

Incorporación de residuos de pellets de poliuretano para la mejora del aislamiento térmico de bloques de hormigón no estructurales



Incorporation of the polyurethane pellet waste for the improvement of the thermal insulation of non-structural concrete blocks



Eduardo González-Díaz¹, Elena Jaizme-Vega³, Javier Jubera-Pérez³, Manuel Torres-Betancort² y Víctor Sánchez-Fajardo²

Universidad de La Laguna. ¹ Departamento de Técnicas y Proyectos en Ingeniería y Arquitectura y ² Departamento de Física Avda. Ángel Guimerá Jorge, s/n - 38204 La Laguna. Tenerife, Islas Canarias (España).

³ Gobierno de Canarias. Consejería de Obras Públicas, Transportes y Política Territorial. C/ Talavera, s/n - 38291 Llano del Moro. Tenerife, Islas Canarias (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8985> | Recibido: 25/09/2018 • Inicio Evaluación: 27/09/2018 • Aceptado: 03/12/2018

ABSTRACT

- The lapilli is an aggregate commonly used for the manufacturing of commercial concrete blocks in the Canary Islands. These blocks are mainly utilized for exterior walls of buildings. However, these blocks have two main weaknesses. The first is associated with the fact that the concrete mixes, containing only lapilli as an aggregate, have a high thermal conductivity and therefore, subsequent blocks do not perform well as insulation. The second important weakness is that the extraction of this lapilli aggregate causes an enormous landscaped deterioration and environment damage. This research presents the results of an experimental study concerning the improvement of the thermal insulation of the Canarian concrete blocks through the incorporation of polyurethane pellets from waste electrical and electronic equipment. Results show that the inclusion of the pellet waste enhances the thermal behaviour of the concrete between 38% and 64%, compared to concretes containing only lapilli as an aggregate. Furthermore, the inclusion of polyurethane pellet waste provides a recovery procedure of this residue. A concrete block prototype was manufactured using polyurethane pellet waste as an example of a possible building material with a minor environmental impact and an obvious economic saving in raw materials.
- **Key Words:** Canarian concrete block, Thermal conductivity, Polyurethane pellet, Plastic waste, Lightweight concrete.

RESUMEN

El lapilli es un árido comúnmente utilizado en las Islas Canarias para la fabricación de bloques de hormigón comerciales. Estos bloques son usados principalmente en el cerramiento exterior de los edificios. Sin embargo, dichos bloques tienen dos claras debilidades. La primera está asociada al hecho de que las mezclas de hormigón, que contienen solo lapilli como árido, poseen una alta conductividad térmica y, por lo tanto, no tienen un buen comportamiento como aislante térmico. La segunda debilidad es consecuencia del proceso de extracción de este árido de lapilli que provoca un enorme deterioro paisajístico y daños al medio ambiente. Esta investigación presenta los resultados de un estudio experimental sobre la mejora del aislamiento térmico en los bloques de hormigón canarios mediante la incorporación de pellets de poliuretano procedentes de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Los resultados muestran que la inclusión de estos residuos de pellets mejora el comportamiento térmico del hormigón entre el 38% y 64%, en comparación con los hormigones

que solo contienen lapilli. Por otra parte, la inclusión de pellets de poliuretano proporciona un procedimiento de valorización de este residuo. En este sentido, se fabricó un prototipo de bloque de hormigón utilizando pellets de poliuretano como ejemplo del uso de estos residuos en la obtención de un material de construcción con menor impacto ambiental y un evidente ahorro económico en materias primas.

Palabras clave: Bloques de hormigón; Conductividad térmica; Pellet de poliuretano; Residuos; Hormigón ligero.

1. INTRODUCCIÓN

Los hormigones ligeros producidos en las Islas Canarias usan normalmente lapilli como árido. Actualmente, estos hormigones ligeros se utilizan para la fabricación de bloques de hormigón (Figura 1c), que son conocidos en las Islas Canarias con el nombre de bloques de picón. Las mezclas de hormigón hechas con estos áridos de lapilli basáltico (Figura 1b) tienen una alta conductividad térmica, lo cual es una desventaja para su uso como aislamiento térmico. Por otro lado, la explotación de este árido provoca un rápido agotamiento de los recursos naturales en los territorios insulares y un daño paisajístico y ambiental grave (Figura 1a).

Los residuos de pellets de poliuretano (PUR-pellets), mostrados en la Figura 1e, proceden del tratamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), concretamente del reciclaje de refrigeradores. Las espumas rígidas de poliuretano son utilizadas como aislamiento térmico en los refrigeradores y están compuestas por diisocianatos con estructuras aromáticas y polioles de bajo peso molecular. Estas espumas incorporan agentes de expansión de bajo punto de ebullición, normalmente pentano [1]. Los residuos de PUR-pellets utilizados en este estudio se obtuvieron del reciclaje de refrigeradores llevados a cabo por la empresa Ewaste (www.ewaste.es), ubicada en Tenerife, Islas Canarias (Figura 1d). Durante el proceso de reciclaje y después de una fase previa de separación manual de algunos de los componentes del refrigerador, el resto de componentes se trituran para ser separados posteriormente. Uno de estos materiales es una espuma de poliuretano que se peletiza para liberar el propelente atrapado en la misma. La extracción de este propelente se realiza bajo una atmósfera inerte sellada para evitar su emisión a la atmósfera. Finalmente, los residuos de poliuretano, en forma de pellet, se almacenan en grandes bolsas. Los PUR-pellets tienen una forma aproximadamente cilíndrica y miden entre cinco y ocho milímetros de altura y unos cinco milímetros de diámetro.

El objetivo de esta investigación fue el estudio de la influencia del comportamiento térmico de mezclas de hormigón elaboradas sustituyendo áridos de lapilli basáltico por residuos de PUR-pellets. Una mejora en las características térmicas de estos hormigones al incorporar PUR-pellets permitiría la fabricación de bloques con menor espesor. Además, esta sustitución de árido natural por residuos produciría un importante y obvio ahorro de materiales. Sin duda, la utilización de estos PUR-pellets contribuiría al logro de soluciones más sostenibles en la línea que establecen las normas europeas e internacionales. La Figura 1f muestra un bloque de hormigón que contiene PUR-pellets y que se fabricó como prototipo [30] durante este estudio.

Varios investigadores [2] [3] han realizado una revisión bibliográfica que incluye más de 15 artículos en relación a la incorporación de residuos plásticos como áridos para la preparación de hormigones y morteros de cemento. Estos plásticos son de muy variada composición química y procedencia: botellas de PET, recipientes de plástico (80% de polietileno y 20% de poliestireno), tuberías de PVC, residuos de melamina, una mezcla de tereftalato de polietileno (PET) y policarbonato de residuos industriales, y materiales de embalaje compuestos de espumas de poliestireno expandido, entre otros. Solo unos pocos investigadores [4] [5] [6] [7] han trabajado específicamente con los residuos de poliuretano en forma de espuma empleándolo como árido en el hormigón. Sin embargo, no se han encontrado referencias que estudien la incorporación de estos residuos de poliuretano en forma de pellets.

2. METODOLOGÍA

2.1. MATERIALES

Las mezclas de hormigón utilizadas en este estudio se fabricaron con un cemento puzolánico EN 197-1 CEM IV / B (P) 32,5N y diferentes proporciones de residuos de PUR-pellets y lapilli. El

lapilli (también denominado "picón" en las Islas Canarias) es un árido natural de origen volcánico con una morfología vesicular y composición basáltica.

La composición química de los PUR-pellets se determinó combinando un microanálisis por dispersión de energías de rayos-X (EDX) y análisis elemental CNHS. A través de estas técnicas se verificó que los pellets están compuestos mayoritariamente por los principales elementos químicos del polímero en las proporciones que se indican entre paréntesis: carbono (64%), oxígeno (13%), nitrógeno (7%) e hidrógeno (6%). Además, en porcentajes por debajo del 2.5%, los residuos de PUR-pellets también contenían elementos químicos tales como: Ca, Fe, Ti, Si, Cl, Zn, Al, entre otros. Estos últimos elementos químicos son propios de la pintura, el acero y las aleaciones metálicas que formaban parte del refrigerador antes del proceso de trituración. Por lo tanto, sin considerar los elementos químicos con menor porcentaje, los resultados muestran que la composición del PUR-pellet es la propia de los polímeros pertenecientes a la familia de los poliuretanos y que están compuestos principalmente por C, H, O, N [1].

La densidad efectiva [8] del lapilli y del residuo de PUR-pellets fue de 1753 y 832 kg/m³, respectivamente. Esta densidad tiene en cuenta, en la determinación del volumen, tanto los poros abiertos como cerrados. La distribución del tamaño de las partículas de PUR-pellets y lapilli superiores a 63 µm se determinó de acuerdo con [9]. El 94% del residuo PUR-pellets posee un tamaño de partícula entre 4 a 8 mm, el resto de las partículas fueron de inferior tamaño. En el lapilli, los tamaños de partículas se distribuyen de la siguiente manera: 10% de 8 a 10 mm, 60% de 4 a 8 mm, 20% de 2 a 4 mm y 6% de 1 a 2 mm, y el resto posee un tamaño más pequeño.

2.2. MEZCLAS DE HORMIGÓN

Se elaboraron ocho mezclas de hormigón distintas para estudiar la influencia de la incorporación de PUR-pellets en el hormi-



Fig. 1: Cantera de lapilli (a). Áridos de lapilli basáltico (b). Ejemplo de bloque de hormigón canario de 50 cm x 25 cm x 20 cm fabricado con lapilli (c). Imagen parcial de la planta de reciclaje de Ewaste (d). Residuos de pellets de poliuretano (e). Ejemplo de prototipo de bloque de hormigón de 50 cm x 25 cm x 9 cm fabricado con PUR-pellets (f)

gón. Las mezclas se agruparon en dos series diferentes según la cantidad de árido y el contenido de cemento. Una serie de cuatro mezclas con el 100% de PUR-pellets, y otra serie con un 25% de PUR-pellets y 75% de lapilli. En ambas series se variaba el contenido de cemento para cada una de las mezclas. Además, se usaron como referencia varias muestras de bloques de hormigón canarios comerciales [10]. La Figura 2 muestra dos tipos de hormigones fabricados durante esta investigación, uno con 100% de PUR-pellets y otro con un 25% de PUR-pellets y 75% de lapilli. Los porcentajes en peso para cada uno de los componentes de las mezclas se presentan en la Tabla 1.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. TRABAJABILIDAD, DENSIDAD Y RESISTENCIA

La determinación de la trabajabilidad para cada mezcla (Tabla 1) se realizó según [11]. El valor medio y la desviación estándar (\bar{y} , s) obtenida para la densidad del hormigón fresco fue de (1158,16) kg/m^3 y (1472,20) kg/m^3 para las mezclas con 100% y 25% de PUR-pellets, respectivamente. La densidad de hormigón fresco se determinó pesando una mezcla de muestra vertida en un molde de 5 dm^3 y compactada por picado con barra [12]. Los valores de densidad del hormigón fresco obtenidos para cada mezcla se muestran en la Tabla 1. Para los hormigones comerciales, la densidad media del hormigón fresco fue de 1555 kg/m^3 .

Los valores de la Tabla 1 muestran que la densidad en estado fresco de los hormigones con PUR-pellets fue muy baja. Su valor, en algunas mezclas, se aproxima a la densidad del agua, por lo

que el contenido de humedad va a tener influencia significativa en el valor de la densidad del hormigón. Nótese que los valores de densidad seca de las mezclas con 100% de PUR-pellets pasan a estar por debajo de 1000 kg/m^3 (Tabla 2). La densidad seca (ρ_{dry}) del hormigón se midió después de secar las muestras a 50°C hasta lograr una masa constante. Esta metodología con un secado de las muestras a 50°C ha sido usada en otras investigaciones [13] para evitar un cambio en la microestructura de la pasta de cemento (fases cristalinas y fases no cristalinas, gel C-S-H) que puede ocurrir a temperaturas incluso por debajo de 105°C [14].

Para determinar la resistencia mecánica de cada mezcla de hormigón, se ensayaron una serie de tres probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm a resistencia de compresión uniaxial (f_c) y dos probetas prismáticas de 100 mm x 100 mm x 400 mm a resistencia a la flexión (f_f). Los ensayos fueron realizados después de 28 días de curado en cámara húmeda. Los valores de ρ_{dry} , f_c y f_f para las mezclas con 25% y 100% de pellets de PUR, mostrados en la Tabla 2, son los valores medios de los ensayos realizados. En los hormigones comerciales con 100% de lapilli se obtuvo un valor de resistencia a compresión media de (9,9,0.5) MPa sobre seis probetas ensayadas, y un valor de resistencia media a flexión (1,7, 0.1) MPa sobre cuatro probetas. Si se comparan estos valores con los obtenidos en las mezclas de hormigón con PUR-pellets, se observa que solo las mezclas con 25% de PUR-pellets y un mayor contenido de cemento poseen valores de resistencia a flexión cercanos a las mezclas de los hormigones comerciales con 100% de lapilli.

El valor de densidad seca de las mezclas de hormigón con un contenido de 100% PUR-pellets fue inferior a la densidad del agua, con un valor medio y desviación estándar de (916,14) kg/m^3 . La den-

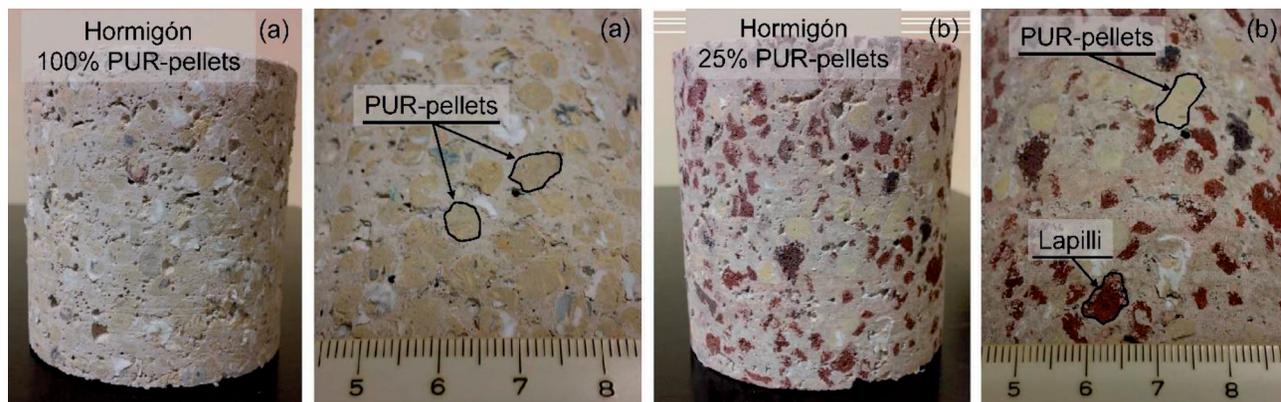


Fig. 2: Ejemplo de muestras de hormigón fabricadas con 100% de PUR-pellets (a) y con 25% de PUR-pellets+75% de lapilli (b)

| Tipo de hormigón | | a/c | Dosificación (kg/m^3) | | | | | | Asiento | Densidad fresco | TGA |
|-----------------------|-----|------|----------------------------------|-------|-------------|-------|---------|-------|---------|-----------------|------|
| | | | Cemento | | PUR-pellets | | Lapilli | | | | |
| | | | kg | %masa | kg | %masa | kg | %masa | | | |
| 100% PUR | P1 | 0.83 | 370 | 31.8 | 489 | 41.9 | 0 | 0 | 6 | 1166 | 44.2 |
| | P2 | | 387 | 34.6 | 409 | 36.6 | 0 | 0 | 20 | 1117 | 49.3 |
| | P3 | | 448 | 37.5 | 373 | 31.3 | 0 | 0 | >25 | 1193 | 58.4 |
| | P4 | | 465 | 40.2 | 306 | 26.5 | 0 | 0 | >25 | 1157 | 62.0 |
| 25% PUR + 75% lapilli | PL1 | 0.83 | 413 | 27.7 | 184 | 12.3 | 575 | 38.5 | >25 | 1492 | 74.3 |
| | PL2 | | 421 | 29.8 | 161 | 11.4 | 502 | 35.5 | 19 | 1414 | 77.0 |
| | PL3 | | 480 | 32.5 | 149 | 10.1 | 468 | 31.7 | 25 | 1477 | 76.5 |
| | PL4 | | 535 | 35.5 | 131 | 8.7 | 411 | 27.3 | >25 | 1504 | 81.1 |

Tabla 1: Dosificación, asiento y densidad en estado fresco, junto con el porcentaje en masa a 900°C obtenido mediante análisis termogravimétrico (TGA) de las muestras de hormigón endurecido

idad seca de las mezclas con un 25% de PUR-pellet fue algo mayor: (1163,38) kg/m³. Por otro lado, para los hormigones con 100% de lapilli, el valor de densidad aumenta a (1442,36) kg/m³.

3.2. ANÁLISIS TERMOTERMIGRÁMETRICO

Con el fin de establecer correlaciones entre el cambio de masa y la composición de la mezcla, cada tipo de hormigón se ensayó mediante análisis termogravimétrico utilizando el equipo Perkin Elmer Thermogravimetric Balance Pyris Diamond TGA/DTA. Esta correlación permitiría disponer de una herramienta para llevar a cabo el control de las dosis de pellets de poliuretano en este tipo de hormigones ligeros. Para realizar los ensayos termogravimétricos, las muestras de hormigón se molieron hasta un tamaño inferior a 1 mm. La masa de cada muestra empleada en el ensayo fue inferior a 10 mg con el objetivo de minimizar diferencias por transferencia de calor. Cada muestra de hormigón fue colocada en un crisol de platino y se calentó con gradiente constante de temperatura igual a 10 K/min desde aproximadamente 50°C a 900°C. El ensayo se realizó bajo atmósfera inerte de nitrógeno para minimizar cualquier interacción secundaria debido a las fases de vapor. El cambio de masa (%W) se calculó mediante la siguiente ecuación (1):

$$\%W = \frac{m}{m_0} \cdot 100 \tag{1}$$

donde m_0 es la masa inicial de la muestra a temperatura ambiente y m es la masa de la muestra a temperatura (T). El grado

de conversión (α) durante el análisis termogravimétrico se calcula como:

$$\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_f} \tag{2}$$

donde m_f es la masa final a 900°C. Los datos termogravimétricos obtenidos de la primera derivada (dm/dt) se pueden expresar como:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{-1}{m_0 - m_f} \cdot \frac{dm}{dt} \tag{3}$$

El TGA es una herramienta valiosa para analizar la deshidratación y descomposición del mortero, así como la degradación del poliuretano que se produce con el aumento de la temperatura. Este análisis permite la determinación del contenido de polímero en los compuestos, por lo que podría utilizarse como un procedimiento de control de calidad [6]. La Figura 3a muestra las curvas TGA para cada mezcla de hormigón (serie con 100% PUR-pellets: P1, P2, P3, P4 y serie con 25% PUR-pellets+75% lapilli: PL1, PL2, PL3 y PL4) y la Figura 3b muestra las curvas TGA y las curvas termogravimétricas derivadas (DTG) para el PUR-pellets.

Los resultados también se representaron (Figura 3c) como curvas DTG para identificar las diferentes regiones de descomposición térmica de los hormigones. Se distinguen cuatro regiones marcadas por intervalos de temperatura en los que tienen lugar distintos procesos. En la primera región, se producen diferentes tipos de efectos térmicos (pérdidas) relacionados con la deshidratación de:

| Tipo de hormigón | | Densidad seca (kg/m ³) | | Resistencia a compresión (MPa) | | Resistencia a flexión (MPa) | | Resistividad eléctrica (Ω·m) | | Conductividad térmica (W/m·K) | |
|------------------------------|-------|------------------------------------|-----|--------------------------------|-----|-----------------------------|-----|------------------------------|-----|-------------------------------|--------|
| | | $\bar{\rho}_{dry}$ | s | \bar{f}_c | s | \bar{f}_f | s | $\bar{\rho}_e$ | s | $\bar{\lambda}$ | s |
| 100% PUR-pellet | P1 | 937 | 11 | 2.7 | 0.2 | 0.9 | 0.1 | 79.3 | 0.3 | 0.1627 | 0.0032 |
| | P2 | 879 | 2 | 2.4 | 0.0 | 0.9 | 0.1 | 77.6 | 0.3 | 0.1541 | 0.0015 |
| | P3 | 909 | 1 | 3.2 | 0.1 | 1.0 | 0.1 | 56.8 | 0.2 | 0.1629 | 0.0057 |
| | P4 | 941 | 4 | 3.3 | 0.1 | 1.4 | 0.1 | 68.8 | 0.2 | 0.1619 | 0.0040 |
| 25% PUR-pellet + 75% lapilli | PL1 | 1274 | 5 | 4.5 | 0.5 | 1.3 | 0.1 | 177.8 | 0.5 | 0.2683 | 0.0024 |
| | PL2 | 1140 | 2 | 3.4 | 0.1 | 1.4 | 0.1 | 115.1 | 0.1 | 0.2596 | 0.0095 |
| | PL3 | 1140 | 13 | 4.4 | 0.4 | 1.5 | 0.2 | 119.4 | 0.2 | 0.2719 | 0.0074 |
| | PL4 | 1099 | 9 | 5.0 | 0.5 | 1.9 | 0.2 | 104.1 | 0.1 | 0.2989 | 0.0097 |
| 100% lapilli [15] | BP-1 | 1355.52 | - | - | - | - | - | - | - | 0.3127 | - |
| | BP-2 | 1379.52 | - | - | - | - | - | - | - | 0.3026 | - |
| | BP-3 | 1461.51 | - | - | - | - | - | - | - | 0.3096 | - |
| | BP-4 | 1484.52 | - | - | - | - | - | - | - | 0.3662 | - |
| | BP-5 | 1497.40 | - | - | - | - | - | - | - | 0.3829 | - |
| | BP-6 | 1584.09 | - | - | - | - | - | - | - | 0.3981 | - |
| | BP-7 | 1656.73 | - | - | - | - | - | - | - | 0.5104 | - |
| | BP-8 | 1676.38 | - | - | - | - | - | - | - | 0.4448 | - |
| | BP-9 | 1720.92 | - | - | - | - | - | - | - | 0.3525 | - |
| | BP-10 | 1725.65 | - | - | - | - | - | - | - | 0.5084 | - |
| | BP-11 | 1729.17 | - | - | - | - | - | - | - | 0.4634 | - |
| | BP-12 | 1766.85 | - | - | - | - | - | - | - | 0.5032 | - |
| | BP-13 | 1818.11 | - | - | - | - | - | - | - | 0.4979 | - |
| | BP-14 | 1935.69 | - | - | - | - | - | - | - | 0.5448 | - |
| | BP-15 | 1942.28 | - | - | - | - | - | - | - | 0.7309 | - |

Tabla 2: Valores experimentales ($\bar{\rho}_{dry}$, \bar{f}_c , \bar{f}_f , $\bar{\rho}_e$, $\bar{\lambda}$) y desviación estándar (s) para cada mezcla de hormigón estudiada, junto con los datos bibliográficos de la conductividad térmica de bloques canarios de picón con 100% lapilli

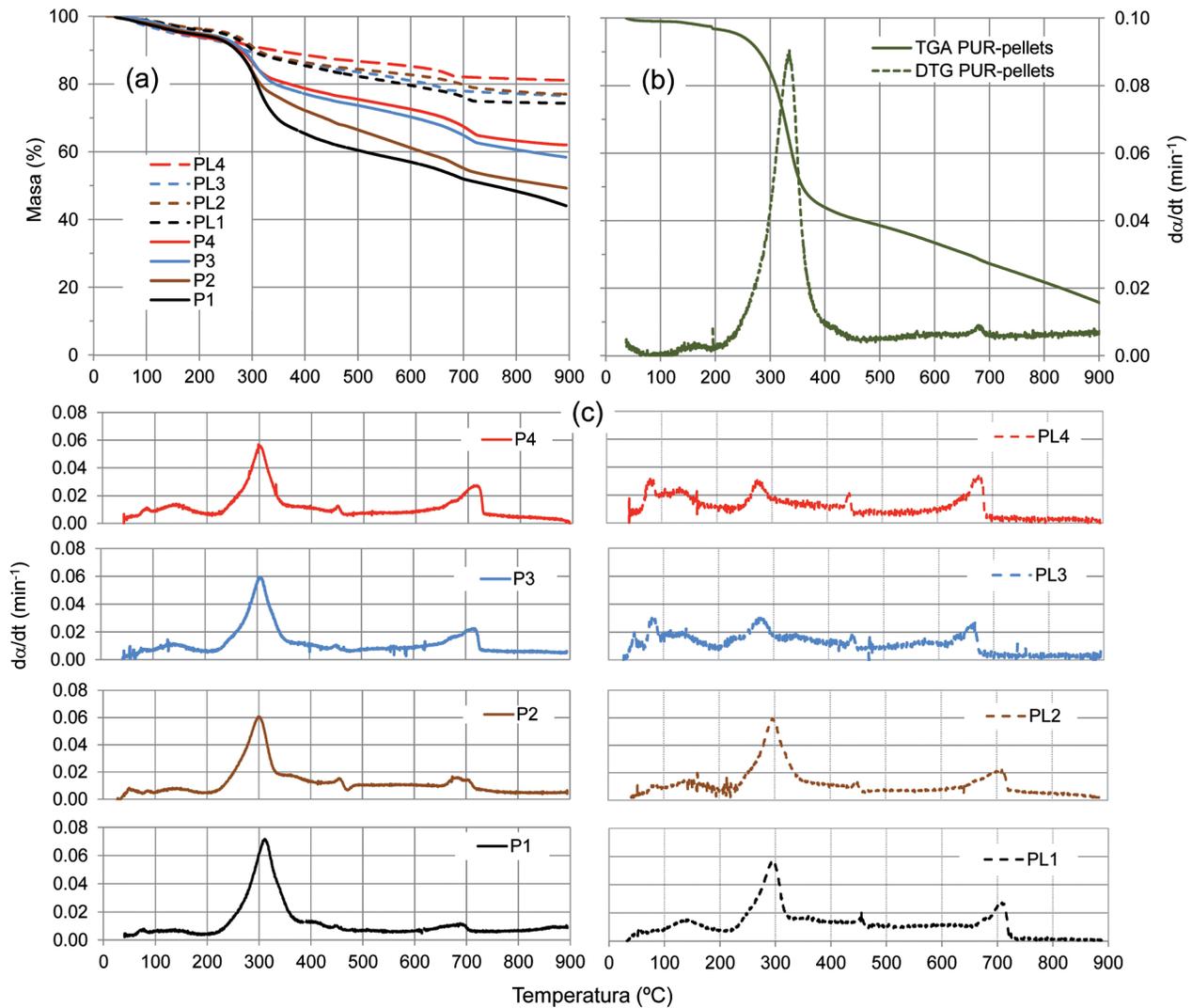


Fig. 3: Curvas TGA para cada mezcla de hormigón (a). Curvas TGA y DTG del PUR-pellets (b). Curvas DTG para cada mezcla de hormigón (c)

zeolita-agua, 40–65°C; ettringita, 75–90°C; y silicatos de calcio hidratados, 150–170°C [16]. En la segunda región, alrededor de 300°C, aparece un pico correspondiente a la descomposición del PUR-pellets, que coincide con el pico observado en la curva DTG para el PUR-pellets analizado por separado (Figura 3b). También se observa un pico suave a 400–500°C que se corresponde con la deshidroxilación de la portlandita, Ca(OH)₂ [17]. Y finalmente, entre 650 y 750°C, se observa la descomposición del carbonato de calcio [18].

La siguiente ecuación expresa la correlación lineal ($R^2=0.99$) que se obtuvo entre el contenido de PUR-pellets expresado como porcentaje en masa del total de hormigón (P) y el porcentaje en masa (W) a 900°C (ver Tabla 1):

$$P = -0.952 W + 84.547 \quad (4)$$

3.3. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad térmica (λ) se determinó sobre probetas de 300 mm x 300 mm x 50 mm para cada mezcla de hormigón después de curado durante 28 días en cámara húmeda. Las probetas se elaboraron con moldes cuidadosamente diseñados para obtener superficies planas y paralelas. Las muestras se secaron en horno a 50°C hasta alcanzar masa constante, y se ensayaron en un equipo

Netzsch HFM 436 Lambda [19]. Este equipo determina el valor de conductividad térmica midiendo la densidad de flujo de calor al establecer un gradiente de temperatura estable entre las caras de la probeta. Se realizaron cuatro mediciones de conductividad térmica para cada muestra de hormigón. La Tabla 2 presenta el valor medio de la conductividad térmica y la desviación estándar. Se observa que la conductividad térmica de estos hormigones depende principalmente del contenido de PUR-pellets. Nótese los bajos valores de conductividad térmica obtenidos para mezclas de hormigón con un contenido de 100% PUR-pellet (0.1604, 0.0021) W/m·K. Este valor medio es cercano al valor de conductividad térmica que poseen algunos materiales de construcción usados en aislamiento, y es mucho más bajo que los valores encontrados en la literatura para este tipo de hormigones, que van desde 0.22 W/m·K [4] y 1.86 W/m·K [20].

De los resultados obtenidos, se observa que los hormigones con menor conductividad térmica son los que también tienen una menor densidad. En la Figura 4 se representa esta relación entre la conductividad térmica y la densidad seca, para los hormigones estudiados, así como para otros materiales en base cemento que recoge la literatura y que usan poliuretano como árido. Para todas estas mezclas la correlación exponencial obtenida expresada como $\lambda=0.0417e^{0.0018\rho_{dry}}$ posee un coeficiente de determinación de $R^2=0.93$ (Figura 4A). Este coeficiente es similar al determinado para los hormigones ligeros con residuos de caucho [21], astillas

de madera [22] y perlita [23]. Por otra parte, en la correlación entre la conductividad térmica y la densidad de las mezclas estudiadas se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.92 (Figura 4B).

En general, la conductividad térmica de los hormigones depende de muchos factores tales como: estructura, composición de la mezcla, agregados, densidad o porosidad [21], y estos parámetros también desempeñan un papel en las mediciones de resistividad eléctrica (ρ_e) [24]. Dado que la determinación de la resistividad eléctrica es rápida, no destructiva y depende de factores similares a la conductividad térmica, la determinación (ρ_e) puede ser de gran interés para la determinación indirecta de la conductividad térmica de los hormigones.

Los valores de resistividad eléctrica se midieron mediante el ensayo de Wenner [25] utilizando el equipo Resipod-Proceq so-

bre muestras cilíndricas (150 mm x 300 mm). Este procedimiento utiliza una sonda de cuatro puntas, que envía una corriente eléctrica a sus dos sondas externas, mientras mide el voltaje entre las sondas internas.

Para mezclas con 100% de PUR-pellets y $\lambda = (0.1604, 0.0021)$ W/m·K, el valor medio de ρ_e fue $(71,5)\Omega\cdot m$, y para mezclas con un 25% de PUR-pellets y $\lambda = (0.2747, 0.0085)$ W/m·K, la ρ_e fue $(113,5)\Omega\cdot m$. Los hormigones comerciales, con 100% de lapilli y una conductividad térmica media de $(0.4419, 0.0295,5)$ W/m·K [26], tuvieron un valor de resistividad eléctrica de $(154,25)\Omega\cdot m$. Estos valores muestran una relación lineal entre el aumento de la conductividad térmica y la resistividad eléctrica de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\lambda = 0.0034 \rho_e - 0.0895 \quad (5)$$

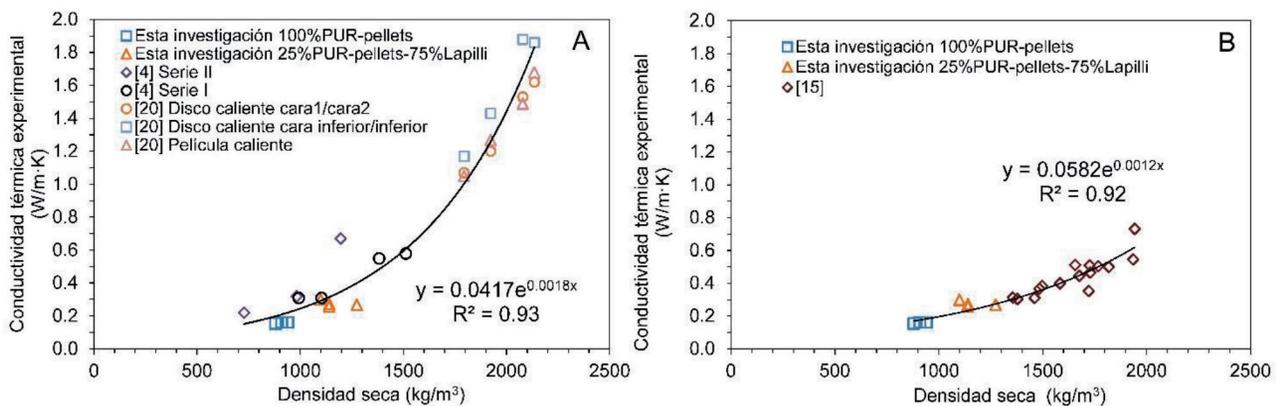


Fig. 4: Correlación entre la densidad seca (ρ_{dn}) y la conductividad térmica (λ). En la gráfica A, los hormigones que contienen poliuretano en forma de espuma (tomados de la bibliografía) o en forma de pellets (datos de esta investigación). En la gráfica B, los hormigones contienen las siguientes tres mezclas: 100% PUR-pellets (\square), 25% PUR-pellets + 75% lapilli (\triangle) y 100% lapilli (\diamond)

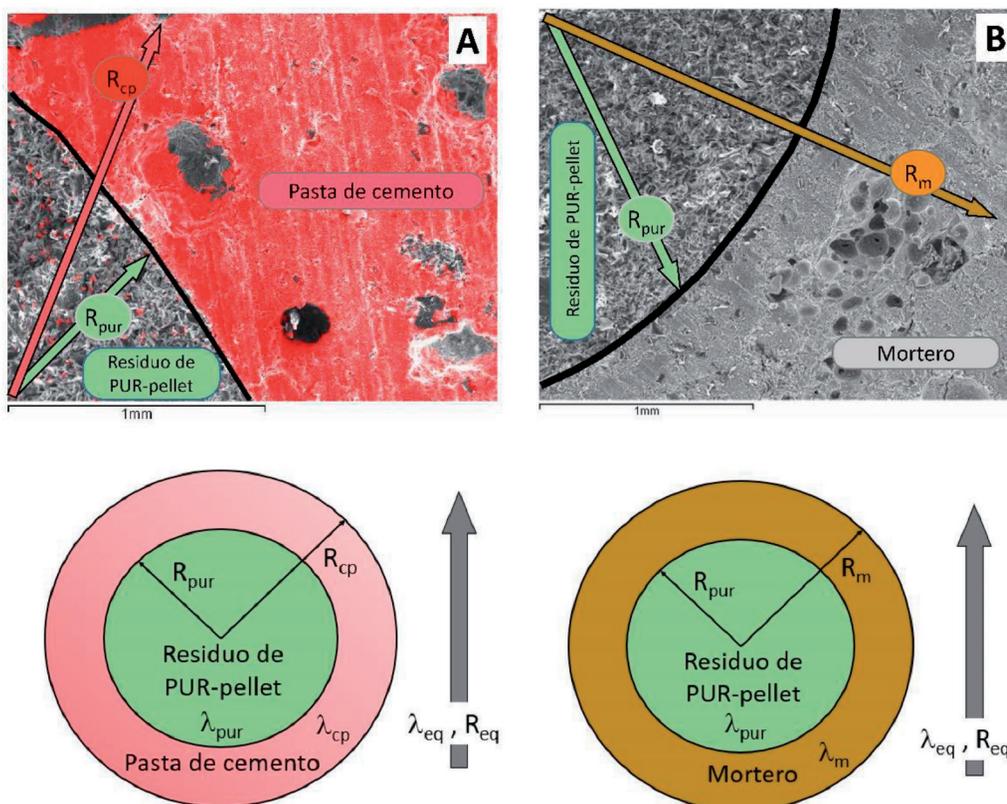


Fig. 5: Imagen (x50) de microscopía electrónica de barrido (SEM) y esquema del modelo de homogenización autoconsistente para dos componentes. Los dos modelos establecidos con dos componentes cada uno, son: A=PUR-pellets + pasta de cemento; B=PUR-pellets + mortero (pasta de cemento + lapilli)

con $R^2 = 0.99$. En base a esta ecuación, es posible estimar la conductividad térmica a partir de los valores de resistividad eléctrica para los hormigones incluidos en este estudio.

3.4. MODELO DE HOMOGENIZACIÓN AUTOCONSISTENTE

El modelo de homogenización autoconsistente permite la estimación de la conductividad térmica de materiales heterogéneos teniendo en cuenta los valores de conductividad de cada componente y su concentración. Este enfoque se desarrolló inicialmente para la caracterización mecánica de materiales compuestos, aunque también fue aplicado para estimar la conductividad térmica de hormigones con los residuos de poliuretano [20], residuos de caucho [21] y residuos de lignocelulosa [27]. Este método se basa en la siguiente condición: la energía almacenada en materiales heterogéneos es igual a un material homogéneo equivalente sometido a las mismas condiciones de contorno [27]. Así, se asume que los materiales heterogéneos estudiados en este trabajo pueden tratarse como materiales homogéneos, que tienen una conductividad y densidad térmica equivalente igual a λ_{eq} y ρ_{eq} , respectivamente.

En el caso de una mezcla con 100% de PUR-pellets, la mezcla de hormigón puede aproximarse a un material equivalente con esferas de poliuretano de radio R_{pur} y con coeficiente de conductividad térmica λ_{pur} y densidad ρ_{pur} , rodeados por una corona de pasta de cemento con un radio de R_{cp} y coeficiente de conductividad térmica y densidad igual a λ_{cp} , ρ_{cp} , respectivamente. El lado izquierdo de la Figura 5 muestra un esquema de este modelo y una imagen SEM con un mapeo de la distribución del elemento calcio obtenida por EDX (color rojo). La distribución de calcio define el área de la pasta de cemento, compuesta principalmente de silicatos de calcio hidratados e hidróxido de calcio [28].

Por otro lado, el modelo de las mezclas de hormigón con un 25% de PUR-pellets y un 75% de lapilli, supone que las esferas de pellets de poliuretano están rodeadas por una corona de mortero (pasta de cemento y lapilli), con un radio externo de R_m y un coeficiente de conductividad térmica λ_m y densidad ρ_m , tal y como se ilustra en el lado derecho de la Figura 5.

Para un material heterogéneo que consta de dos componentes, la conductividad térmica de un medio homogéneo equivalente (λ_{eq}) puede ser calculada mediante [20]:

$$\lambda_{eq} = \lambda_i \left[1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{1}{\frac{\lambda_{pur}}{\lambda_i} - 1}} \right] \quad (6)$$

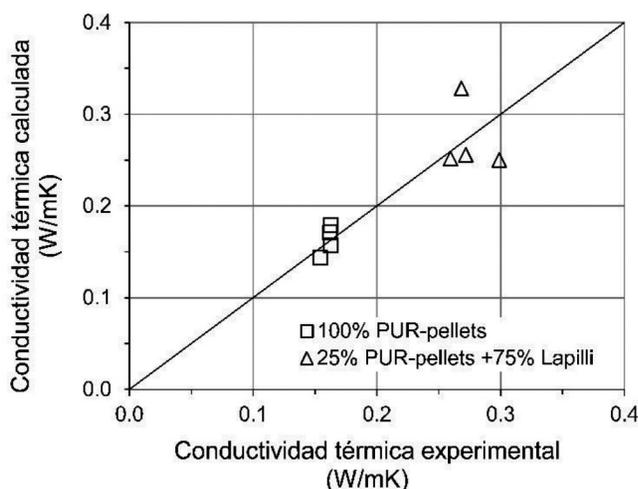


Fig. 6: Comparación entre los valores experimentales de conductividad térmica y calculados mediante el modelo de homogenización autoconsistente

Donde el subíndice "i" es remplazado por pasta de cemento (subíndice: cp) para hormigones con 100% PUR-pellets, o por mortero (subíndice: m) para hormigones con 25% PUR-pellets. El parámetro θ se define como:

$$\theta = \left(\frac{R_{pur}}{R_i} \right)^3 = \frac{V_{pur}}{V_{pur} + V_i} \quad (7)$$

donde V_{pur} es la fracción de volumen de PUR-pellets y V_i es la fracción de volumen de la pasta de cemento ($i=cp$) o mortero ($i=m$). La densidad equivalente para el medio homogéneo (ρ_{eq}) se calcula como:

$$\rho_{eq} = \frac{\rho_{pur} V_{pur} + \rho_i V_i}{V_{pur} + V_i} = \rho_{pur} \theta + \rho_i (1 - \theta) \quad (8)$$

Para obtener la conductividad térmica de un medio homogéneo equivalente en mezclas de hormigón con 100% PUR-pellets, se asume que la pasta de cemento tiene un valor de densidad de $\rho_{cp} = 2500 \text{ kg/m}^3$ y un valor de conductividad térmica de $\lambda_{cp} = 0.52 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [29]. Del mismo modo, para las mezclas de hormigón con 25% PUR-pellets y 75% de lapilli, se asume: $\rho_m = 1649 \text{ kg/m}^3$ y $\lambda_m = 0.44 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [26]. Por último, se toma como densidad PUR-pellet: $\rho_{pur} = 832 \text{ kg/m}^3$, y la conductividad térmica (λ_{pur}) igual a $0.042 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [20]

Los resultados del modelado se representan en la Figura 6. Estos resultados se consideran satisfactorios dada las hipótesis de partida: a) hay una distribución uniforme de las partículas de PUR-pellet en la mezcla, y b) el valor de sus propiedades no cambia cuando las partículas pasan a formar parte del hormigón. Estos resultados confirman que este modelo de homogeneización autoconsistente se puede usar como una primera aproximación para estimar la conductividad térmica de los hormigones con pellets de poliuretano que reemplazan parcial o totalmente al lapilli.

4. CONCLUSIONES

La inclusión de residuos de pellets de poliuretano proporciona un procedimiento de recuperación de este residuo, que permite la fabricación de materiales de construcción, como bloques de hormigón, con un impacto ambiental menor y un ahorro económico evidente en las materias primas.

La sustitución parcial de lapilli por un 25% PUR-pellets mejora la conductividad térmica hasta un 38% en relación a los hormigones comerciales con 100% lapilli. En relación al comportamiento mecánico de estos hormigones, la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión disminuyen un 12% y un 57%, respectivamente, con respecto a los hormigones con 100% lapilli. En el caso de la sustitución total de lapilli por 100% PUR-pellets, la conductividad térmica mejora 64% y la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión disminuye en un 35% y 71%.

Los resultados muestran que los hormigones que contienen PUR-pellets tienen un excelente comportamiento térmico con respecto a los hormigones con 100% lapilli. Por otro lado, la disminución de la resistencia mecánica de estos hormigones con 25% ó 100% PUR-pellets no es un inconveniente para aplicaciones como hojas de aislamiento interno en cerramientos, o la fabricación de bloques de hormigón no estructurales para mejorar el aislamiento térmico en las edificaciones.

El modelo de homogenización autoconsistente proporciona resultados satisfactorios en el cálculo de la conductividad térmica. Este modelo se puede usar para la estimación de la conductividad

térmica de estos hormigones que contienen tanto PUR-pellets y lapilli, o solo PUR-pellets.

Se obtuvo una correlación lineal con $R^2 = 0.99$ entre el porcentaje en masa de hormigón a 900°C y el porcentaje en masa de PUR-pellets correspondiente a la dosificación del hormigón. Esta correlación es una herramienta que permite el control de las dosificaciones de estos hormigones. El control de la cantidad de PUR-pellets es de gran interés porque determina el comportamiento del hormigón como aislante térmico. Además, se encontró una correlación aceptable ($R^2 > 0.90$) entre la conductividad térmica y la densidad seca para los valores obtenidos en todas las mezclas: las incluidas en este estudio con PUR-pellets y las publicadas por otros autores referentes a la incorporación de residuos de espuma de poliuretano en materiales en base cemento.

REFERENCIAS

- [1] M.R. Vigil Montaña, A. Pastoriza Martínez, In. Fernández de Piñola, Los plásticos como materiales de construcción, UNED, Madrid, 2002.
- [2] N. Saikia, J. de Brito, Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review, *Constr. Build. Mater.* 34 (2012) 385–401. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>.
- [3] R. Siddique, J. Khatib, I. Kaur, Use of recycled plastic in concrete: a review, *Waste Manag.* 28 (2008) 1835–52. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>.
- [4] P. Mounanga, W. Gbongbon, P. Poullain, P. Turcry, Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) 806–814. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.007>.
- [5] A. Ben Fraj, M. Kismi, P. Mounanga, Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 1069–1077. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.010>.
- [6] J. Gadea, A. Rodríguez, P.L. Campos, J. Garabito, V. Calderón, Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam, *Cem. Concr. Compos.* 32 (2010) 672–677. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.017>.
- [7] L. Verdolotti, E. Di Maio, M. Lavorgna, S. Iannace, L. Nicolais, Polyurethane-cement-based foams: Characterization and potential uses, *J. Appl. Polym. Sci.* 107 (2008) 1–8. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/app.24997>.
- [8] P.A. Webb, Volume and Density Determinations for Particle Technologists, Society. (2001) 1–16. http://www.micromeritics.com/Repository/Files/density_determinations.pdf.
- [9] EN 933-1, European Standard. Test for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution. Sieving method., 2012.
- [10] V.M. Sánchez-Fajardo, M.E. Torres, A.J. Moreno, Study of the pore structure of the lightweight concrete block with lapilli as an aggregate to predict the liquid permeability by dielectric spectroscopy, *Constr. Build. Mater.* 53 (2014) 225–234. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.093>.
- [11] EN 12350-2, European Standard. Testing fresh concrete. Part 2: Slump test, 2009.
- [12] EN 12350-6, European Standard. Testing fresh concrete - Part 6: Density, 2009.
- [13] E. González-Díaz, E. Jaizme-Vega, J. Jubera-Pérez, Assessment of the influence of the effective water-cement ratio on the workability and strength of a commercial concrete used for the construction of concrete caissons | Evaluación de la influencia de la relación agua-cemento efectiva en la trabajabilidad, *Rev. La Constr.* 17 (2018) 231–239. doi: <http://dx.doi.org/10.7764/RDLC.17.2.231>.
- [14] H.S. Wong, N.R. Buenfeld, Determining the water-cement ratio, cement content, water content and degree of hydration of hardened cement paste: Method development and validation on paste samples, *Cem. Concr. Res.* 39 (2009) 957–965. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.06.013>.
- [15] V.M. Sánchez Fajardo, Aplicación de la Espectroscopía Dieléctrica a la Caracterización del Bloque de Picón, Universidad de La Laguna, 2014.
- [16] V. Petkova, V. Stoyanov, Y. Pelovski, TG-DTG-DTA in studying white self-compacting cement mortars, *J. Therm. Anal. Calorim.* 109 (2012) 797–806. doi: [10.1007/s10973-012-2447-7](https://doi.org/10.1007/s10973-012-2447-7).
- [17] W. Wongkeo, P. Thongsanitgarn, P. Chindapasirt, A. Chaipanich, Thermogravimetry of ternary cement blends: Effect of different curing methods, *J. Therm. Anal. Calorim.* 113 (2013) 1079–1090. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3017-3>.
- [18] I. Galan, C. Andrade, M. Castellote, Thermogravimetric analysis for monitoring carbonation of cementitious materials, *J. Therm. Anal. Calorim.* 110 (2012) 309–319. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2466-4>.
- [19] EN 12664, European Standard. Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Dry and moist products of medium and low thermal resistance., 2002.
- [20] M. Kismi, P. Poullain, P. Mounanga, Transient Thermal Response of Lightweight Cementitious Composites Made with Polyurethane Foam Waste, *Int. J. Thermophys.* 33 (2012) 1239–1258. doi: <https://doi.org/10.1007/s10765-012-1244-7>.
- [21] A. Benazzouk, O. Douzane, K. Mezreb, B. Laidoudi, M. Quéneudec, Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 573–579. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.011>.
- [22] K. Al Rim, A. Ledhem, O. Douzane, R.M. Dheilly, M. Quéneudec, Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites, *Cem. Concr. Compos.* 21 (1999) 269–276. doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00008-6).
- [23] R. Demirboga, R. Gül, The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 723–727. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01032-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01032-3).
- [24] E. González-Díaz, P. Sánchez-Luis, F.J. Gutiérrez-García, Guide to best practices: Making and validation of a device for the measurement of the electrical resistivity of concrete. Application in the control of concrete curing., *DYNA Ing. e Ind.* 89 (2014) 422–430. doi: <https://doi.org/10.6036/7070>.
- [25] UNE 83988-2, Spanish Standards. Concrete durability. Test methods. Determination of the electrical resistivity. Part 2: Four points or Wenner method., 2014. <http://www.en.aenor.es/>.
- [26] V.M. Sánchez Fajardo, M.E. Torres, A.J. Moreno, Hydraulic and hygrothermal properties of lightweight concrete blocks with basaltic lapilli as aggregate, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 398–407. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.020>.
- [27] M. Bederina, L. Marmoret, K. Mezreb, M.M. Khenfer, A. Bali, M. Quéneudec, Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modelling, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 662–668. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.008>.
- [28] S. Diamond, The microstructure of cement paste and concrete--a visual primer, *Cem. Concr. Compos.* 26 (2004) 919–933. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.028>.
- [29] X. Fu, D.D.L. Chung, Effects of silica fume, latex, methylcellulose, and carbon fibers on the thermal conductivity and specific heat of cement paste, *Cem. Concr. Res.* 27 (1997) 1799–1804. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [30] E. González-Díaz, "Patente: Hormigones no estructurales elaborados con residuos de pellet de poliuretano procedentes del proceso de reciclaje de frigoríficos. Oficina Española de Patentes y Marcas" ES 2 683 082 A1, 2018.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de La Laguna (ULL) la financiación concedida dentro del Proyecto de Investigación 2014/0001215 del "Plan propio de Investigación" y al Servicio General de Apoyo a la Investigación de ULL (<http://www.segai.ull.es/>) por el apoyo científico, instrumental y técnico prestado. Además, los autores desean agradecer al Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción del Gobierno de Canarias por los recursos humanos y técnicos facilitados durante el desarrollo de esta investigación, así como a la empresa Ewaste por proporcionar los residuos de pellets de poliuretano. Este trabajo está dedicado a Clinton Taylor, fallecido antes de finalizar la revisión de la versión en inglés de este artículo.