

CMMoST 2019

5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON

Mechanical Models in Structural Engineering

Alicante, SPAIN

23 - 25 October 2019

Escuela Politécnica Superior

Universidad de Alicante

Full Papers



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

CMMoST 2019

5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON

Mechanical Models in Structural Engineering

Polytechnic School of Alicante

23rd – 25th October 2019



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

COMITÉ DE EDICIÓN

Salvador Ivorra Chorro

Victor Compán Cardiel

Andrés Sáez Pérez

Enrique Hernández Montes

Luisa M^a Gil Martín

Margarita Cámara Pérez

COORDINADORES

Francisco Javier Baeza de los Santos

M. A. Yordhana Gómez Sánchez

Edita: Editorial Club Universitario
C/ Decano, n.º 4 – 03690 San Vicente (Alicante)
www.ecu.fm
original@ecu.fm

ISBN: 978-84-17924-58-4
ISBN papel: 978-84-17924-22-5

Printed in Spain

Organizan:



ugr



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Patrocinan:



PAVASAL

<i>R. García Cuevas, J.F. Jiménez-Alonso, C. Martín de la Concha Renedo, F. Martínez y I.M Díaz</i>	
NUMERICAL MODEL OF VEGETAL FABRIC REINFORCED CEMENTITIOUS MATRIX COMPOSITES (FRCM) SUBJECTED TO TENSILE LOADS. <i>L. Mercedes, E. Bernat y L. Gil</i>	583
NUMERICAL MODELS FOR MAMMOPLASTY SIMULATIONS. <i>A. Lapuebla-Ferri, A. Pérez del Palomar, J. Cegoñino- y A.J. Jiménez-Mocholí</i>	597
ON THE VULNERABILITY OF AN IRREGULAR REINFORCED CONCRETE BELL TOWER. <i>M. Diaferio, D. Foti, N.I. Giannoccaro, S. Ivorra, G. Notarangelo y M. Vitti</i>	611
OPTIMIZACIÓN DE MUROS DE HORMIGÓN MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA. <i>V. Yepes, D. Martínez-Muñoz y J.V. Martí</i>	623
PIEZOELECTRIC LEAD-FREE NANOCOMPOSITES FOR SENSING APPLICATIONS: THE ROLE OF CNT REINFORCED MATRICES. <i>F. Buroni, J.A. Krishnaswamy, L. Rodríguez-Tembleque, E. García-Macías, F. García-Sánchez, R. Melnik y A. Sáez</i>	637
STRONG EQUILIBRIUM IN FEA - AN ALTERNATIVE PARADIGM? <i>E. Maunder y A. Ramsay</i>	651
STUDY OF ACTIVE VIBRATION ISOLATION SYSTEMS CONSIDERING ISOLATOR-STRUCTURE INTERACTION <i>J. Pérez Aracil, E. Pereira González, I. Muñoz Díaz y P. Reynolds</i>	665
THERMAL AND STRUCTURAL OPTIMIZATION OF LIGHTWEIGHT CONCRETE MIXTURES TO MANUFACTURE COMPOSITE SLABS. <i>F.P. Álvarez Rabanal, J.J. del Coz Díaz, M. Alonso Martínez y J.E. Martínez-Martínez</i>	675
THROUGH-BOLTING EFFECT ON STIFFENED ANGLE JOINTS. <i>J.M. Reinoso, A. Loureiro, R. Gutiérrez y M. López</i>	689
VIBRATION TESTING BASED ON EVOLUTIONARY OPTIMIZATION TO IDENTIFY STRUCTURAL DAMAGES. <i>J. Peña-Lasso, R. Sancibrián, I. Lombillo, J. Setién, J.A. Polanco y Ó.R. Ramos</i>	699

THERMAL AND STRUCTURAL OPTIMIZATION OF LIGHTWEIGHT CONCRETE MIXTURES TO MANUFACTURE COMPOSITE SLABS

Alvarez Rabanal, Felipe Pedro¹; del Coz Díaz, Juan José²; Alonso-Martínez, Mar³; Martínez-Martínez, Juan Enrique⁴

ABSTRACT

The use of composite slabs in buildings is increasingly widespread in the EU in the last decades. Current standards specified the minimum concrete compressive strength used in its manufacture as 25 MPa. The aim of this work is to study different lightweight concrete mixtures to manufacture composite slabs, taking into account their thermal and structural properties, such as thermal conductivity and compressive strength.

Firstly, design of experiments methodology was used to study different formulations of lightweight concrete mixtures. Secondly, a test protocol was established in order to maintain the maximum homogeneity in the samples. Thirdly, structural and thermal tests were done and the experimental results were analyzed. Results of compressive strength varies between 14.90 to 27.43 MPa and thermal conductivity are between 0.68 to 0.93 W/mK. Finally, the concrete mixtures was optimized and four were chosen as the most suitable ones for its use in this type of slabs.

Keywords: Design of experiments, Lightweight concrete, Mixture design, Sustainable construction, Composite slab.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, aproximadamente un 50% de los nuevos edificios que se construyen en la UE utilizan forjados mixtos. Actualmente en España la normativa específica para forjados mixtos con hormigones estructurales (HE) es el Eurocódigo 4 [1]. En dicha norma no se contempla el empleo de hormigones armados o pretensados con resistencias características a compresión inferiores a los 25 MPa. El peso excesivo del recubrimiento de hormigón sobre la sección de pared delgada es una debilidad en este tipo de estructuras, por lo que el uso de hormigones ligeros estructurales reforzados con fibras implica una menor carga muerta sobre la estructura y las cimentaciones [2]. Otro aspecto importante a considerar, es la menor conductividad térmica de este tipo de hormigones [3], por lo que su

¹ Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación. Universidad de Oviedo (ESPAÑA). alvarezfelipe@uniovi.es (Corresponding author).

² Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación. Universidad de Oviedo (ESPAÑA). juango@constru.uniovi.es

³ Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación. Universidad de Oviedo (ESPAÑA). mar@constru.uniovi.es

⁴ Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación. Universidad de Oviedo (ESPAÑA). quique@constru.uniovi.es

utilización mejora el aislamiento térmico de estos forjados y el consecuente ahorro energético en las edificaciones.

El empleo de hormigones ligeros (*HL*) en la construcción de estructuras está justificado por su excelente comportamiento térmico e higrotérmico [3-4], por su carácter de material completamente reciclable y, debido a su menor peso, por el menor coste estructural y de transporte respecto a los hormigones normales utilizados tradicionalmente en el sector de la construcción. Ya en la 12th International Brick/Block Masonry Conferences, celebrada en Madrid en el año 2000, se comenzó a mostrar la gran influencia de los hormigones ligeros en el aislamiento térmico cuando se utilizan en la construcción de bloques [5], continuando posteriormente con los trabajos de determinación de mezclas para la mejora de sus propiedades [6]. En este tipo de hormigones, la alta capacidad de absorción de agua de los áridos ligeros que los componen puede alterar las características mecánicas, reológicas y de durabilidad del hormigón elaborado. Para evitar estas alteraciones, suele ser necesario efectuar un pre-acondicionamiento del árido ligero y realizar un control exhaustivo del procedimiento de fabricación. Parámetros tales como el tipo de árido utilizado, su grado de saturación y las proporciones de la mezcla tienen una influencia directa sobre las propiedades finales del hormigón ligero [7]. En España, la Instrucción de Hormigón estructural [8] es la que determina en su Anejo 16 los requisitos que deben cumplir los hormigones ligeros para conseguir un comportamiento y durabilidad adecuadas. En dicha Instrucción, se determina un mínimo contenido de cemento y, dada la complejidad los fenómenos de absorción que se producen en los áridos ligeros y la posterior transferencia de agua a la pasta durante el curado, se sustituye la tradicional relación agua/cemento utilizada en la elaboración de hormigones normales por la Clase Resistente. Esto se debe también a que las dosificaciones previstas presentan una gran variabilidad en función de los pequeños ajustes que siempre se producen durante el procedimiento de ejecución en obra. Por lo tanto, el único método de validación de la dosificación y del procedimiento de ejecución que viene reflejado en la norma es la realización de ensayos previos que determinen su resistencia mecánica. En la actualidad, la mayoría de los fabricantes utilizan arcillas expandidas hidrofugadas con las cuales, al no requerir una hidratación previa, se consiguen HL de mayor resistencia a menores densidades, y con unas propiedades más homogéneas.

En la búsqueda de las dosificaciones adecuadas para obtener un hormigón con unas determinadas características, suele utilizarse la técnica del Diseño de Experimentos (*DOE*) [9]. En el DOE, es fundamental determinar el objetivo perseguido por el experimento y los factores involucrados en el proceso con la finalidad de seleccionar el método más apropiado. El método elegido debe tener la finalidad de reducir el trabajo experimental mediante la determinación de la dependencia de los factores. En el caso de la optimización de la combinación de proporciones de los componentes de una mezcla de hormigón de forma que se obtenga un valor determinado de respuesta, los métodos de Diseño de Mezcla de Vértice Extremo [10] y de Superficie de Respuesta con Diseños Compuestos Centrales (*CCD*) [11] y de Box-Behnken (*BBD*) [12] suelen ser los más utilizados.

El principal objetivo de este trabajo es el estudio de la optimización de diferentes dosificaciones de hormigones ligeros reforzados con fibras mediante DOE, con el fin de determinar las más eficientes desde el punto térmico y estructural para su utilización en forjados mixtos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se indicará la metodología aplicada en el estudio, así como los materiales y procedimientos de ensayo utilizados.

2.1. Metodología

Para obtener los hormigones ligeros reforzados con fibras objeto del estudio se aplicó la metodología de Diseño de Experimentos [9], combinando dosificaciones de cemento (CEM II/A-V 42,5 R) y arena (0-2mm de diámetro) con los volúmenes de dos tipos de arcilla expandida (de 1-5 y de 2-10 mm de diámetro) y el agua aportada, dando lugar a un total de 37 dosificaciones diferentes. A todas ellas se añadieron fibras de poliolefina para mejorar el comportamiento del hormigón ligero frente a fenómenos de retracción [13]. Posteriormente, se estableció el período de elaboración, curado y ensayos según la normativa vigente [14]. En este sentido, fue muy importante establecer un protocolo de ensayos, con el fin de mantener la máxima homogeneidad posible en las probetas, así como planificar todas las tareas a realizar en el período de tiempo correspondiente.

El protocolo de elaboración de las probetas fue el siguiente:

1. Se realizaron ensayos de absorción higroscópica del árido ligero para determinar el tiempo que necesita la arcilla expandida para alcanzar el grado de saturación que permita homogeneizar la preparación de las mezclas a mayor escala.
2. Se midió la temperatura ambiente del laboratorio y el agua sobrante de la saturación del árido, que fue aprovechada para elaborar la mezcla. Se mezcló el hormigón en hormigonera durante 5 minutos y se extrajo para poder realizar el vertido en los moldes cilíndricos para ensayos de compresión [15], y cúbicos (45mmx45mmx45mm) para ensayos de conductividad térmica mediante la técnica de la fuente plana transitoria modificada (MTPS) [16]. Las probetas fueron vibradas en mesa de vibrado con el fin de reducir coqueas y oquedades.
3. Se desmoldaron las probetas 24 horas después de su elaboración, se pesaron y se introdujeron para su curado en cámara higrotérmica a condiciones de humedad y temperatura controladas durante 28 días.
4. Antes de la finalización del período de curado, se realizó el refrentado de las probetas con azufre, con el fin de garantizar la perpendicularidad entre la superficie de apoyo y la dirección de aplicación de la carga en los ensayos de compresión.
5. Transcurrido el período de curado de 28 días, se realizaron los ensayos de las probetas a compresión y se obtuvieron las propiedades de conductividad térmica. Paralelamente se determinaron las densidades aparentes de los diferentes hormigones ligeros fabricados [17].

Se analizaron los resultados obtenidos y se seleccionaron las dosificaciones más adecuadas para la construcción de las losas en términos de resistencia y eficiencia térmica, alcanzando un equilibrio entre ambas.

2.2. Materiales

El cemento utilizado en esta investigación, CEM II/A-V 42.5, es un cemento Portland con ceniza volante fabricado por la empresa Tudela Veguín. Tiene una densidad de 3150 kg/m³ y una resistencia a compresión de 49,63 MPa a 28 días según UNE-EN 196-1. Las proporciones de los distintos componentes son los que se muestran en la Tabla 1. Como agregado fino se utilizó Arena sílicea de 0-2mm de diámetro con una densidad de 1600 kg/m³. En este estudio se han usado dos granulometrías de árido ligero no hidrofugado de la empresa Weber Saint-Gobain, cuyas propiedades son las que se indican en la Tabla 2. Para reducir el fenómeno de la retracción sobre los hormigones fabricados, se han añadido macro fibras sintéticas de poliolefina Sikafiber® T-48 de la empresa Sika con una longitud de 48 mm y una densidad de 910 kg/m³.

Tabla 1. Proporciones de los componentes de CEM II/A-V 42,5 R

Material	Proporciones			
	Clinker	Ceniza Volante	Yeso	Escorias
CEM II/A-V 42,5 R	84,5 %	7,9 %	4,3 %	3,3%

Tabla 2. Propiedades del árido ligero

Material	Propiedades			
	Forma	Granulometría	Densidad ($\pm 15\%$)	Absorción de agua
Arlita® LECA-S	Aprox. esférica	1-5 mm	430 kg/m ³	<38% masa seca
Arlita® LECA-Dur	Aprox. esférica	2-10 mm	350 kg/m ³	<34% masa seca

2.3. Dosificaciones. Diseño de experimentos

El objetivo principal del DOE es el de obtener hormigones ligeros estructurales reforzados con fibras maximizando la ratio de Resistencia-Conductividad Térmica. Se han respetado los valores mínimos de cemento citados en la EHE-08, y se ha realizado un estudio combinado de pesos (cemento y arena) y volúmenes (LECA-Dur, LECA-S y agua). La cantidad de fibras de poliolefina aportadas no se ha considerado un factor a tener en cuenta y se ha mantenido constante para cada una de las dosificaciones estudiadas. En la Tabla 3 pueden observarse los rangos para cada uno de los materiales. Para determinar las dosificaciones a estudiar, se utilizó el software Minitab® en su versión 15, utilizándose el método de Superficie de Respuesta con Diseños Compuestos Centrales (CCD).

Tabla 3. Tabla de factores y rangos

RANGO	FACTORES				
	LECA-Dur	LECA-S	Arena 0/2	Cemento 42.5R	AGUA
INFERIOR	3,6 l	3,6 l	13,20 kg	9,00 kg	4,35 l
SUPERIOR	7,2 l	7,2 l	20,02 kg	12,6 kg	6,09 l

Las dosificaciones estudiadas pueden verse en la Tabla 4.

Tabla 4. Tabla de dosificaciones

DOSIFICACIONES	FACTORES				
	LECA-Dur	LECA-S	Arena 0/2	Cemento 42.5R	AGUA
LSDur-1	7,20 l	7,20 l	13,20 kg	9 kg	4,35 l
LSDur-2	5,70 l	7,20 l	15,60 kg	9 kg	4,35 l
LSDur-3	7,20 l	5,70 l	15,60 kg	9 kg	4,35 l
LSDur-4	3,60 l	7,20 l	18,96 kg	9 kg	4,35 l
LSDur-5	7,20 l	3,60 l	18,96 kg	9 kg	4,35 l
LSDur-6	6,30 l	6,30 l	14,90 kg	9,9 kg	4,35 l
LSDur-7	3,60 l	6,30 l	20,40 kg	9 kg	4,35 l
LSDur-8	6,30 l	3,60 l	20,40 kg	9 kg	4,35 l
LSDur-9	5,55 l	6,30 l	16,10 kg	9,9 kg	4,79 l
LSDur-10	6,30 l	5,55 l	16,10 kg	9,9 kg	4,79 l
LSDur-11	3,60 l	4,80 l	22,80 kg	9 kg	4,35 l
LSDur-12	4,50 l	6,30 l	17,78 kg	9,9 kg	4,79 l
LSDur-13	4,80 l	3,60 l	22,80 kg	9 kg	4,35 l
LSDur-14	6,30 l	4,50 l	17,78 kg	9,9 kg	4,79 l
LSDur-15	4,50 l	5,85 l	18,50 kg	9,9 kg	4,79 l
LSDur-16	5,85 l	4,50 l	18,50 kg	9,9 kg	4,79 l
LSDur-17	4,50 l	5,10 l	19,70 kg	9,9 kg	4,79 l
LSDur-18	5,10 l	4,50 l	19,70 kg	9,9 kg	4,79 l
LSDur-19	5,40 l	5,40 l	16,61 kg	10,8 kg	5,22 l
LSDur-20	5,70 l	6,30 l	13,51 kg	11,7 kg	5,66 l
LSDur-21	6,30 l	5,70 l	13,51 kg	11,7 kg	5,66 l
LSDur-22	4,95 l	6,30 l	14,71 kg	11,7 kg	5,66 l
LSDur-23	6,30 l	4,95 l	14,71 kg	11,7 kg	5,66 l
LSDur-24	4,50 l	6,30 l	15,43 kg	11,7 kg	5,66 l
LSDur-25	6,30 l	4,50 l	15,43 kg	11,7 kg	5,66 l
LSDur-26	6,00 l	7,20 l	10,42 kg	12,6 kg	6,09 l
LSDur-27	7,20 l	6,00 l	10,42 kg	12,6 kg	6,09 l
LSDur-28	4,50 l	5,25 l	17,11 kg	11,7 kg	5,66 l
LSDur-29	5,25 l	4,50 l	17,11 kg	11,7 kg	5,66 l
LSDur-30	4,50 l	4,50 l	18,31 kg	11,7 kg	5,66 l
LSDur-31	4,50 l	7,20 l	12,82 kg	11,7 kg	6,09 l
LSDur-32	3,60 l	7,20 l	14,26 kg	12,6 kg	6,09 l
LSDur-33	7,20 l	4,50 l	12,82 kg	12,6 kg	6,09 l
LSDur-34	7,20 l	3,60 l	14,26 kg	12,6 kg	6,09 l
LSDur-35	3,60 l	5,10 l	17,62 kg	12,6 kg	6,09 l
LSDur-36	5,10 l	3,60 l	17,62 kg	12,6 kg	6,09 l
LSDur-37	3,60 l	3,60 l	20,02 kg	12,6 kg	6,09 l

2.4. Procedimientos de ensayo

A continuación, se indican los procedimientos utilizados en los ensayos realizados, así como la normativa aplicada en los mismos.

2.4.1. Ensayos de absorción higroscópica del árido ligero

El procedimiento seguido para determinar el tiempo necesario para determinar el tiempo de saturación de los áridos ligeros fue el siguiente:

- Pesaje del árido ligero.
- Introducción en hormigonera del árido ligero y del doble de su volumen en agua.
- Hormigonera en funcionamiento durante diferentes tiempos.
- Evacuación del agua sobrante de la hormigonera.
- Pesaje del árido ligero saturado.

Este procedimiento se repitió para diferentes volúmenes de árido y en diferentes condiciones de humedad relativa ambiente. El tiempo mínimo de saturación del árido se determinó cuando el incremento del peso medido en diferentes tiempos fue menor del 5%.

2.4.2. Ensayos de resistencia a compresión

Todos los ensayos se realizaron para probetas fabricadas y curadas durante 28 días según las condiciones indicadas en la norma UNE 83504:2004 [14] (ver Figura 1). Previamente a la realización de los ensayos de compresión, todas las probetas cilíndricas fueron refrentadas con mortero de azufre según lo indicado en la norma UNE 83506:2004 [18] para conformar una superficie de ensayo totalmente lisa.

Las pruebas estándar de resistencia a compresión se realizaron sobre cilindros normalizados de acuerdo con los procedimientos indicados en la norma UNE 83507:2004 [15]. Las muestras cilíndricas se colocaron en la máquina de prueba hidráulica, y se fijó a una velocidad de aplicación de la carga de 8800 N/s hasta que las muestras fallaron. Se realizaron réplicas para cada prueba y se calculó el promedio de los valores de resistencia a compresión. Se realizaron 3 muestras para cada diseño de mezcla (3 réplicas por dosificación, 111 ensayos realizados).

A partir de los resultados obtenidos, se realizó el cálculo de la resistencia característica a compresión según lo indicado en el capítulo 8 de la EHE-08 [8].

$$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa} \quad (1)$$

siendo:

f_{ck} (MPa): resistencia característica a compresión del hormigón a 28 días.

f_{cm} (MPa): resistencia media a compresión del hormigón a 28 días.



Figura 1. Probetas utilizadas en los ensayos a compresión: fabricación (izquierda) y curado (derecha).

2.4.3. Ensayos de conductividad térmica

Para estos ensayos se ha utilizado un analizador TCI de la empresa C-Therm, el cual permite obtener valores de conductividad y efusividad térmica de los materiales mediante una técnica de ensayo no destructiva. El instrumento TCI se basa en una técnica modificada de la fuente plana transitoria (TPS) contemplada en la norma ISO/DIS 22007-2. En la Figura 2 puede verse una imagen descriptiva de los diferentes componentes del equipo, y en la Figura 3 un detalle de la realización de los ensayos.

Los ensayos se realizaron sobre probetas fabricadas y curadas durante 28 días según las condiciones indicadas en la norma UNE 83504:2004 [14], y estabilizadas posteriormente durante 30 días a temperatura ambiente. Se realizaron tres ensayos por cada probeta, recogiendo 10 medidas en cada uno de los ensayos (3 réplicas por dosificación, 111 ensayos, 1110 mediciones). Finalmente, se obtuvieron los valores promedio de conductividad térmica para cada una de las dosificaciones.

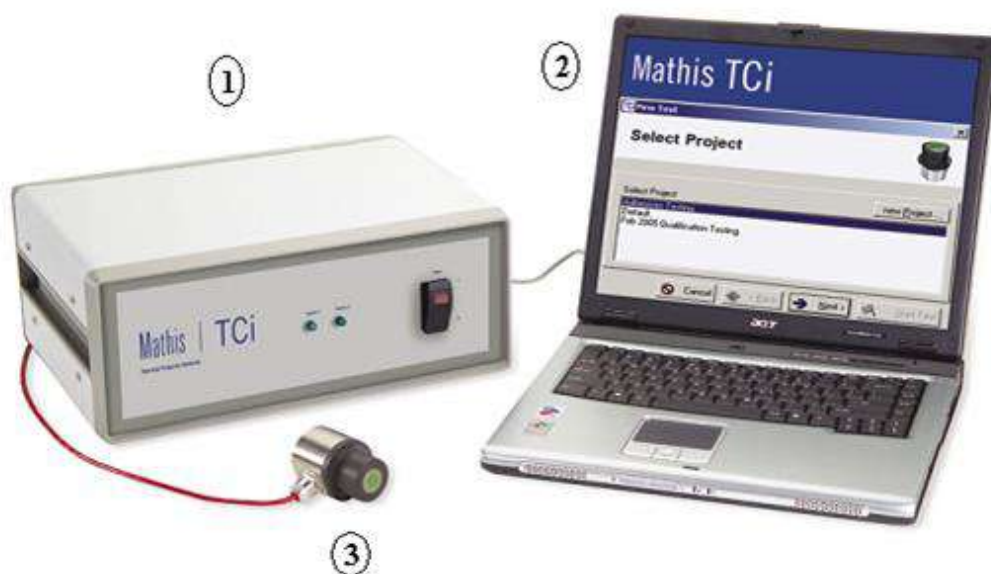


Figura 2. TCI C-Therm: unidad de control y medida (1), PC (2) y sensor de conductividad térmica (3).



Figura 3. Realización de ensayos de conductividad térmica con MTPS.

2.4.4. Ensayos de densidad aparente

Para determinar las densidades aparentes de los diferentes hormigones ligeros fabricados, se realizaron ensayos según norma UNE-EN 12390-7:2009 [17] sobre las probetas prismáticas utilizadas en los ensayos de conductividad térmica.

El procedimiento utilizado es mediante cálculo del volumen de la probeta, en m^3 , usando medidas reales y pesada en condiciones de recepción, es decir, al menos 30 días después de su extracción de la sala de curado, registrándose el valor medido en kg. Se realizaron tres ensayos por probeta en diferentes días y se calculó el valor promedio de los resultados obtenidos.

3. RESULTADOS

En el ensayo de absorción higroscópica se determinó que el tiempo necesario para conseguir que un árido ligero saturado presentase una variación menor del 5% en peso y, por tanto, su contenido en humedad fuera homogéneo en toda la muestra, es de al menos 15 minutos en hormigonera.

Los resultados obtenidos en los ensayos de densidad aparente, resistencia a compresión y conductividad térmica se pueden ver en la Tabla 5.

En la Figura 4 se muestran las gráficas de contorno de la ratio resultante de dividir la resistencia característica a compresión (resultado a maximizar) por la conductividad térmica (resultado a minimizar) para las diferentes combinaciones de los componentes de la mezcla. Los valores más altos de esta ratio son los que servirán para determinar el comportamiento térmico-estructural más eficiente de las dosificaciones estudiadas.

Tabla 5. Valor promedio de las propiedades volumétricas, térmicas y mecánicas de las dosificaciones de los hormigones ligeros ensayados

DOSIFICACIONES	PROPIEDADES			
	Densidad Aparente	Carga de rotura	Resistencia a compresión, 28 días	Conductividad térmica
LSDur-1	1602 kg/m ³	458,47 kN	25,95 MPa	0,78 W/mK
LSDur-2	1619 kg/m ³	481,43 kN	27,25 MPa	0,81 W/mK
LSDur-3	1633 kg/m ³	479,75 kN	27,15 MPa	0,83 W/mK
LSDur-4	1653 kg/m ³	463,70 kN	26,24 MPa	0,86 W/mK
LSDur-5	1625 kg/m ³	445,63 kN	25,22 MPa	0,82 W/mK
LSDur-6	1624 kg/m ³	511,00 kN	28,92 MPa	0,82 W/mK
LSDur-7	1677 kg/m ³	437,07 kN	24,74 MPa	0,90 W/mK
LSDur-8	1661 kg/m ³	404,57 kN	22,90 MPa	0,88 W/mK
LSDur-9	1610 kg/m ³	537,00 kN	30,39 MPa	0,79 W/mK
LSDur-10	1660 kg/m ³	566,27 kN	32,05 MPa	0,88 W/mK
LSDur-11	1691 kg/m ³	453,87 kN	25,69 MPa	0,92 W/mK
LSDur-12	1643 kg/m ³	515,77 kN	29,19 MPa	0,85 W/mK
LSDur-13	1664 kg/m ³	410,00 kN	23,20 MPa	0,88 W/mK
LSDur-14	1636 kg/m ³	528,93 kN	29,93 MPa	0,84 W/mK
LSDur-15	1629 kg/m ³	516,97 kN	29,26 MPa	0,83 W/mK
LSDur-16	1656 kg/m ³	515,63 kN	29,18 MPa	0,87 W/mK
LSDur-17	1656 kg/m ³	511,40 kN	28,94 MPa	0,87 W/mK
LSDur-18	1653 kg/m ³	505,13 kN	28,59 MPa	0,87 W/mK
LSDur-19	1665 kg/m ³	556,10 kN	31,47 MPa	0,88 W/mK
LSDur-20	1626 kg/m ³	600,23 kN	33,97 MPa	0,82 W/mK
LSDur-21	1577 kg/m ³	573,87 kN	32,48 MPa	0,74 W/mK
LSDur-22	1616 kg/m ³	613,43 kN	34,72 MPa	0,80 W/mK
LSDur-23	1636 kg/m ³	608,10 kN	34,41 MPa	0,84 W/mK
LSDur-24	1638 kg/m ³	600,77 kN	34,00 MPa	0,84 W/mK
LSDur-25	1633 kg/m ³	580,00 kN	32,83 MPa	0,83 W/mK
LSDur-26	1540 kg/m ³	572,77 kN	32,41 MPa	0,70 W/mK
LSDur-27	1560 kg/m ³	560,90 kN	31,74 MPa	0,72 W/mK
LSDur-28	1692 kg/m ³	626,03 kN	35,43 MPa	0,92 W/mK
LSDur-29	1635 kg/m ³	533,97 kN	30,22 MPa	0,83 W/mK
LSDur-30	1663 kg/m ³	573,53 kN	32,46 MPa	0,88 W/mK
LSDur-31	1575 kg/m ³	502,67 kN	28,45 MPa	0,74 W/mK
LSDur-32	1649 kg/m ³	547,60 kN	30,99 MPa	0,86 W/mK
LSDur-33	1498 kg/m ³	453,73 kN	25,68 MPa	0,68 W/mK
LSDur-34	1563 kg/m ³	490,53 kN	27,76 MPa	0,72 W/mK
LSDur-35	1692 kg/m ³	552,73 kN	31,28 MPa	0,93 W/mK
LSDur-36	1698 kg/m ³	558,00 kN	31,58 MPa	0,93 W/mK
LSDur-37	1676 kg/m ³	579,43 kN	32,79 MPa	0,90 W/mK

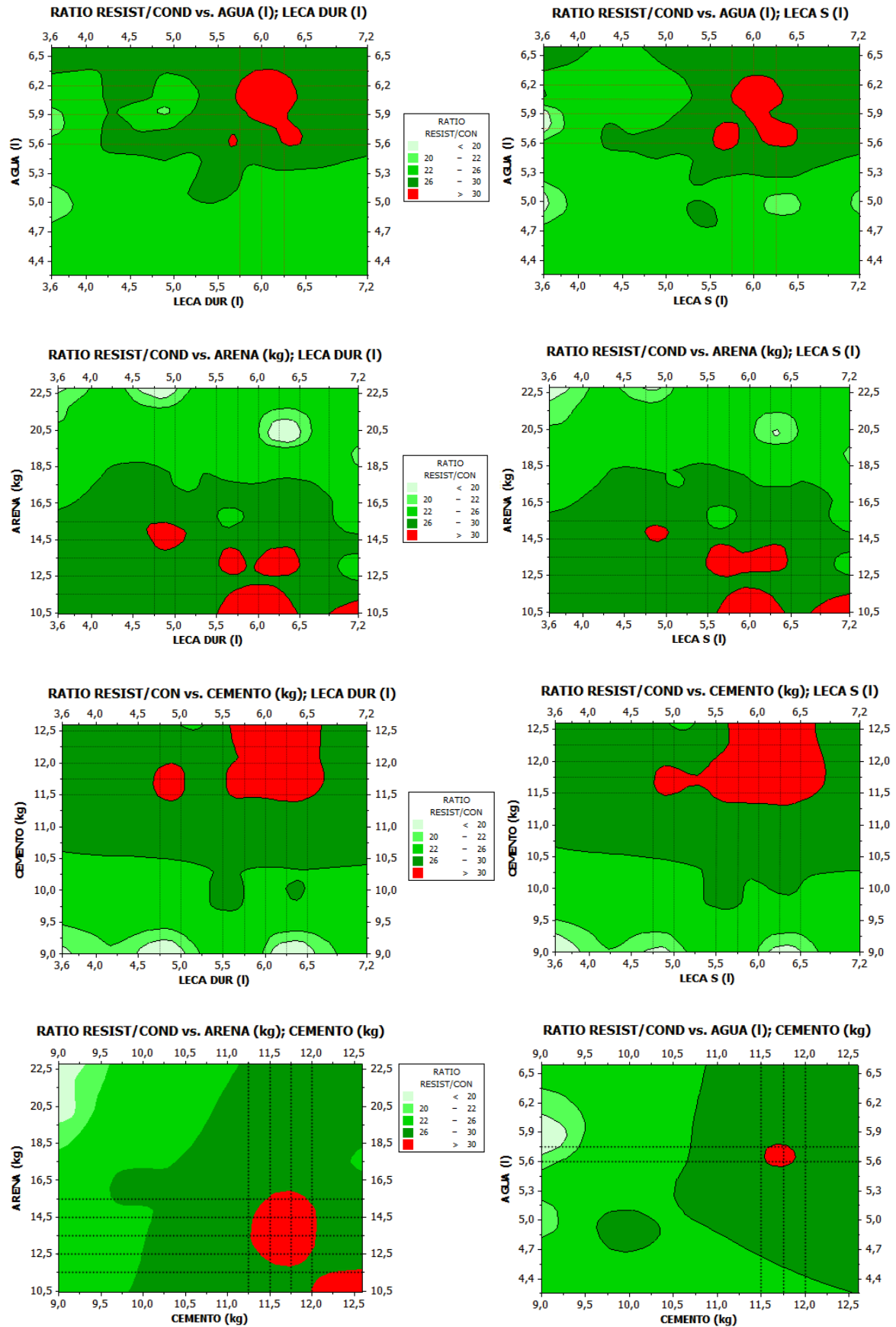


Figura 4. Gráficas de contorno de la ratio resistencia característica/conductividad térmica para las distintas relaciones de los componentes de la mezcla.

Un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos, se pueden ver en la gráfica combinada de resistencia característica a compresión y conductividad térmica de la Figura 5.

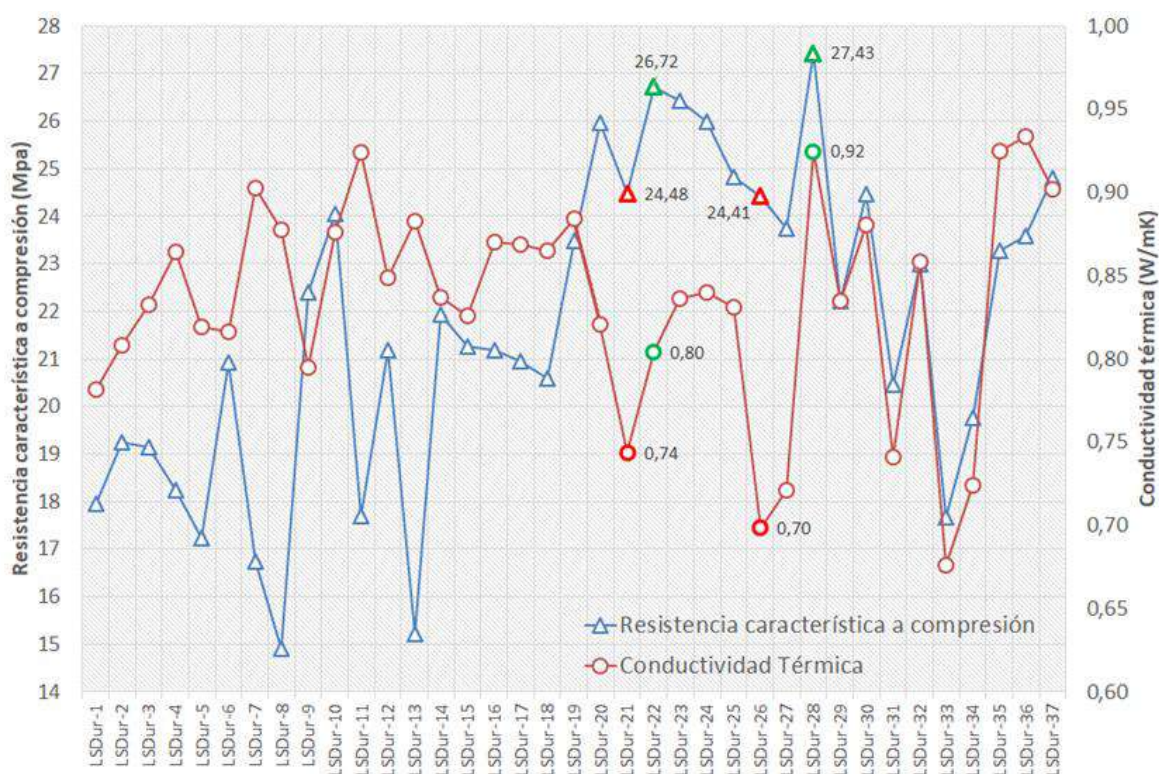


Figura 5. Resultados térmico-estructurales de los hormigones ligeros estudiados.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha abordado con éxito la caracterización térmica y mecánica de nuevos hormigones ligeros, tanto estructurales como no estructurales, para su utilización en forjados mixtos. Para conseguir los objetivos propuestos, se diseñaron 37 formulaciones de hormigones ligeros mediante un DOE-RSM-CCD. Se estudiaron hormigones con densidades comprendidas entre 1498 y 1698 kg/m³, obteniéndose resistencias características a compresión entre 14,90 y 27,43 MPa, y conductividades térmicas entre 0,68 y 0,93 W/mK.

El estudio combinado de los resultados obtenidos en las gráficas de contorno de la Figura 4 nos ha permitido optimizar los rangos de las dosificaciones necesarias para obtener los hormigones más eficientes desde el punto de vista térmico-estructural. El resultado es el que se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Tabla de factores y rangos optimizada

RANGO	FACTORES				
	LECA-Dur	LECA-S	Arena 0/2	Cemento 42.5R	AGUA
INFERIOR	6,2 l	6,0 l	10,5 kg	12,0 kg	5,6 l
SUPERIOR	6,4 l	6,2 l	11,5 kg	12,6 kg	5,8 l

Se encontraron cuatro dosificaciones especialmente interesantes desde el punto de vista resistente y de la eficiencia térmica, tal y como se muestra en la Tabla 7. Dos de ellas, LWC-22 y 28, cumplen con el requisito de hormigón estructural para su utilización en forjados mixtos, mientras que los valores de la resistencia característica a compresión de las otras dos, LSDur-21 y 26, son ligeramente inferiores a los 25 MPa requeridos. Estas dos últimas dosificaciones tienen valores de conductividad térmica muy inferiores a las dos anteriores, presentando la LSDur-26 una ratio de resistencia-conductividad térmica mejorada respecto al resto.

Tabla 7. Caracterización térmica y mecánica de los hormigones ligeros estructurales

Propiedades	Valores			
	LSDur-21	LSDur -22	LSDur -26	LSDur -28
Densidad aparente	1577 kg/m ³	1616 kg/m ³	1540 kg/m ³	1692 kg/m ³
Resistencia característica a compresión	24,48 MPa	26,72 MPa	24,41 MPa	27,43 MPa
Conductividad térmica	0,74 W/mK	0,80 W/mK	0,70 W/mK	0,92 W/mK
Ratio Resistencia-Conductividad Térmica	32,91	33,22	34,96	29,66

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Fundación para el Fomento en Asturias de la Investigación Científica Aplicada y la Tecnología (FICYT) y al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del gobierno de España las ayudas recibidas a través de los proyectos FC-GRUPIN-IDI/2018/000221 y PGC2018-098459-B-I00 respectivamente, ambos financiados con fondos FEDER. También agradecen a las empresas Weber Saint-Gobain, Cementos Tudela Veguín y Sika su asesoramiento técnico y la aportación de los materiales necesarios para poder realizar este estudio.

REFERENCIAS

- [1] UNE-EN 1994-1-1:2013. Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.
- [2] Guerrero Muñoz, J. (2016). *Análisis y Optimización del comportamiento estructural de Forjados Mixtos en Hormigón Ligero* (PhD. thesis). Gijón: Universidad de Oviedo.
- [3] Del Coz Díaz, J.J., Álvarez Rabanal, F.P., García Nieto, P.J., Domínguez Hernández, J., Rodríguez Soria, B., & Pérez-Bella, J.M. (2013). Hygrothermal properties of lightweight concrete: Experiments and numerical fitting study. *Construction and Building Materials*, 40, 543–555.
- [4] Del Coz Díaz, J.J., Álvarez Rabanal, F.P., Gencel, O., García Nieto, P.J., Alonso-Martínez, M., Navarro-Manso, A., & Prendes-Gero, B. (2014). Hygrothermal study of lightweight concrete hollow bricks: A new proposed experimental–numerical method. *Energy and Buildings*, 70, 194–206.

- [5] Sagmeister, B. How optimize heat-insulating block design. In 12th International Brick/Block Masonry Conference (pp. 1583-1587). Madrid (España): Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónica, de la Universidad Politécnica de Madrid.
- [6] Sagmeister, B. (2001). Optimization of the mixture of no-fines lightweight concrete. Sondertruck aus BFT. Bauverlag GmbH.
- [7] Mehta, P.K., & Monteiro, Paulo J.M. (2005). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. United States of America: McGraw-Hill Professional.
- [8] EHE-08. (2011). Instrucción de Hormigón Estructural, p.704. Madrid (España): Ministerio de Fomento, 5ª edición.
- [9] Montgomery, D.C. (2017). Design and Analysis of Experiments, p.735. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- [10] Zahiri, F., & Eskandari, H. (2019). Optimizing the compressive strength of concrete containing micro-silica, nano-silica, and polypropylene fibers using extreme vertices mixture design. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0518-6>.
- [11] Ghayeb, H.H., Razak, H.A., Sulong, N.H.R., Hanoon, A.N., Abutaha, F., Ibrahim, H.A., Gordan, M., & Alnahhal, M.F. (2019). Predicting the Mechanical Properties of Concrete Using Intelligent Techniques to Reduce CO2 Emissions. *Materiales de Construcción*, 69 (334), 1-20. <https://doi.org/10.3989/mc.2019.07018>.
- [12] Liu, H., Liu, S., Wang, S., Gao, X., & Gong, Y. (2019). Effect of Mix Proportion Parameters on Behaviors of Basalt Fiber RPC Based on Box-Behnken Model. *Applied Sciences*, 9, 1-14. <http://dx.doi.org/10.3390/app9102031>.
- [13] Hassanpour, M., Shafigh, P. & Mahmudb, H.B. (2012). Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement – A review. *Construction and Building Materials*, 37, 452–461.
- [14] UNE 83504:2004. Hormigones con fibras. Fabricación y conservación de probetas para los ensayos de laboratorio.
- [15] UNE 83507:2004. Hormigones con fibras. Rotura por compresión.
- [16] Harris, A., Bateman, R. Application of the Modified Transient Plane Source Technique in Testing the Thermal Conductivity of Concrete. In 31st International Thermal Conductivity Conference (pp. 41-47). Quebec (Canada): DEStech Publications Inc.
- [17] UNE-EN 12390-7:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón.
- [18] UNE 83506:2004. Hormigones con fibras. Refrentado de probetas con mortero de azufre.