





Comportamiento térmico de hormigón en masa con árido reciclado de conchas de mejillón

Thermal behaviour of plain concrete with mussel shell waste aggregate

Juan Luis Pérez Ordóñeza, David Bienvenido-Huertasb, Carolina Martínez-Garcíac, Roberto Rodríguez-Álvarod, Juan José Moyano-Campose, Belén González-Fontebóaf

^aDr Ingeniero en Informática, Universidade da Coruña, Prof. Titular de Universidad, jlperez@udc.es ^bGraduado en Ciencia y Tec. en la Edificación, Universidad de Sevilla, Estudiante de doctorado, jbienvenido@us.es Graduada en Arquitectura Técnica, Universidade da Coruña, Estudiante de doctorado, carolina fernandez 2@udc.es dGraduado en Arquitectura Técnica, Universidade da Coruña, Estudiante de doctorado, roberto rodriguez1@udc.es ^eDr en Historia del Arte, Universidad de Sevilla, Profesor Titular de Universidad, imoyano@us.es Dra Ingeniera en Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña, Profesora Titular de Universidad bfonteboa@udc.es

RESUMEN

En este trabajo se ha analizado el comportamiento térmico de los residuos tratados con conchas de mejillón en hormigón en masa mediante el método de caja caliente calibrada. Para realizar el estudio térmico se utilizó una losa de hormigón de 6 cm de espesor, en la cual se han sustituido el 12.5% de los áridos finos y gruesos por áridos reciclados de conchas de mejillón. Los resultados obtenidos avalan, sin mermar las características físicas, la mejora térmica comparada con el valor teórico de un hormigón en masa convencional.

ABSTRACT

In this paper, the thermal behaviour of mussel shell waste aggregate in plain concrete has been analyzed by calibrated hot box method. A 6 cm thickness concrete slab was used for the thermal study. In the elaboration of the concrete slab the 12.5% of the fine and coarse aggregates have been replaced by mussel shell aggregates. The results obtained confirm, without diminishing the concrete physical characteristics, the thermal improvement compared to its theoretical value of a conventional mass concrete.

PALABRAS CLAVE: Árido de conchas de mejillón, reciclado, hormigón en masa, transmitancia, caja caliente. KEYWORDS: mussel shells aggregate, waste, plain concrete, transmittance, hot box.

1. Introducción

Según el último informe del Food and Agiculture Organization (FAO) de las Naciones Unidas en el año 2019, la producción de mejillón a nivel mundial ha superado los 2 millones de toneladas [1]. Dado que cerca del 33% del peso se convierte en desperdicios, implica que la cantidad de residuos derivados del procesado del mejillón supere las 700000 toneladas. Para minimizar el impacto ambiental es de gran interés reciclar estos residuos y convertirlos en nuevos productos útiles para la industria. Una posible alternativa es emplear las conchas de mejillón como sustitutos a los áridos en la producción de hormigón en masa. Para su uso en elementos de cerramiento en edificación conviene conocer las propiedades térmicas que proporciona el empleo de este hormigón, lo que se presenta en esta comunicación.

El análisis de la conducción de calor en el hormigón es imprescindible cuando se considera un diseño energéticamente eficiente del edificio. Es preciso evaluar la carga térmica de las estructuras debido a las fluctuaciones estacionales de temperatura con el objetivo de garantizar la comodidad de los futuros habitantes. El análisis de las propiedades térmicas es otra medida de control de calidad utilizada para estructuras prefabricadas y es necesaria si dichos materiales se van a utilizar como cerramientos de la envolvente.

Los hormigones y pastas cementosas son productos porosos. La porosidad tiene una fuerte influencia en las propiedades térmicas, ya que cuanto mayor es el volumen de poros, mejor es el comportamiento térmico de los materiales.

Existen dos publicaciones previas en las que se evalúan las propiedades térmicas del hormigón y morteros de cemento con conchas marinas. En el estudio de Barnaby [2] las conchas de mejillón fueron usadas como árido grueso para la elaboración de hormigones. Comparado con un hormigón de referencia, la evaluación de la conductividad térmica del hormigón con conchas mostró reducciones de un 80%. En el trabajo de Lertwattanaruk et al. [3] se estudió la sustitución del cemento por filler de diferentes conchas marinas (mejillón, almeja, berberecho y ostra) en la elaboración de morteros de albañilería. La sustitución de estos áridos redujo la densidad de los morteros debido a la introducción de aire ocluido incrementando la porosidad total de las mezclas. Esto mostró

una reducción de la conductividad térmica de todos los morteros con conchas comparado con la del mortero patrón. Los morteros que usaron el *filler* de mejillón fueron los que mostraron mayores reducciones debido a que las partículas fueron las de mayor granulometría y menor densidad, comparadas con las del cemento, dando lugar una estructura interna más ligera. Las reducciones medidas fueron del 16, 24 y 35% para sustituciones del ligante por áridos de conchas de mejillón del 5, 10 y 20% respectivamente.

En un trabajo anterior [4] se ha analizado el comportamiento de las conchas de mejillón en la elaboración de hormigón en masa estructural (HM-30). El porcentaje de sustitución del 12.5% tanto del árido fino como de la gravilla, mostró reducciones en la densidad con respecto del patrón de un 5%. Esta reducción está ocasionada por un aumento de la porosidad de las mezclas debido a la forma lajosa de las partículas de mejillón y al contenido en materia orgánica (polisacárido: quitina) preveniente de microestructura de la misma concha, que reacciona con los componentes químicos del cemento introduciendo aire ocluido en las mezclas. Por lo tanto, es esperable una mejora del comportamiento térmico de los hormigones con mejillón comparado con un hormigón elaborado con árido convencional.

El hormigón analizado en este trabajo se ha caracterizado en estado fresco (trabajabilidad) y endurecido (resistencia a la compresión). La caja caliente calibrada se ha diseñado con una separación térmica de 20 °C y la transmitancia térmica se ha determinado mediante el método termoflujométrico.



2. Materiales y dosificación

Para la dosificación de la losa de hormigón se ha empleado el cemento CEM II/A-M (V-L) 42.5R (según EN 197-1)[5]. Este cemento está compuesto con clínker, cenizas volantes (V), piedra caliza (L) y otros componentes menores. Para obtener una consistencia adecuada se utilizó un superplastificante (Melcret 222).

En cuanto a los áridos, se han empleado cinco tipos diferentes: una arena natural (AN, 0-4 mm), dos fracciones de tamaño de áridos gruesos – grava (GN1 4-16 mm y GN2 10-20 mm), arena de conchas de mejillón (AM, 0-4 mm) y grava de conchas de mejillón (GM, 4-16 mm). Los áridos convencionales se han obtenido a partir del machaqueo de piedra caliza. Para la obtención de los áridos procedentes de mejillón ha sido necesario previamente un tratamiento térmico a 135 °C durante 32 minutos, y posteriormente se tritura y es tamizada para obtener las fracciones de grava y arena. El proceso empleado se basa en la normativa

europea para la alimentación de las aves de corral mediante subproductos. Este procedimiento asegura la desinfección de los áridos y garantiza su manipulación y almacenamiento seguro [4,6]. La Tabla 1 resume las propiedades básicas de estos áridos. Estos resultados ya han sido presentados en un trabajo anterior que analiza las propiedades del hormigón [4].

Tabla 1. Propiedades de los áridos empleados [4].

| | | AN | AM | GN1 | GN2 | GM |
|-----------------|----|-------|-------|--------|---------|-------------------|
| | | (0-4) | (0-4) | (4-16) | (10-20) | (4-16) |
| Densidad de | | | | | | <u></u> |
| Partículas | | 2.67 | 2.73 | 2.61 | 2.66 | 2.62 |
| (EN 1097-6) | | | | | | |
| Absorción de | | | | | | |
| Agua | % | 2.22 | 4.12 | 2.20 | 1.33 | 2.17 |
| (EN 1097-6) | | | | | | |
| Coeficiente de | | | | | | |
| Los Ángeles | % | | | | 23.10 | 20 |
| (EN 1097-2) | | | | | | |
| Finos | % | 3.71 | | 6.20 | 7.37 | 5.38 |
| (EN 933-1) | /0 | 3.71 | | 0.20 | 1.37 | 5.56 |
| Índice de lajas | % | | | 14.02 | 7.21 | 99.24 |
| (EN 933-3) | /0 | | | 17.02 | 1.41 |)). 24 |
| | | | | | | |

Empleando los materiales descritos se ha diseñado un hormigón con una resistencia a

compresión de 30 MPa. La relación agua/cemento es de 0.50, el contenido de cemento se ha establecido en 260 kg/m³ y un 12.5% de sustitución en volumen de áridos de conchas de mejillón, tanto para las fracciones fina y gruesa.

En investigaciones previas se constata que el uso de áridos de concha de mejillón conduce a una mayor capacidad de absorción de agua que los áridos naturales. Esta característica reduce el agua disponible en la mezcla de hormigón que influye en las propiedades del hormigón, por lo que se debe utilizar un proceso de mezcla específico para evitar este efecto. En este caso, se añadió agua adicional al agua de amasado, cuyo valor se calculó en función de la absorción de agua de diferentes fracciones de áridos a 24 h[4].

La dosificación del hormigón se puede ver en la Tabla 2. El proceso de amasado y los materiales empleados se pueden ver en la Figura 1.

Tabla 2. Dosificación 1 m³ [4].

| Volumen (l) | Peso (kg) |
|-------------|-----------|
| 116.13 | 360.00 |
| 180.00 | 180.00 |
| 380.70 | 1016.45 |
| 54.39 | 145.21 |
| 178.67 | 466.31 |
| 37.37 | 97.55 |
| 77.76 | 206.83 |
| | 77.76 |

w/c = 0.5

Aditivo (relación aditivo/cemento)= 2 %

El hormigón se ha caracterizado tanto en estado fresco como endurecido. La resistencia a compresión obtenida a 28 días ha sido 32.87 MPa con 1.9 MPa de desviación típica. La densidad obtenida es de 2196.82 kg/m³ con 12.23 kg/m³ de desviación típica. Por último, en fresco se ha obtenido un asentamiento de 20 cm (cono de Abrams). En la Figura 2 se muestra las fibras empleadas y los ensayos realizados para determinar las propiedades en fresco y endurecido.



Figura 2. Fibras empleadas, losa y test.

3. Metodología

El método para determinar la transmitancia térmica de un cerramiento se calcula mediante la norma ISO 9869-1:2014 [7]. Se centra en la medición instantánea del flujo de calor, considerando que temperaturas interior y exterior son constantes, es decir en condiciones de régimen estacionario (ver Ecuación (1)).

$$U = \frac{\sum q}{\sum (T_{in} - T_{out})} \tag{1}$$

Donde q es el flujo de calor (W/m²), T_{in} la temperatura interior ambiente (°C) y T_{out} la temperatura exterior ambiente (°C).

La ecuación 1 permite determinar la transmitancia térmica de un elemento. Esta variable resulta de interés en las auditorías energéticas. Sin embargo, a efectos de este estudio es la resistencia térmica de la probeta la que se pretende analizar. Para ello, la misma norma plantea otra posibilidad de formulación para el cálculo de la resistencia térmica (ver Ecuación (2)).

$$R = \frac{\sum (T_{s,in} - T_{s,out})}{\sum q}$$
 (2)

Donde $T_{s,in}$ es la temperatura superficial interior (°C) y $T_{s,out}$ es la temperatura superficial exterior (°C). Al tratarse el caso de estudio de una capa homogénea, la ecuación 3 permitirá determinar la conductividad térmica:

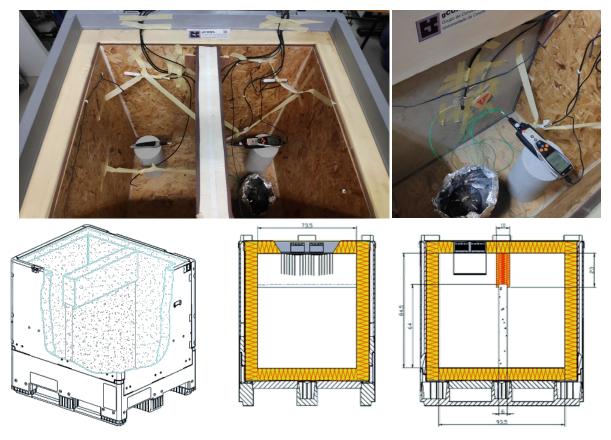


Figura 3. Imágenes reales y secciones de la caja caliente calibrada

$$\lambda = \frac{e}{R} \tag{3}$$

Donde e es el espesor de la probeta (m).

Para realizar las mediciones en un entorno controlado se ha empleado una caja caliente calibrada (en inglés, calibrated hot box (CHB)). La CHB se ha diseñado acorde a la norma ISO 8990 [8]. En la Figura 3 se muestra el esquema (secciones) y fotografías de la CHB con los sensores montados en la losa. Las paredes del CHB estás constituidas por 3 capas: la primera constan de dos láminas de 3mm polipropileno (PP) y una cámara de aire interior de 2 cm; la segunda 8 cm de poliuretano PUR de kg/m^3 40 coeficiente densidad conductividad de 0.023 W/(m·K); y por último la 3 capa 1 cm de tablero de viruta orientado (en oriented strand inglés, board (OSB)) de conductividad térmica de 0.13 W/(m·K). cámara caliente está equipada con una resistencia

eléctrica variable que alcanza los 450 W, en cambio la cámara fría dispone de un sistema de enfriamiento basado en células Peltier de 100 W.

Para el registro de los datos se ha empleado un sistema de captura de datos modelo CR 1000 de Campbell, configurado con sensores de temperatura y humedad, con sensores de temperatura superficial y con un sensor de flujo de calor. En la Tabla 3 se muestran las características de los sensores. El sistema de captura registra la media de 12 muestras por minuto de cada variable.

Tabla 3. Sensores empleados [4].

| Sensor | Unidades | Rango de medida | Precisión |
|---|-------------------|--------------------|-----------|
| Sensor de temperatura superficial 110PV | °C | -40 a 135 | ±0.2°C |
| Sensor HC2S3 | °C | -50 a 100 | ±0.1°C |
| Temperatura/humedad | % | 0 a 100 | ±0.8% |
| Sensor de flujo de calor HFP01 | W m ⁻² | ±2000 | -15% a+5% |

4. Resultados

El ensayo se ha llevado a cabo durante 5 días, si bien se han descartado los datos iniciales y finales para lograr que el incremento térmico promedio de temperaturas entre cara caliente y fría en una hora no difiera más de 0.02 °C. De este modo se puede considerar que el ensayo está régimen estacionario. Los registros seleccionados (4500 medidas) representan más de 3 días de ensayo. Estos datos se emplean para calcular la transmitancia mediante la ecuación 1 obteniendo un valor de 4.122 W/m²K. En la Figura 4 se muestra los resultados obtenidos. En sombreado se muestra el intervalo usado para determinar la transmitancia.

Si bien las temperaturas de consigna establecidas en las cámaras caliente y fría han sido 40 °C y 20 °C respectivamente, el sistema de enfriamiento diseñado no ha conseguido bajar la temperatura hasta los 20 °C. Esto ha generado que la media de la temperatura de la cámara caliente si fuera aproximada a la consigna establecida (con un valor de 40.61 °C), mientras que en la cámara fría el valor de temperatura conseguido fue superior (24.60 °C). Se obtiene, por tanto, un salto térmico promedio de 16.02 °C entre las dos cámaras.

Empleando la ecuación 2 se obtiene que la losa de hormigón con áridos procedentes de concha de mejillón tiene una resistencia térmica de 0.06002522 m²K/W

Dado que la losa tiene un espesor de 6 cm, empleando la ecuación 3, se obtiene que la conductividad térmica (\(\lambda\)) es de 0.9996 W/mK

Este valor fue comparado con el valor teórico del hormigón en masa con densidad entre 2000 a 2300 kg/m³, ya que la mezcla empleada para realizar la losa está dentro de este intervalo. En este caso el valor de referencia es de 1.65 W/mK obtenido del catálogo de elementos constructivos del Código Técnico de la Edificación en España [9]. El uso de la concha de mejillón para sustituir parcialmente los áridos mejora la capacidad térmica en un valor cercano al 60.6%

5. Conclusiones

Se consigue mejorar el comportamiento térmico del hormigón en masa sustituyendo el 12.5 % del árido empleado por árido procedente del machaqueo de las conchas de mejillón.

El aporte de árido reciclado procedente de conchas de mejillón en este porcentaje arroja

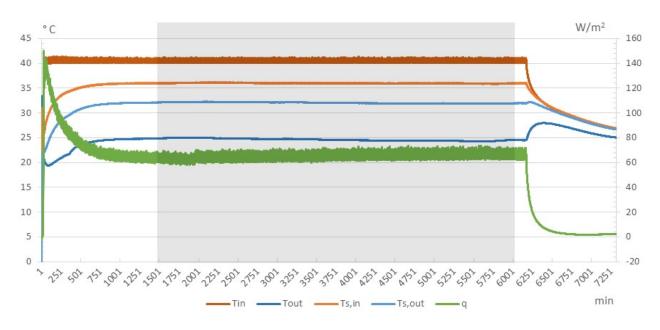


Figura 4 Registros temporales de las variables medidas durante el proceso de ensayo en la caja caliente calibrada.

valores aceptables de variación de las propiedades físicas del hormigón en masa.

Las conchas de mejillón introducen mayor porosidad ocasionada por la forma alargada de las conchas y el contenido en materia orgánica de las partículas. Esto da lugar a un hormigón más ligero que un hormigón elaborado con árido convencional, produciendo mejoras en el comportamiento térmico.

Los áridos de conchas de mejillón, de ser un residuo, se han convertido en un subproducto que mejora la capacidad térmica de los elementos de hormigón elaborados con las mismas.

Es necesario el desarrollo de más ensayos para ver la influencia porcentual de sustitución en las propiedades térmicas.

El empleo del método termométrico no es válido para el estudio de la transmitancia térmica dentro de la caja caliente.

El método de enfriamiento empleado en la caja caliente no es suficiente para obtener un gradiente térmico de 20 °C.

Agradecimientos

El trabajo ha sido parcialmente financiado por el CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial) dentro del Programa FEDER-Innterconecta, y cofinanciado con el Fondo FEDER de la Unión Europea (Código 00064742/ITC-20133094). Del mismo modo, contó con el apoyo parcial del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (Código BIA 2017-85657-R). Por último agradecer a María, Eva, Yordi y Cristian por su colaboración en el trabajo realizado.

Referencias

- [1] FAO, FAO yearbook. Fishery and Aquaculture Statistics 2017, Rome, 2019.
- [2] C. Barnaby, An investigation into the reuse of organic waste produced by the New Zealand mussel industry, Master The, Auckland University of Technology, 2004. http://hdl.handle.net/10292/112.

- [3] P. Lertwattanaruk, N. Makul, C. Siripattarapravat, Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering, J. Environ. Manage. (2012). doi:10.1016/j.jenvman.2012.06.032.
- [4] C. Martínez-García, B. González-Fonteboa, F. Martínez-Abella, D. Carro-López, Performance of mussel shell as aggregate in plain concrete, Constr. Build. Mater. (2017). doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.091.
- [5] UNE-EN 197-1, Cemento. Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes, AENOR. (2011).
- [6] The European Parliament and the Council of the European Union, Regulation (EC) No 1069/2009: laying down health rules as regards animal byproducts and derived products not intended for human consumption, Off. J. Eur. Communities. (2000). doi:2004R0726 v.7 of 05.06.2013.
- [7] International Organization for Standardization, ISO 9869-1:2014 Thermal insulation Building elements In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance. Part 1: Heat flow meter method, Geneva, Switzerland, 2014.
- [8] ISO 8990, ISO 8990 Thermal insulation
 Determination of steady-state thermal transmission properties Calibrated and guarded hot box, 1994. doi:10.1016/S0140-6736(17)31917-7.
- [9] Ministerio de Fomento, Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, 2011.