPS extruido (XPS), residuos de vidrio y una mezcla de fibra de vidrio y polvo de vidrio. Además, se preparó una muestra de referencia para comparar los resultados. Todas las muestras se analizaron con un analizador de conductividad térmica (Modelo C-Therm TC™) obteniendo las propiedades térmicas (efusividad térmica, conductividad térmica, difusividad térmica y capacidad calorífica) de las muestras. Los resultados de conductividad térmica de las muestras de referencia se compararon con los obtenidos por otros autores en investigaciones previas los cuales se midieron con otras técnicas. Además, se realizó una exploración visual de las muestras utilizando un microscopio Dino-Lite™ digital.

Palabras clave: Conductividad térmica, Yeso, Residuo de construcción y demolición, Material de reciclaje.

1. INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción genera graves impactos medioambientales en nuestro planeta debido principalmente a las grandes cantidades de residuos de construcción y demolición (RCD) generados, a los numerosos recursos naturales consumidos y a la gran cantidad de energía utilizada. España, con más de 20 millones de toneladas de residuos generados en el año 2014, se encuentra entre los países de la Unión Europea que más residuos genera. Además, cabe destacar que el sector de la construcción se posiciona como el sector que más residuos genera [1]. La Directiva 98/2008/CE establece como objetivo para el año 2020, la reutilización, el reciclado y la recuperación de un 70% en peso de los RCD [2]. Por este motivo, son muchas las medidas que poco a poco se están implementando para mejorar esta situación. Entre ellas destacan las medidas encaminadas a fomentar el reciclaje de los residuos generados así como el uso de nuevos materiales de construcción fabricados a partir de residuos. Las buenas prácticas en gestión de residuos pueden convertirse en una herramienta eficaz de promoción, ya que los criterios ambientales son cada vez más tenidos en cuenta a la hora de adjudicar obras por la Administración o el sector privado [3]. La reutilización de residuos está muy extendida para la obtención de áridos y está comenzando a extenderse a otros residuos como por ejemplo la madera, metales y los polímeros sintéticos [4].

Por otra parte, la emisión de dióxido de carbono es el aspecto más importante en el aumento de calentamiento global del planeta. Una parte de éstas emisiones se deben al elevado consumo energético que existe en el sector de la edificación. Un aspecto clave para disminuir el consumo de energía en nuestro sector es el desarrollo de materiales con coeficientes de conductividad térmica que mejoren el aislamiento térmico de la envolvente exterior [5]. Por tanto, la caracterización de las propiedades de nuevos materiales reciclados, fabricados a partir de residuos, es un aspecto importante de cara a optimizar el ahorro energético en los edificios. El yeso es un material de construcción tradicional que se ha utilizado en la realización de acabados el cual se aplica en forma de una pasta o mortero. Además, el yeso se utiliza para la fabricación de productos de construcción como placas de yeso o bloques de mampostería [6], [7]. Sin embargo, existen aspectos negativos, como el elevado consumo de energía necesario para su fabricación y la alta generación de residuos de este material en obra, que causan un impacto negativo en el medio ambiente [8]. El yeso, a pesar de ser un material que se ha utilizado desde la antigüedad es un material poco evolucionado. Desde un punto de vista energético posee un coeficiente de conductividad térmica elevado (0,25-0,4 W/m·K) en comparación con otros materiales.

| Material | Densidad (kg/m ³). | Conductividad térmica (W/m-K) | Calor específico (J/kg-K) | Composición química |
|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--|
| Yeso grueso | 980,00 | 0,350 | 1000 | Sulfato de calcio hemihidrato de alta pureza. |
| EPS [13, 14] | 45,00 | 0,032 | - | Poliestireno expandido. |
| XPS [13, 15] | 35,00 | 0,029 | - | Poliestireno extruido |
| Polvo de vidrio [13] | 2500,00 | 1000 | 750 | El componente principal es óxido de silicio. En menor cantidad también hay óxidos de calcio, fósforo, sodio y magnesio. |
| Fibra de lana [16] | 112,14 | 0,04 | 750 | El componente principal es el oxígeno, sílice, sodio y calcio. En cantidades menores también hay aluminio, hierro, magnesio, potasio y azufre. |

Tabla 1: Propiedades químicas y físicas de los materiales



Fig. 1: CDW añadidos a la matriz de yeso

En este sentido, una de las posibles estrategias para reducir el consumo de yeso en el sector de la construcción así como para mejorar su comportamiento térmico se basa en la sustitución parcial por agregados ligeros procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). En la actualidad existen estudios que han analizado el comportamiento térmico de materiales de yeso que incorporan residuos de madera [9], poliestireno extruido (XPS) y resinas [10] o poliuretano [11]. Los resultados obtenidos en estos trabajos mostraron que la conductividad térmica de las muestras analizadas era considerablemente más baja que la del yeso tradicional sin adiciones. Desde el punto de vista técnico, para la reducción del consumo de calefacción y refrigeración, una de las alternativas más destacables es la mejora del comportamiento térmico de la envolvente. De hecho, tanto la normativa Europea como la nacional [12] son cada vez más exigentes en este aspecto, lo que en general se traduce en la necesidad de incrementar el aislamiento térmico de la envolvente de los edificios para cumplir con las exigencias requeridas por las distintas normativas.

En definitiva, la modernización del sector de la construcción hacia un concepto más sostenible es inevitable, por ello se debe empezar a diseñar materiales reciclados eficientes que sustituyan a los materiales tradicionales. Los materiales reciclados producen valor añadido ya que productos de residuo pueden tener una nueva aplicación en el mercado. En concreto, el proyecto Waste to Resources (W2R) se centra en el diseño de materiales reciclados con agregados ligeros procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD), con el fin de mejorar su eficiencia energética. Para ello, se desarrolla un catálogo de diferentes materiales de construcción usando RCD que son incorporados en conglomerados de yeso y cemento. Este documento muestra parte de los resultados, obtenidos en el proyecto, sobre el comportamiento térmico de algunos compuestos de yeso.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El objetivo es evaluar la manera en que el aporte de residuos a materiales tradicionales (ej. yeso) puede suponer una mejora significativa en su comportamiento energético. En caso afirmativo estos nuevos materiales podrían integrarse en los sistemas constructivos

de la envolvente del edificio con el fin de reducir el consumo energético del mismo. Para analizar las propiedades térmicas de los materiales compuestos se siguió la siguiente metodología:

1. Materiales utilizados y elaboración de probetas.
2. Realización de ensayos.

Los materiales y métodos, así como los equipos utilizados, se describen en los siguientes apartados.

2.1. MATERIALES Y ESPECÍMENES DE ELABORACIÓN

Las propiedades químicas y físicas de los materiales utilizados se muestran en la Tabla 1.

Se utilizó yeso grueso en todas las muestras. En concreto el yeso tipo B1 --sulfato de calcio hemihidrato-- utilizado fue suministrado por Placo® Saint Gobain [17]. Además, se incorporaron los siguientes materiales RCD en la matriz de yeso grueso (fig. 1):

- Placas de residuo de poliestireno (EPS y XPS) triturado en una máquina con un cepillo metálico. El material obtenido es muy fino (<2mm).
- Fragmentos de vidrio obtenidos de la eliminación de ventanas de un edificio. Los residuos se trituraron con una máquina trituradora micro-deval para obtener polvo fino ($\leq 12 \mu$).
- Planchas de lana de vidrio trituradas en una trituradora convencional. Las fibras obtenidas son inferiores a 3mm.

En total se fabricaron seis series de muestras de yeso con dimensiones 40x40x160mm siguiendo la norma UNE-EN 13279-1 [18]. Cada serie consta de tres muestras. Entre las seis muestras ensayadas se fabricaron dos probetas de referencia sin ninguna adición (REF), tres probetas con una sola adición, con 2% de poliestireno expandido (EPS), con 2% de poliestireno extruido (XPS) y con 100% de vidrio en polvo (V-POLVO), y por último una probeta con una doble adición con un 70% vidrio en polvo y un 3% de vidrio de lana de fibra de vidrio (MIXTO). Todos los porcentajes de residuo incorporados fueron medidos en relación al peso del yeso. Finalmente, las dos probetas de referencia (REF) fueron preparadas sin ninguna adición en su contenido con el fin de comparar resultados (Tabla 2).

Para la elaboración de las probetas, en primer lugar se pesaron las cantidades necesarias de yeso y agua para una relación

| Compuesto | Relación a/y. | Residuo de EPS | Residuo de XPS | Residuo de polvo de vidrio | Residuo de fibra de lana |
|-----------|---------------|----------------|----------------|----------------------------|--------------------------|
| REF | 0,8 | - | - | - | - |
| REF | 0,8 | - | - | - | - |
| EPS | 0,8 | 2% | - | - | - |
| XPS | 0,8 | - | 2% | - | - |
| V-POLVO | 0,8 | - | - | 100% | - |
| MIXTO | 0,8 | - | - | 70% | 3% |

Tabla II: La composición de las muestras analizadas



Fig. 2: Equipamiento utilizado para la caracterización térmica del material

agua/cemento de 0,8. A continuación, se añadieron los residuos y se procedió a mezclar mediante amasado manual. Una vez el residuo estaba mezclado, se añadió agua y se continuó amasando según lo estipulado en la UNE-EN 13279-1 [18]. Una vez el yeso fue endurecido, las muestras se extrajeron del molde y se dejaron a temperatura ambiente durante 7 días en el laboratorio. Finalmente, las muestras fueron secadas en un horno a temperatura constante de $40\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ durante 24 horas, conforme a la norma UNE-EN 13279-2 [19].

2.2. ENSAYO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES

La caracterización consiste en determinar las propiedades termo-físicas de los nuevos materiales reciclados mediante método de la fuente plana transitoria modificada (MTPS, por sus siglas en inglés). El estudio se ha realizado mediante un analizador de conductividad térmica (Modelo C-Therm TCi™) el cual permite realizar ensayos no-destructivos para la determinación de la efusividad y conductividad térmica de un material. El equipo puede realizar medidas de 0,0 a 100 W/mK, efusividades (0-38000 $\text{Ws}^{0.5}/\text{m}^2\text{K}$) en un amplio rango de temperaturas (-50 °C a 200 °C) con una precisión en torno a 5% en temperaturas entre 0°C y 50°C. La figura 2 muestra los principales componentes del equipo.

El principio de funcionamiento se basa en medir el valor de la efusividad térmica mediante un sensor que presenta reflectancia del calor por un solo lado, interfacial y de área perfectamente conocida. Asimismo, el sensor mediante una resistencia eléctrica provoca una fuente de calor sobre la muestra que varía con el tiempo. La variación de la temperatura con el tiempo se relaciona con la efusividad del sensor (conocida mediante calibración) y de la muestra, lo que permite la determinación de la misma. Una vez obtenida la conductividad térmica y la efusividad térmica del material es posible calcular la capacidad calorífica y la difusividad térmica según las formulas (1) y (2):

$$Cp = e^2 / (k \cdot p) \quad (1)$$

$$\alpha = k / (\rho \cdot Cp) \quad (2)$$

Donde:

- Cp es el calor específico [$\text{J}/\text{kg}/\text{K}$]
- α es la difusividad térmica [m^2/s]
- e es la térmica effusivity [$\text{Ws}^{0.5}/\text{m}^2\text{K}$]
- k la conductividad térmica [W/mK]
- ρ la densidad aparente [g/cm^3]

En función del tipo de muestra a ensayar hay que configurar el tipo de ensayo y el equipo. Para ello, se selecciona un tipo de test de entre los que ofrece el programa para fijar el rango de medida de la conductividad térmica, así como el agente de contacto a modo de interfase entre el sensor y la probeta (grasa térmica, agua, glicol o ninguno). El mejor agente de contacto es el agua ya que tiene una conductividad térmica relativamente alta ($\approx 0,6\text{ W}/\text{mK}$), baja viscosidad, y es fácil de aplicar y limpiar. Sin embargo, el principal inconveniente es que al tratarse de probetas de matriz de yeso, el agua no puede utilizarse. Esto es debido a que aunque la solubilidad del yeso en agua no es muy elevada sí que se produce un deterioro en sus características resistentes, ya que el agua libre que absorbe el yeso actúa a modo de lubricante entre su estructura cristalina, deshaciendo la trabazón formada por la disposición de los cristales. Del mismo modo, según la guía de usuario del analizador, se recomienda evitar el uso de agentes de contacto tradicionales (agua o glicol) cuando se ensayan materiales como el yeso, ya que pueden ser absorbidos y afectar a la medición. En este sentido, la guía también recomienda utilizar la grasa térmica como agente de contacto. Por todo lo anterior, se ha considerado que el agente de contacto tipo "grasa térmica" (Apply Wakefield™ thermal grease) es el más adecuado para rellenar el espacio de aire entre el sensor y la superficie del material. Este agente de contacto posee una conductividad térmica (0,735 W/mK) similar a la del agua. Una vez definidos tanto el rango de medida (polymers method, 0,13-1,2 W/mK) como el agente de contacto se procedió a calibrar el equipo con ayuda de una muestra de referencia de conductividad conocida (Pyrex – vidrio de borosilicato).

Para la preparación de las muestras, en primer lugar se limpió la superficie de la probeta para eliminar la existencia de polvo u otras sustancias que puedan distorsionar la medida. A continuación se apli-

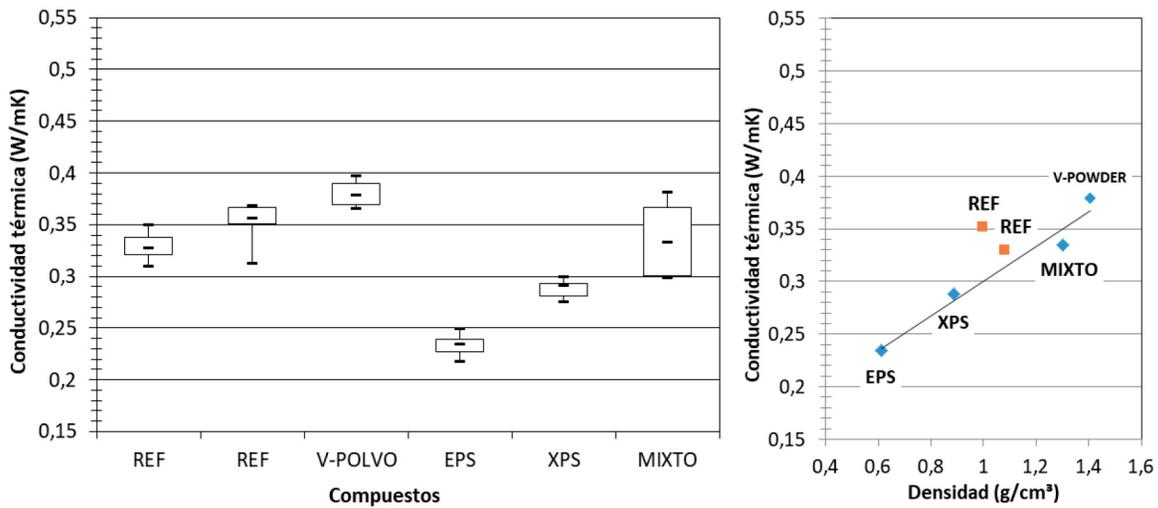


Fig. 3: Diagrama de caja de bigotes de conductividad térmica según muestra (izquierda) y diagrama de conductividad térmica frente densidad según muestra (derecha)

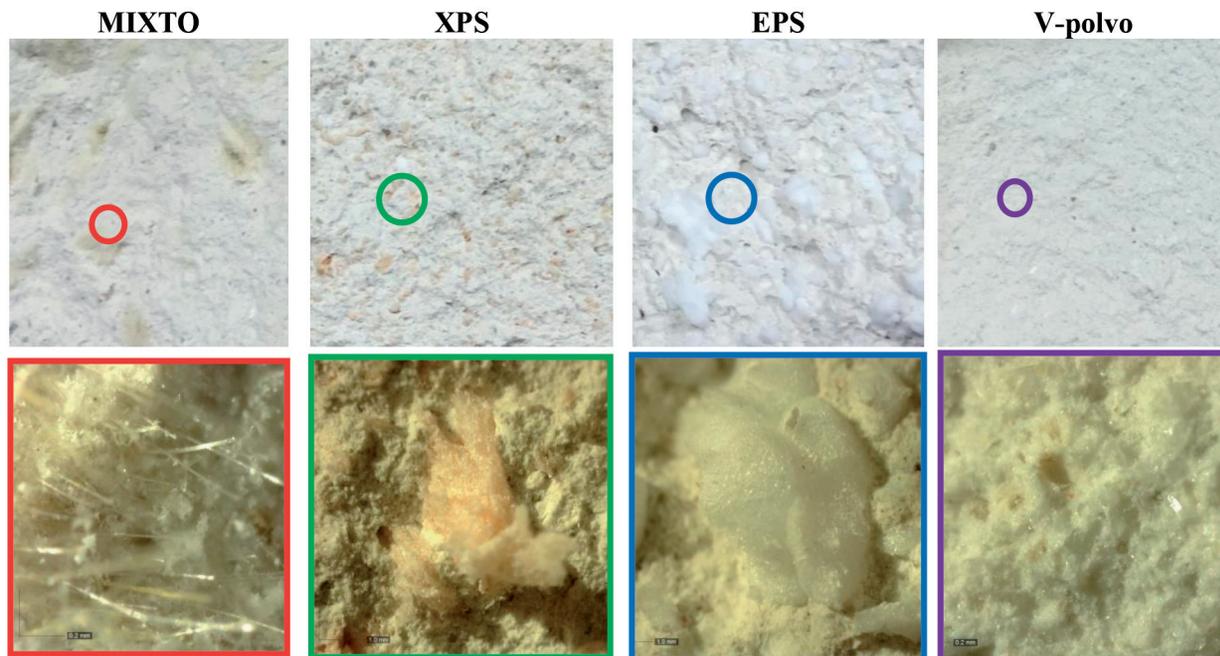


Fig. 4: Exploración visual de las muestras con el microscopio (x50)

có la grasa térmica sobre la superficie del sensor, se colocó la muestra encima del sensor y finalmente la pesa de 500g encima (Fig. 2). Una vez todos los ajustes del analizador estaban preparados se comenzó con el ensayo. En cada una de las muestras se ha medido la efusividad térmica y la conductividad térmica en al menos seis zonas diferentes de la probeta. Las medidas se han tomado en todas las caras de la probeta, a excepción de la cara superior, ya que presenta un acabado rugoso poco representativo del material que puede llevar a errores de medida. Una vez tomadas las mediciones, se han promediado los valores descartando los valores erróneos. Por último, se realizó una exploración visual con un microscopio digital modelo Dino-Lite™ con el fin de analizar la adherencia del residuo con la matriz de yeso. Es un microscopio digital para realizar análisis visuales que permite la ampliación de 10x a 220x. Se puede encontrar más información en la hoja de especificaciones técnicas del fabricante [20].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos durante la calibración han servido para realizar ajustes y poner a punto el equipo de medida. La con-

ductividad térmica promedio del Pyrex (vidrio de borosilicato) obtenida es de $1,113 \pm 0,02$ W/mK. Teniendo en cuenta que la desviación existente entre el valor de referencia (1,143 W/mK) es menor al 1%, y que el manual de usuario recomienda un rango de aceptación de 1,09 hasta 1,20 W/mK, los resultados se consideraran satisfactorios para continuar con los ensayos. La Figura 3 (izquierda) muestra un diagrama de cajas y bigotes a partir de los valores de conductividad térmica de las seis muestras ensayadas mientras que la Figura 3 (derecha) muestra un gráfico de dispersión que relaciona la densidad de las muestras y la conductividad térmica. Los valores obtenidos de conductividad térmica corresponden al promedio de al menos seis medidas tomadas en diferentes zonas de cada una de las muestras. Cabe destacar que durante los ensayos ha sido necesario repetir algunas medidas, ya que la rugosidad de las caras de las probetas a veces impide un contacto total con el sensor. Esto se puede comprobar, primero porque las medidas de coeficiente de conductividad salen muy bajas, lo que quiere decir que el sensor está tomando la medida en el aire, y segundo porque en la probeta queda la marca del contacto con el sensor y puede detectarse por la mancha que el contacto no es total.

| | REF | REF | V-polvo | EPS | XPS | MIXTO |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Densidad (g/cm ³) | 1,08 ± 0,01 | 0,98 ± 0,01 | 1,41 ± 0,02 | 0,61 ± 0,02 | 0,89 ± 0,02 | 1,3 ± 0,02 |
| (Ws ^{0.5} /m ² K) | 701 ± 16 | 710 ± 25 | 741 ± 13 | 583 ± 11 | 642 ± 9 | 692 ± 37 |
| Conductividad térmica (W/mK) | 0,33 ± 0,01 | 0,35 ± 0,02 | 0,38 ± 0,01 | 0,23 ± 0,01 | 0,29 ± 0,01 | 0,33 ± 0,03 |
| La difusividad térmica (m ² /s) .10 ⁷ | 2,21 ± 0,1 | 2,46 ± 0,6 | 2,62 ± 0,08 | 1,61 ± 0,07 | 2 ± 0,06 | 2,33 ± 0,2 |
| Calor específico (J/kg/K) | 1380 ± 13 | 1438 ± 18 | 1031 ± 1 | 2368 ± 10 | 1616 ± 1 | 1105 ± 4 |

Tabla III: Propiedades térmicas y densidad de las muestras ensayadas

| Referencia | Agua/Yeso | Densidad (g/cm ³) | Coefficiente de conductividad térmica [W/mK] | Método de medición |
|--------------|-----------|-------------------------------|--|--|
| Este trabajo | 0,80 | 1,08 | 0,33 | Fuente plana transitoria modificada |
| Este trabajo | 0,80 | 1,00 | 0,35 | Fuente plana transitoria modificada |
| [21] | 0,80 | 1,48 | 0,31 | Placa caliente protegida (UNE12670) |
| [16] | 0,75 | 1,02 | 0,35 | Fuente plana transitoria |
| [9] | 0,80 | 1,30 | 0,25 | Analizador de conductividad térmica (caja) |
| [15] | 0,80 | 0,98 | 0,14 | Analizador de conductividad térmica (caja) |

Tabla IV: Resultados de conductividad térmica obtenidos en anteriores investigaciones de yeso

En las gráficas se puede apreciar que las muestras que incorporan residuos de obra (ej. XPS y EPS) en su matriz de yeso proporcionan valores de conductividad térmica más bajos que los obtenidos en los casos de referencia (solo yeso). El porcentaje de mejora de conductividad térmica varía en función del residuo aplicado, obteniéndose hasta un 56% de mejora en el caso del EPS. Estos resultados ponen de manifiesto que la incorporación de residuos de obra en matriz de yeso puede optimizar las propiedades térmicas del material. Sin embargo, este hecho debe seguir siendo investigado considerando un mayor número de muestras y porcentajes de residuo. Además también se debe considerar que diferentes proporciones del mismo residuo puede producir variaciones en la superficie específica de los componentes y la demanda de agua, afectando la porosidad y conductividad térmica final del material.

Por otro lado, se observa que el rango intercuartílico es $\leq 0,020$ W/mK en todos los casos excepto en la muestra con residuo mixto (polvo de vidrio y fibra de lana de vidrio) donde alcanza los 0,066 W/mK. Teniendo en cuenta que se han tomado un mínimo de seis mediciones en cada una de las muestras, los valores de dispersión obtenidos indican que el residuo está distribuido de manera bastante homogénea.

Los resultados revelan el potencial de utilizar agregados procedentes de residuos de construcción en matrices de yeso. La tendencia general muestra que la conductividad térmica de los materiales disminuye a medida que disminuye su ligereza. Por tanto, dada la baja conductividad, estos compuestos de yeso con residuo reciclado son ideales para ser integrados en determinados elementos constructivos del edificio como por ejemplo el trasdosado interior. Este hecho permitiría reducir el coeficiente de transmisión térmica en la envolvente del edificio y reducir el consumo energético edificio debido a las pérdidas y ganancias energéticas por transmisión. Los valores más bajos de conductividad corresponden a las muestras de menor densidad, que son las que contienen residuo de EPS (0,234±0,01 W/mK) y residuo de XPS (0,288±0,01 W/mK). Por otro lado, los valores de conductividad térmica más elevados corresponden a las muestras de mayor densidad, que son las que contienen residuo de vidrio en polvo (0,379±0,012 W/mK) y residuo mixto de vidrio en polvo y fibra de lana de vidrio (0,334±0,03 W/mK).

Además, una exploración visual se realizó utilizando un microscopio digital a fin de analizar la forma en que los residuos se

integran en la matriz de yeso (Figura 4). Se observa que los residuos se integran de forma homogénea a lo largo de la superficie de las muestras. La ausencia de cavidades de aire interior impide cualquier reducción de las propiedades resistentes del material.

La Tabla 3 muestra las propiedades térmicas y la densidad promedios de las seis muestras ensayadas. Los valores obtenidos pueden ser de gran ayuda en el desarrollo de modelos numéricos avanzados que permitan cuantificar el potencial de ahorro energético de los materiales con residuo desarrollados.

Finalmente, las muestras de referencia (sin RCD) analizadas en este trabajo (usando la prueba técnica Fuente Plana Transitoria Modificada) fueron comparadas con otras muestras de referencia (sin RCD) de otros autores que utilizaron otras técnicas de medición del coeficiente de conductividad térmica. De esta manera, es posible saber cómo el método de medición influye en los resultados, ya que las muestras de referencia han sido fabricadas un yeso similar y la misma proporción de yeso y agua. Los detalles se muestran en la Tabla 4.

La Figura 5 relaciona los valores de densidad y de conductividad térmica en función de la técnica de medición utilizada. La comparación se ha realizado únicamente considerando las muestras de yeso sin residuo agregado con el fin de obtener valores similares de conductividad térmica y densidad. Los valores de conductividad térmica

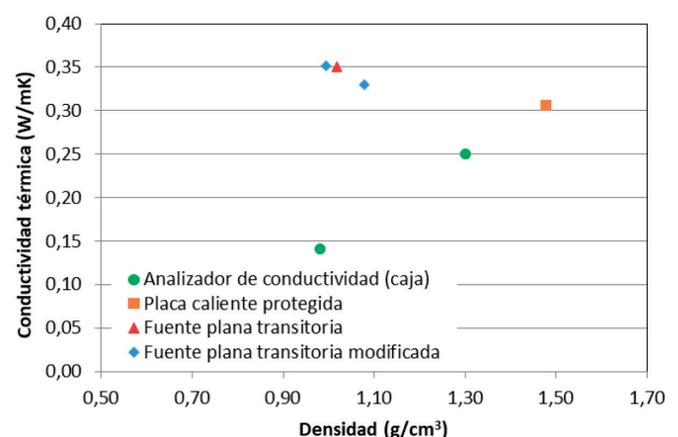


Fig. 5: Densidad frente a coeficiente de conductividad térmica en función de la técnica de medición

mica obtenidos tanto con el método de la Fuente plana transitoria como con el método de la Fuente plana transitoria modificada son muy similares ($\approx 0,35$ W/mK) y próximos al valor de conductividad del yeso indicado por los fabricantes. Este hecho indica que ambos métodos ofrecen una razonable precisión en la medida.

Por otro lado, el método de la Caja Térmica arroja valores de conductividad que son ligeramente inferiores a los valores indicados por el fabricante (0,25–0,40 W/mK). Además, los valores difieren en más del 50% cuando los comparamos con la técnica de la Fuente plana transitoria modificada. Teniendo en cuenta que la misma probeta ha sido medida por ambas técnicas (Fuente plana transitoria modificada y Caja Térmica), sería necesario profundizar en el análisis del proceso metodológico de la técnica de ensayo (Caja térmica) así como la precisión del dispositivo, con el fin de identificar la causa de la desviación de valores.

4. CONCLUSIONES

Considerando el marco contextual sobre el impacto ambiental del sector de la edificación y la situación del yeso como material de construcción, es necesario diseñar materiales que no solo fomenten la reutilización de residuos sino que optimicen el comportamiento térmico de los yesos tradicionales. Los resultados revelan el potencial de utilizar agregados procedentes de residuos de construcción en matrices de yesos, optimizando sus propiedades térmicas y haciéndolos mejores aislantes térmicos.

La tendencia general observada en las muestras ensayadas indica que la conductividad térmica disminuye a medida que también lo hace su ligereza. Cuando el agregado es residuo de EPS, la conductividad térmica ($0,234 \pm 0,01$ W/mK) es un 56% menor respecto a la muestra de referencia. En este sentido, estos compuestos de yeso con residuos reciclados podrían ser de gran utilidad en determinados elementos constructivos como por ejemplo el trasdosado interior de la fachada, ayudando a mejorar el comportamiento energético global del edificio. No obstante, a pesar de los resultados positivos obtenidos, es necesario continuar investigando y ampliando el número de muestras a ensayar así como los porcentajes de residuo.

Además, a partir del análisis de los distintos métodos existentes de medición de conductividad térmica en las muestras de yeso de referencia (sin RCD), se puede concluir que todos los resultados están comprendidos dentro de los valores indicados por los fabricantes, a excepción de aquellos obtenidos con el método de la caja térmica. El método de Caja Térmica alcanza valores que difieren en más de un 50% respecto al método de la Fuente plana transitoria modificada. Por el contrario, tanto el método Fuente plana transitoria como el método de la Fuente plana transitoria modificada tienen un nivel de precisión aceptable ya que llegaron a resultados muy similares, que estaban cerca del valor de conductividad térmica del yeso indicado por los fabricantes ($\approx 0,35$ W/mK).

Además, el presente trabajo aporta datos sobre las propiedades térmicas (conductividad, efusividad, difusividad y calor específico) y de densidad de los materiales, lo cuales pueden ser de gran ayuda para el desarrollo de modelos numéricos avanzados que permitan cuantificar el potencial de ahorro energético de los eco-yesos desarrollados.

REFERENCIAS

[1] European Commission. (2014). Eurostat statistics for waste flow generation. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/environment/waste/main-tables>

[2] Parlamento Europeo, "Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas," ed, 2008.

[3] P. Villoria Saez, M. del Río Merino, A. San-Antonio González, and C. Porras-Amores, "Best practice measures assessment for construction and demolition waste management in building constructions," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 75, pp. 52-62, 2013/06/01/ 2013.

[4] Comunidad de Madrid, "Plan Regional de Residuos de Construcción y Demolición 2006-2016," 2006.

[5] J. Cha, J. Seo, and S. Kim, "Building materials thermal conductivity measurement and correlation with heat flow meter, laser flash analysis and TCI," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 109, pp. 295-300, 2012.

[6] G. Camarini and S. M. M. Pinheiro, "Microstructure of Recycled Gypsum Plaster by SEM," *Advanced Materials Research*, vol. 912-914, pp. 243-246, 2014.

[7] R. X. Magallanes-Rivera, C. A. Juárez-Alvarado, P. Valdez, and J. M. Mendoza-Rangel, "Modified gypsum compounds: An ecological-economical choice to improve traditional plasters," *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 591-596, 2012/12/01/ 2012.

[8] R. H. Geraldo, S. M. M. Pinheiro, J. S. Silva, H. M. C. Andrade, J. Dweck, J. P. Gonçalves, and G. Camarini, "Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution," *Journal of Cleaner Production*, vol. 164, pp. 288-300, 2017.

[9] M. J. Morales-Conde, C. Rodríguez-Liñán, and M. A. Pedreño-Rojas, "Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works," *Construction and Building Materials*, vol. 114, pp. 6-14, 2016/07/01/ 2016.

[10] A. Bicer and F. Kar, "Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 1, pp. 59-65, 2017/03/01/ 2017.

[11] S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, C. Junco, and V. Calderón, "Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes," *Construction and Building Materials*, vol. 28, pp. 653-658, 2012/03/01/ 2012.

[12] Código Técnico de la Edificación, "Documento básico HE Ahorro de energía," ed, 2006.

[13] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja and Instituto de la Construcción de Castilla y León. (2007). CTE WEB. Código técnico de la edificación Available: <http://cte-web.iccl.es>

[14] A. San-Antonio-González, M. D. R. Merino, C. V. Arrebola, and P. Villoria-Sáez, "Lightweight Material Made with Gypsum and EPS Waste with Enhanced Mechanical Strength," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, 2015.

[15] A. San-Antonio-González, M. Del Río Merino, C. Viñas Arrebola, and P. Villoria-Sáez, "Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour," *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 57-63, 2015/09/15/ 2015.

[16] S. Romaniega Piñero, "Refuerzo de la escayola mediante fibras de lana mineral procedentes del reciclaje de RCD. Tesis Doctoral," E.T.S. Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2016.

[17] P. S. Gobain. (2017). IBERPLAST YG. Available: <https://www.placo.es/Portals/0/Documentacion/Productos/Yesos%20Escayolas/2.1.1.%20IBERPLAST.pdf>

[18] UNE-EN 13279-1, Gypsum binders and gypsum plasters. Part 1: Definitions and requirements. , S. A. f. S. a. Certification, 2009.

[19] UNE-EN 13279-2, Gypsum binders and gypsum plasters. Part 2: Test methods, S. A. f. S. a. Certification, 2011.

[20] D.-L. Europe. (2007). Dino-Lite iluminación especial. Modelo AM4113T-FV2W. Available: <https://www.dino-lite.eu/index.php/es/component/k2/item/1345-am4113t-fv2w?tmpl=component&print=1>

[21] S. Gutiérrez González, J. Gadea, A. Rodríguez, C. Junco, and V. Calderón, "Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes," *Construction and Building Materials*, 2012.

AGRADECIMIENTOS

La investigación realizada ha sido financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España (Número de referencia del proyecto BIA2013-43061-R). Además, los autores agradecen el apoyo prestado por el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Edificación de Madrid (UPM).