

# Diseño y caracterización de hormigones ligeros para el desarrollo de un sistema integral de tabiquería interior

*Design and characterization of lightweight concrete for the development of an integral interior partition system*

Emilio José Rey Bouzón<sup>\*,a</sup>, Manuel F. Herrador<sup>b</sup>, Sindy Seara Paz<sup>c</sup>, Santiago

González García<sup>d</sup>, Francisco Saavedra Calo<sup>e</sup> y Jose Millán Pérez<sup>f</sup>.

<sup>a</sup> Estudiante de doctorado. Arquitecto Técnico e Ingeniero de obras públicas. Universidade da Coruña

<sup>b</sup> Prof. Contratado Doctor. Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Universidade da Coruña

<sup>c</sup> Prof. Contratada Doctora. Dra. Ingeniera de Caminos Canales y Puertos. Universidade da Coruña

<sup>d</sup> Director Técnico. Arquitecto. Naos 04 Arquitectos S.L.P.

<sup>e</sup> Director Técnico. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Construcciones López Cao S.L.

<sup>f</sup> Director Técnico. Licenciado en Ciencias Químicas. Galaicontrol

## RESUMEN

Esta investigación se centra en el desarrollo de un hormigón ligero para un sistema de tabiquería prefabricada de altas prestaciones. Se analizan la influencia de los aireantes y la sustitución de los áridos convencionales por EPS reciclado en el hormigón y sus características desarrollando tres dosificaciones diferentes. Estas dosificaciones se diferencian en el uso de solo aireante, aireante y EPS o solo EPS. También se analiza las primeras pruebas de fabricación de tabiques con este tipo de hormigón y su implantación en una vivienda experimental.

## ABSTRACT

This research focuses on the development of a lightweight concrete for a high-performance prefabricated partition system. The influence of the aerators and the replacement of conventional aggregates by recycled EPS in the concrete and its characteristics are analysed by developing three different dosages. These dosages differ in the use of just aerating, aerating and EPS or just EPS. The first tests for the manufacture of partitions with this type of concrete and its implementation in an experimental house are also analysed.

**PALABRAS CLAVE:** hormigón ligero, prefabricación, tabiquería, instalaciones.

**KEYWORDS:** lightweight concrete, prefabrication, partition walls, building facilities.

## 1. Introducción

Esta investigación nace de la necesidad de agilizar los procesos de construcción en edificación, así como de mejorar sus calidades y reducir su impacto ambiental.

Actualmente es difícil encontrar mano de obra cualificada en edificación lo que ralentiza el proceso de construcción de edificios, sobre todo a la hora de realizar las particiones interiores y colocación de instalaciones.

Por eso se decide desarrollar un sistema de tabiques prefabricados con las instalaciones ya embebidas.

Para ello se necesita un hormigón ligero que permita que estas piezas sean fácilmente manejables. El desarrollo de este producto de alto interés industrial se realiza por medio de un convenio de investigación en conjunto del grupo gCONS, con López Cao, Galaicontrol y Naos Arquitectura.

La colaboración en esta investigación con López Cao que cuenta con una planta de prefabricados ayudará a desarrollar e implantar este nuevo producto en una vivienda real prototipo.

## 2. Selección de materiales

Para la selección de materiales se partió del condicionante de que al ser un producto de prefabricados tiene que poder desmoldarse rápido por lo que la resistencia a 24 horas es un factor clave. Esto condiciona el tipo de cemento, que debe ser de altas resistencias iniciales. Además, se usa un filler calizo para tener más cantidad de pasta sin llegar a usar demasiado cemento.

Se utilizan dos arenas graníticas por ser un material abundante en la zona y de uso habitual en la planta de prefabricados donde se va a fabricar el modelo.

Como materiales aligerantes para el hormigón se seleccionó el aireante Poresin 88 y EPS reciclado granulado.

También se usaron dos aditivos, el Premia 550 y el Quad 20 para mejorar el comportamiento en fresco de la mezcla.

### 2.1 Cemento

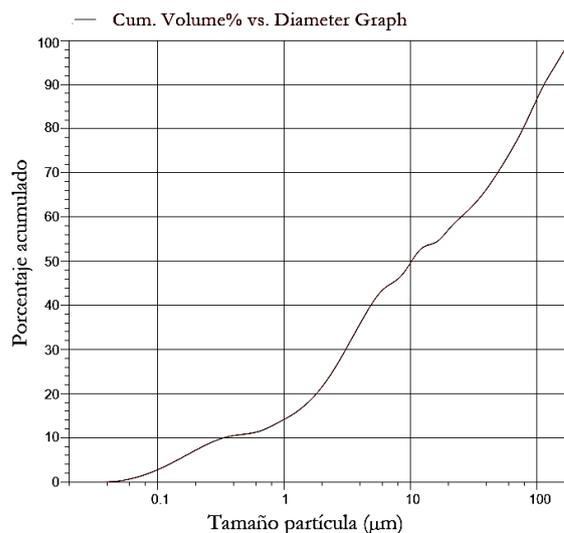
Se trata de un CEM I 52.5 N-SR de la empresa Votorantim Cosmos con un contenido de clinker mayor al 97% y con un tiempo de fraguado inferior a los 250 minutos de media.

### 2.2 Filler

La tabla 1 y figura 1 muestran las características del filler calizo empleado.

**Tabla 1. Características del filler.**

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.735
Sup. BET (m <sup>2</sup> /g)	0.9883



**Figura 1. Granulometría filler**

### 2.3 Áridos naturales

Se tratan de dos arenas graníticas que se mezclan en una proporción 80-20. Sus principales características se reflejan en la tabla 2 y la figura 2. Los valores de la tabla 2 se obtienen según la norma UNE 1097-6 [1].

**Tabla 2: Características de las arenas**

	Arena 0/2	Arena 0/4
ρa(g/cm <sup>3</sup> )	2.70 ± 0.02	2.66 ± 0.01
ρrd(g/cm <sup>3</sup> )	2.48 ± 0.02	2.58 ± 0.01
ρssd(g/cm <sup>3</sup> )	2.56 ± 0.02	2.61 ± 0.01
Wa 24h (%)	3.27 ± 0.03	1.17 ± 0.04

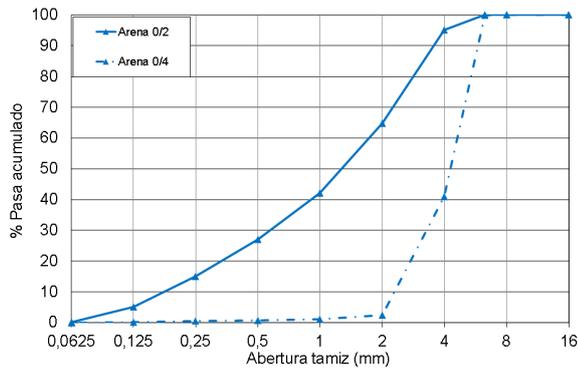


Figura 2: Granulometría áridos

## 2.4 EPS

Tras la revisión bibliográfica previa [2][3], se opta por emplear Polietileno Expandido reciclado (EPS) como árido que debido a su baja densidad permite el diseño de hormigones ligeros.

El EPS es un material plástico espumado derivado del poliestireno que en este caso se utiliza reciclado. Su fabricación parte de perlitas de este material que contienen un agente expansivo que actúa aplicando un aumento de la temperatura.

Para el desarrollo de este estudio se analizan dos tipos de EPS, uno blanco y otro grafitado optándose finalmente por el blanco, figura 3.



Figura 3: EPS blanco y grafitado

Las principales características de este material se muestran en la tabla 3 y figura 4 y

están en consonancia con los de otros EPS utilizados en otras investigaciones [4], [5], [6] y [7].

Tabla 3: Características del EPS

	EPS blanco	EPS grafitado
$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	15.75 ± 0.15	26.04 ± 0.10
$\rho_{rd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	15.75 ± 0.15	26.04 ± 0.10
$\rho_{ssd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	15.75 ± 0.15	26.04 ± 0.10
Wa 24h (%)	3.92 ± 0.02	3.19 ± 0.01

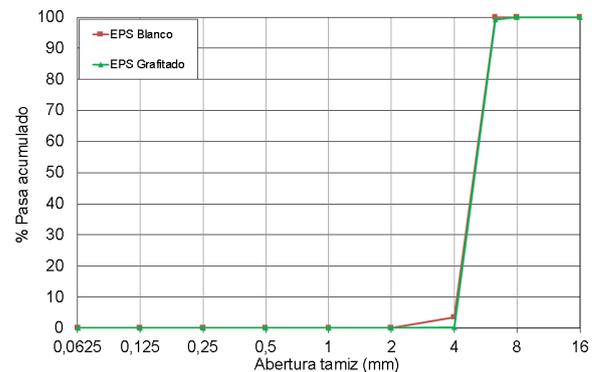


Figura 4: granulometrías EPS

## 2.5 Aditivos

Los aditivos usados son todos de la casa comercial Chryso. En dos de las dosificaciones se emplea el superplastificante Premio 550 con el fin de conseguir mayor fluidez y el aireante Poresin 88 buscando una menor densidad en el hormigón. Este aditivo a su vez contribuye a una mejor dispersión de las partículas de EPS dentro del hormigón y favorece la fabricación y colocación de estos hormigones.

En la dosificación que no se usa aireante se emplea un modulador de viscosidad, el Quad 20, para obtener una buena dispersión de partículas de EPS.

## 3. Dosificaciones

En esta investigación se analizan 3 dosificaciones, seleccionadas en un estudio previo en el que se evaluó la influencia de

diferentes aditivos y el EPS para conseguir un comportamiento adecuado, tanto en fresco como en endurecido.

Los principales parámetros que se estudiaron fueron la cantidad de aireante, la cantidad de EPS, el comportamiento conjunto de una determinada cantidad de aireante y EPS, y la interacción de ambos con aditivos superplastificantes y moduladores. Finalmente, se seleccionaron tres dosificaciones, una con aireante, otra con aireante y EPS y una tercera con EPS y modulador.

### 3.1 Ajuste de aireante

Con el fin de ajustar el contenido de aireante adecuado, se realizaron 4 pruebas con contenidos de 0.3 l/m<sup>3</sup>, 0.6 l/m<sup>3</sup>, 0.9 l/m<sup>3</sup> y 1.2 l/m<sup>3</sup>, valor recomendado por el fabricante. En todas ellas se añade un 1% de aditivo superfluidificante, Premio 550, sobre el peso de cemento, que se mantiene fija para todas las dosificaciones.

Con estas dosificaciones, todos los hormigones obtenidos presentan densidades por debajo de los 1800 kg/m<sup>3</sup>, valor objetivo prefijado para el diseño de los hormigones. Sin embargo, las dosificaciones con contenidos de aireante más elevados presentan un descenso considerable de las propiedades mecánicas, estos resultados están en consonancia con los obtenidos por otros autores [8] [6]. En base a estos primeros resultados, se fijó el contenido de

aireante óptimo entre 0.3-0.6 l/m<sup>3</sup> con el objetivo de buscar un equilibrio entre la necesidad de obtener bajas densidades en el hormigón sin penalizar en exceso las prestaciones mecánicas del mismo.

### 3.2 Ajuste de EPS

Una vez decidida la cantidad de aireante se analiza la influencia del contenido de EPS a utilizar en sustitución del árido natural. Se realizan pruebas con el 10%, el 20%, el 30% y el 40% de EPS (sustitución en volumen).

Este análisis previo arroja resultados que permiten constatar la caída de las resistencias mecánicas con el aumento de EPS en sintonía con otros estudios similares [9]. Se decide por tanto, que la cantidad óptima a sustituir es del 20-40%, que permite obtener densidades propias de un hormigón ligero y prestaciones mecánicas adecuadas para la aplicación objeto de estudio en esta investigación.

### 3.3 Dosificaciones finales

En la tabla 4 se muestran las tres dosificaciones de los hormigones que se analizaron. Como se comentó anteriormente, estas dosificaciones se diseñaron en base a los resultados obtenidos en la campaña de ajuste de aditivos y de cantidad de EPS en sustitución del árido convencional.

Tabla 4: Dosificaciones finales (kg/m<sup>3</sup>)

	Agua	Cemento	Filler	Poresin 88	Premia 550	Quad 20	Arena 0/2	Arena 0/4	EPS
Aireante	149	375	100	0.71	3.75	0.00	1471.7	373.5	0.00
Air.+EPS	149	375	100	0.41	3.75	0.00	1103.8	280.1	2.71
Mod.+EPS	187.5	375	100	0.00	0.00	2.25	837.2	212.5	4.12

## 4. Resultados

Para caracterizar los hormigones de estudio se hicieron ensayos en fresco y endurecido. En fresco se estudió la fluidez y la densidad. En endurecido se evaluó de nuevo la densidad, la pérdida de peso, la resistencia a compresión, la resistencia a tracción, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y la retracción.

Los ensayos en estado endurecido se realizaron a 28 días para obtener los valores característicos de las propiedades del hormigón y a 1 y 2 días de edad con el fin de conocer sus propiedades a edades tempranas y definir los plazos de fabricación de los tabiques prefabricados.

### 4.1 Escurrimiento

Se realiza el ensayo en la mesa de sacudidas para morteros debido a que el tamaño máximo del árido es de 4 mm, tomando medidas antes y después de las sacudidas. Los resultados se muestran en la tabla 5. Los hormigones con aireante son muy fluidos, prácticamente autocompactantes como sugiere la bibliografía existente [10]. En el caso del hormigón con modulador y EPS la fluidez es menor que en los anteriores.

Tabla 5: Escurrimiento (cm)

	Antes sacudidas	Después
Aireante	15.0 ± 0.61	20.9 ± 1.03
Air. + EPS	14.9 ± 0.63	21.1 ± 0.85
Mod. + EPS	10.5 ± 0.41	16.4 ± 1.11

### 4.2 Densidad

La densidad, por ser uno de los parámetros objetivo de la investigación se mide en más de 40

probetas de cada una de las dosificaciones para obtener un dato lo más representativo posible. Los resultados se muestran en la tabla 6. No se llegan a alcanzar las densidades de otros hormigones ligeros [6] debido al uso de porcentajes menores de aireante y de EPS con el fin de obtener propiedades mecánicas adecuadas para la aplicación objeto de estudio [7]. Estos resultados están en sintonía con los obtenidos en estudios similares [11].

Tabla 6: Densidad (kg/m<sup>3</sup>)

	Fresco	1 día	28 días
Aireante	1770.8 ± 17.0	1742.5 ± 17.8	1701.7 ± 17.4
Air.+EPS	1556.9 ± 40.8	1539.5 ± 35.5	1502.6 ± 34.6
Mod.+EPS	1747.2 ± 34.6	1727.9 ± 39.7	1685.6 ± 38.7

### 4.3 Pérdida de peso

La pérdida de peso se calcula con pesadas diarias de varias probetas de control en un ambiente con temperatura y humedad controlada.

La evolución de la pérdida de peso se muestra en la figura 5, donde apenas se observan diferencias significativas entre los tres hormigones analizados.

Tampoco se aprecian variaciones significativas a partir de los 12-15 días. Otros estudios se centran sólo en la densidad en seco a 28 días [12][13] por lo que es difícil en este caso, establecer comparaciones.

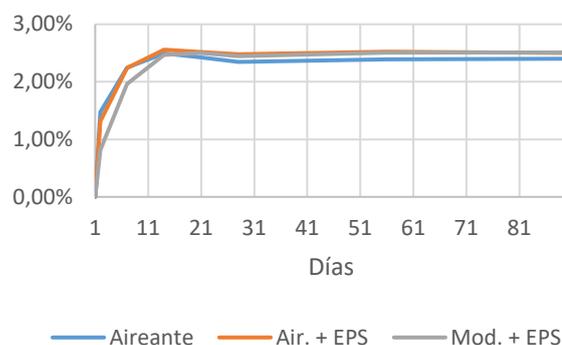


Figura 5: pérdida de peso

#### 4.4 Resistencia a compresión

Para calcular la resistencia a compresión se ensayan probetas cúbicas de 10 cm de arista y probetas cilíndricas de 15x30 cm, estas primeras proporcionan un coeficiente de reducción de 0.8 respecto a las cilíndricas según UNE 12390-3 [14].

Se ensayan a 24 horas para caracterizar a edades tempranas y a 48 horas para poder hacer el ensayo de módulo de Young y coeficiente de Poisson. También se obtienen resultados a 28 días para conocer el valor característico. En este caso, las resistencias presentan valores inferiores a los obtenidos en otros estudios [4], hecho que se atribuye a la menor cantidad de cemento empleada [15].

Tabla 7: Resistencia a compresión (MPa)

	1 día	2 días	28 días
Aireante	5.2 ± 0.41	7.2 ± 0.3	10.5 ± 0.61
Air. + EPS	4.2 ± 0.60	5.7 ± 0.58	8.4 ± 0.84
Mod. + EPS	7.5 ± 0.52	8.9 ± 0.82	13.2 ± 1.09

#### 4.5 Resistencia a tracción

Estos valores se obtienen realizando el ensayo de tracción indirecta o brasileño [16] en probetas cilíndricas de 10x20 cm. De nuevo, se ensayan a 24 horas y a 28 días para caracterizar el hormigón a edades tempranas y obtener el valor característico. Al igual que la resistencia a compresión, el hormigón sin aireante presenta mayores valores de resistencia a tracción indirecta que los otros dos [17].

Tabla 8: Resistencia a tracción (MPa)

	1 día	28 días
Aireante	0.7 ± 0.19	1.7 ± 0.01
Air. + EPS	0.8 ± 0.09	1.3 ± 0.11
Mod. + EPS	1.2 ± 0.12	1.9 ± 0.07

#### 4.6 Módulo de Young y coeficiente de Poisson

Se determinó la deformación longitudinal y transversal bajo carga constante [18], este ensayo se realizó a 48 horas y no a 24 por la preparación que requieren las probetas. También se realizó a 28 días para obtener el valor característico.

En consonancia con los resultados de las resistencias mecánicas, se observan mayores módulos de Young en el hormigón sin aireante.

Tabla 9: Modulo de Young (Mpa)

	2 días	28 días
Aireante	12365 ± 809	10344 ± 663
Air. + EPS	10862 ± 607	11747 ± 1120
Mod. + EPS	14195 ± 1550	15704 ± 1152

Tabla 10: Coeficiente de Poisson

	2 días	28 días
Aireante	0.423 ± 0.048	0.594 ± 0.128
Air. + EPS	0.380 ± 0.052	0.655 ± 0.058
Mod. + EPS	0.434 ± 0.158	0.934 ± 0.196

#### 4.7 Retracción

La deformación por retracción se mide sobre probetas de 200x25x25 mm [14]. La figura 6 muestra los resultados obtenidos hasta 90 días. En la figura 6 se aprecia como a partir de los 12-15 días la retracción se estabiliza y apenas muestra variaciones. En otros estudios [19] esto se produce a una edad más avanzada por lo que será necesario seguir investigando en esta línea .

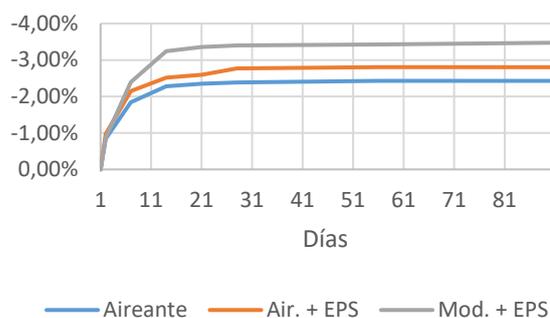


Figura 6: Evolución de la retracción

#### 4.8 Segregación del hormigón

Con el fin de conocer si el uso de los aditivos aireantes o EPS genera segregación en los hormigones, se realiza una inspección visual de probetas cilíndricas partidas longitudinalmente tras el ensayo de tracción indirecta. En la figura 7, figura 8 y figura 9 se pueden apreciar las pequeñas microesferas de aire que introduce el aireante, así como el EPS bien distribuido en la totalidad de la altura de la probeta.



Figura 7: Probeta de hormigón con aireante



Figura 8: Probeta de hormigón con aireante y EPS



Figura 9: Probeta de hormigón con modulador y EPS

### 5. Aplicación a prototipos de tabique

Una vez definido el material se inicia la fase de análisis de los tabiques prefabricados con estos hormigones.

Como parte de esta investigación se construye un módulo residencial de 100 m<sup>2</sup> en el que se han colocan 3 tabiques, cada uno de ellos realizado con una de las dosificaciones analizadas anteriormente.

#### 5.1 Diseño de tabiques

Para el diseño de los modelos a fabricar se parte de modelos de elementos finitos tipo placa elaborados con el programa SAP 2000 de CSI Structures [20] en los que se observan las peores configuraciones posibles en cuanto a esfuerzos, este caso es en el momento de izado cuando se coloca. El modelo se realiza con elementos bidimensionales de placa gruesa, suponiendo un espesor de tabique de 10 cm, módulo de deformación del hormigón de 15000 MPa y peso específico unitario de 10 kN/m<sup>3</sup>.

Los modelos de referencia son dos: tabique con voladizo (figura 10) y tabique con puerta centrada (figura 12). En el tabique con voladizo, suponiendo densidad relativa de 1,80, las tensiones principales máximas son de 1,37 MPa en el punto del anclaje (figura 11), por lo que su sujeción debe ir bien repartida. Las tensiones en el resto del tabique son mínimas.

En el caso del tabique con puerta centrada las tensiones máximas son de 1,42 MPa en el punto del anclaje (figura 13) por lo que su sujeción debe ir bien repartida igual que en el caso anterior. Las tensiones en el resto del tabique son mínimas.

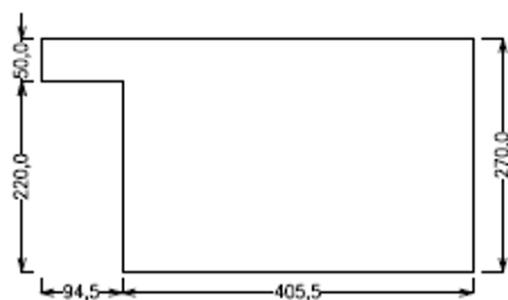


Figura 10: Modelo de tabique interior con voladizo

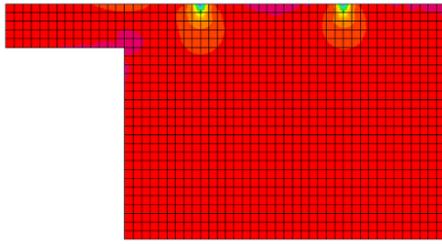


Figura 11: Tensiones principales máximas en tabique con voladizo

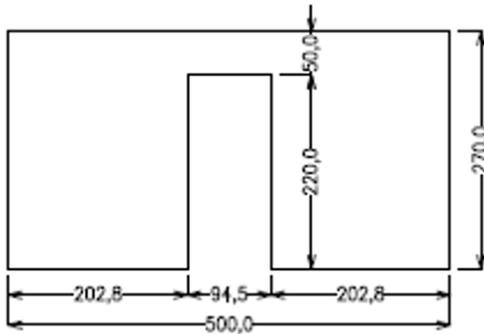


Figura 12: modelo de tabique con puerta en el centro

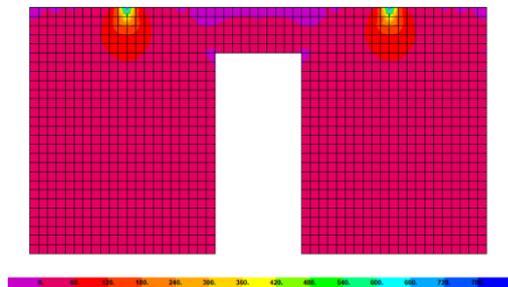


Figura 13: tensiones principales máximas en tabique con puerta en el centro

## 5.2 Fabricación de tabiques.

Tras caracterizar las distintas dosificaciones y comprobar su viabilidad se procedió a hacer las primeras pruebas de fabricación de tabiques con los hormigones ligeros desarrollados.

Por simplificar el proceso se hizo en mesas de hormigonado horizontal (figura 14), aunque en un futuro se implantará el sistema para hormigonar en vertical consiguiendo un mejor acabado en ambas caras del tabique.

Se coloca un mallazo simple para poder sujetar los tubos y las cajas de las instalaciones y simplificar el montaje (figura 15). También

sirven para distribuir mejor las tensiones de los anclajes que se utilizan para elevar y transportar los tabiques. Los futuros huecos de puertas se dejan ya definidos (figura 16).

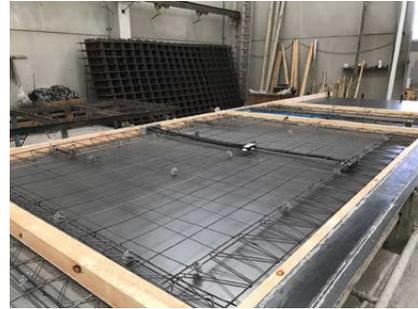


Figura 14: Tabique preparado para colocar instalaciones.



Figura 15: Tabique con instalaciones colocadas.



Figura 16: Tabique hormigonándose.

En las primeras pruebas de fabricación hubo algún problema de izado de las piezas por lo que hubo que repartir mejor las cargas del sistema de elevación al mallazo interior. También pasó lo esperado con el acabado superficial de la cara superior, que debería ser lo suficientemente liso como para evitar tratamientos superficiales posteriores. Por ello, se propone en versiones futuras hormigonar los tabiques con un encofrado a dos caras vertical.

Estos tabiques se integran en un módulo experimental que cuenta con paredes exteriores

fabricadas con tabiques prefabricados que, por cumplir con función estructural, se fabrican con hormigón convencional (figuras 17 y 18).

En las divisiones interiores se utilizan los tabiques con las tres dosificaciones de hormigón ligero desarrollado (figura 19).

El módulo terminado y acondicionado se monitoriza para caracterizar el comportamiento de estos tabiques tanto acústica como térmicamente. También se realizarán ensayos para determinar si cumplen el resto de las exigencias del CTE [21].



Figura 17: Montaje del módulo



Figura 18: Montaje de los tabiques interiores objeto de esta investigación

## 6. Conclusiones

El desarrollo de un nuevo sistema de tabiquería ligera prefabricada con instalaciones integradas requiere de un hormigón con una serie de propiedades que permitan su implantación en la cadena de producción de la planta de prefabricados y su colocación en obra:

- Densidad inferior a  $1800 \text{ kg/m}^3$  para colocarlos con grúas convencionales.
- Resistencia a tracción superior a  $0.5 \text{ MPa}$  para poder desmoldar a 1 día.

- Resistencia a compresión suficiente para garantizar dureza superficial e integridad.
- Fluidez.
- Evitar segregación.

En base a los resultados obtenidos se seleccionan tres hormigones diferentes que cumplen estos requisitos: uno con  $0.6 \text{ l/m}^3$  de aireante, otro con el 25% de EPS y  $0.3 \text{ l/m}^3$  aireante, y un último hormigón con modulador de viscosidad y 40%EPS.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto PRET-A-BICO (financiado con fondos FEDER de la convocatoria CONECTA PEME 2018 de la Axencia Galega de Innovación (GAIN) de la Xunta de Galicia. En este proyecto participa un consorcio de empresas formado por LOPEZ CAO, NAOS ARQUITECTURA Y GALAICONTROL.

## Referencias

- [1] UNE 1097-6, Ensayo para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos, AENOR. (2009).
- [2] G. Sahmenko, E. Namson, K. Rubenis, A. Dubnika, G. Niparts, Effect of various additives and aeration on the properties of lightweight concrete, Key Eng. Mater. 762 (2018) 351–355. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.762.351>.
- [3] J. Zach, M. Sedlmajer, J. Bubenik, V. Novak, Utilization of Non-Traditional Fibers for Light Weight Concrete Production, Key Eng. Mater. 760 (2018) 231–236. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.760.231>.
- [4] N. Liu, B. Chen, Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete, Constr. Build. Mater. 68 (2014) 227–232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.062>.

- [5] D.S. Babu, K. Ganesh Babu, W. Tiong-Huan, Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete, *Cem. Concr. Compos.* 28 (2006) 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.018>.
- [6] B. Chen, N. Liu, A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties, *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 691–698. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.091>.
- [7] J. Cui, The Influence of Redispersible Powder on Mechanical Properties of EPS Light-Aggregate Concrete, *Appl. Mech. Mater.* 651–653 (2014) 173–176. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.651-653.173>.
- [8] S. Wei, Z. Yunsheng, M.R. Jones, Using the ultrasonic wave transmission method to study the setting behavior of foamed concrete, *Constr. Build. Mater.* (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.066>.
- [9] D. Saradhi Babu, K. Ganesh Babu, W.T. Huan, Mechanical properties of lightweight expanded polystyrene concrete containing fly ash, *Indian Concr. J.* 80 (2006) 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.015>.
- [10] A. Bagheri, A. Samea, Effect of air content on the rheology of foamed concrete, *Mag. Concr. Res.* (2019). <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00267>.
- [11] C.L. Nogueira, K.L. Rens, Ultrasonic wave propagation in EPS lightweight concrete and effective elastic properties, *Constr. Build. Mater.* 184 (2018) 634–642. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.026>.
- [12] C. Waste, E. Polystyrene, M. Ingot, EPS Mechanical Properties of Lightweight Concrete Using, 56 (2007) 287–293.
- [13] A. Kan, R. Demirboğa, A novel material for lightweight concrete production, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 489–495. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.002>.
- [14] UNE 12390-3, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a la compresión de probetas., Aenor. (2003).
- [15] M.A. Qurashi, S.A.R. Shah, M. Farhan, M. Taufiq, W. Khalid, H. Arshad, M. Tayyab, G. Shahzadi, M. Waseem, Sustainable design and engineering: A relationship analysis between digital destructive and non-destructive testing process for lightweight concrete, *Processes.* 7 (2019). <https://doi.org/10.3390/pr7110791>.
- [16] British Standard, Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens, BS EN 12390-6:2009. (2009).
- [17] B. Chen, N. Liu, A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties, *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 691–698. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.091>.
- [18] UNE EN 12390-13, Testing hardened concrete - Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression, AENOR. (2013).
- [19] Y. Li, N. Liu, B. Chen, Properties of lightweight concrete composed of magnesia phosphate cement and expanded polystyrene aggregates, *Mater. Struct. Constr.* 48 (2015) 269–276. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0182-6>.
- [20] CSI Structures, SAP 2000, (2017). <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>.
- [21] Real Decreto, Código Técnico de la Edificación, 2009. <https://doi.org/CTE>.