

A.Serrano^a, M.Carmona^a, J.F.Rodríguez^a, A.M.Borreguero^a,
I.Garrido^b, J.Catalá^a, M.Rodríguez^a.

^a Departamento de Ingeniería Química, Instituto de Tecnología Química y Medioambiental, Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, 13004, España.

^b Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela de Arquitectura, Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, 45071, España.

Desarrollo de espumas rígidas de poliuretano de baja densidad conteniendo microcápsulas termorreguladoras

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 5 de Mayo 2017

En la versión revisada 5 de Mayo 2017

Aceptado 31 de Mayo 2017

Accesible online 21 de Junio 2017

Palabras clave:

Espuma rígida poliuretano

Material de cambio de fase

Captación pasiva de energía

PCM

Durante los últimos años se han llevado a cabo varios estudios incorporando PCMs en materiales de construcción. La combinación de las propiedades de almacenamiento y aislamiento térmico que presentan las espumas rígidas de poliuretano conteniendo PCMs permiten reducir las pérdidas durante el calentamiento y enfriamiento al mismo tiempo que almacenan energía, haciendo de estos composites un elemento ideal para el incremento de la eficiencia energética de edificios.

Para combinar de una manera óptima ambas propiedades, en este trabajo se ha estudiado la síntesis de espumas de poliuretano rígidas (RPU) conteniendo hasta un 30% en peso de microcápsulas termorreguladoras a presión atmosférica y de vacío (800 y 700 mbar). Las microcápsulas empleadas han sido obtenidas en una planta piloto de spray-drying situada en el Instituto de Tecnología Química y Medioambiental (UCLM). Las espumas obtenidas han sido caracterizadas física (densidad), térmica (capacidad de almacenamiento térmico y conductividad térmica) y mecánicamente (módulo de elasticidad a la compresión).

Como resultado de esta investigación se ha obtenido una espuma RPU sintetizada a 800 mbar y conteniendo un 30% en peso de microcápsulas, con un calor latente de 21,3 J/g y una capacidad de almacenamiento térmico de 1,43 kWh/m³ que además, conserva la capacidad aislante del poliuretano. Esta espuma, presenta una buena resistencia a la compresión con una densidad que cumple la normativa española para la aplicación de espumas RPU en edificios.

Development of light rigid polyurethane foams containing thermoregulating microcapsules

ABSTRACT

Keywords:

Rigid polyurethane foam

Phase Change Material

Passive design

PCM

During the past years the incorporation of PCMs in building materials has been extensively studied. The combination of isolation and thermal storage properties that rigid polyurethane foams containing PCMs exhibit allows to reduce the losses during the warming and cooling at the same time that they store energy, making these composites an ideal element for the increase of the energy efficiency of buildings.

In order to combine both properties in an optimal way, in this work the development of rigid polyurethane foams (RPU) containing up to 30 wt% of thermoregulatory microcapsules at 700, 800 mbar and atmospheric pressure has been studied. The used thermoregulatory microcapsules have been obtained in a spray-drying pilot plant at the Instituto de Tecnología Química y Medioambiental (UCLM). Obtained foams have been physically (density), thermally (thermal energy storage capacity and thermal conductivity) and mechanically (modulus of elasticity in compression) characterized.

As a result of this research, a RPU foam synthesized at 800 mbar, containing 30 wt% of microcapsules, with a latent heat of 21.3 J/g and a thermal energy storage capacity of 1.43 kWh/m³ has been obtained. In addition, this foam keep the isolation property of the polyurethane. The final composite presents a proper resistance to compression with a density that fulfills the Spanish regulation for the RPU foams application in buildings.

1 Introducción

El rendimiento energético de los edificios es un punto clave para alcanzar los objetivos climáticos y energéticos de la mayoría de países europeos. Estos objetivos son los definidos por la Directiva Europea 2012/27/UE [1] la cual enfatiza en la necesidad de incrementar la eficiencia energética con el fin de reducir en un 20% el consumo de energía primaria de la Unión para el 2020. De acuerdo con la Directiva Europea 2010/31/UE [2] el sector residencial es responsable del 40% del total del consumo energético en la Unión.

Además, aproximadamente el 85% de las viviendas existentes fueron construidas antes de 1990 con una mala calidad de fachada y baja capacidad aislante [3]. Debido a esta debilidad mucha energía es derrochada cuando están funcionando equipos auxiliares de calefacción o aire acondicionado.

La captación pasiva de energía solar puede ser una solución alternativa para el calentamiento de edificios, pero la radiación solar es una fuente de energía intermitente y de carácter variable por lo que, para ser usada de manera eficiente es necesario absorberla, almacenarla y distribuirla en forma de calor [4]. Los materiales que presentan estos atributos son los denominados materiales de cambio de fase o PCMs por sus siglas en inglés (Phase Change Materials). Estos compuestos pueden absorber o liberar la energía equivalente a su calor latente cuando la temperatura se encuentra por encima o por debajo de su rango de cambio de fase [5].

Para aprovechar las propiedades de estos materiales los PCMs pueden ser incorporados en materiales de construcción. Existen tres principales métodos de incorporación de PCMs en edificios: incorporación directa, inmersión y encapsulación. Dentro de este último tipo la microencapsulación de PCMs con cubiertas poliméricas destaca como la mejor opción de confinamiento, sobre todo debido a que aumenta la superficie de transferencia de calor, evita la corrosión así como la fuga del PCM y puede ser manejado fácilmente [6, 7]. Dentro de los posibles métodos para llevar a cabo esta microencapsulación se encuentra la técnica denominada spray drying, que minimiza la generación de residuos y la pérdida de materia prima, permitiendo la producción de un producto homogéneo con una distribución de tamaño de partículas deseado dependiendo del diseño del atomizador [8, 9]. Esta técnica consiste en la atomización de una corriente homogénea en una cámara de secado donde el disolvente es evaporado y las partículas sólidas son obtenidas [10].

Durante los últimos años se han llevado a cabo varios estudios incorporando PCMs en materiales de construcción como yeso, hormigón o espumas rígidas de poliuretano (RPU). La combinación de las propiedades de almacenamiento y aislamiento térmico que presentan las espumas rígidas de poliuretano conteniendo PCMs permiten reducir las pérdidas durante el calentamiento y enfriamiento al mismo tiempo que almacenan energía, haciendo de estos composites un elemento ideal para el incremento de la eficiencia energética de edificios.

En anteriores trabajos se llevó a cabo la incorporación de hasta un 50% en peso de microcápsulas termorreguladoras obtenidas mediante spray drying en RPUs [11]. Los resultados obtenidos mostraron el notable incremento en la capacidad de

almacenamiento térmico de las espumas sintetizadas, produciendo un amortiguamiento térmico tanto durante el calentamiento como en el enfriamiento. Sin embargo, se observó una pérdida de la capacidad aislante al alcanzar el estado estacionario, aumentando la conductividad térmica de las espumas con el contenido de microcápsulas. Esta pérdida de efecto aislante es debido al escape del CO₂ producido durante la síntesis de la espuma para elevados contenidos de microcápsulas, fomentando además grandes incrementos en la densidad de las mismas.

Para combinar de una manera óptima el almacenamiento térmico de las microcápsulas con el aislamiento que proporcionan las espumas, en este trabajo se pretende disminuir la densidad de las espumas rígidas de poliuretano conteniendo microcápsulas, intentando mantener ambas propiedades en el compuesto final. Para este fin se propone emplear una baja presión controlada durante la síntesis de espumas de poliuretano rígidas (RPUs).

Hay muy pocas investigaciones reportadas sobre el efecto de la presión en la síntesis de espumas. En estos estudios se muestra que el mezclado de la espuma se ve impedido por la ebullición de los componentes líquidos, además de producir espumas frágiles, sin embargo, la expansión de la misma aumenta significativamente. Estas investigaciones emplearon condiciones de vacío, sin estudiar el efecto de la baja presión en la síntesis de las espumas [12].

Por lo tanto, en el presente trabajo se ha llevado a cabo la incorporación de hasta un 30% en peso de microcápsulas termorreguladoras a espumas rígidas de poliuretano empleando condiciones de baja presión controlada, permitiendo así una notable disminución en su densidad. Además, para mejorar las propiedades mecánicas de las espumas obtenidas se ha modificado la relación PMDI:Polioil respecto a la de la formulación de partida y basándonos en trabajos previos realizados por este mismo equipo de investigación [13]. Las microcápsulas empleadas han sido obtenidas en una planta piloto de spray-drying situada en el Instituto de Tecnología Química y Medioambiental (Itquima) de la UCLM. Las espumas obtenidas a presión atmosférica, 800 mbar y 700 mbar han sido caracterizadas físicamente (densidad), térmicamente mediante calorimetría diferencial de Barrido (DSC) y una instalación de comportamiento térmico y mecánicamente mediante ensayos de compresión.

2 Materiales y métodos

2.1 Materiales

El poliol R-4520 de Repsol YPF S.A. fue el empleado en este trabajo. El difenilmetano diisocianato polimérico fue proporcionado por AISMAR S.A. Se usaron como catalizadores Tegoamin 33 y Tegoamin BDE así como Tegostab B8404 como surfactante, ambos proporcionados por Evonik Degussa International AG. Como agente expansor se empleó agua desionizada. Las microcápsulas termorreguladoras empleadas en esta investigación contienen parafina Rubitherm®RT27 con una carcasa formada por polietileno de baja densidad y etilvinil acetato (mSD). Estas microcápsulas fueron obtenidas siguiendo el método descrito en la patente EP2119498 [14] en una planta piloto de spray



drying. La Figura 1 muestra estas microcápsulas las cuales poseen un tamaño de partícula medio de 10 μm y un calor latente de 98,14 J/g. Para hacer referencia a las microcápsulas emplearemos la abreviación mSD en el resto del texto.

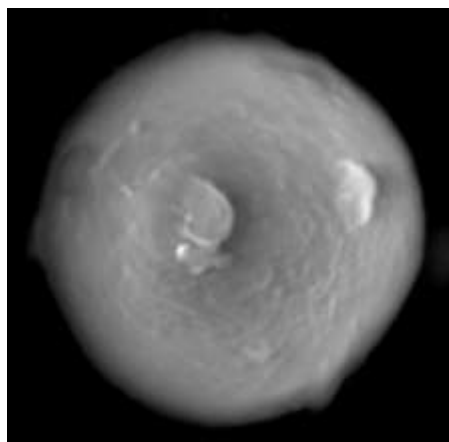


Figura 1. Imagen SEM de una microcápsula (mSD).

2.2 Síntesis de la espuma de poliuretano

Las espumas fueron sintetizadas en un molde prismático para espumación de 20 x 20 x 13 cm^3 mediante pesada previa de las masas deseadas de polioliol, silicona, agua, aminas y mSD, con posterior agitación de la mezcla durante 1 minuto. Tras esta etapa se añade a la mezcla inicial la correspondiente masa de isocianato y la disolución resultante es agitada durante 5 segundos hasta el momento en el que la espuma empieza a crecer. Para controlar la presión durante el período de crecimiento, las espumas son introducidas en un horno de vacío EV 018 de la marca Nüve, conectado a su vez a un vacuómetro y a una bomba de vacío. Las espumas fueron sintetizadas a presión atmosférica, 800 mbar y 700 mbar. Finalmente, las espumas obtenidas fueron curadas a temperatura ambiente. La Tabla 1. muestra la formulación empleada para la síntesis de una espuma sin microcápsulas. El cálculo de la relación PMDI:Poliol fueron basados en estudios previos llevados a cabo en este mismo grupo de investigación [13].

Tabla 1. Relación másica de cantidad de reactivo empleado respecto a la masa de polioliol para la síntesis de las espumas de poliuretano sin mSD.

Reactivo	Ratio reactivo/poliol
Poliol	1
Agua	0,0164
Silicona	0,006
T-33	0,0182
BDE	0,0164
PMDI	1,455

Para facilitar la obtención de una espuma estable, la cantidad de silicona se varió en relación a la cantidad de microcápsulas

adicionadas y en relación másica 0,006; 0,0185; 0,024 y 0,026 para una espuma conteniendo 0, 10, 20 y 30 % en peso de mSD, respectivamente.

2.3 Caracterización de las espumas

2.3.1 Densidad

Se tomaron tres muestras cúbicas de cada espuma de dimensiones 3 x 3 x 3 cm^3 y se llevó a cabo su pesada para el cálculo de su densidad.

2.3.2 Test de compresión

La resistencia a la compresión de las espumas fue analizada de acuerdo al estándar ASTM D1621 para plástico celular rígido. Los tests de compresión uniaxial se llevaron a cabo usando un instrumento de testado MTS 370.02. Los ensayos de compresión se realizaron a la velocidad de deformación de 2.5 mm/min. Las dimensiones de las muestras fueron 5.1 x 5.1 x 2.6 cm y cada análisis fue repetido 3 veces. De esos resultados se determinó el módulo de elasticidad en compresión siguiendo la norma mencionada.

2.3.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las espumas de poliuretano sintetizadas fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) para visualizar cambios en su estructura celular así como para comprobar la localización de las microcápsulas en la estructura interna de la espuma.

2.3.4 Calor latente

El calor latente de las espumas fue estudiado a micro-escala mediante análisis DSC (calorimetría diferencial de barrido). De cada espuma se obtuvo una muestra de forma cúbica de unos 6.0 mg. El análisis DSC fue llevado a cabo en el rango de -20 $^{\circ}\text{C}$ a 50 $^{\circ}\text{C}$ con un ratio de calentamiento de 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

2.3.5 Comportamiento térmico

El comportamiento térmico de las espumas con microcápsulas ha sido estudiado empleando un equipo de fabricación propia, descrito previamente [15, 16]. El sistema experimental se muestra en la Figura 2.

Los ensayos fueron llevados a cabo aplicando un cambio en el set point del baño termostático de 18 a 40 $^{\circ}\text{C}$. En este ensayo, las temperaturas y flujos de calor en distintas posiciones de la probeta son registrados con el tiempo. Las dimensiones de las muestras fueron de 3 x 6 x 10 cm^3 . 6 termopares tipo K fueron colocados a lo largo del espesor de la espuma: dos en la superficie externa (T_{up}), dos en la mitad (T_{middle}) y otros dos en la celda de aluminio (T_{down}). Los flujos de calor fueron medidos mediante 6 sensores de flujo PU22T para monitorizar a tiempo real los flujos de calor a través de cada cara externa de la probeta (Figura 2.b).

Usando estas señales es posible cuantificar la capacidad de almacenamiento térmico (TES) por metro cúbico a macro escala y la conductividad térmica efectiva en el estado estacionario final (k) mediante las ecuaciones (1) y (2), respectivamente.

$$TES = \frac{q_{\text{acc}}}{m_{\text{muestra}}} \cdot \frac{\rho}{3.6 \cdot 10^6} \quad (1)$$



$$k = \frac{Q_{in} \cdot X_f}{(T_{down} - T_{up})} \quad (2)$$

donde q_{acc} es la cantidad de calor acumulado en la muestra durante el experimento (J) y es calculada mediante la diferencia entre el caudal de calor entrante (*flujo de calor por área de flujo*) y los caudales salientes, $m_{muestra}$ es la masa de la probeta de espuma (kg), TES en kWh/m³, Q_{in} en el flujo de calor entrante en el estado estacionario final (W/m²) y x_f (m) es el espesor de la espuma.

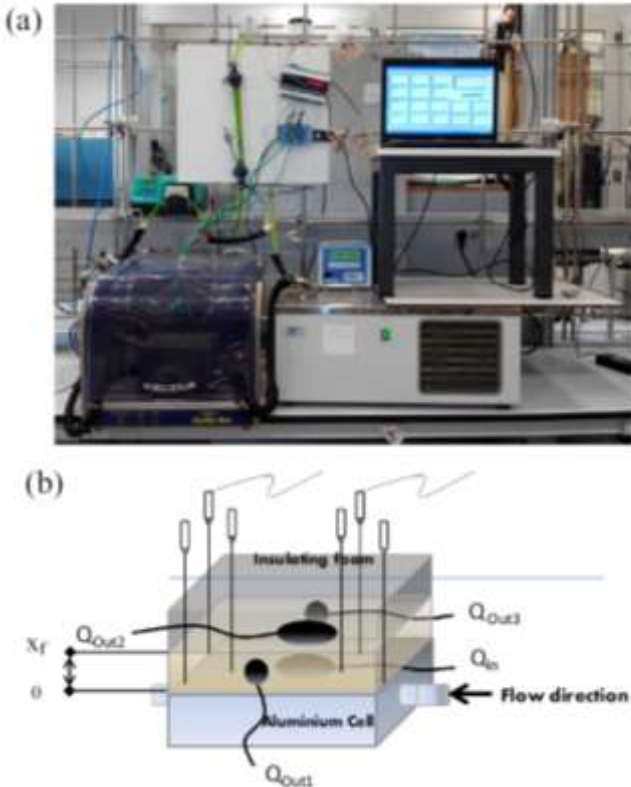


Figura 2. Instalación experimental para el testado del comportamiento térmico de los materiales: a) foto; b) esquema de la posición de los sensores de flujo térmico.

3 Resultados

3.1.1 Densidad

La Figura 3 muestra la densidad de las espumas sintetizadas. Como puede observarse la densidad de las mismas aumenta con el contenido en microcápsulas, sin embargo, a medida que la presión de operación disminuye, la densidad de la espuma decrece, a diferencia de lo que ocurre a 700 mbar y en ausencia de microcápsulas. Este efecto se encuentra en concordancia con los resultados observados al emplear vacío en la síntesis de espumas, donde la baja presión incrementa la expansión de la misma [12]. No obstante, la alta densidad observada a 700 mbar indicaría una gran pérdida de CO₂, lo que disminuye el crecimiento de la espuma y por tanto, provoca un notable descenso en el volumen final de la misma. Comparando la densidad obtenida anteriormente para un 30% en peso de adición de mSD y una relación PMDI:poliol de 1,455, (102 kg/m³) con la obtenida previamente al utilizar el mismo porcentaje de microcápsulas, la relación PMDI:poliol de 1 y presión atmosférica (142 kg/m³), se observa que la

densidad de la espuma disminuye notablemente. Valor que incluso se ve mucho más favorecido al disminuir la presión hasta los 700 mbar (89 kg/m³) aunque la diferencia de ésta con el valor alcanzado a 800 mbar (91 kg/m³) es insignificante. Todas las espumas obtenidas satisfacen la regulación española para la aplicación de espumas RPU en edificios (UNE 92120), la cual especifica una densidad mínima de espuma de 30 kg/m³. Además, podría decirse que una disminución de la presión de 800 a 700 mbar no es justificable desde el punto de vista del incremento en los costes del material.

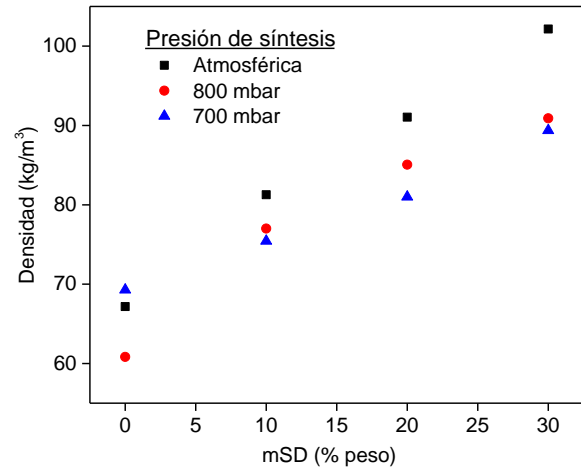


Figura 3. Variación de la densidad de las espumas con la adición de mSD.

3.1.2 Comportamiento mecánico

Como se ha comentado anteriormente, el módulo de elasticidad en compresión se calculó experimentalmente de los ensayos de compresión. Como se muestra en la Figura 4 el módulo de elasticidad de las espumas disminuye con el contenido en microcápsulas. Este descenso puede deberse a la localización de las microcápsulas dentro de la espuma. La aglomeración de microcápsulas en el *strut* (intersección de varias paredes o caras de celdas) de la espuma promueve el colapso parcial de las celdas, disminuyendo la resistencia de la espuma [17]. Aunque se aprecia una bajada de la resistencia mecánica a la compresión este detrimento no es muy acusado, sobre todo en el caso de emplear 800 mbar de presión durante el crecimiento de la espuma. El valor del módulo de elasticidad para una espuma conteniendo un 30% en peso de mSD y sintetizada a 800 mbar es de 6.9 MPa, mientras que, tanto en la espuma sintetizada previamente como en las presentes en esta investigación el módulo de elasticidad se encuentra en torno a 4 MPa al añadir un 30% en peso de mSD [17]. Por tanto, mediante análisis mecánicos se confirma que 800 mbar es la presión más adecuada para sintetizar este tipo de espumas.



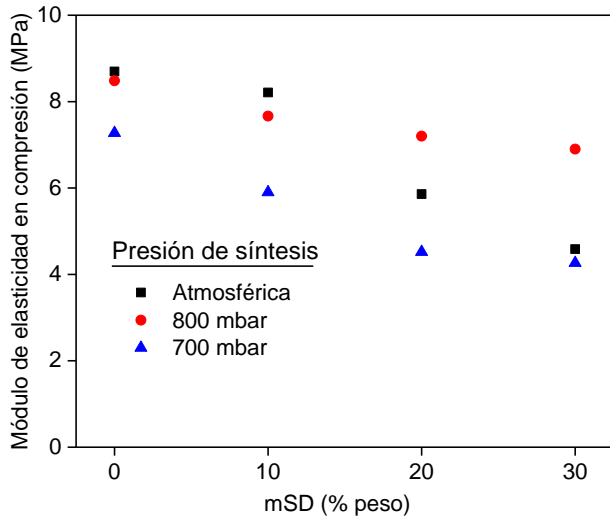


Figura 4. Módulo de elasticidad en compresión de espumas de poliuretano conteniendo microcápsulas sintetizadas a diferentes presiones.

3.1.3 Calor latente de las espumas

Con el objetivo de confirmar la presencia de las microcápsulas y conocer su contenido real en las espumas obtenidas se cuantificó el calor latente de las muestras mediante análisis DSC (Figura 5).

Estos análisis confirman la presencia de las microcápsulas en las espumas, además, como indica la Figura 5 el calor latente aumenta linealmente con el contenido de microcápsulas. Comparando los calores latentes para las diferentes presiones de operación podemos afirmar que las espumas sintetizadas a 800 mbar presentan calores latentes superiores a los de sus homólogas sintetizadas a presión atmosférica y 700 mbar. El calor latente que exhibe la espuma sintetizada a 800 mbar y conteniendo un 30% en peso de mSD (21,3 J/g) es muy similar al reportado en literatura para ese mismo contenido de microcápsulas (25,5 J/g) [11].

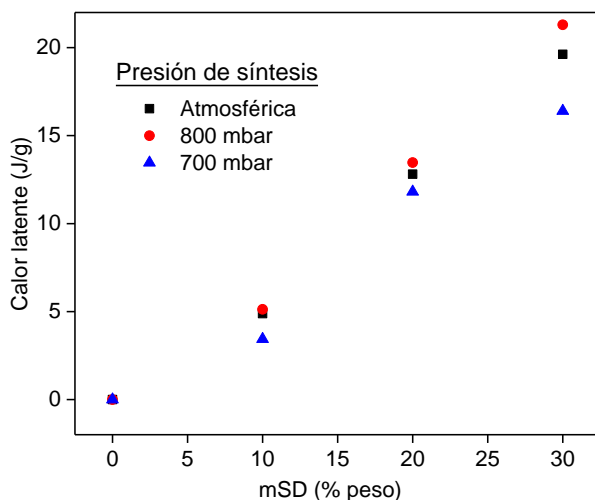


Figura 5. Calor latente de las espumas sintetizadas obtenido mediante análisis DSC.

3.1.4 Comportamiento térmico

La Figura 6 muestra los perfiles de temperatura de la superficie externa de las diferentes espumas conteniendo mSD cuando estas son sometidas al proceso de calentamiento descrito anteriormente.

La representación de los perfiles de temperatura muestra cómo su pendiente en el estado transitorio (tiempo < 4500 s) es prácticamente independiente del contenido en microcápsulas para las espumas sintetizadas a presión atmosférica y a 700 mbar, no evidenciándose el efecto amortiguador térmico de las microcápsulas. Sin embargo, los perfiles de las espumas obtenidas empleando 800 mbar de presión muestran una menor pendiente a medida que aumenta el contenido en microcápsulas, indicando un fuerte efecto amortiguador y por tanto, un mayor tiempo de operación (tiempo > 7500 s para mSD=30 %p/p). Además, una vez alcanzado el estado estacionario, se observa una menor temperatura final de la superficie externa con respecto a la temperatura de la espuma sin microcápsulas. Esta menor temperatura sugiere que la conductividad térmica de las espumas sintetizadas a 800 mbar disminuye con el contenido de microcápsulas. Puede observarse como a presión atmosférica y a presión de 700 mbar, el perfil térmico de las espumas conteniendo mSDs queda siempre por encima del de la espuma libre de microcápsulas y por tanto, no se consigue en estas condiciones un material que conserve su capacidad aislante. Estos resultados permiten concluir que una presión de 800 mbar permitiría sintetizar espumas RPU con capacidad aislante y con gran capacidad de almacenamiento térmico.

La amortiguación producida por el PCM en las espumas sintetizadas a 800 mbar queda aún más patente al observar el perfil de flujo de calor saliente (superficie superior externa) (Figura 7).

El flujo de calor saliente por la superficie de la espuma presenta un cambio de pendiente que se vuelve más abrupto con el aumento del contenido en microcápsulas. Este descenso en el flujo de calor de salida es debido a la absorción de energía por parte del PCM para cambiar su estado de agregación de sólido a líquido sin aumento de temperatura.



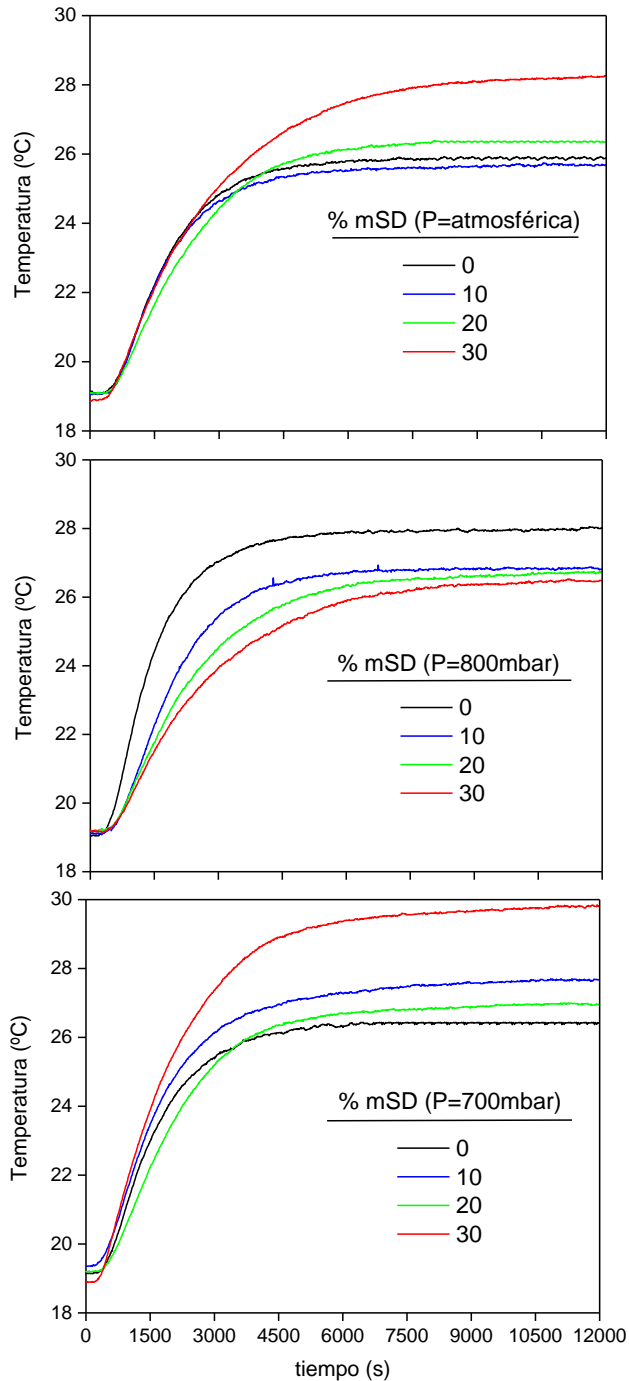


Figura 6. Efecto de la presión y el contenido de microcapsulas sobre la temperatura externa de las espumas al ser sometidas a un cambio de set-point en el baño termostatzado de 18 a 40 °C.

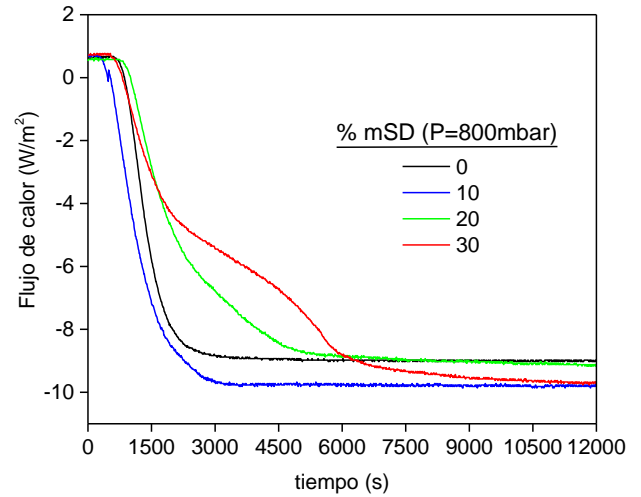


Figura 7. Flujos de calor saliente para las espumas de poliuretano con diferentes contenidos de mSD y sintetizadas a 800 mbar de presión de operación cuando son sometidas a un cambio de set-point en el baño termostatzado de 18 a 40 °C.

En la Figura 8 se muestran fotografías e imágenes SEM para las espumas conteniendo un 30% en peso de microcápsulas, sintetizadas a distintas presiones. Mientras que para presión atmosférica y 800 mbar las espumas presentan un tamaño de celda medio de 649 y 773 μm respectivamente, para la espuma a 700 mbar el tamaño medio de celda es de 2853 μm , valor muy superior a las otras dos espumas, respaldando así la hipótesis del escape de CO_2 .

Esta figura explica perfectamente la alta conductividad térmica obtenida para las las espumas de 700 mbar ya que las celdas tienden a ser celdas abiertas y en las que el CO_2 prácticamente ha escapado. Igualmente, este tamaño y forma de las celdas está completamente relacionado con el menor valor del módulo de elasticidad a la compresión obtenido para esta espuma. Por otro lado, el incremento de la conductividad térmica de las espumas obtenidas a presión atmosféricas está más relacionado con la densidad de la espuma que con el tamaño de la celda que es incluso menor que el de la espuma sintetizada a 800 mbar. Por último, las espumas generadas a 800 mbar presentarían un descenso de la densidad sin detrimento de la estructura celular interna, permitiendo la retención del CO_2 de síntesis y manteniendo así la capacidad aislante.



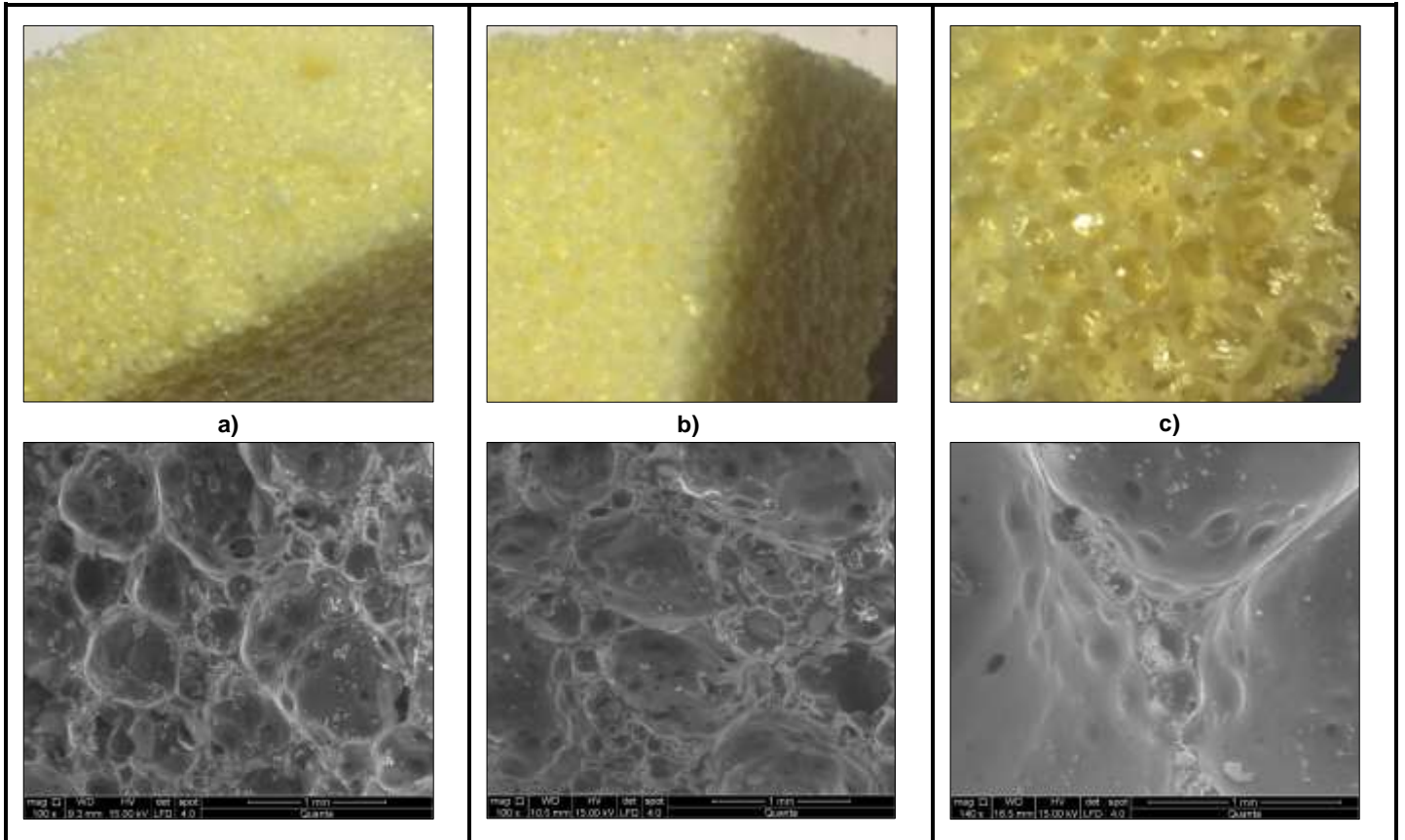


Figura 8. Fotografías e imágenes SEM de las espumas con un 30% en peso de mSD a diferentes presiones de operación: a) atmosférica; b) 800 mbar; c) 700 mbar.

3.1.5 Acumulación de calor y conductividad térmica

Una vez obtenidos los perfiles de temperatura y flujos de calor entrante y saliente podemos calcular tanto el perfil de acumulación de calor como los parámetros de capacidad de almacenamiento térmico, TES, y conductividad térmica para cada espuma. En la Figura 9 se muestra a modo de ejemplo el perfil de acumulación de calor para las espumas sintetizadas a 800 mbar. Como era de esperar a mayor contenido de microcápsulas mayor es el área bajo la curva de acumulación de las espumas y mayor es su tiempo de acumulación de energía.

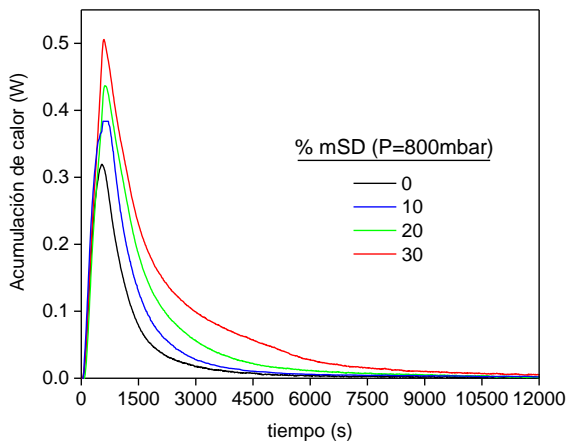


Figura 9. Acumulación de calor de las espumas con diferentes porcentajes de mSD cuando son sometidas a un cambio de set-point en el baño termostatizado de 18 a 40 °C.

La Figura 10 muestra la capacidad de almacenamiento térmico por unidad de volumen de las espumas, observando un crecimiento de la misma con el contenido en microcápsulas. La espuma que mayor TES presenta es la sintetizada a 800 mbar de presión con un contenido del 30% en peso de mSD siendo capaz de almacenar 1,43 kWh por metro cúbico de espuma.

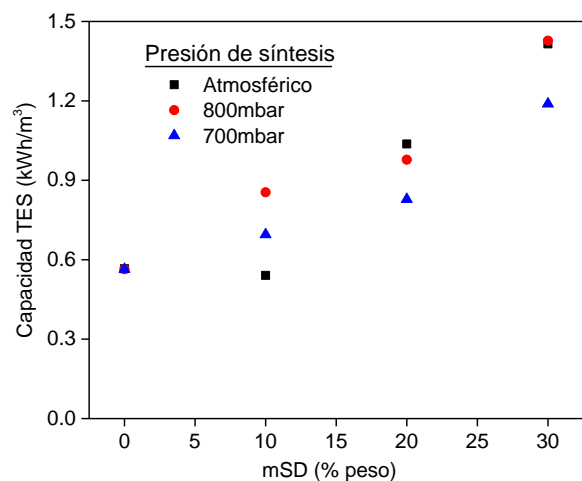


Figura 10. Capacidad TES de las espumas sintetizadas en función del contenido en mSD para cada presión de síntesis.

En la Figura 10 se muestra la conductividad térmica de las espumas sintetizadas. Puede observarse como este parámetro incrementa con el contenido en microcápsulas, sin



embargo, para las espumas obtenidas a 800 mbar de presión, la conductividad térmica se mantiene prácticamente constante. Además esta conductividad es similar a la presentada por la espuma sin microcápsulas obtenida a presión atmosférica. Estos valores están en concordancia con los resultados observados en los perfiles de temperatura mostrados anteriormente. Por tanto, queda demostrado que cambiando la presión de operación es posible sintetizar espumas que cumplan un doble propósito ya que actuarían como aislantes térmicos al igual que acumuladores de energía. De esta forma, la utilización de estos materiales en los edificios podría permitir alcanzar los objetivos de ahorro energético marcados en la anteriormente mencionada directiva europea.

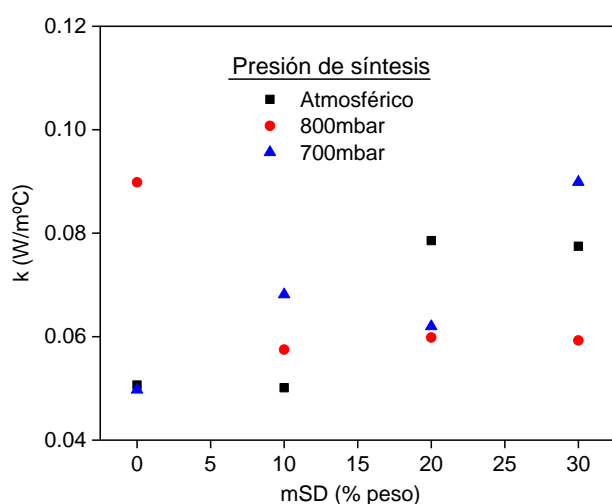


Figura 11. Conductividad térmica de las espumas conteniendo diferentes porcentajes de mSD.

4 Conclusiones

Se ha demostrado la viabilidad técnica de producir espumas rígidas de poliuretano a baja presión conteniendo hasta un 30% en peso de microcápsulas termostabilizadoras. El empleo de baja presión durante la síntesis de las espumas permite una mayor expansión de la misma, obteniendo a su vez menores densidades que cuando se obtienen a presión atmosférica. A pesar de la disminución de la densidad las espumas presentan buena resistencia a la compresión, presentando una ligera disminución del módulo de elasticidad al aumentar el contenido de mSD.

Se ha comprobado mediante DSC la presencia de PCM en los compuestos obtenidos, creciendo el calor latente linealmente con el contenido en microcápsulas. Estudiando el comportamiento térmico de las muestras se ha determinado el detrimento de la propiedad aislante en las espumas producidas a presión atmosférica, debido al incremento de su densidad y por tanto al aumento de su conductividad térmica. Las espumas obtenidas a 700 mbar de presión presentan el mismo efecto negativo en la capacidad aislante debido al gran tamaño de sus celdas, que evitan la retención del CO₂ producido durante la síntesis de la espuma. La espuma sintetizada a 800 mbar mantiene la capacidad aislante además de presentar amortiguamiento térmico por efecto del PCM.

Debido a la presencia de ambas propiedades, aislante y acumulador de energía térmica, la espuma sintetizada a 800 mbar con un contenido en microcápsulas del 30% en peso es escogida como la óptima para su aplicación en edificios. Además, esta espuma es la que presenta el mayor módulo de elasticidad a la compresión, un calor latente superior a las demás espumas obtenidas, la mayor acumulación de energía térmica por metro cúbico y la menor conductividad térmica.

Por lo tanto, la aplicación de este tipo de compuestos permitiría aumentar la eficiencia energética de los edificios, reduciendo las pérdidas energéticas y aprovechando la energía solar térmica.

Agradecimientos

El autor agradece la beca del Plan Propio de la Universidad de Castilla-La Mancha (España) para los estudios doctorales de Ángel Serrano Casero.

Referencias

- [1] EU Directive 2012/27/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, (2012).
- [2] EU Directive 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL (on the energy performance of buildings), (2010).
- [3] http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Housing_conditions, 2012.
- [4] W. Xiao, X. Wang, Y. Zhang, Analytical optimization of interior PCM for energy storage in a lightweight passive solar room, *Applied Energy*, 86 (2009) 2013-2018.
- [5] A.M. Borreguero, J.F. Rodríguez, J.L. Valverde, T. Peijs, M. Carmona, Characterization of rigid polyurethane foams containing microencapsulated phase change materials: Microcapsules type effect, *Journal of Applied Polymer Science*, 128 (2013) 582-590.
- [6] N. Soares, J.J. Costa, A.R. Gaspar, P. Santos, Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency, *Energy and Buildings*, 59 (2013) 82-103.
- [7] A.M. Borreguero, I. Garrido, J.L. Valverde, J.F. Rodríguez, M. Carmona, Development of smart gypsum composites by incorporating thermoregulating microcapsules, *Energy and Buildings*, 76 (2014) 631-639.
- [8] A.I.o.C.E.E.T.P. Committee, *Spray dryers: a guide to performance evaluation*, American Institute of Chemical Engineers 2003.
- [9] J.M. Obón, M.R. Castellar, M. Alacid, J.A. Fernández-López, Production of a red-purple food colorant from *Opuntia stricta* fruits by spray drying and its application in food model systems, *Journal of Food Engineering*, 90 (2009) 471-479.
- [10] V. Land, *Industrial Drying Equipment: Selection and Application*, Marcel Dekker, (1991) 362.
- [11] A. Serrano, A.M. Borreguero, I. Garrido, J.F. Rodríguez, M. Carmona, Reducing heat loss through the building envelope by using polyurethane foams containing thermoregulating microcapsules, *Applied Thermal Engineering*, 103 (2016) 226-232.



[12] M. Schoenfeld, M. Tinker, Polyurethane Foam Injection and Expansion in Thin-Film Inflatable Booms Under Semi-Vacuum Conditions, 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics 2003.

[13] D. Simón, A.M. Borreguero, A. de Lucas, J.F. Rodríguez, Glycolysis of viscoelastic flexible polyurethane foam wastes, *Polymer Degradation and Stability*, 116 (2015) 23-35.

[14] M.J. Gravalos, H.I. Calvo, R.J. Mieres, C.J. Cubillo, S.A.M. Borreguer, F.M. Carmona, R.J.F. Rodríguez, P.J.L. Valverde, Procedure for microencapsulation of phase change materials by spray-drying, Google Patents, 2009.

[15] A.M. Borreguero, M. Luz Sánchez, J.L. Valverde, M. Carmona, J.F. Rodríguez, Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content, *Applied Energy*, 88 (2011) 930-937.

[16] C. Barreneche, A. De Gracia, S. Serrano, M. Elena Navarro, A.M. Borreguero, A. Inés Fernández, M. Carmona, J.F. Rodríguez, L.F. Cabeza, Comparison of three different devices available in Spain to test thermal properties of building materials including phase change materials, *Applied Energy*, 109 (2013) 544-552.

[17] A. Serrano, A.M. Borreguero, I. Garrido, J.F. Rodríguez, M. Carmona, The role of microstructure on the mechanical properties of polyurethane foams containing thermoregulating microcapsules, *Polymer Testing*, 60 (2017) 274-282.

