

DYNAL

ingeniería e industria #2

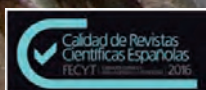
www.revistadyna.com

Año 92 | N°2 | Marzo - Abril 2017

NÚMERO ESPECIAL DE
TECNOLOGÍA EN EDIFICACIÓN

Hormigón en masa con fibras de polipropileno

Monitorización de temperatura y humedad en edificios
Incorporación de cenizas de RSU en morteros de cemento
Hormigón ligero v. estructural según contenido en acero
La energía nuclear en China



Revista de Ingeniería Multidisciplinar con factor de impacto en JCR

ISSN 0012-7361 | DOI: 10.6036/DYNAL | SICR: 0012-7361(20170301)92:2<>1.0.TX;2-0 | CODEN: DYNAU



MANTÉNTE INFORMADO

con **DYNA**

Revista Dyna te hace más fácil que nunca mantenerte actualizado en lo último de Ingeniería Multidisciplinar.

Visita hoy mismo www.revistadyna.com y comienza a recibir información actualizada.

- ➔ **Noticias** sobre Ingeniería y Tecnología
- ➔ **Artículos científicos** auditados por expertos
- ➔ **Colaboraciones monográficas** sobre temas de interés
- ➔ **Boletín mensual** por correo electrónico
- ➔ **Encuestas** para escuchar tus opiniones e ideas
- ➔ **Foros** de discusión
- ➔ **RSS** para estar informado de lo último publicado
- ➔ **Alertas** configurables por correo electrónico.
- ➔ **Acceso a DYNAs digitales:** Energía y Sostenibilidad, Management y New Technologies

Publicamos la actualidad en Ingeniería desde 1926.

La Revista DYNA es el Órgano Oficial de Ciencia y Tecnología de la Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España (FAIE).

Fundada en 1926, DYNA es una de las revistas de ingeniería más influyentes y prestigiosas del mundo, como lo reconoce Thomson-Reuters en la edición anual de su informe JCR. Es el medio más indicado para la comunicación de los Ingenieros Industriales Superiores y de cuantos vean en ella el medio de expresión de sus ideas y experiencia.

DYNA es una revista bimestral que edita 6 números al año: enero, marzo, mayo, julio, septiembre, noviembre.

En el número de noviembre de cada año se publican los índices acumulativos por materias y autores de los artículos publicados en el año.

La entidad editora Publicaciones DYNA también publica otras 3 revistas especializadas: DYNA Energía y Sostenibilidad (www.dyna-energia.com), DYNA Management (www.dyna-management.com) y DYNA New Technologies (www.dyna-newtech.com).

<http://www.revistadyna.com>

dyna@revistadyna.com

CONSEJO DE ADMINISTRACIÓN

Presidente de Honor: Luis Manuel Tomás Balibrea (FAIE - Madrid)

Presidente: Luciano Azpiazu Canivell (Asociación de Bizkaia - Bilbao)

Vicepresidente: José Esteban Fernández Rico (Asociación de Asturias - Oviedo)

Secretario-no consejero: Carlos López de Letona Ozaita (Asociación de Bizkaia - Bilbao)

Vocales:

José Antonio Arvide Cambra (Asociación de Andalucía Oriental - Granada), Manuel Villalante LLauradó (Asociación de Catalunya - Barcelona), Germán Ayora López (Asociación de Andalucía Occidental - Sevilla), Francisco Cal Pardo (Asociación de Madrid - Madrid), Manuel Lara Coira (Asociación de Galicia - Santiago), Luis Soriano Bayo (Asociación de Aragón), José Antonio Muñoz Argos (Asociación de Cantabria - Santander).

OTROS SOCIOS

Ramón Larrinoa Barreda (Colegio de Alava), Gabriel Egaña Uranga (Colegio de Gipuzkoa), Carlos Izkie Montejo (Colegio de Navarra), Francisco J. Marrodán Esparza (Asociación de La Rioja), Jesús María Mirat Celdrán (Asociación de Extremadura), Ginés Moratalla Valero (Asociación de Albacete), Begoña Martín Pérez (Asociación de Canarias Occidental), Gregorio Martínez Royano (Asociación de Canarias Oriental), Alfredo Arias Berenguer (Asociación de Baleares), Manuel María Urueña Cuadrado (Asociación de León).

CONSEJO DE REDACCIÓN

Presidente: Ignacio Fernández de Aguirre Guantes (Instituto de Fundición Tabira - Durango)

Vicepresidente: Néstor Goicoechea Larracochea (Universidad del País Vasco - Bilbao)

Secretario: Carlos López de Letona (Asociación de Bizkaia - Bilbao)

Vocales:

Alfonso Parra Gómez (Asociación de Bizkaia - Bilbao), Angel Arcos Vargas (Universidad de Sevilla - Sevilla), Eduardo Valle Peña (Asociación de Cantabria - Santander), Franck Girot (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - Paris, Francia), Angel Mena Nieto (Universidad de Huelva - Palos de la Frontera), José Manuel Palomar Carnicero (EPS Jaén - Jaén), José María Bueno Lidón (Green Power Tech - Sevilla), José Rafael Castrejón Pita (Queen Mary University of London - London, UK), Manuel Lara Coira (Escuela Politécnica Superior de Ferrol - Ferrol), Nicolás Gaminde Alix (Asociación de Bizkaia - Bilbao), Mikel Sorli Peña (Asociación de Bizkaia - Bilbao), Pere Alavedra Ribot (Universidad Internacional de Catalunya - Barcelona).

CONSEJO ASESOR

Alberto Del Rosso (Universidad Tecnológica Nacional - Buenos Aires, Argentina), Andrés Ortuño Carbonell (Asociación de Murcia - Murcia), Antonio Adsuar Benavides (Conselleria de Industria Comercio e Innovación - Valencia), Allan Joseph Wailoo (Universidad de Sheffield - Sheffield, UK), Blas Hermoso Alameda (Universidad Pública de Navarra - Pamplona), Fernando Guijarro Merelles (Universidad de Extremadura - Cáceres), Fernando López Rodríguez (Agencia Extremeña de la Energía - Cáceres), Ferrán Puerta Sales (Universidad Politécnica de Cataluña - Barcelona), Roberto Uribeetxeberria (Universidad de Mondragón - Mondragón), Eva Martínez Caro (Universidad Politécnica de Cartagena - Cartagena), Javier Santos García (Universidad de Navarra - San Sebastián), Joan L. Serarols Font (Universidad de Girona - Girona), Jorge Arturo Del Ángel Ramos (Universidad Veracruzana - Veracruz, México), Juan M. Gers (Gers USA LLC - Weston, Florida, USA), Ricardo Rodríguez Jorge (Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez - Juárez, México), Erik Ocaranza Sánchez (Instituto Politécnico Nacional - Tlascala, México), Joshué Manuel Pérez Rastelli (Tecnalia - Bilbao, España) - Lina Montuori (Universidad de Nueva York - Buffalo, USA), Jacques Mercadier (UISBA - Pau, Francia), Noelia Fernández Díaz (NaCOM Energy - Agotnes, Noruega), Luis Alfonso Fernandez Serantes (Universidad FH JOANNEUM - Graz, Austria), Jose L. Fernández Solís (Texas A&M University - College Station, Texas, USA), María Cristina Rodríguez Rivero (University of Cambridge - Cambridge, UK), Nadia Rego Monteil (Queen's University - Ottawa, Canada), Raimundo Martínez Giménez (Euroconseil - Sevilla).

© 2017. Publicaciones DYNA S.L.

Publicaciones DYNA SL, a los efectos previstos en el artículo 32.1 párrafo segundo del vigente TRLPI, se opone expresamente a que cualquiera de las páginas de esta obra o partes de ella sean utilizadas para la realización de resúmenes de prensa. Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra (<http://www.conlicencia.com>; +34 917 021970 / +34 932 720447).

Las opiniones y datos reflejados en los contenidos son de exclusiva responsabilidad de los autores.

ENTIDAD EDITORA:

Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España

ADMINISTRACIÓN, DIRECCIÓN, DISTRIBUCIÓN, EDICIÓN, PEDIDOS, PUBLICIDAD Y SUSCRIPCIONES:

Publicaciones DYNA S.L.,
www.dynapubli.com
Alameda de Mazarredo, 69 - 48009 BILBAO.
Tel. +34 944 237566 - Fax +34 944 234461
email: dyna@revistadyna.com
Instrucciones detalladas para los autores en la web: www.revistadyna.com

IMPRESOR: MCCGRAPHICS

C/ Larrondo Beheko Etorbidea, edif. 4 Nave 1 - 48180 LOIU (Vizcaya)
- Tel.: +34 944 535 205. e-mail: elkar@mccgraphics.com
Formato: 21 x 29,7 cm (A4)
D.L. BI-6-1958
ISSN 0012-7361
ISSN electrónico 1989-1490
SICI: 0012-7361(20170301)92:2<>1.0.TX;2-0
CODEN: DYNAAU
DOI: 10.6036/DYNAIL

Tirada de este número: 3.867 (papel) y 38.918 (digital)

Ejemplares vendidos: 3.697 (papel) y 38.902 (digital)

UNIVERSIDADES COLABORADORAS

Universidad del País Vasco, Universidad de la Coruña, Universidad de Vigo, Universidad Carlos III, Universidad de Oviedo, Universidad de Navarra (Tecnun), Universidad Politécnica de Cartagena, Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad de Mondragón, Universidad de Gerona, Universidad de Cantabria, Universidad Politécnica de Valencia, Universidad Miguel Hernández, Universidad Rovira i Virgili, Universidad de Huelva, Universidad Sancti Spiritus.

ORGANIZACIONES COLABORADORAS

CEIT-IK4, Euskalit, Tecnalia, ITEC, ITE, CTM, AIMEN, Gaiker-IK4, IAT, CIATEC

ORGANIZACIONES AMIGAS DE DYNA

Bodegas Muriel y Structuralia

DIRECCIÓN

José María Hernández Álava

Miembro de:

- Council of Science Editors
- Asociación Española de Comunicación Científica

contenido

Marzo - Abril 2017

171

NUEVO PROCEDIMIENTO PARA CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE REGIONES UTILIZABLE CON EL CÓDIGO TÉCNICO DE EDIFICACIÓN. APLICACIÓN A EXTREMADURA

NEW PROCEDURES TO CHARACTERIZE CLIMATICALLY REGIONS USED ACCORDING TECHNICAL BUILDING CODE. APPLICATION IN EXTREMADURA

183

DISEÑO DE UN SISTEMA CONSTRUCTIVO MODULAR BAJO CRITERIOS PASIVOS A PARTIR DE UN MATERIAL COMPUESTO POR FIBRAS DE MADERA AGLOMERADAS CON CEMENTO

DESIGN OF A MODULAR LOW-ENERGY BUILDING SYSTEM FROM A COMPOSITE MATERIAL BASED ON WOOD FIBERS AGGLOMERATED WITH CEMENT

195

AJUSTE DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISEÑO FIJADA POR EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN PARA MATERIALES DE FACHADA

ADJUSTING THE DESIGN THERMAL CONDUCTIVITY CONSIDERED BY THE SPANISH BUILDING TECHNICAL CODE FOR FAÇADE MATERIALS

209

ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN Y MONITOREO REAL DE UN INVERNADERO EN LA IMPLICACIÓN TÉRMICA DE UN EDIFICIO. UN CASO PRÁCTICO

SIMULATION AND MONITORING CAMPAIGN IN A SUNSPACE, ANALYSIS OF ITS INFLUENCE OVER THE BUILDING THERMAL PERFORMANCE. A CASE STUDY

220

INFLUENCIA DE LA POROSIDAD EN EL COMPORTAMIENTO DE MORTEROS FABRICADOS CON ESCORIAS DE ACERÍA Y ADITIVOS EN AMBIENTES HÚMEDOS

THE INFLUENCE OF POROSITY ON THE BEHAVIOUR IN HUMID ENVIROMENTS OF MORTARS MADE WITH STEELMAKING SLAGS AND ADDITIVES

230

INERTIZACIÓN Y VALORIZACIÓN DE CENIZAS VOLANTES DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA LA FABRICACIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO

INERTING AND VALORIZATION OF FLY ASH FROM SOLID URBAN WASTE FOR CEMENT MORTAR PRODUCTION

178

COMPORTAMIENTO DEL MICROPILOTE TERMOACTIVO COMO INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA EN DISTINTAS ÉPOCAS DEL AÑO

PERFORMANCE OF THERMOACTIVE MICROPILE AS LOW ENTHALPY GEOTHERMAL HEAT EXCHANGER IN DIFFERENT SEASONS

188

TALADRADO DE MATERIALES COMPUESTOS: PROBLEMAS, PRÁCTICAS RECOMENDADAS Y TÉCNICAS AVANZADAS

DRILLING OF COMPOSITE MATERIALS: PROBLEMS, RECOMMENDED PRACTICES AND ADVANCED TECHNIQUES

202

FAR-INFRARED PERFECT OPTICAL ABSORPTION IN FILM SUPPORTING METALLIC GRATING STRUCTURES

ABSORCIÓN ÓPTICA PERFECTA DE LA RADIACIÓN INFRARROJA LEJANA EN ESTRUCTURAS DE PARRILLA METÁLICA SOPORTADAS POR UNA PELÍCULA

214

IDONEIDAD Y DISCREPANCIA DE MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGOS EN SEGURIDAD Y SALUD APLICADOS EN OBRAS DE CONSTRUCCIÓN

SUITABILITY AND DISCREPANCY OF HEALTH AND SAFETY RISK ASSESSMENT METHODS APPLIED TO CONSTRUCTION WORKS

226

SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN LA EDIFICACIÓN. APLICACIÓN A UNA VIVIENDA DE MADRID

TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY MONITORING SYSTEM IN BUILDINGS. A STUDY CASE OF A FLAT IN MADRID

235

ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE UN HORMIGÓN LIGERO ESTRUCTURAL FRENTE A UN HORMIGÓN CONVENCIONAL EN FUNCIÓN DE LA CUANTÍA DE ACERO

EXPERIMENTAL COMPARED STUDY OF BENDING BEHAVIOUR OF A LIGHTWEIGHT CONCRETE AGAINST A REGULAR CONCRETE ACCORDING TO THE STEEL QUANTITY

■ ■ ■ nuestras cosas

124

Hitos de la ingeniería industrial

125

Editorial

■ ■ ■ perspectivas

126

Progresos en la fabricación de palas de rotor

127

Medios para promover la innovación en vehículos con hidrógeno

129

La energía nuclear en China: pasado, presente y futuro (1ª parte)

133

La COP22 de Marrakech confirma el compromiso mundial con la lucha contra el cambio climático

■ ■ ■ notas técnicas

136

Micro algoritmo genético basado en un nuevo estimador para la marcha de un robot cuadrúpedo

137

Presentación de contenidos 3d: del aula a la empresa. Usabilidad e influencia en la capacidad espacial

138

Un modelo de probabilidad implementado en la solución de ruteo de autobuses escolares con selección de paradas

140

Gestión de almacenamiento energético para instalaciones de generación-distribución

141

Combinación de técnicas de big data analytics y web semántica para la detección de vocabulario de acoso escolar en internet

143

Compresión de imágenes sin pérdida usando clasificador 1-nn para adaptar los coeficientes de filtros lifting

■ ■ ■ colaboraciones

144

Comunicación y seguimiento de procesos en empresas constructoras: posible desarrollo como aplicación para dispositivos móviles

150

Análisis del comportamiento del hormigón en masa con adición de fibras de polipropileno

155

Morteros adicionados con metacaolín: efecto de la proporción de agregado

158

Evolución con la edad de las propiedades mecánicas de hormigones autocompactantes reforzados con fibras de acero sometidos a compresión

163

Metodologías de identificación de materiales para la intervención en el patrimonio arquitectónico

168

Microestructura de morteros de albañilería fabricados con poliamida reciclada

LA ESCUELA DE BARCELONA EN SUS ORÍGENES

Aunque la nueva fase de la industrialización de Cataluña se puede dar por iniciada en la década de 1830 con las primeras máquinas de vapor aplicadas al textil, es desde el final de la segunda guerra carlista o “*dels matiners*”, ya estabilizado al reinado efectivo de Isabel II (1843-1868), cuando se establece por Real Decreto en 1850 la organización de las enseñanzas técnicas industriales. Como consecuencia, el año siguiente se funda la **Escuela Industrial Barcelonesa** estableciendo su sede en el antiguo Convento de San Sebastián (sito donde, después de su demolición, se creó la plaza de Antonio López), y donde se mantendría hasta 1873. Los estudios impartidos serían los llamados de *ampliación*, junto con Sevilla y Vergara (Vizcaya), reservándose los *superiores* al llamado **Real Instituto Industrial de Madrid**.

Tras una reforma fallida, cinco años más tarde, la Ley de Instrucción Pública de 1857, refundía los estudios de ampliación y superiores para Escuelas situadas en Barcelona, Sevilla, Valencia, Vergara y Gijón. De esa manera en la ya **Escuela Superior Industrial de Barcelona** se expidieron en 1861 los primeros títulos superiores en las especialidades Mecánica y Química. La escasez de alumnado en la mayor parte de Escuelas citadas hicieron que progresivamente fueran cerrando, las de Gijón y Vergara en 1860, la de Valencia en 1865, la de Sevilla en 1866 y, finalmente, el propio Real Instituto Industrial de Madrid en 1867. La de Barcelona, con el nombre de **Escuela de Ingenieros Industriales de Barcelona**, fue la única durante 32 años, hasta la puesta en marcha en 1899 de la Escuela de Bilbao, que impartió este título en España. Pero la definitiva estructuración de la enseñanza superior de ingeniería industrial, se dio con un Real Decreto de 1901, en el que se consolidan las Escuelas Superiores de Ingenieros Industriales de Barcelona y Bilbao, y vuelve a crearse la Escuela Central de Ingenieros Industriales en Madrid.

Desde la Escuela se va a promover en 1900, con las distintas autoridades locales y nacionales, un Centro General de Enseñanzas Técnicas (Escuela Industrial) que cubriese todos los niveles de estas enseñanzas. Confirmado por Real Decreto de 1904 y dotado de amplia autonomía, va a generar durante los veinte años siguientes una serie de importantes proyectos en forma de nuevas escuelas, laboratorios y museos, así como una sede propia a partir de 1908 en la antigua fábrica de hilados y tejidos de Batlló Hnos. Sin embargo, el traslado de la Escuela de Ingenieros Industriales va a demorarse hasta 1927 por numerosas desavenencias entre el claustro escolar y los dirigentes locales. La dictadura de Primo de Rivera reformó las condiciones y características de la Escuela Industrial e integró definitivamente a la Escuela de Ingenieros Industriales en el complejo de Batlló Hnos. donde permaneció hasta 1964.



Convento de San Sebastián



Universidad Literaria



En Batlló Hnos.

¿ESTÁ ESPAÑA APOSTANDO POR LA INDUSTRIA 4.0?

Para contestar a esta pregunta se hace necesario definir con precisión a qué nos referimos cuando hablamos de Industria 4.0, mencionada por primera vez durante la ceremonia de apertura en la feria de Hannover de 2011, por el Prof. **Wolfgang Wahlster**, Director del Centro de Investigación Alemán de Inteligencia Artificial. Empieza ahora a ser un concepto ligado a cierta mercadotecnia de la consultoría y la política industrial que corre el peligro de descubrirse vacío de contenido real y nada disruptivo.

Y es que Industria 4.0 no es sólo sistemas de fabricación robotizada, ciberproducción, robótica colaborativa, sensorización, factorías virtuales, máquinas inteligentes o *Big-Data*, es mucho más. Para definir Industria 4.0 de una manera cuantitativa debemos alejarnos de estos aspectos meramente formales o descriptivos con los que corremos el riesgo de intentar definir el todo por sus partes y ahondar en ciertos ratios o aspectos económico-empresariales que son los que de verdad nos permiten evaluar si un país o región ha hecho los deberes en este asunto o tiene algún aspecto que mejorar.

Estaremos caminando en la dirección de la Industria 4.0: si fabricamos productos de gran valor añadido, si producimos de manera flexible y, por último, si nuestro *retorno sobre el capital empleado* (ROCE) es alto.

Pues bien, según estudios de analistas internacionales¹ la evolución del ROCE española parece apuntar en el sentido contrario al esperado si pretendemos afirmar que somos un país que está apostando por la Industria 4.0. De manera relativa y gráfica nuestro ROCE 2000-2014 va en sentido y dirección opuesta al de Alemania que, de manera objetiva, es el único país del mundo cuya industria ha mejorado significativamente su ROCE en los últimos 15 años y puede decirse que va en la senda correcta de la Industria 4.0.

La estrategia de Alemania: defensiva al mantener su producción localizada y siendo flexible ante la crisis de los mercados internacionales y ofensiva al retener el conocimiento para soportar un modelo claramente exportador ha sido la acertada en estos últimos cinco lustros.

España, al contrario, no ha conseguido fijar la producción pese a un descuelgue de salarios para intentar ser una economía más competitiva y tampoco ha conseguido mantener el conocimiento.

La realidad es que en España entre el año 2000 y el año 2014 la relación entre los beneficios antes de Impuestos y Tasas (EBIT) y el valor añadido (EBIT/added value), en lugar de crecer, ha disminuido aproximadamente un 3% y el ratio entre el valor añadido y el capital empleado (added value/capital employed) ha pasado de ser 0,6 a un 0,4. Ello ha provocado que nuestro ROCE, en estos 15 años, haya disminuido de un 20% a un 10% y que Alemania, por contra, que ha crecido en ambos ratios, haya pasado de un ROCE de un 15% aproximado a tenerlo mayor del 30%.

Por tanto, la respuesta a la pregunta inicial es que no, España no está en la senda adecuada en lo que a Industria 4.0 se refiere y que más allá de ejemplos puntuales nuestras empresas productivas y las instituciones deben procurar introducir mecanismos que eleven de manera real la competitividad y la rentabilidad de las empresas españolas.

Nada mejor que la vuelta a los orígenes de este concepto cuyos paradigmas clave se marcaron en el acto citado al principio: unos productos inteligentes, fabricados con unos equipos inteligentes, planificados con medios inteligentes y conducidos por una gestión inteligente. Esto es el qué: el cómo se deberán estudiar y aplicar en cada caso concreto las nuevas herramientas que la tecnología digital ofrece y que las actuales promociones de ingenieros industriales deben dominar en la mayor extensión posible.

https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_industry_40_20160609.pdf



editorial

Progresos en la fabricación de palas de rotor

Hasta ahora, las palas del rotor para turbinas eólicas se hacen en gran parte manualmente. En el nuevo centro de producción BladeMaker, los investigadores ensayan métodos de producción innovadores.

Frank Grotelüschen
Instituto Fraunhofer (Alemania)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8207>

Pausada pero rítmicamente, el brazo del robot se mueve sobre el material sintético de baja densidad y fresa a lo largo del recorrido del pórtico una suave forma redondeada. En paralelo, un segundo brazo en el otro extremo de la larga pieza crea el vástago. En el proyecto *BladeMaker* los científicos investigan en el Instituto Fraunhofer para la Energía Eólica y Tecnología de Sistemas de Energía (IWES), la producción eficiente y económica de palas de rotor.

El objetivo: reducir el diez por ciento los costes de fabricación – que a un precio actual de unos 400.000 euros, resulta una suma sustancial. “Calculamos que vamos a ver estas técnicas en dos a cinco años ya en los talleres”, expone el director del proyecto **Roman Brown**. “Esto podría contribuir significativamente a que la fabricación europea de palas de rotor siga siendo competitiva en el futuro”. A pesar de que el sector de la energía eólica se ha convertido en una industria en toda regla, la producción, principalmente de composite reforzado con fibra de vidrio de las palas del rotor de plástico, tiene lugar todavía de una forma en gran parte manual – desde el corte de las mantas de fibra y su posicionamiento en la preforma con las aplicaciones de resina hasta el lijado y el lacado finales. “En una pala de rotor grande se invierten alrededor de 1.000 horas de trabajo manual”, explica **Niels Ludwig**, director de operaciones del fabricante de palas de rotor SINOI. La medida de las palas más grandes hoy en día llegan a más de 80 metros y pesan hasta 35 toneladas – con la tendencia a ir incluso hacia aún mayores componentes.

Ocho etapas de fabricación, un puesto de trabajo

Para explorar en qué medida se puede organizar la producción industrial, IWES ha construido en un antiguo pabellón de un astillero, el centro de fabricación *BladeMaker-Bremerhaven*. Su elemento clave:

una máquina pórtico con dos puentes, con avance y retroceso sobre carriles. En cada pórtico se encuentra un cabezal procesador que es capaz de realizar una mecanización sofisticada en cualquier posición que se desee. La estructura en forma de L de los dos pórticos ofrece dos ventajas clave: posibilita una carga y descarga fácil desde el lateral y los pórticos de estructura ligera combinan la precisión de una máquina fresadora con una capacidad de soportar hasta 400 kilogramos. “En general, este equipo es capaz de la ejecución de ocho etapas de fabricación diferentes, que se llevan a cabo de forma manual hasta la fecha en la industria”, explica Brown. “Con todas estas características se puede ayudar a los equipos humanos a realizar las palas de forma rápida, precisa y de calidad constante”.

Escaso número de unidades por cada diseño de pala

Un fenómeno ocurrido desde hace tiempo en la industria automotriz, el número cada vez menor de unidades similares, va llegando poco a poco a la energía eólica con el añadido de las mayores

dimensiones y peso de las palas. Deben además tenerse en cuenta otras condiciones complementarias de fabricación: para optimizar esas condiciones de producción, en el proyecto *BladeMaker* se ha considerado también el diseño de la pala, incorporado nuevos materiales y ensayado tecnologías innovadoras. Los especialistas quieren fabricar en 2017 y en este equipo de pórticos un segmento de pala de rotor de 18 m de longitud – prueba clave del sistema y, a la vez, cierre del proyecto de investigación cooperativa. “Además ofrecemos a la industria la oportunidad de experimentar aquí en Bremerhaven con materiales y equipos propios”. En *BladeMaker* han participado en total 16 socios cooperativos, entre ellos Siemens, BASF y el citado fabricante de palas SINOI. “Vemos a esta instalación como un campo de juego en el que se pueden desarrollar nuevas ideas y, de ese modo, transmitirlos a la producción”, dice Niels Ludwig. “Entre otras cosas queremos probar cómo se puede automatizar la aplicación de las mantas de fibra de vidrio en la preforma y cómo eliminar los restos de material adhesivo de las palas de rotor”.



En el Centro de Ensayos para Fabricación de Palas se pueden hacer por mecanización hasta ocho etapas del proceso en un mismo puesto de trabajo. A partir de los bloques apilados se crean las formas de las palas del rotor

Medios para promover la innovación en vehículos con hidrógeno

■■■■■
Maren Hunsberger
LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL
LABORATORY (USA)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8282>

Como la demanda de combustibles fósiles con reservas limitadas crece, también lo hace la necesidad de alternativas viables a su uso. En particular, los investigadores están trabajando arduamente para sustituir estos recursos en los vehículos de transporte, que representan el 70% del total mundial de consumo de petróleo. Científicos del *Laboratorio Nacional Lawrence Livermore* (LLNL) han estado a la vanguardia de la investigación durante casi dos décadas en una de las soluciones más prometedoras a largo plazo: el hidrógeno.

El hidrógeno ofrece varias ventajas en comparación con los combustibles fósiles: es de suministro ilimitado y tiene posibilidad de empleo libre de contaminación y con alta eficiencia en células de combustible. Sin embargo, el gas es difícil de almacenar de forma compacta, haciendo que a día de hoy, los vehículos de hidrógeno sean costosos y de alcance limitado. Con financiación de la *Oficina de Tecnologías para Pilas de Combustible* del Departamento de Energía, un equipo del LLNL está utilizando las nuevas instalaciones criogénicas de hidrógeno del Laboratorio para mejorar el almacenamiento y suministro de hidrógeno. A través de sus esfuerzos, los investigadores se proponen ayudar a construir vehículos de hidrógeno que satisfagan realmente las expectativas del cliente en cuanto a alcance, costo, espacio de carga y de pasajeros así como de tiempo de reabastecimiento de combustible.

GAS VERSUS LÍQUIDO

Hoy en día los vehículos de hidrógeno llevan un tanque de combustible con gas comprimido. Estos depósitos, hechos de resistente fibra de carbono ligera, almacenan el hidrógeno a temperatura ambiente y alta presión – unos 70 megapascals (MPa). Sin embargo el hidrógeno, el elemento químico más ligero, sigue teniendo baja densidad incluso cuando está altamente presurizado y por lo tanto, la obtención de energía suficiente para

una gama de vehículos prácticos requiere grandes tanques de combustible, que son caros y ocupan un valioso espacio en el vehículo.

El hidrógeno gaseoso se convierte en líquido a bajas temperaturas, alrededor de los 20°K (–253°C). El hidrógeno líquido es 60% más denso que su contraparte en gas comprimido, lo que podría hacer factible un almacenaje compacto, de alta densidad energética. Pero el hidrógeno líquido es extremadamente volátil, se evapora rápidamente y aumenta la presión por la simple transferencia de calor del medio ambiente. Por lo tanto, los tanques de hidrógeno líquido deben tener una válvula de seguridad para dar salida al exceso de gas cuando se presuriza más allá del límite de resistencia del depósito. Incluso en tanques bien aislados, es posible perder el contenido completamente.

Investigaciones anteriores realizadas sobre el hidrógeno en el LLNL mostraron que aumentando la presión de almacenaje del hidrógeno líquido se mantiene el almacenamiento de combustible y se evita la pérdida aún en las condiciones más extremas. *"Este trabajo fue clave en lograr una alta densidad de almacenamiento sin pérdidas de combustible"*, dice Salvador Aceves, director del programa del LLNL para Tecnologías de Hidrógeno. Sin embargo, dichos tanques de hidrógeno líquido criogénico todavía no están disponibles comercialmente.

ALIMENTANDO BAJO PRESIÓN

Mientras varias marcas de automóviles ofrecen vehículos de hidrógeno en el mercado a base de gas comprimido, la adopción generalizada de esta tecnología está limitada por el alto costo de los vehículos y la escasez de estaciones de recarga. Los Estados Unidos tienen aproximadamente 50 estaciones de repostaje de hidrógeno, 20 de las cuales están ubicadas en California, y se prevé que el número aumente a 100 estaciones en los próximos años. Muchas estaciones de recarga almacenan el hidrógeno en forma líquida, pero lo dispensan como gas comprimido, enfriado por la evaporación del líquido y la presurización de una serie de compresores. Aunque ineficaz y caro, este método es necesario para facilitar el almacenamiento y distribución de hidrógeno en las estaciones de servicio.

En las instalaciones de Ensayo Criogénico del Hidrógeno del LLNL, los investigadores están evaluando la viabilidad de la eliminación de muchos de estos pasos por la presurización directa del hidrógeno líquido con una bomba. Fabricada por LINDE Corp. (Munich), la bomba toma el hidrógeno líquido a baja presión (0,3 MPa) de un recipiente aislado (vaso *dewar*) y lo presuriza a la presión del depósito del vehículo (hasta 87,5 MPa) antes de la recarga. Debido a que la presurización del líquido es termodinámicamente más eficiente que la presurización del gas, la bomba suministra un flujo continuo de hidrógeno criogénico a alta presión, reduciendo considerablemente el consumo de electricidad en la estación de servicio. Lo que es más, el equipo de bombeo ocupa un espacio reducido y es más fácil de mantener.

El nuevo proceso de bombeo de líquidos ofrece dos principales ventajas para el consumidor. Primero, una bomba de tamaño relativamente pequeño puede entregar 100 kilogramos de hidrógeno líquido por hora. Como resultado, el tiempo de reabastecimiento de combustible se ha reducido a sólo cinco minutos por vehículo. El aumento de la eficiencia de bombeo también beneficia a la estación pues pueden ser atendidos más vehículos en menos tiempo y en general el costo del bombeo por vehículo es menor. La segunda ventaja para los consumidores es el aumento de la autonomía del vehículo. A diferencia del agua, que puede ser altamente presurizada sin aumentar significativamente su densidad, el hidrógeno líquido se vuelve mucho más denso cuando más se presuriza. El equipo de investigación, que incluye a los ingenieros del LLNL, Guillaume Petitpas, Francisco Espinosa-Loza y Nick Killingsworth, así como a los técnicos de alta presión, Rick Buskey y Vernon Switzer, espera llenar depósitos de alta presión con densidad de 80 g/l (el doble de la densidad de hoy en los tanques de gas comprimido) a partir de una densidad de 65 g/l en los vasos *dewar*. Este aumento en la densidad del hidrógeno ofrece la posibilidad de obtener una mayor autonomía de conducción de los vehículos en comparación con los de hidrógeno comprimido convencionales.

La estación de bombeo en las instalaciones de Ensayo Criogénico del Hidrógeno



Instalaciones de Ensayo Criogénico del Hidrógeno en el LLNL

no recarga actualmente vehículos con la mayor densidad de hidrógeno molecular del hemisferio occidental. Aceves dice, *"una mayor densidad de hidrógeno sólo pueden encontrarse en pequeñas cantidades en laboratorios de física, como las mini-cápsulas de hidrógeno comprimido producido para la Instalación Nacional de Ignición del mismo LLNL"*.

CONSTRUCCIÓN DE UN DEPÓSITO DE COMBUSTIBLE MEJOR

Después de investigar varias partes clave del proceso de abastecimiento de este combustible, el equipo centró su atención en mejorar los depósitos a bordo de los vehículos. El LLNL, en asociación con Spencer Composites y BMW, ha diseñado y construido varios prototipos. Para probar estos prototipos de forma segura, el equipo de investigación utiliza otro componente crítico de las instalaciones de Ensayo Criogénico del Hidrógeno – la unidad de contención de acero inoxidable controlada y supervisada a distancia. Con más de 3 cm de grosor y pesando casi 5 T – el recipiente de ensayo puede contener la energía equivalente a 1,8 k de TNT – se hace posible

ensayar a escala real depósitos y sistemas de hidrógeno de forma segura.

La unidad de contención se utiliza para el ensayo repetido de depósitos prototipo de almacenaje de hidrógeno cargados con hidrógeno líquido criogénico bombeado para ver su comportamiento. Como parte de estos experimentos, el equipo llena y vacía continuamente depósitos prototipo para simular su vida al uso. Los resultados de la prueba son luego analizadas para evaluar las fortalezas y debilidades del prototipo.

El equipo está empezando a ensayar depósitos de alta presión con material ultra fino con el objetivo de producir un depósito comercial con mayor eficiencia volumétrica, es decir, cuánto de este depósito está disponible para el almacenamiento de hidrógeno. Los depósitos de un vehículo actual alcanzan aproximadamente el 70% de eficiencia volumétrica. El equipo aspira a alcanzar el 81%. Los extremadamente delgados materiales reducen el grosor de la pared del depósito, dejando más espacio para el hidrógeno, y producen un aumento de la capacidad de almacenamiento con una mayor autonomía del vehículo.

EL FUTURO DE LA CIRCULACIÓN CON HIDRÓGENO

Hoy, los fabricantes de automóviles como Toyota, Honda, Hyundai, y Mercedes-Benz están trabajando activamente en la comercialización de vehículos impulsados por pilas de combustible alimentadas con hidrógeno. Además, varias líneas de autobuses de los condados de Alameda-Contra Costa de la zona de la Bahía de San Francisco tienen vehículos a pilas de combustible de hidrógeno con una autonomía de 355 km por tanque. En 2015, uno de estos autobuses alcanzó 20.000 horas de funcionamiento continuo, aproximadamente cuatro veces más de lo esperado. En California, el 2016 Toyota Mirai – un coche con célula de combustible a hidrógeno – se vende por unos 57.000 dólares. Que el precio de los vehículos a hidrógeno sea más competitivo, requerirá un aumento de la demanda de los consumidores, pero la falta de infraestructura de llenado hace mantener un mercado restringido.

"Las mejoras que estamos realizando en el proceso de bombeo y complementariamente nuestra investigación en recipientes de almacenamiento podría disminuir los costos y mejorar el rendimiento", afirma Petitpas. "Sin embargo, se necesitan grandes cambios en muchos ámbitos, y estos avances tardarán algún tiempo: necesitamos más pruebas, más estaciones de carga, y la mejora de otras características...pero lo estamos consiguiendo".

La labor realizada por Aceves y el equipo soporta directamente el acuerdo de la 21ª Conferencia de las Partes, COP21, celebrada en París. La COP es el órgano decisorio de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. *"Por medio de nuestros esfuerzos, estamos posibilitando vehículos prácticos a hidrógeno con mayor autonomía que pueden ayudar a reducir el cambio climático, las emisiones de dióxido de carbono", dice Aceves. Además, los recientes avances en la tecnología de hidrógeno serán resaltados en el Día Nacional del Hidrógeno y Pilas de combustible, que se celebra anualmente el 8 de octubre. "Este evento es una gran oportunidad para aumentar el conocimiento de los desarrollos actuales en el ámbito de las tecnologías de hidrógeno, incluidas las organizaciones de investigación, las infraestructuras de reabastecimiento de combustible y los vehículos disponibles comercialmente"*.



Técnicos de Ensayo Criogénico del Hidrógeno observando un depósito en el interior del contenedor de hidrógeno criogénico

La energía nuclear en China: pasado, presente y futuro (1ª parte)

Nuclear energy in china: past, present and future (1st Part)

Gonzalo Jiménez-Varas¹, César Queral-Salazar²

¹ ETSI Industriales. UPM (España)

² ETSI Minas y Energía. UPM (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8247>

PREÁMBULO

Hasta comienzos de siglo, China no era un país con un peso específico en la industria nuclear mundial. Sin embargo, desde que el Gobierno chino apostó en 2005 por el desarrollo de la energía nuclear, se ha convertido en el país con más reactores en construcción y con mayor abanico de tecnologías, propias e importadas. En este artículo se expone una perspectiva del desarrollo de la tecnología nuclear de China desde sus comienzos hasta nuestros días, incluyendo la participación de la industria nuclear española en los proyectos chinos.

1. ANTECEDENTES Y CONTEXTO

El 8 de diciembre de 1953, el presidente de Estados Unidos, Dwight D. Eisenhower pronunció un discurso que pasaría a la posteridad como el punto de arranque del desarrollo de la energía nuclear para usos pacíficos a nivel mundial. Posteriormente, fueron varios los países que se sumaron al desarrollo nuclear en su fase más temprana. Esa primera hornada de reactores nucleares se denominó con posterioridad "Generación I". Dichos reactores nucleares representaron una prueba de la viabilidad económica y técnica del uso de la energía nuclear para producción de energía eléctrica a gran escala.

Poco después, en los años 70 y 80, comenzó la construcción masiva de reactores nucleares, llamada "Generación II", no sólo en Estados Unidos o en Gran Bretaña, sino también en países como Francia, Japón, España, Rusia, etc. Estos reactores contaban con una potencia mayor que la generación anterior, estando el promedio en los 1000 MWe. La gran mayoría de los 450 reactores que actualmente se encuentran operativos son de esta generación.

Las tecnologías más relevantes del desarrollo nuclear en las dos primeras generaciones fueron los reactores de agua a

presión (PWR), los reactores de agua en ebullición (BWR) y más minoritariamente los reactores refrigerados por gas (GCR) y los reactores de agua pesada (PHWR) [1] y [2].

Posteriormente, desde el año 2005, se comenzó la construcción de nuevos reactores avanzados, denominados como Generación III/III+, que se consideran una evolución natural de los diseños tradicionales de Generación II, ya que sobre la misma base tecnológica, incorporan nuevos sistemas activos y redundancias (Generación III) o sistemas pasivos en sustitución de los sistemas activos (Generación III+).

En una iniciativa internacional en el año 2000, liderada por el Departamento de Energía de EEUU, se constituyó el Generation IV International Forum (GIF), que desde entonces ha tenido como objetivo el desarrollo de los reactores de Generación IV. Dichos reactores se basan en tecnologías que optimizan el uso del combustible, a la vez que suponen un paso adelante en cuestiones relativas a la seguridad nuclear [3].

Como se mostrará en los siguientes apartados, China ha tenido un desarrollo nuclear muy ralentizado en su fase inicial, pero muy intenso desde el año 2005 en lo correspondiente a la construcción de reactores de Generación II, III/III+ e incluso con proyectos en curso de Generación IV.

2. PRIMER PERIODO: EL COMIENZO DE LA ENERGÍA NUCLEAR EN CHINA

La historia de la industria nuclear China comenzó en los años 70 con el desarrollo de los submarinos nucleares chinos (clase Han). Posteriormente, ya en los 80, el Gobierno chino decidió comenzar la construcción de varios reactores nucleares para intentar compensar la desigualdad entre los centros de producción energética y los centros de consumo en el país [4].

Como estrategia de futuro, se quiso fomentar un equilibrio entre tecnologías importadas del extranjero con tecnologías propias desarrolladas en China [5]. Por ello, la primera central nuclear, Qinshan I (300 MWe) PWR de tipo CNP300, fue principalmente diseñada por Shanghai Nuclear Engineering Research and Design

Institute (SNERDI) compañía filial en ese momento de China National Nuclear Corporation (CNNC) y puesta en marcha en 1991. Este diseño se realizó a partir de la experiencia previa con los reactores para submarinos clase Han (Fig. 1). Posteriormente este mismo diseño se vendió a Pakistán (actualmente hay 3 CNP300 en operación y uno en construcción).

La segunda central nuclear llamada Daya Bay, con dos unidades de tipo M310, siguió una filosofía diferente a Qinshan: el constructor fue un consorcio denominado Guangdong Nuclear Power Joint Venture Co. (GNPJVC), el suministrador de la isla nuclear y la de turbina fueron Framatome (Francia) y British General Electrical Company (Gran Bretaña) respectivamente y la responsabilidad técnica recayó en Electricité de France (Francia). El reactor M310 es un diseño francés, equivalente al reactor PWR de 3 lazos de Framatome, con 34 reactores en operación en Francia, y este a su vez es una evolución del reactor PWR de 3 lazos de Westinghouse Electric Company (WEC-Estados Unidos), cuya licencia fue adquirida por el gobierno francés en 1974 [6]. Daya Bay 1 y 2 se pusieron en operación en 1993 y 1994, respectivamente.

3. SEGUNDO PERIODO: EL LENTO DESARROLLO (1996-2005)

En el periodo posterior, desde 1996 a 2005, China incrementó su flota de reactores nucleares, pero a un ritmo más pausado (≈ 1 reactor/año) que el que tuvieron en otras grandes potencias económicas en su fase de desarrollo nuclear durante los años 80 como Estados Unidos ($\approx 4,63$ reactor/año), Japón ($\approx 1,82$ reactor/año) o Francia ($\approx 3,83$ reactor/año). Durante ese periodo, se pusieron en marcha otros dos reactores tipo M310 (Ling Ao I y II), dos reactores de agua pesada tipo CANDU de tecnología canadiense (Qinshan III-1 y III-2), dos reactores de diseño ruso tipo AES-91 (Tianwan 1 y 2) y dos reactores chinos tipo CNP600 (Qinshan II-1 y II-2). Los reactores CNP600 eran un modelo escalado a 650 MWe del diseño CNP300 con ciertas características tomadas del M310 francés.

La potencia eléctrica nuclear instalada alcanzó en 2007 los 9.124 MWe, lo que

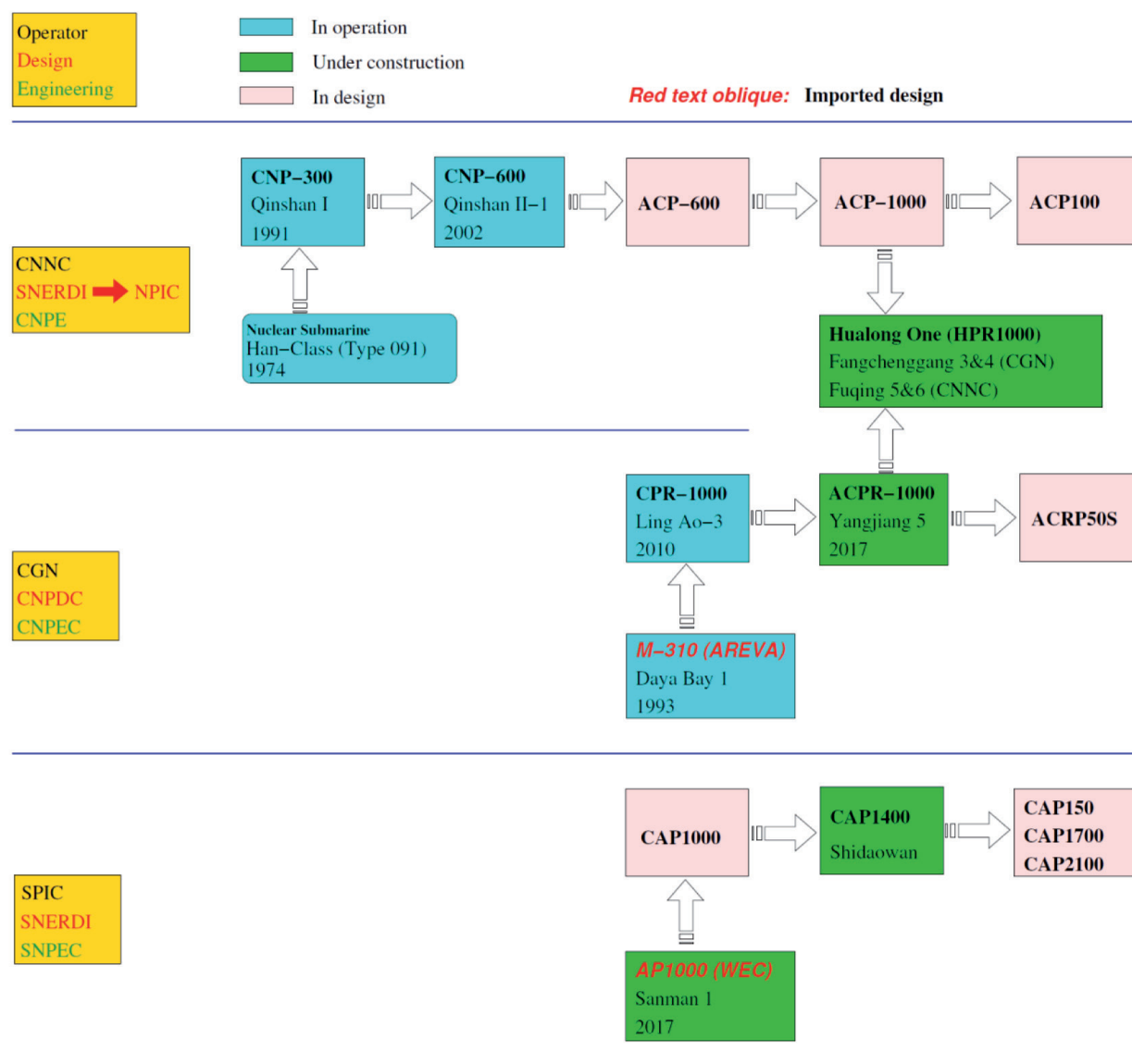


Fig. 1: Evolución de los principales diseños de agua ligera de reactores chinos. Fuente: Elaboración propia

colocaba a China entre los países con una potencia nuclear instalada significativa, comparable a España (7.864,7 MWe nucleares en la actualidad), pero lejos de Estados Unidos, Francia o Japón. Ver la Tabla 1 en Material suplementario al final del artículo. Las empresas explotadoras de las centrales que estaban en ese momento en operación eran CNC y China Guangdong Nuclear Power Corporation (CGNPC), la cual posteriormente paso a llamarse China General Nuclear Power Group (CGN) para destacar su expansión fuera de la provincia de Guangdong (Cantón) (Fig. 1).

4. TERCER PERIODO: LA CONSTRUCCIÓN MASIVA DE REACTORES (2005-.....)

En el año 2005 se produjo un cambio de planteamiento y el primer ministro Wen Jiabao impulsó un nuevo plan energético en China en el que todas las fuentes de

energía se desarrollarían para conseguir suplir la creciente demanda energética del país [5]. Con respecto a la energía nuclear, fue el punto de partida de un plan de construcción con pocos precedentes en el campo nuclear. Ese impulso coincidió con la revisión de planes estratégicos en energía de otros países como Estados Unidos y Gran Bretaña. En los tres países se consideraban prioritarios para el desarrollo de la energía nuclear la construcción de nuevos reactores de Generación III/III+.

En el año 2007, el State Council elaboró un plan nuclear a medio y largo plazo, reflejado en el documento "Condiciones y Política de la Energía en China". En el plan estratégico reflejado en dicho documento se incluía, por una parte, la inversión en tecnologías de reactores extranjeros así como el diseño y la construcción de reactores de Generación II y III/III+ chinos, fabricados, construidos y operados por empresas chinas [5].

En dicho plan, se prevé construir hasta 40 GWe de potencia nuclear en el periodo 2005-2020 ($\approx 2,66$ reactor/año), aproximadamente un 4% de la generación total del país. Desde finales del año 2009, China se ha mantenido como el país con más reactores en construcción del mundo, teniendo actualmente unos 20 en construcción.

Pese a priorizar la construcción de reactores de Generación III/III+, se siguieron construyendo reactores de Generación II: 4 reactores tipo CNP600 y 2 tipo VVER-1000 V-428M, Tianwan 3 y 4, aún en construcción. Adicionalmente, con la premisa de mejorar los diseños de Generación II, CGN desarrolló un diseño denominado CPR-1000 con algunas características de Generación III, como la instrumentación y control digital o un diseño para 60 años de operación. En este diseño parte de los derechos de propiedad intelectual pertenecen a AREVA (antigua Framatome) ya que par-

te de la tecnología proviene de su diseño M310 [6]. En China, hay 20 reactores CPR-1000 en operación y 2 en construcción (Figs. 1 y 2). Ver las Tablas 2 y 3 en Material Suplementario. Después del accidente

de Fukushima en 2011, el gobierno chino decidió no conceder más licencias de este reactor, siendo su prioridad a partir de ese momento la construcción de reactores de Generación III/III+.

El primer reactor de Generación III/III+ que comenzó a construirse en China fue el modelo AP1000 de WEC (EEUU). El AP1000 es un reactor tipo PWR que cuenta con innovadores sistemas de seguridad pasivos que basan su funcionamiento en la fuerza de la gravedad, la condensación, la ebullición y el uso de baterías de CC como contrapunto a los sistemas activos que necesitan CA proveniente del parque eléctrico exterior a la central o los generadores diésel de emergencia [7]. El contrato por la construcción de cuatro unidades de AP1000 (dos en Sanmen y dos en Haiyang) fue firmado en junio del 2007 por el consorcio WEC-Shaw en un lado y el consorcio formado por State Nuclear Power Technology Company of China (SNPTC), Sanmen Nuclear Power Company, Shangdong Nuclear Power Company y China National Technical Import & Export Corporation (CNTIC) en el otro. La construcción oficial de los reactores AP1000 comenzó en Sanmen el 19/04/2009 y en Haiyang el 23/09/2009 [8] [9]. Estos reactores tienen previsto su inicio de la operación comercial en 2017, siendo los primeros reactores AP1000 que van a comenzar a operar en el mundo, puesto que los proyectos AP1000 americanos (Vogtle 3-4 y VC Summer 1-2) comenzaron su construcción en 2013, cuatro años después que los AP1000 chinos.

Simultáneamente al inicio de la construcción de los reactores AP1000 se comenzó un nuevo diseño nuclear denominado CAP1400 (Fig. 3), concebido a partir del reactor AP1000 pero con una potencia de 1500 MWe, desarrollado por SNERDI [10], empresa que hoy en día forma parte de SNPTC después de ser transferida desde CNNC por el gobierno chino. Este proyecto incluyó un acuerdo de transferencia de conocimiento y tecnología de WEC a SNERDI. Los primeros reactores de este tipo se espera que se construyan en Shidaowan donde ya han empezado las actividades preparatorias del emplazamiento. Además del diseño CAP1400, SNERDI también está desarrollando otros de tecnología similar denominados CAP150, CAP1000, CAP1700 y CAP2100 (Fig.



Fig. 2: Localización de los reactores nucleares en China. Fuente: Wikipedia Commons

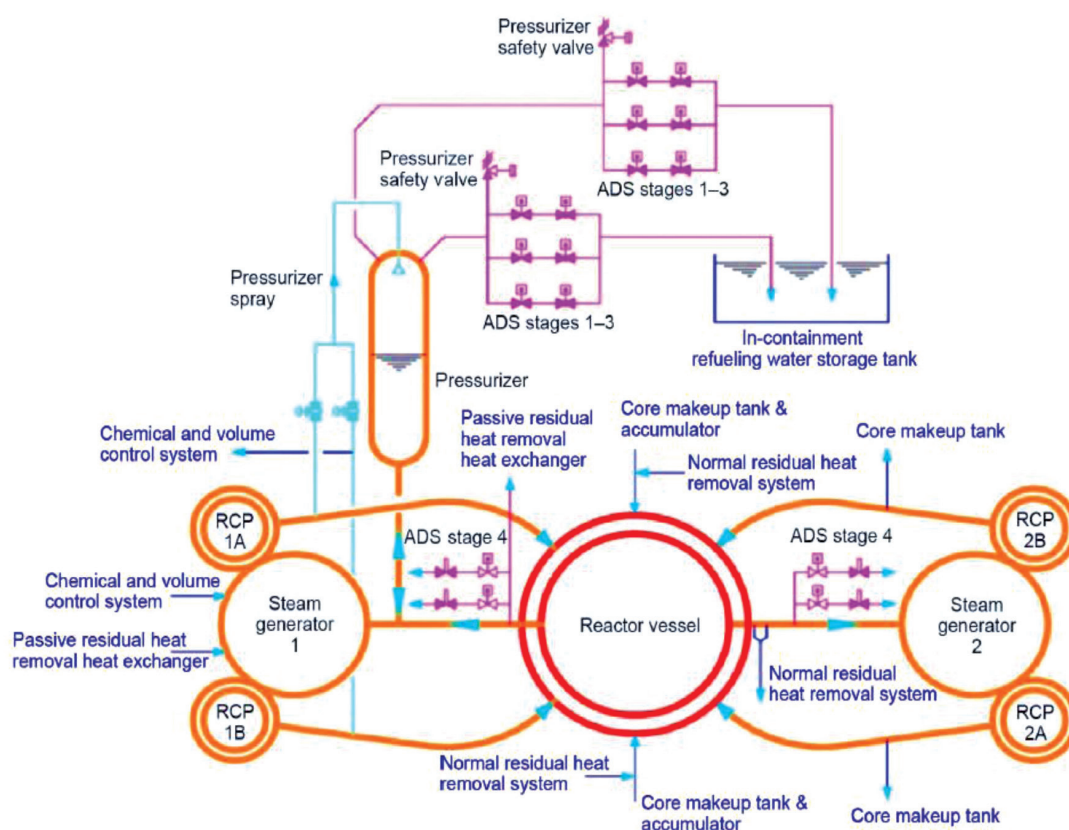


Fig. 3: Sistemas de seguridad del reactor CAP1400. Fuente: [10]

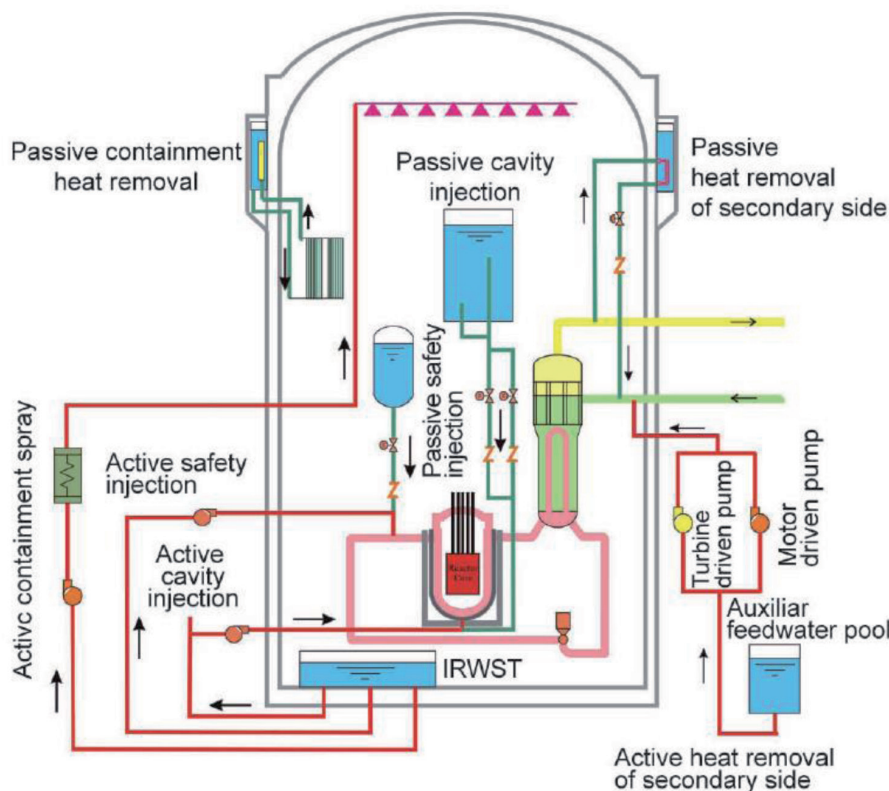


Fig. 4: Sistemas de seguridad del reactor HPR1000 de CNNC. Fuente: [19]

1). En 2015, SNPTC se fusionó con China Power Investment Corporation (CPI) para dar lugar a un gran conglomerado empresarial energético denominado State Power Investment Corporation (SPIC). Esta nueva empresa tiene un capital de 7.000 M\$ y unos activos de 116.000 M\$ con una potencia instalada de 98 GWe, siendo la potencia total instalada en China, con todo tipo de generación, 1.382 GWe (106 GWe en España) con una tasa de crecimiento de 90 GWe/año.

Ese mismo año un consorcio formado por EdF y CGN firmó la construcción de dos reactores tipo EPR con AREVA, [11]. El reactor EPR cuenta con más redundancias de seguridad que los actuales reactores de Generación II, así como múltiples sistemas de mitigación en caso de accidente severo, como el sistema de retención del núcleo fundido [12]. Los reactores EPR comenzaron su construcción el 18/11/2009 [13] y la segunda unidad el 15/04/2010 [14]. En enero de 2016, Taishan fue el primer reactor EPR a nivel mundial en completar los test hidráulicos de puesta en marcha [15], estimando su puesta en marcha efectiva para 2017. Este hecho representa un hito, puesto que los EPR construidos fuera de China comenzaron su construcción mucho antes pero su conexión a la red no está prevista hasta al menos finales de 2018 [16] [17].

Simultáneamente a la construcción de los reactores AP1000 y EPR, varias empre-

sas chinas comenzaron nuevos desarrollos de reactores de Generación III. Por una parte, CGN desarrolló un reactor avanzado denominado ACPR1000, tomando como base el reactor CPR1000. El ACPR1000 incorpora avances notables en seguridad nuclear, como una doble contención o un sistema de refrigeración del núcleo fundido, como el EPR de AREVA. Hay cuatro reactores ACPR1000 en construcción actualmente: Hongyahn 5-6, Yangjiang 5-6 (Fig. 2). Ver la Tabla 3 en el anexo. Por otra parte, y motivados por los requisitos de seguridad post-Fukushima, CNNC desarrolló dos nuevos reactores de Generación III denominados ACP600 y ACP1000, del primero se espera que se construyan dos reactores en Changjiang 3-4, sin embargo del segundo no se espera ninguna construcción en un futuro ya que en 2012, el gobierno chino decidió parar el desarrollo en paralelo de reactores de Generación III por parte de CNNC (ACP1000) y de CGN (ACPR1000), imponiendo como objetivo el desarrollo conjunto de un diseño de reactor único: el Hualong One o HPR1000 [18] (Fig. 1). El HPR1000 incluye más redundancias y sistemas pasivos de seguridad que los diseños chinos anteriores [19], como un sistema de refrigeración pasivo de la contención, basado en intercambiadores de calor en el exterior de la misma (Fig. 4). Actualmente se están construyendo tres reactores HPR1000 en China (Fan-

gchenggang 3 y Fuqing 5-6 y se encuentran avanzadas las negociaciones para su posible construcción en Pakistán, Reino Unido y Argentina [18]. Ver la Tabla 3 en el anexo.

Como estrategia de futuro a medio plazo, China aprobó el 13º Plan Quinquenal en 2016, en el que se estima que cada año se aprobará la construcción de entre 6 y 8 reactores nucleares nuevos hasta 2020. Este objetivo está motivado por la aprobación en 2014 del *Energy Development Strategy Action Plan 2014-2020*, en el cual se establece como prioritario el uso de la energía nuclear para cumplir los objetivos de emisiones. En cifras globales, moderadas después del accidente de Fukushima en 2011, China se ha puesto como objetivo alcanzar los 58 GWe de nueva instalación en 2020 con otros 30 GWe en construcción para la misma fecha [20]. Por tanto, es de prever un crecimiento intenso, pero sostenido en el tiempo de la energía nuclear en China.

PARA SABER MÁS

- GONZALEZ-JIMENEZ, Antonio. NUCLEAR POWER PLANTS: A HISTORICAL VISION - 1ST PART. DYNA, Marzo 2014, vol. 89, no. 2, p.138-143. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5757>
- GONZALEZ-JIMENEZ, Antonio. NUCLEAR POWER PLANTS: A HISTORICAL VISION - 2ND PART. DYNA, Mayo 2014, vol. 89, no. 3, p.267-271. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5759>
- Zhou Ping. "Nuclear power development in China" IAEA Bulletin, 2/1987.
- Xu Yi-chong et al. "Nuclear Energy Development in Asia. Problems and Prospects" Editorial Palgrave MacMillan, 2011.
- World Nuclear Association. "France Nuclear Power" 10/11/2016
- Carmelo Palacios. "The Spanish Nuclear Group for Cooperation: A Story of Success". Nuclear España, septiembre de 2013, pg 21-25.
- Luis Rejas y Víctor Martínez. "Diseño y suministro de salas de control para el programa nuclear de China" Nuclear España, Febrero 2016, pg. 40-45.
- Teresa Alejos. "ENSA y ENUSA logran nuevos acuerdos comerciales en China" Revista SEPI, 27/10/2014, pg. 28-30.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Las referencias completas y tablas 1, 2 y 3 se pueden descargar en...
http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8247-1.pdf



La COP22 de Marrakech confirma el compromiso mundial con la lucha contra el cambio climático

COP22 in Marrakech confirms worldwide commitment to fighting climate change

■■■■
 Maria-Victoria Román-de-Lara, María-José
 Sanz-Sánchez, Ibon Galarraga-Gallastegui
 Basque Centre for Climate Change (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8273>

Recientemente, en París, se llegó a un acuerdo universal sobre el clima. El Acuerdo de París, al que se llegó en la COP22 el 21 de diciembre de 2015, estableció un objetivo respecto al incremento de la temperatura global (por debajo de 2°C sobre el nivel preindustrial) y fijó mecanismos para coordinar los esfuerzos de los países, promover el progresivo aumento en ambición y monitorizar el progreso¹. El Acuerdo de París entró en vigor el 4 de noviembre de 2016, después de haber sido ratificado por más de 55 partes (113 en concreto) que representan más del 55% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero².

La conferencia de la ONU sobre el clima reunió en Marrakech, del 7 al 19 de noviembre de 2016, alrededor de 22.500 participantes, incluidos 70 jefes de estado y gobierno, cientos de organizaciones no gubernamentales, muchas compañías privadas, la mayoría de los centros de investigación líderes a nivel mundial y cientos de representantes gubernamentales locales y regionales. Además de suponer la 22ª sesión de la Conferencia de las Partes (COP 22 en inglés) dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC en inglés), esta conferencia también acogió la 12ª sesión de la conferencia de las Partes del Protocolo de Kioto (CP/RP 12) y la primera sesión de la Conferencia de las Partes del Acuerdo de París (CMA 1 en inglés). Tres órganos subsidiarios (SBs en inglés) también se reunieron durante la cumbre.

El foco y el objetivo principal de las

negociaciones era comenzar a trabajar en el reglamento para la implementación del Acuerdo de París; esto es, comenzar a desarrollar toda la arquitectura técnica necesaria para la implementación efectiva del Acuerdo. Las partes adoptaron 35 decisiones (25 en la COP, ocho en la CMP y dos en la CMA) que sirven de guía al programa de trabajo del Acuerdo de París, decidieron que el Fondo de Adaptación debería servir al Acuerdo de París, y adelantaron los preparativos para la entrada en vigor del Acuerdo de París³. También acordaron fijar el año 2018 como fecha límite para concluir la puesta en marcha del Acuerdo de París⁴.

A pesar de la incertidumbre en cuanto al compromiso de EEUU después de conocerse el resultado de las elecciones, otras partes del Acuerdo de París mostraron su voluntad clara y firme de luchar contra el cambio climático mediante la implementación total del Acuerdo de París, con o sin EEUU a bordo. La participación del sector privado, al igual que de gobiernos locales y regionales, en los eventos paralelos fue alentadora. En éstos se presentaron nuevas tecnologías de energía limpia, transporte y eficiencia energética.

Los resultados más relevantes de la cumbre de Marrakech pueden resumirse como sigue:

1. IMPLEMENTACIÓN DEL ACUERDO DE PARÍS: NDCS, BALANCE GLOBAL DE 2018

Según el Acuerdo de París, los países deberán presentar cada cinco años sus contribuciones fijadas a nivel nacional (NDCs en inglés). Su progreso colectivo se revisará también cada cinco años. Este ciclo de revisión, llamado balance global, comenzará en 2023, tras un diálogo preliminar o balance inicial en 2018. Antes de

este diálogo, el IPCC (Panel intergubernamental sobre el cambio climático) emitirá un informe especial sobre el impacto y las consecuencias de un calentamiento global de 1,5°C sobre el nivel preindustrial. Los SBs han facilitado unas directrices sobre cómo pueden informar las valoraciones del IPCC al balance global y han invitado a las partes a presentar sus opiniones en 2017⁵. Además, la COP ha solicitado a los presidentes de las COP22 y COP23 que elaboren un informe sobre la preparación del diálogo preliminar para 2017⁶.

Los SBs fijaron en Marrakech un claro programa de trabajo para tratar los diferentes aspectos relacionados con la implementación durante mayo de 2017, incluyendo convocatorias a presentaciones, talleres y mesas redondas. Éste es el caso respecto de la transparencia, la comunicación de la adaptación y el cumplimiento. El Acuerdo de París establece un marco de transparencia en virtud del cual cada parte presentará regularmente información de emisiones, acciones de mitigación y adaptación y el apoyo internacional que se haya ofrecido y/o recibido. Los SBs avanzaron en este tema a través de debates sobre métodos para la contabilización de la financiación pública de países desarrollados a países en desarrollo. Además, las partes han sido invitadas a presentar sus propuestas sobre modalidades, procedimientos y directrices para el marco de transparencia en 2017. El trabajo de orientación para la comunicación de la adaptación, y para el comité responsable del cumplimiento fijado en el Acuerdo de París, también se organizará en 2017⁷.

Marrakech sirvió igualmente para identificar los llamados "temas huérfanos". Éstos son las partes del Acuerdo de París que faltaban en las agendas de los

¹ Para más información véanse: Roman De Lara, M.V. and Galarraga, I. 2016. The summit in Paris, a historic result? DYNA Ingeniería e Industria. 91. (2) 131. DOI (10.6036/7958). Roman De Lara, M.V. and Galarraga, I. 2016. The Paris Summit: The Beginning of the End of The Carbon Economy. Dyna Energía y Sostenibilidad. 5. (1) 41-44. DOI (10.6036/ES7954).

² El estado de ratificación puede encontrarse en http://unfccc.int/paris_agreement/items/9444.php.

³ Todos éstos pueden encontrarse en http://unfccc.int/meetings/marrakech_nov_2016/meeting/9567.php

⁴ Decisiones FCCC/CP/2016/L.12 y FCCC/PA/CMA/2016/L.3

⁵ Decisiones FCCC/CP/2016/L.4 y FCCC/SBSTA/2016/L.24

⁶ Decisión FCCC/CP/2016/L.12

⁷ Decisión FCCC/PA/2016/L.4

⁸ Decisión FCCC/PA/CMA/2016/L.3

SBs, incluyendo plazos comunes para la presentación de NDCs, el foro de medidas de reacción, y la fijación de un nuevo objetivo colectivo de financiación, entre otros. La CMA decidió fijar 2018 como la fecha límite para abordar estos temas⁸.

2. ACCIÓN PREVIA A 2020

El Acuerdo de París orientará las actividades a partir de 2020 pero la falta de acciones inmediatas limita el nivel de ambición futura. Por esta razón la pronta entrada en vigor del segundo periodo de compromiso del Protocolo de Kioto (2013-2020) es crucial. En este sentido la COP urge a las partes a ratificar la Enmienda de Doha del Protocolo de Kioto⁹. Marrakech también ha reforzado la Agenda Mundial de Acciones Climáticas, diseñada para catalizar acciones previas a 2020, iniciando la Alianza de Marrakech para la Acción Climática Mundial, que pretende facilitar un plan de trabajo para actuar de 2017 a 2020.

3. ADAPTACIÓN, PÉRDIDAS Y DAÑOS

El Fondo de Adaptación fue creado bajo el Protocolo de Kioto y su financiación depende de aportaciones voluntarias y del mercado del carbón (recibe una parte de los ingresos de las Reducciones de Emisiones Certificadas bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio). Dada la actual falta de financiación, el CMP animó a los países desarrollados a hacer contribuciones de manera que los proyectos en activo del Fondo de Adaptación puedan ser implementados¹⁰. Como respuesta se anunciaron nuevas contribuciones por valor de 81 millones de US\$. Además, la COP y CMA decidieron que el Fondo de Adaptación sirviera al Acuerdo de París y pidieron para ello la preparación de acuerdos gubernamentales e institucionales, garantías y modalidades de funcionamiento¹¹.

La COP invitó a los países en vías de desarrollo a acceder a la financiación aprobada por el Fondo Verde del Clima (GCF en inglés) para apoyar la creación de los Planes Nacionales de Adaptación (NAP en inglés)¹² y animó a los países desarro-

llados a contribuir a los otros dos fondos (el Fondo de los Países menos desarrollados y el Fondo Especial del Cambio Climático) que apoyan la preparación e implementación de los NAPs y los Programas Nacionales de Adaptación (NAPAs).

Adicionalmente, los SBs han aprobado un plan de trabajo de cinco años para el Comité Ejecutivo (ExCom en inglés) del Mecanismo Internacional de Varsovia (WIM en inglés) sobre pérdidas y daños, y para las siguientes revisiones periódicas. La COP ha pedido al ExCom que incluya áreas de trabajo sobre finanzas, tecnología, desarrollo de capacidades y migración, y que trate de establecer una cámara de compensación para la transferencia de riesgo. La COP también ha invitado a las partes a fijar un punto de contacto nacional para reforzar la implementación a nivel nacional¹³.

4. MEDIOS DE IMPLEMENTACIÓN: FINANZAS, TECNOLOGÍA Y CAPACIDAD

Justo antes de que la COP22 empezara, los países desarrollados presentaron la "Hoja de ruta hacia los 100 mil millones US\$". En este documento afirman que tienen la esperanza de que "alcanzarán este objetivo y llevarán a cabo todas las acciones necesarias para movilizar la financiación climática desde una variedad de fuentes públicas y privadas"¹⁴.

Sin embargo, la COP, ante las conclusiones de la evaluación bienal y revisión de la financiación climática de 2016 por parte del Comité Permanente de Financiación (SCF)¹⁵, insta a los países desarrollados a alcanzar el equilibrio de financiación entre mitigación y adaptación y a mejorar la accesibilidad a los fondos. La COP también ha facilitado una guía para mejorar la accesibilidad y las posibles sinergias, y ha solicitado una recopilación de estrategias para ampliar la financiación climática y la organización de talleres en 2017 y 2018 centrados en experiencias y lecciones aprendidas¹⁶.

Los países en vías de desarrollo han sido invitados a utilizar el apoyo disponible en el Programa de preparación y ayuda preliminar del Fondo Verde del Clima (GCF



en inglés) para realizar Evaluaciones de Necesidades Tecnológicas (TNAs en inglés) y desarrollar los Planes de Acción tecnológica, y también a presentar proyectos relacionados con la tecnología a los diferentes fondos del Mecanismo Financiero del UNFCCC. La COP, además, ha ofrecido una guía para mejorar la efectividad de las acciones en desarrollo y transferencia de tecnología, y ha reforzado los vínculos entre los mecanismos tecnológico y financiero¹⁷.

Los SBs acordaron el pleno funcionamiento del Comité de París sobre el Fomento de la Capacidad (PCCB en inglés). Este Comité tiene como objetivo abordar las necesidades de fomento de la capacidad en los países en vías de desarrollo, y en 2017 empezará a trabajar en actividades de fomento de la capacidad para la implementación de NDCs dentro del contexto del Acuerdo de París¹⁸.

5. GÉNERO Y EDUCACIÓN

La COP ha decidido continuar durante tres años el plan de trabajo de Lima sobre género, y llegar a los acuerdos necesarios para promover y controlar la integración de consideraciones y equilibrio de género en todos los procesos y organismos del UNFCCC¹⁹.

La COP también ha mejorado la efectividad del plan de trabajo de Doha en educación, formación y concienciación pública. Se animó a las partes a enviar información sobre acciones relacionadas con el propósito de revisar este plan de trabajo en 2020. Por último, la COP ha decidido que a estos esfuerzos se les denominará Acciones de Emponderamiento Climático (ACE)²⁰.

¹⁰ Decisión FCCC/KP/CMP/2016/L.3

¹¹ Decisiones FCCC/CP/2016/L.12 y FCCC/PA/CMA/2016/L.3

¹² Decisión FCCC/SBI/2016/L.32/Add.1

¹³ Decisiones FCCC/SB/2016/L.8 y FCCC/SB/2016/L.9

¹⁴ <http://dfat.gov.au/international-relations/themes/climate-change/Documents/climate-finance-roadmap-to-us100-billion.pdf>

¹⁵ http://unfccc.int/cooperation_and_support/financial_mechanism/standing_committee/items/8034.php

¹⁶ Decisiones FCCC/CP/2016/L.11, FCCC/CP/2016/L.7 y FCCC/CP/2016/L.11

¹⁷ Decisiones FCCC/CP/2016/L.6 y FCCC/SBI/2016/L.5

¹⁸ Decisiones FCCC/SBI/2016/8/Add.1 y FCCC/SBI/2016/L.34

¹⁹ Decisión FCCC/SBI/2016/L.37

²⁰ Decisiones FCCC/SBI/2016/8/Add y FCCC/SBI/2016/8/Add

CONCLUSIONES FINALES

La cumbre del clima de 2016 en Marrakech puede considerarse más bien como una reunión técnica necesaria para implementar eficazmente el Acuerdo de París. En este sentido ha cumplido bien su objetivo ya que ha permitido avanzar mucho en términos de decisiones, calendarios y temas que se desarrollarán más adelante.

Desde un punto de vista político, se envió un mensaje claro de compromiso con la puesta en práctica del Acuerdo de París gracias a la aprobación universal de la Proclamación de la Acción de Marrakech para nuestro Clima y Desarrollo Sostenible. Tratando de contrarrestar la incertidumbre generada por el eventual abandono de EEUU, las partes afirmaron que la transición hacia una economía global respetuosa con el clima es irreversible, ya que ésta está impulsada por la ciencia, los negocios y la sociedad. Hoy en día los negocios, inversores, gobiernos locales, regionales y nacionales llegan a decisiones respetuosas con el clima por conveniencia económica. Pruebas de ello son la llamada hecha durante la COP22 de 360 compañías (incluidas Nike y Starbucks) al Presidente Trump a posicionarse en favor de la energía baja en emisiones de carbono, o el progreso anunciado por los gobiernos locales y regionales con respecto tanto a la mitigación como a las políticas de adaptación a nivel subnacional.

Ante la alarma generada por la elección de Trump surgieron varios nuevos líderes. Las economías emergentes, incluidas China, India, Brasil y Sudáfrica, mostraron su firme compromiso con el Acuerdo de París y se opusieron a cualquier intento de renegociación. Por ejemplo, con el inicio el próximo año del mercado de emisiones chino, el 60% del producto interior bruto mundial tendrá un precio del carbono. Además, varios países han presentado planes de descarbonización para 2050, como Alemania o Suecia. La gran sorpresa fue el anuncio de los 48 miembros del Foro de Vulnerabilidad Climática (países en vías de desarrollo como Bangladesh, Kiribati, Maldivas o Filipinas) de que para 2050 se habrán convertido en países 100% renovables.

Con el liderazgo de otros grandes emisores, el apoyo de autoridades subnacionales y las oportunidades creadas por la economía de bajas emisiones de carbono, parece que la lucha contra el cambio climático puede progresar con o sin el apoyo de EEUU. Las dos citas siguientes, donde habrá que concluir el trabajo técnico para la implementación exitosa del Acuerdo de París, tendrán lugar en Bonn, bajo la presidencia de Fiji, y en Polonia.

RECONOCIMIENTOS

Los autores quieren reconocer el apoyo de CICEP – Strategic Challenges in International Climate and Energy Policy (<http://www.cicero.uio.no/en/posts/projects/centre-for-international-climate-and-energy-policy-cicep>)



GEDLux

alcance global, respuesta local

Automatización de Subestaciones SCADA, Control, Protección, Comunicaciones

Somos un integrador de sistemas certificado especializado en la automatización de subestaciones.

Con 10 años de experiencia y más de 150 sistemas en servicio en tres continentes, nuestra calidad y orientación al cliente, unidas a nuestra asociación con ABB garantizan un desarrollo óptimo de su sistema de control basado en productos de la máxima calidad.

Authorized
value
provider



GEDLux

Sistemas de Control S.L.
Pasaje de Doña Carlota 8.
Bajo, 28002 Madrid
Tel. (+34) 91 510 56 97
www.gedlux.com

Micro algoritmo genético basado en un nuevo estimador para la marcha de un robot cuadrúpedo

Micro genetic algorithm based on a novel estimator for the quadruped robot locomotion

Francisco-Alejandro Chávez-Estrada¹, Juan-Carlos Herrera-Lozada¹, Jacobo Sandoval-Gutiérrez², Jesús-Antonio Álvarez-Cedillo³ y Mauricio Olguín-Carbajal¹

¹ Instituto Politécnico Nacional – Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo (México)

² Universidad Autónoma Metropolitana (México)

³ Instituto Politécnico Nacional – Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (México)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8215>

Las investigaciones dirigidas a reproducir la marcha de robots con patas se han incrementado en la última década. Entendemos que la marcha de robots con patas es la locomoción de la plataforma coordinando el movimiento de las extremidades, siendo este modo de caminar el que predomina en la naturaleza buscando la adaptabilidad a cualquier tipo de superficie, no obstante, la mejora de dicha locomoción no resulta una tarea sencilla considerando la dificultad en la estimación de los parámetros que intervienen en ésta [1].

Son tres parámetros los que inciden principalmente para asegurar la estabilidad en la marcha de un robot con patas [2]: el centro de gravedad (CDG), la localización dentro del polígono de apoyo (PDA) y el movimiento de las patas referido al seguimiento de un modelo geométrico (MG). En la particularidad del presente trabajo se caracterizó el comportamiento de estos parámetros a través de dos estimaciones: un algoritmo evolutivo de control que genera los patrones de marcha y un parámetro único denominado Identificador de Corriente Eléctrica (ICE).

Para efecto de realizar los experimentos correspondientes se diseñó y construyó una plataforma de un robot cuadrúpedo con doce grados de libertad (GDL) a razón de tres grados por pata. En una etapa inicial se diseñó y construyó el robot utilizando *Solidworks* e imprimiendo los elementos estructurales con plástico ABS. Se determinó que el espesor de los eslabones fuera de 3 mm y se forzó a utilizar las mismas dimensiones por cada pata para

coadyuvar con la posición el centro de gravedad (CDG) considerando el equilibrio estático y dinámico. Después de los experimentos se obtuvo una segunda versión de la plataforma robótica cuyos eslabones tienen ahora 4 mm de espesor y las partes que requieren mayor rigidez mecánica se les agregó pequeños ángulos y soleras, la marcha del robot mejora al ser más estable y disminuir la corriente rms.

Algoritmo evolutivo de control [3]:

En esta vertiente se diseñó e implementó un algoritmo evolutivo, particularmente un algoritmo genético en dos versiones: un algoritmo genético estándar (AGE) y un micro Algoritmo Genético (μ AG), ambos para generar los patrones de marcha del robot imitando un desplazamiento tipo mamífero. Los algoritmos se ejecutan intrínsecamente en un sistema embebido para comparar su desempeño. Al ser algoritmos poblacionales, en donde un individuo está codificado como cromosoma y contiene la información para generar los patrones de marcha para los doce servomotores del robot, el uso de los recursos internos del sistema embebido se ve comprometido a medida que aumenta el número de cromosomas. Con base en esta premisa, el diseño de ambos algoritmos consideró CDG, PSDA, MG, para codificar los cromosomas, siendo la versión μ AG la que redujo notablemente el costo computacional para resolver la locomoción del robot manteniendo su estabilidad y dotándolo de autonomía, propiciando un aprendizaje de marcha que se evoluciona. El μ AG diseñado sólo utiliza una población de doce individuos por lo que en la experimentación se logró comprobar que una población reducida en tamaño permite una rápida convergencia para generar los patrones de la marcha, siendo una opción válida para una implementación en hardware.

Identificador de Corriente Eléctrica (ICE): El análisis experimental de las mediciones de las corrientes pico y rms utilizadas por el robot durante la locomoción, permitió definir el tipo de marcha y estimar si el mecanismo se encuentra en el espacio de trabajo sin calcular el CDG, PDA y MG, razón por la cual se validó el ICE como un parámetro único [4]. Una

aportación importante de esta estimación es que se reduce la complejidad de cálculos y se simplifica el control de la locomoción al considerar un solo parámetro en lugar de múltiples parámetros.

Durante las pruebas se determinaron rangos de locomoción del robot: rangos óptimos de operación (locomoción normal, recta y estable), y el rango fuera del espacio de trabajo donde la locomoción es forzada, inestable y el valor del ICE se incrementa un 80%. Los rangos identificados del ICE determinan las características de la locomoción del robot en modo mamífero o reptil.

En futuras investigaciones se utilizará el robot prototipo para ejecutar algoritmos Bioinspirados que resuelvan la locomoción del robot al optimizar el aprendizaje de marcha, en función del parámetro ICE. También se considera la posibilidad de aplicar este parámetro a otro tipo de robots, como robots con ruedas y robots manipuladores, entre otros.

REFERENCIAS

- [1] Tedeschi F, and Carbone G. "Design Issues for Hexapod Walking Robots". *Robotics* 2014. Vol.3-2 p.181-206. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/robotics3020181>.
- [2] H. Suzuki, H. Nishi, A. Aburadani, and S. Inoue "Animal Gait Generation for Quadrupedal Robot". In *Innovative Computing, Information and Control*, IEEE, p. 20, 2007. DOI:10.1109/ICIC.2007.169.
- [3] A. Asteroth and A. Hagg. "How to successfully apply genetic algorithms in practice: representation and parametrization". *IEEE, 2015 International Symposium On Innovations In Intelligent Systems And Applications (INISTA)*. 2015 pp. 390-395. DOI:10.1109/INISTA.2015.7276778.
- [4] Chavez-Estrada, Francisco Alejandro, Sandoval-Gutiérrez, Jacobo, Herrera-Lozada, Juan Carlos et al. THE ELECTRIC CURRENT AS KEY PARAMETER IN THE LOCOMOTION OF A QUADRUPED ROBOT. *DYNA New Technologies*, Enero-Diciembre 2016, vol. 3, no. 1, p.0. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT8074>

Presentación de contenidos 3D: del aula a la empresa. Usabilidad e influencia en la capacidad espacial

Presentation of 3d contents: from classroom to job. Usability and influence in spatial ability

Francisco-Javier Ayala-Álvarez^{1,2}, Elidia-Beatriz Blázquez-Parra², Francisco Montes-Tubío³

¹ Instituto Politécnico Jesús Marín (España)

² Universidad de Málaga (España)

³ Universidad de Córdoba (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8236>

La falta de expectativas laborales y la dificultad de los estudios técnicos, han provocado una disminución en el acceso vocacional en estos ámbitos, que demanda, además, un cierto desarrollo de la capacidad espacial previa.

Se pretende aumentar la motivación y la participación de los discentes en clase, agilizar su capacidad espacial y mejorar la presentación de los proyectos finales para que posteriormente se puedan utilizar en el mundo laboral.

Por ello, se ha introducido en el aula modelos 3D, visibles digitalmente en formato PDF3D, *SketchUp* o utilizando realidad aumentada fija o móvil, pretendiendo determinar su usabilidad docente en el aula y en las prácticas en empresas. También se desea fijar su potencial como elementos que permitan la mejora de la capacidad de visualización espacial del alumnado.

La experiencia se ha desarrollado dentro del ámbito de la Expresión Gráfica: en FP con 54 estudiantes, (CFGS en Proyectos de Edificación), IES Politécnico de Málaga y en la Universidad de Málaga con 63 alumnos, en un estudio de contraste, grupo control C (N=28) y grupo experimental X (N=35), en el Doble grado en Ingeniería Mecánica + Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo del Producto.

Los modelos se han utilizado en clases magistrales, a partir de ejercicios y de la presentación de proyectos. Se han tratado los distintos sistemas de representación gráfica, y en FP se han desarrollado proyectos de urbanización y de edificación, tanto en clase como en las prácticas de empresa.

Previamente los alumnos fueron encuestados respecto a su perfil académico y tecnológico, así como respecto a

capacidad de visualización espacial con la prueba DAT-5 SR nivel 2. Esta misma prueba fue contestada por los estudiantes después de haber realizado la experiencia, así como respecto de la usabilidad de los modelos 3D usados. Para ello, se elaboró un test *ad hoc* de 10 preguntas según la escala likert 1-5 sobre usabilidad, norma ISO 9241-201 [1]. También se han recogido datos cualitativos sobre los elementos estudiados mediante entrevistas individuales.

Los resultados iniciales han sido similares para todos los grupos de estudiantes, sin encontrarse diferencia significativa entre los mismos. Así se manifiesta, por todos ellos, un alto dominio ofimático a nivel de usuario, de lo que se concluye que estas herramientas TIC 3D no van a suponer ningún impedimento para el normal desarrollo de las clases, [2].

Por otra parte, casi el 90% de los alumnos encuestados piensan que su capacidad de visualización espacial ha aumentado gracias a la utilización de los modelos tridimensionales. El estudio de contraste corroboró este hecho, siendo la diferencia entre los grupos la rapidez de respuesta observada: a igualdad de aciertos, los estudiantes del grupo experimental contestaron significativamente más rápido que los del grupo de control. Resultados acordes con experiencias anteriores [3].

Las valoraciones de la usabilidad del grupo de FP son superiores significativamente con respecto de los grupos universitarios, habiendo sido los primeros productores de modelos 3D para la presentación final de proyectos y los segundos meros consumidores de los elementos 3D realizados por el profesor. Los estudiantes universitarios no se han encontrado diferencias significativas entre las valoraciones de los grupos experimental y control, aun siendo las valoraciones de los primeros superiores a las de los segundos, igual que un estudio realizado por Urdarevik [4].

Además, el grupo X ha seguido mejor la asignatura que el grupo C, aunque no significativamente: ha presentado mayor cantidad de prácticas y con notas más al-

tas, y ha asistido en mayor número al examen final y a las clases durante el curso.

Los profesionales han presentado una buena acogida por la incorporación a sus proyectos de los modelos 3D realizados por los alumnos en las prácticas en empresa, ya que se ha conseguido una mejor comprensión por los clientes a los que iban dirigidos el trabajo final realizado.

Los resultados sugieren repetir la experiencia extendiéndola a toda la docencia de la asignatura, con un mayor número de estudiantes y con una mayor cantidad de parámetros en estudio, para llegar a conclusiones más clarificadoras.

Finalmente, se puede destacar la gran capacidad de comunicación a nivel académico y profesional, la asistencia que prestan al alumnado y su facilidad de manejo; sin embargo, todavía es necesaria una mejora en cuanto a la rapidez y sencillez de la obtención de los mismos.

REFERENCIAS

- [1] I. DIS, 9241-210: 2010. ERGONOMICS OF HUMAN SYSTEM INTERACTION-PART 210: HUMAN-CENTRED DESIGN FOR INTERACTIVE SYSTEMS, Switzerland: International Standardization Organization (ISO), 2009.
- [2] AYALA-ÁLVAREZ, Francisco Javier, BLÁZQUEZ-PARRA, Elidia Beatriz, MONTES-TUBÍO, Francisco. NEW WAYS FOR PRESENTATION OF PROJECTS, FROM THE CLASSROOMS TO WORLD OF WORK. DYNA New Technologies, Enero-Diciembre 2016, vol. 3, no. 1, p.0. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT8128>
- [3] CHEN, H., FENG, K., APPLICATION OF AUGMENTED REALITY IN ENGINEERING GRAPHICS EDUCATION. ITME, Vol. 2, p. 362-365, 2011.
- [4] URDAREVIK S., USING MODELS TO TEACH AND LEARN ENGINEERING. ASQ Advancing the STEM Agenda Conference, 2013.

AGRADECIMIENTOS

Se quiere agradecer la contribución a todos los alumnos y compañeros de departamento que han posibilitado la realización de este estudio. La financiación parcial del mismo ha sido sufragada por el gobierno de España dentro del proyecto Gutenberg 3D.

Un modelo de probabilidad implementado en la solución de ruteo de autobuses escolares con selección de paradas

A probability model for the school bus routing problem with bus stop selection

Ricardo Pérez-Rodríguez¹, Arturo Hernández-Aguirre², S. Jöns¹, Ivan Cruz², Jonás Velasco¹ y J. Raul Pérez-Gallardo¹

¹ CONACYT (México)

² Centro de Investigación en Matemáticas (CIMAT A.C.) (México)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8204>

El problema del enrutamiento de autobuses escolares con selección de paradas de autobús (por sus siglas en inglés SBRP-BSS) busca planificar un horario eficiente para una flota de autobuses escolares que recogen estudiantes de un conjunto de paradas de autobús y los entregan a la escuela atendiendo a varias restricciones: capacidad del autobús, tiempo de camino máximo permitido a cada estudiante para llegar a una posible parada, tiempo de conducción máximo, y ventana de tiempo para llegar a la escuela.

Este problema tiene tres cuestiones separadas pero interrelacionadas: (1) determinar el conjunto de paradas de autobús a visitar, (2) determinar para cada estudiante a qué parada de autobús debe caminar y (3) determinar las rutas que se encuentran a lo largo de la ruta elegida, de manera que se minimice la distancia total recorrida.

Se propone un algoritmo de estimación de distribuciones (por sus siglas en inglés EDA) para identificar los valores más probables para cada vector solución. El EDA trata de encontrar cualquier relación o interacción entre las variables del problema, es decir, los elementos correspondientes del vector solución. En esta investigación se considera un EDA para mostrar que los valores correspondientes del vector solución pueden estimarse mediante modelos de probabilidad.

Esta investigación proporciona detalles sobre las instancias de problema y muestra para cada caso ocho aspectos: escenario, número de paradas, número de estudiantes, capacidad de autobús, distancia máxima de caminata y los resultados de Schittekat et al. [1].

Los tamaños de instancia mencionados anteriormente van desde 5 paradas y 25 estudiantes a 80 paradas y 800 estudian-

tes. Esta investigación también informa de los resultados de un algoritmo genético (por sus siglas en inglés GA) utilizado por Prins [2], y un algoritmo memético (por sus siglas en inglés MA) propuesto por Moscato [3]. Estos algoritmos se proponen como referencia para la comparación con el esquema EDA porque estos algoritmos se han utilizado para resolver problemas de programación tales como el problema de enrutamiento de vehículos y la secuenciación en máquinas respectivamente.

Sobre la base de los resultados de esta investigación, donde el número de paradas de autobús potencial es de 5, el esquema EDA muestra un mejor resultado en 9 de 24 casos contra el mejor resultado de Schittekat et al. [1]. En el mismo número de posibles paradas de autobús, el EDA encuentra la mejor aptitud en 22 de 24 casos contra los algoritmos propuestos como referencia. Si el número de paradas potenciales es de 20, el EDA encuentra la mejor o la misma aptitud en 22 de 24 casos, cuando el número de paradas es 40, el EDA produce 18 de 24 y finalmente para 80 paradas, en 10 de 24 casos. Esto significa que cuando el número de paradas aumenta de 10 a 80, es necesario identificar una mejor relación o interacción entre paradas de autobús en la secuencia para reducir la aptitud.

El EDA es capaz de reducir sustancialmente la aptitud mediante un modelo de probabilidad con el fin de detectar las interacciones entre las variables, lo que explica las reducciones en la aptitud mediante la aplicación del EDA en comparación con el GA y el MA [4].

El enfoque más simple para estimar la distribución de probabilidad conjunta detallada anteriormente no es capaz de detectar las interacciones superiores cuando el número de paradas aumenta de 10 a 80 para los casos considerados en esta investigación. Para cada generación, sabemos la probabilidad de que la parada *j*-ésima sea elegida para la *i*-ésima posición en la secuencia; sin embargo, al modelar interacciones más altas, el modelo probabilístico básico usado puede ser una desventaja.

Por último, la literatura no considera

suficientemente la interacción entre las paradas de autobús para el enrutamiento con otras cuestiones de planificación relacionadas mediante un modelo de probabilidad, y podría ser útil proporcionar un enfoque de solución diferente, que integre las decisiones sobre estas cuestiones de planificación con el fin de minimizar la distancia total recorrida.

El EDA puede detectar relaciones o interacciones entre paradas y puede mejorar significativamente el rendimiento mediante un modelo de probabilidad. Los resultados actuales incluyen varios ejemplos que detallan el potencial del enfoque EDA para resolver el problema del enrutamiento de autobuses escolares con la selección de paradas de autobús. Los resultados alientan el desarrollo de un método de optimización eficaz basado en un modelo de probabilidad para resolver los problemas de enrutamiento de autobuses escolares del mundo real, que generalmente ocurren en entornos dinámicos donde la eficiencia es frecuente.

Aunque el modelo de probabilidad propuesto es suficiente para ser competitivo, los modelos de mayor probabilidad deberían considerarse como trabajo futuro para obtener mejores resultados para el SBRP-BSS.

REFERENCIAS

- [1] Schittekat P, Kinable J, Sörensen K, Sevaux M, Spieksma F & Springael J, A metaheuristic for the school bus routing problem with bus stop selection, *European Journal of Operational Research*, 229-2 (2013) 518-528.
- [2] Prins, C, A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem, *Computers & Operations Research*, 31-12 (2004) 1985-2002.
- [3] Moscato P. "On Evolution, Search, Optimization, Genetic Algorithms and Martial Arts: Towards Memetic Algorithms". Caltech Concurrent Computation Program (report 826) (1989).
- [4] Pérez-Rodríguez, Ricardo, Hernández-Aguirre, Arturo, Jöns, S et al. An estimation of distribution algorithm for the school bus routing problem with bus stop selection. *DYNA New Technologies*, January-December 2016, vol. 3, no. 1, p.0. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT8118>



TRESCA
ENGINEERING SOLUTIONS

BUENOS COMPAÑEROS DE VIAJE

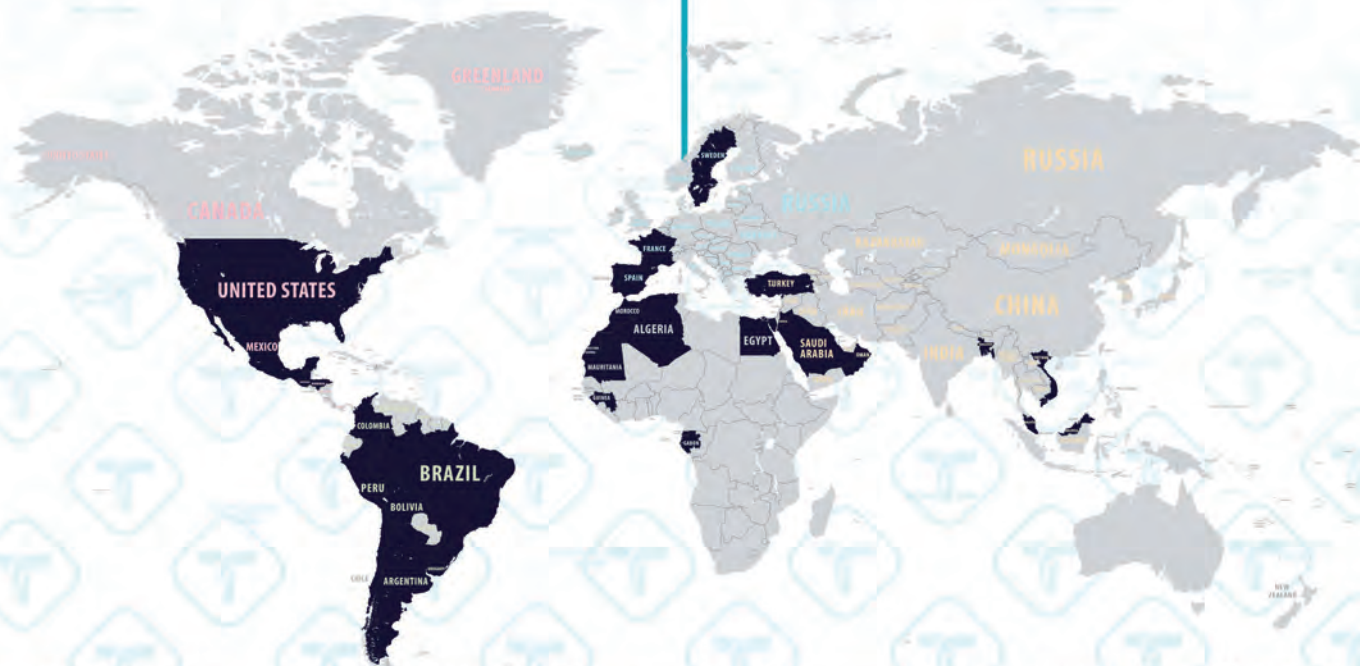
¿TE ACOMPAÑAMOS EN TU PRÓXIMO PROYECTO INTERNACIONAL?

> SECTORES

ENERGIA
PLANTAS INDUSTRIALES
MINERIA
INDUSTRIA QUÍMICA
INDUSTRIAL DEL CEMENTO
MADERA Y CELULOSA
HANDLING DE SÓLIDOS

> SERVICIOS

INGENIERÍA INTERNACIONAL
INGENIERÍA DE APOYO A EPC
INGENIERÍA BÁSICA
INGENIERÍA DE DETALLE
MODELOS Y MAQUETAS EN 3D
APOYO A LICITACIONES INTERNACIONALES



> INGENIERÍA ELÉCTRICA

> INGENIERÍA CIVIL

> INGENIERÍA MECÁNICA

CONÓCEMOS EN:
www.tresca.es



Gestión de almacenamiento energético para instalaciones de generación-distribución

Energy storage management for generation-distribution facilities

Juan-Aurelio Montero-Sousa, Luis-Alfonso Fernández-Serantes, José-Luis Casteleiro-Roca, Xosé-Manuel Vilar-Martínez y José-Luis Calvo-Rolle
Universidad de A Coruña (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8172>

Normalmente, la curva de demanda de energía de un país no es conocida a priori, pero pueden hacerse estimaciones [1]. En la Fig. 1 se muestra un ejemplo real, donde la estimación (azul), es similar a la demanda real (roja). Las energías renovables tienen disponibilidad variable [1]; lo que hace compleja la labor de previsión de funcionamiento para el resto de centrales.

Por otra parte, la inclusión de los sistemas de almacenamiento requiere una gestión eficaz. Si el sistema de almacenamiento estuviera controlado por el gestor de la red, lo que procuraría es optimizar el binomio entre energía generada y demandada. Acumulando energía cuando la generación fuese mayor que la demanda, y cuando el sistema demandase más energía de la generada, liberaría energía, equilibrando generación y demanda.

Frecuentemente la planta de almacenamiento puede estar controlada por una central renovable. Estas, tienen que proporcionar al gestor de red una previsión de la energía que aportarán en un momento concreto [1]. De no cumplirla, se impondrían penalizaciones a la planta de generación [2]. La energía almacenada se aportaría, hasta completar lo pactado. De disponer de más energía que la indicada al gestor, la sobrante se emplearía para recargar el sistema de almacenamiento. Así se evitarían en todo momento penalizaciones por incumplimiento de previsiones.

Otro uso de las plantas de almacenamiento es gestionar la energía almacenada acumulando cuando el precio de la energía fuese bajo y generando cuando es más rentable. En la Fig. 2 se muestra la evolución del precio a lo largo de un mes; esta variación depende de muchos factores como: eventos, climatología, etc.

Para poder afrontar las previsiones de energía con precisión, se presenta un nuevo basado en un modelo híbrido [3,4]; primero, se realizaría una reducción de variables, posteriormente se aplicarían

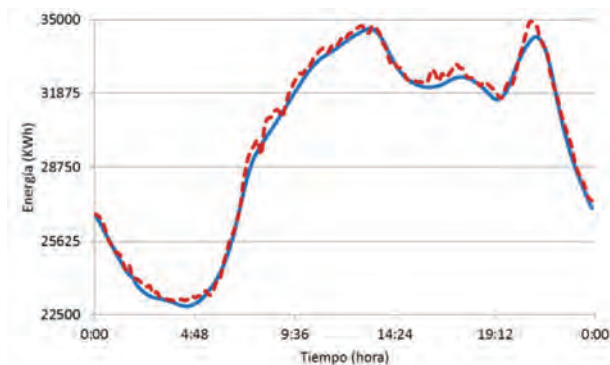


Fig. 1: Curvas de estimación y demanda real

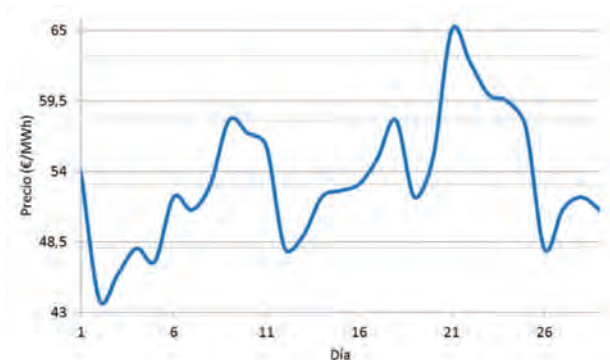


Fig. 2: Evolución del precio de la energía

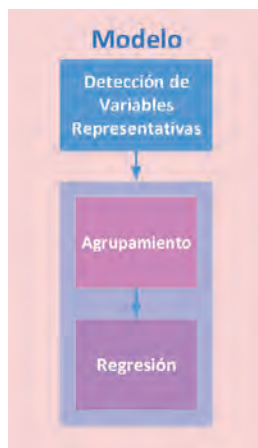


Fig. 3: Modelo

técnicas de agrupamiento (*clustering*), y finalmente se modelaría el comportamiento de cada grupo mediante algoritmos de regresión específicos (Fig. 3).

En la Fig. 4 se muestra una propuesta simplificada. Para su creación, primero se utilizarían algoritmos para la detección de variables de entrada significativas para obtener las salidas. Esto se puede efectuar mediante algoritmos como PCA (*Principal Component Analysis*) [5], o SOM (*Self Organization Maps*) [3].

El *clustering* consiste en crear grupos con datos que poseen similitudes; técnicas para conseguirlo son SOM y *K-means*.



Fig. 4: Propuesta simplificada

Aplicadas conjuntamente, un primer análisis con SOM predice el número de grupos, y luego *K-means* permite dividir el conjunto de datos [6,7]. Se conoce como modelo global al que incluye todos los datos, y como modelos locales a los creados cuando se aplica *clustering*. Seguidamente, se utilizarían técnicas de regresión para prever los valores de las salidas del sistema. Algoritmos típicos son: regresión polinomial, redes neuronales artificiales (ANNs), máquinas de vectores soporte (SVR), etc. Finalmente, en la creación del modelo, es necesario comprobar su eficiencia. Para ello, el indicador típico es el error cuadrático medio (MSE); este indicador se usa para comparar los diferentes algoritmos, seleccionar el número correcto de grupos y para ajustar los parámetros internos de los algoritmos [8].

Sería posible así, ubicar diferentes plantas de almacenamiento en la red eléctrica, y optimizar su administración. Es importante enfatizar en la creación de

modelos que permitirían predecir la demanda para tomar decisiones en la gestión del almacenamiento, y poder disponer de la energía en los momentos necesarios.

REFERENCIAS

- [1] Fernandez-Serantes, L., Montero-Sousa, J., Casteleiro-Roca, J., Vilar-Martinez, X., Calvo-Rolle, J. (2016). MANAGEMENT POSIBILITIES FOR GENERATION-DISTRIBUTION FACILITIES WITH ENERGY STORAGE. *DYNA Energía y Sostenibilidad*, 5(1). O. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES7820>
- [2] Salmerón J. Las renovables en el mercado de la electricidad: perspectivas de futuro. Generalitat de Catalunya. Nota d'economia 95-96, 1er trimestre 2010
- [3] Casteleiro-Roca, J.L., Calvo-Rolle, J.L., Meizoso-López, M.C., Piñón-Pazos, A., Rodríguez-Gómez, B.A., Bio-inspired model of ground temperature behavior on the horizontal geothermal exchanger of an installation based on a heat pump, *Neurocomputing*, 150, Part A, 90-98, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2014.02.075>
- [4] Ferreiro Garcia, R., Calvo-Rolle, J.L., Romero Gomez, M., DeMiguel Catoira A., Expert condition monitoring on hydrostatic self-levitating bearings, *Expert Systems with Applications*, 40(8), 2975-2984, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.013>
- [5] Quintián, H., Calvo-Rolle, J. L., Corchado, E. (2014). A Hybrid Regression System Based on Local Models for Solar Energy Prediction. *Informatica*, 25(2), 265-282.
- [6] Alaiz Moretón, H., Calvo Rolle, J.L., García, I., Alonso Alvarez, A., Formalization and practical implementation of a conceptual model for PID controller tuning, *Asian Journal of Control*, 13(6), 773-784, doi: <http://dx.doi.org/10.1002/asjc.264>
- [7] José Luis Casteleiro-Roca, Héctor Quintián, José Luis Calvo-Rolle, Emilio Corchado, María del Carmen Meizoso-López, Andrés Piñón-Pazos, An intelligent fault detection system for a heat pump installation based on a geothermal heat exchanger, *Journal of Applied Logic*, Volume 17, September 2016, Pages 36-47, ISSN 1570-8683, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jal.2015.09.007>.
- [8] Calvo-Rolle, J.L., Casteleiro-Roca, J.L., Vilar-Martinez, X., Montero-Sousa, J., Expert system development to assist on the verification of "TACAN" system performance. *DYNA*, 89(1). 112-121. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5756>

Combinación de técnicas de big data analytics y web semántica para la detección de vocabulario de acoso escolar en internet

Combination of techniques of big data analytics and semantic web for the detection of vocabulary of harassment school in internet

■■■■
Iván Castillo-Zúñiga¹, Francisco-Javier Luna-Rosas¹, Jaime Muñoz-Arteaga³ y Jaime-Iván López-Veyna⁴

¹ Instituto Tecnológico de Aguascalientes (Méjico)

² Instituto Tecnológico el Llano Aguascalientes (Méjico)

³ Universidad Autónoma de Aguascalientes (Méjico)

⁴ Barcelona Supercomputing Center (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8159>

Interactuar con el mundo mediante redes sociales, buscar y recibir información, realizar transacciones, colaborar y compartir contenidos independientemente de nuestra situación geográfica e idioma se han convertido en actividades cotidianas que realizamos día a día a través de la Web. La gran cantidad de dispositivos conectados a Internet (*móviles, tabletas electrónicas o Pc's*), así como el crecimiento de la infraestructura de red, son algunos de los factores que han contribui-

do al éxito de la Web generando grandes volúmenes de datos (*Big Data*). Sin embargo el proceso para analizar la enorme cantidad de datos en la Web todavía debe establecerse, en este sentido existen Arquitecturas de Software poco definidas, algunas se han enfocado a la búsqueda y localización de información en la Web [1], al procesamiento distribuido en grandes volúmenes de datos [1], y a la recuperación de información con técnicas de Procesamiento de Lenguaje Natural (*PLN*) [1], implementando soluciones parciales que no han sido del todo aceptadas por la comunidad científica.

Para obtener un valor agregado de la información, es necesario llevar a cabo una administración eficaz en los datos y aplicar distintas técnicas de procesamiento que permitan manejar grandes cantidades de información en tiempo real (*velocidad*), asimismo utilizar procedimientos para analizar datos complejos semiestructurados y no estructurados como documentos, imágenes, vídeos, música, entre

otros (*variedad*) [1]. Por otro lado se deben considerar problemas como la dificultad para la interpretación de palabras o significados (*semántica*), integración de información (*datos dispersos y sin relación*) y la recuperación de datos (*problemas de sinonimia, polisemia y multilingüismo*) [1].

El problema inicial de esta investigación reside en que la información se encuentra en formato no estructurado, en grandes cantidades de datos dispersa en sitios Web, con distintos protocolos de seguridad y comunicación, además, los textos presentan errores ortográficos, abreviaturas y sinónimos. Para iniciar el proceso de detección del vocabulario de un tema es necesario transformar la información a datos estructurados. Y para obtener conocimiento de la información, una de las opciones que recientemente han tomado auge, es la aplicación de técnicas del área de Aprendizaje Máquina (*Machine Learning*).

La problemática abordada en esta investigación considera los siguientes puntos:

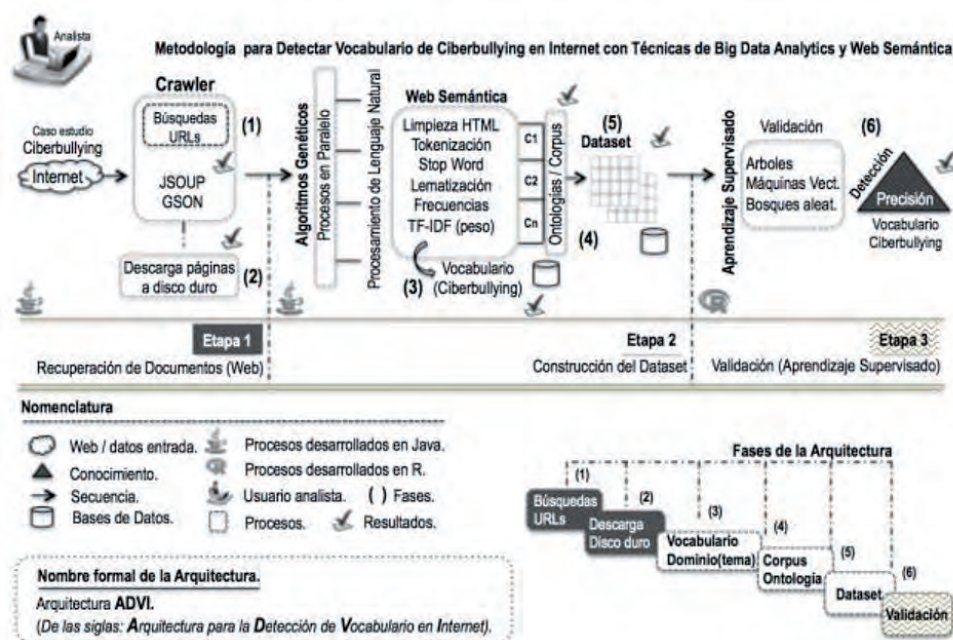


Fig. 1: Arquitectura (ADVI) para la Detección de Vocabulario de Cyberbullying en Internet combinando Técnicas de Big Data Analytics y Web Semántica. Fuente: Castillo, Luna, Muñoz, et al. [1]

- Dificultad en la búsqueda y recuperación de grandes cantidades de información en la Web.
- La información está mezclada con código HTML, abreviaciones y errores ortográficos.
- Alta complejidad en el preprocesamiento de datos debido a la sinonimia, polisemia y multilingüismo.
- Gran consumo de memoria RAM y procesamiento lento en grandes cantidades de información.
- Transformación de información a datos estructurados para su análisis.
- Dificultad para obtener conocimiento útil de la información (*valor en los datos*).

La principal aportación de esta investigación es una arquitectura de software que implementa una metodología inspirada en técnicas de *Big Data Analytics* (Algoritmos Genéticos, Aprendizaje Supervisado (*Machine Learning*)) y Web Semántica (*Ontologías, Vocabularios, Corpus Lingüísticos*) [1], con el objetivo de analizar grandes cantidades de información en la Web y obtener conocimiento que apoye en la toma de decisiones a organizaciones, empresas y sociedad en general.

A efectos de probar la arquitectura y sus métodos, como caso de estudio se analizaron páginas Web sobre el *Cyberbullying*. Descrito como fenómeno de acoso escolar que sufren los niños y adolescentes haciendo uso de Tecnologías de la Información para acosar, hostigar e intimidar a un individuo a través de ataques personales, divulgación de información

confidencial o falsa [2].

La Fig. (1), muestra el esquema que representa la arquitectura de software planeada para la detección de vocabulario de *Cyberbullying* en Internet con técnicas de *Big Data Analytics*, Web Semántica y Procesamiento de Lenguaje Natural.

La arquitectura diseñada por nosotros [1], utiliza un *Crawler* para localizar y descargar la información en la Web. Para la recuperación del vocabulario se implementó una estrategia genética en paralelo que integra técnicas de Web Semántica (*ontologías*) y Procesamiento de Lenguaje Natural (*Limpieza HTML, Tokenización, Stop Word, Frecuencia de Término (TF) y Frecuencia de Término con Frecuencia Inversa del Documento (TF-IDF)*), métodos de lematización y sinónimos, con el propósito de recuperar más información. Para obtener conocimiento se utilizaron los algoritmos de Aprendizaje Supervisado, Árboles de Decisión, Máquinas de Soporte Vectorial y Bosques Aleatorios.

La arquitectura propuesta utiliza una metodología que integra un proceso completo que inicia obteniendo datos en la Web y termina con la detección de vocabulario (*conocimiento*), uniendo distintas técnicas de manera natural. Los resultados obtenidos en distintas fases del estudio en comparación con investigaciones similares como las de Kontostathis, Reynolds, Garrón et al. [3], muestran una mayor precisión, obteniendo un conjunto de datos que reporta porcentajes elevados en la detección del vocabulario del *Cyberbullying* logrando un 95% de precisión [1]. De igual manera se optimiza el proceso

secuencial con una estrategia genética en paralelo reduciendo considerablemente el tiempo de procesamiento en un 302% [1]. Hay que mencionar, además, que el uso de ontologías semánticas facilitó el análisis de la información generando (n) conjuntos de datos con distintas perspectivas [1].

Por lo tanto, se puede mencionar, que nuestra arquitectura ha demostrado ser eficaz en la detección de vocabulario de *Cyberbullying* en Internet. Es importante resaltar que esta arquitectura puede representar una interesante aportación al análisis de datos sobre problemas sociales en Internet. Adicionalmente, cabe destacar que el agregar técnicas de *Big Data Analytics* en los procesos de recuperación de información, permite agilizar el análisis y clasificación de páginas Web originando información valiosa y conocimiento significativo para el usuario.

REFERENCIAS

- [1] Castillo-Zúñiga I, Luna-Rosas F, Muñoz-Arteaga J, et al. "Architecture (ADVI) for the Detection of Cyberbullying Vocabulary in Internet Combining Techniques of Big Data Analytics and Semantic Web". *Dyna New Technologies*, Enero-Diciembre 2016, vol. 3, no. 1, p.0. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT8032>
- [2] Ortega JI, González DL. "Análisis del impacto del Cyberbullying en el rendimiento académico de estudiantes de nivel medio superior". 1ª ed. 2015. Ed. Instituto Universitario Anglo Español. ISBN: 978-607-9003-22-7
- [3] Kontostathis A, Reynolds K, Garrón A, et al. "Detecting Cyberbullying: Query Terms and Techniques". *ACM-WebSci*. 2013, Paris, Francia, p. 195 - 204. ISBN: 978-1-4503-1889-1.

Compresión de imágenes sin pérdida usando clasificador 1-nn para adaptar los coeficientes de filtros lifting

Image compression without loss using classifier 1-nn to adapt the coefficients of lifting filters

Ignacio Hernández-Bautista¹, Oleksiy Pogrebnyak², José-Juan Carbajal-Hernández², Jesús-Ariel Carrasco-Ochoa¹, José-Francisco Martínez-Trinidad¹

¹ INAOE (México)
² CIC-IPN (México)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8102>

La transformada *wavelet* es ampliamente usada en diferentes aplicaciones del procesamiento de señales e imágenes. Sin embargo, una adecuada selección o el diseño de una *wavelet* para un problema dado es un área abierta, debido a que actualmente no existe una forma de adaptar los coeficientes de los filtros. La transformada *wavelet* puede utilizar diferentes funciones de base, y es importante que la base seleccionada proporcione la mejor representación posible de la señal analizada; es decir, el acoplamiento de la *wavelet* y la señal resulta en una mejor representación para ésta, y con ello, un mejor nivel de compresión.

Actualmente los coeficientes de los filtros *lifting* son fijos y dependiendo del valor de los coeficientes tienen una notación específica. En la tabla 1 se presenta los valores de los coeficientes *a* y *b* con su notación correspondiente:

a	b	Notación Filtros	Notación Lifting
0	0	5/3	(2,2)
0	12	9/3 MPEG-4	(2,4)
16	0	9/7 M	(4,2)
16	8	13/7 SWE	(4,4)

Tabla 1: Relación entre los coeficientes y los filtros estándar

En este trabajo, presentamos un método para comprimir imágenes. Este método está basado en analizar las características espectrales de diferentes imágenes, adaptando los coeficientes *a* y *b* de los filtros *lifting* en cada nivel de descomposición de la transformada *wavelet* usando un clasificador 1-NN, obteniendo la mínima entropía en cada imagen a comprimir. El modelo propuesto se detalla a continuación:

CARACTERIZACIÓN

Es importante subrayar, que los coeficientes *a* y *b* de los filtros *wavelets* son obtenidos previamente mediante una búsqueda exhaustiva para cada imagen contenida en el conjunto de imágenes de prueba. Dicha búsqueda se realizó buscando cada coeficiente *a* y *b* de cada imagen, utilizando el método de prueba y error obteniendo la menor entropía de cada una de ellas.

Después, para comprimir una imagen (*S*) se calcula el espectro de potencia promediado entre el número de filas de la imagen, aplicando la Transformada Discreta del Coseno a cada fila mediante las siguientes expresiones:

$$S_i = a_i M N l = 0 N - 1 q = 0 M - 1 s_i, q \cos \pi i (2q + 1) / 2M \quad (1)$$

para $0 \leq l \leq M - 1$

$$a_i = 11 / \sqrt{2} \quad 1 \leq i \leq M - 1 \quad i = 0$$

donde *M* es el número de filas y *N* es número de columnas de la imagen.

Posteriormente, se realiza un proceso de interpolación utilizando la transformada directa de Fourier (TF), obteniendo un vector característico con longitud fija de 16 elementos:

$$x = F_{16}^{-1} F_{MS}(l) \quad (2)$$

donde denota la TF de tamaño *M*, es la transformada inversa de Fourier de tamaño 16. Con este procedimiento se resta importancia al tamaño y resolución de una imagen a comprimir, ya que se obtiene un vector característico de tamaño fijo.

ENTRENAMIENTO

El vector característico de cada imagen se asocia con el conjunto de coeficientes *a* y *b* de los filtros *wavelets* previamente obtenidos a través del clasificador 1-NN. Obteniendo diferentes coeficientes para la generalización de filtros. El clasificador 1-NN fue entrenado utilizando al vector característico como patrones de entrada y los coeficientes como clase.

RECUPERACIÓN

Se obtiene el vector característico de una nueva imagen a comprimir, el cual es presenta al clasificador 1-NN. Como resultado, un conjunto de coeficientes *a* y *b* serán obtenidos para ser usados en la TDW para cada nivel de descomposición.

Finalmente, se procesa con técnicas de búsqueda de árboles y con coeficientes *wavelets* diferentes de cero, codificándose con modelos de entropía.

Pruebas experimentales utilizando un conjunto de 30 imágenes en escala de grises de 8 bits por pixel y de diferente tamaño, se obtuvieron menores niveles de entropía, así como un mejor bitstream en cada imagen que fue probada con el mé-

todo propuesto. Dichos experimentos fueron comparados contra los filtros *wavelets* estándares CDF(2,2), CDF(2,4), CDF(4,2) y CDF(4,4), así como basados en predicción lineal LPC(4,2) y LPC(4,4). La mejoría obtenida en la entropía y el bitstream se obtuvo sin agregar un tiempo de ejecución excesivo, derivado del uso del clasificador 1-NN. La mejora de la entropía y del bitstream se debe al reconocimiento de patrones del espectro de potencia, lo cual permite adaptar los coeficientes para la transformada *wavelet*.

REFERENCIA

HERNANDEZ-BAUTISTA, Ignacio, POGREBNYAK, Oleksiy, CARRASCO-OCHOA, Jesus Ariel et al. WAVELET FILTER SETTING BY USING K-NN FOR LOSSLESS IMAGE COMPRESSION. DYNA New Technologies, Enero-Diciembre 2016, vol. 3, no. 1, p.0. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7938>

Comunicación y seguimiento de procesos en empresas constructoras: posible desarrollo como aplicación para dispositivos móviles

Communication and monitoring process in construction companies: possible development as application for mobile devices

Alejandro Sánchez-Molina, Manuel Jesús Hermoso-Orzáez, José Ignacio Rojas-Sola
Universidad de Jaén (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7895>

El sector de la construcción, por su rigidez y condicionamiento a los cambios económicos y políticos del país, ha sufrido un importante retraso en la evolución de sus procesos respecto del resto de industrias [1]. Las empresas constructoras deben adaptarse al cambio sin renunciar a tecnologías que garanticen la calidad, debiendo gestionar sus obras con sistemas que permitan controlar su producción, reducir desplazamientos, disminuir fallos y reaccionar con rapidez a los imprevistos.

Se ha detectado que disponen de sistemas de gestión con procesos estáticos, lentos, con altos niveles de fallo, mala comunicación y poca capacidad de adaptación: por ello, este estudio aborda la necesidad de utilizar un canal alternativo que deseché el registro manual de las actividades, y mejore la gestión, la comunicación y la dirección y gestión de proyectos [2].

La mayoría de las constructoras en nuestro país son de tamaño pequeño o mediano, y poseen procedimientos de gestión y de comunicación al nivel de las grandes o simplemente no disponen. En el primer caso, los costes indirectos y gastos generales crecen al no ser acorde al volumen de facturación, y en el segundo, se renuncia a la calidad. En cualquier caso, la gestión de proyectos crea valor añadido [3]. Asimismo, se han producido fracasos como las PDA (del inglés, *Personal Digital Assistant*), al requerir mayor complejidad en su uso y costes.

Por ello, dado que los sistemas operativos Android (Google) e iOS (Apple) son los más extendidos en el desarrollo de aplica-

ciones para dispositivos móviles (Apps), con un uso extraordinariamente implantado, se entendería que una aplicación diseñada y basada en cualquiera de los citados sistemas operativos para la gestión de obras, podría tener una altísima aceptación en el mercado, pues además se podría descargar fácilmente de sus plataformas Google Play o App Store, respectivamente.

Seguidamente se muestran los procesos de obra que se implementarían en dicha aplicación.

1. ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA

De los dos sistemas operativos más extendidos para dispositivos móviles (Android e iOS), Android es más abierto, flexible y personalizable que iOS que obliga a adaptarse a los patrones básicos de uso que desarrolla Apple, y siendo además una herramienta globalizada muy estandarizada. Sin embargo, la selección de un sistema u otro dependerá de la experiencia de usuario.

La idea surge del *Benchmarking* [4], quedando demostrado que es posible ganar en mejoras con la ayuda de dichos sistemas. Para su diseño e implantación, se necesita:

- La observación de los procedimientos actuales a través de la experiencia.
- La recogida de material procedente de opiniones de proveedores, profesionales de otras constructoras y trabajadores de diferentes departamentos, creando grupos de trabajo para simular el método Kawakita Jiro [5], donde cada uno en representación de diferentes *stakeholders* [6], ofrecen su visión acerca de los problemas que desde su opinión tienen los procedimientos actuales.

El segundo paso es seleccionar dichas incidencias y analizarlas por el método

Causa-Raíz [5] para señalar qué actividades se desechan por dependencia con otro software, o por no ser posible su programación con Android o iOS.

Tras identificar las actividades causa-efecto se estudió el exceso vinculado a ellos, y para cuantificar el coste de las incidencias y fallos detectados se procedió a:

- Determinar el coste por la diferencia de horas de mano de obra entre el tiempo óptimo y el tiempo real del proceso.
- Establecer un valor aproximado representativo anual del coste causado por incidencias basándose en un histórico de hechos ocurridos en un departamento de la empresa.

La metodología escogida no cuestiona los procedimientos diseñados por las constructoras para cada uno de sus procesos, sino ofrecer un diagrama de flujo optimizado de los mismos para el futuro desarrollo de una App que permitiera ejecutarlos optimizando tiempos y costes, desplazando así la curva de prevención-evaluación y la de costes de fallos de la teoría de costes de la calidad [7].

2. ENCUESTA DE PARTIDA Y RESULTADOS

Encuestas de partida y de análisis, han sido realizadas a Jefes de Obra (J.O.), Encargados, Delegados y Proveedores de un departamento con 3 empleados y con 10 obras de 250.000 € o 2,5 meses por año y habiéndose estudiado 36 proyectos al año. Dichas encuestas, arrojan la necesidad de gestionar los procesos de forma más eficiente, para lo que se propone el desarrollo de una App como solución de mejora.

Partiendo de una encuesta inicial, se han obtenido como resultados, una secuencia de actividades y procesos asociados a cada una de las fases de obra (estudio, contratación, seguimiento y control, y entrega), mostradas en el diagrama de flujo de la Fig.1.

En los procesos para la selección de proveedores, subcontratas o alquiler, entre otros, se tendrán en cuenta los criterios de precio, plazo y calidad de entrega o servicio. En el proceso de seguimiento y control, se realizará una gestión de alarmas efectiva y acorde con cada proceso. Así pues, en los procesos de selección de subcontratas se enviará una señal de alarma a la mitad del plazo y otra finalizando el

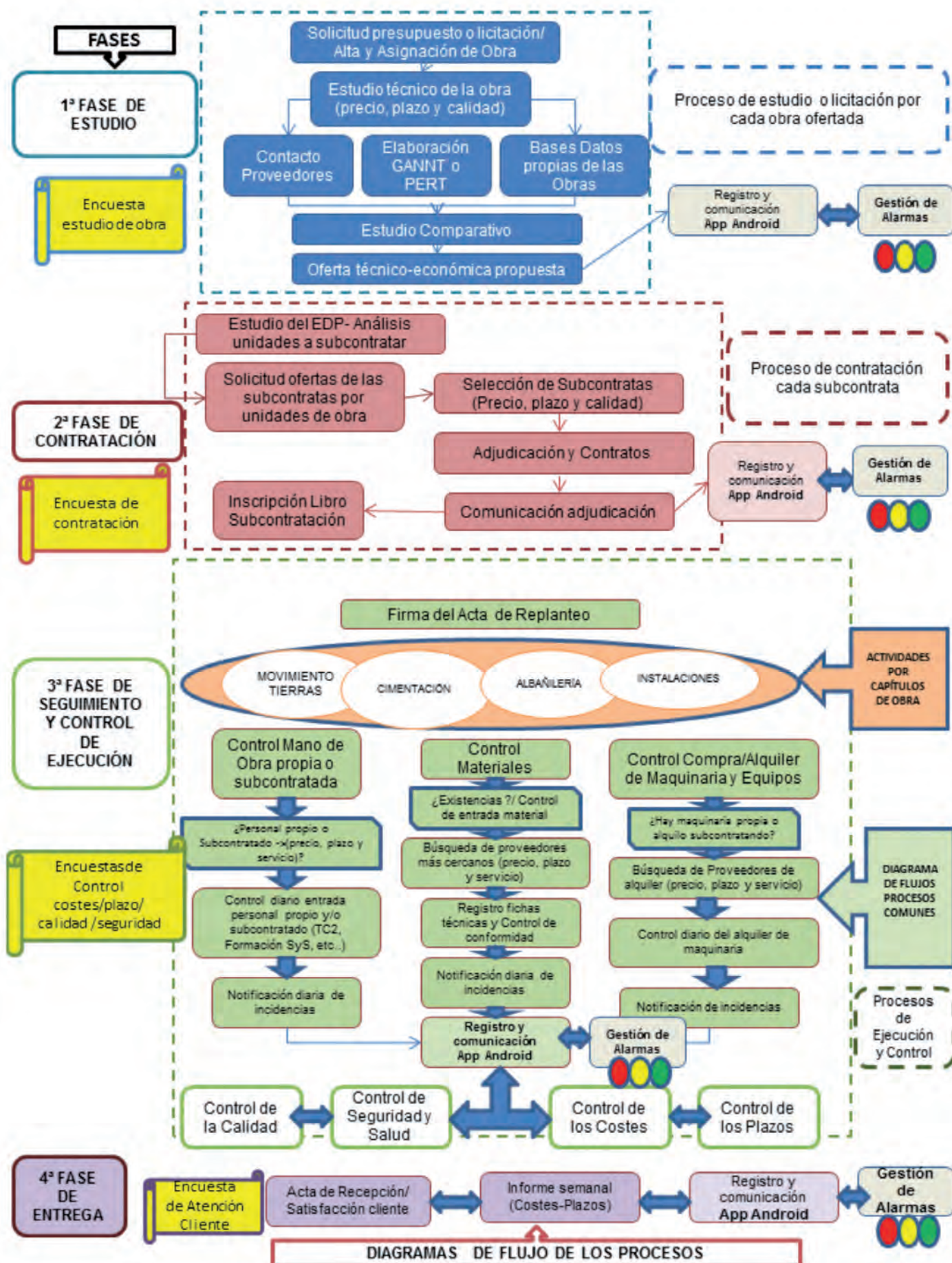


Fig. 1: Diagrama de flujo de los procesos en cada una de las fases de obra

mismo. Para los procesos de ejecución, se enviará información discriminada de las incidencias en función de su importancia y/o mayor o menor gravedad e impacto en el plazo, coste, calidad o seguridad. Asimismo, en los procesos de selección se tendrán en cuenta las ofertas temerarias en plazo y/o precio, considerando como tales aquellas que supongan una rebaja por encima del 25% sobre la media de las ofertas recibidas. Las ofertas se enviarán de forma interactiva a los departamentos de Compras y Jurídico para su análisis.

Los resultados de los cuestionarios realizados a los agentes internos y externos sobre el nuevo sistema permiten valorar su efecto y nivel de aceptación, siendo la escala utilizada: 1: Muy desfavorable, 2: Desfavorable, 3: Regular, 4: Favorable, 5: Muy favorable.

2.1. DEFINICIÓN DE PROCESOS Y ACTIVIDADES Y DE SUS ACCIONES DE MEJORA

2.1.1. Proceso de estudio de obras

Son las actividades relacionadas con la preparación de una oferta para el cliente.

2.1.1.1. Llamada a proveedores

Actualmente el Jefe de Producción dedica mucho tiempo a preparar documentación y localizar empresas. La aplicación permitiría:

- Volcar la información del proyecto de .bhz/.bc3 (formato del software presto.obra) a Excel, y de éste al sistema operativo elegido.
- Aviso automático diario al dispositivo móvil del proveedor.
- Disponer de una base de datos común de proveedores, permitiendo seleccionar los mejores precios, descartando proveedores problemáticos, y formas de pago incompatibles.
- Envío de recordatorios desde la aplicación mejorando tiempos de respuesta.

2.1.1.2. Preparación de presupuestos

Enviar la documentación de cada unidad de obra al proveedor y preparar la información de las partidas para los documentos de comparación, adjudicación y contrato. La aplicación permitiría:

- Si el proveedor colabora con la App, únicamente tendría que usar el asistente diseñado para introducir el precio de cada unidad de obra y validar el presupuesto. Esto supondría ahorro para el proveedor y permitiría que la aplicación recibiera los precios y los introdujera en la hoja del comparativo.
- El proveedor comunicaría a través de la aplicación el plazo de entrega.

- El proveedor podría acceder a la aplicación para conocer el estado de su oferta permitiéndole mejorarla.
- Se rechazarían aquellas ofertas que incurran en temeridad de plazo o precio.

2.1.2. Proceso de contratación

Son actividades que registran un alto número de errores. La aplicación permitiría:

- Facilitar la tarea a la subcontrata para responder a una solicitud desde cualquier punto, aumentando así sus posibilidades de adjudicación.
- Evitar pérdidas de documentos, retrasos u olvidos.
- Disponer del Anexo del contrato relacionado con las partidas contratadas inmediatamente.
- Enviar notificación al adjudicatario y lista de obligaciones con fecha límite cuando es validado, enviando la documentación de la empresa y los trabajadores.
- Permitir la subsanación en la falta de algún documento evitando retenciones de pagos o expulsiones de trabajadores, mediante el aviso al proveedor.

Los resultados obtenidos de las encuestas que refuerzan la necesidad de controlar los procesos, se exponen en las Tablas I y II (ver Anexo).

2.1.3. Proceso de compra

Aquí existen dos situaciones, una durante el estudio de la obra, donde se dispone de tiempo suficiente para analizar cantidades y proveedores más cercanos, y otra, en obra, donde el Encargado o el J.O. sólo disponen del teléfono móvil para realizar pedidos y búsquedas de proveedores.

Todo esto genera fallos en la gestión del stock, problemas en la adquisición de materiales, falta de registro de entrada-salida, inexistencia de índices de consumo por unidad de obra, etc., detectándose que en el 90% de los casos, no se revisan los materiales y directamente se realizan las compras generando duplicados. En el alquiler se detectaron problemas para contabilizar el gasto diario de maquinaria por falta de mecanismos de control para determinar costes mensuales, e impedir días ociosos de alquiler. La aplicación permitiría el control de los materiales y equipos que se consideran críticos para la ejecución de la obra, cuya falta o escasez podría ocasionar incluso la paralización de la misma. Para ello, en los procesos de compra, se incorporaría en la gestión de incidencias, el envío de alarmas al J.O., Encargado y al departamento de Compras, cuando se estuviera a punto de consumir las existencias con al menos 7 días naturales

previos. Así, el punto de pedido de cada material o equipo, se calcularía sumando estos siete días al tiempo mínimo de fabricación de dicho material o equipo.

La aplicación permitiría:

- Evitar duplicados de pedidos por el J.O. y el Encargado.
- Disponer de una herramienta para el registro de E/S de materiales y sus consumos.
- Almacenar las compras en la base de datos aportando información al J.O.
- Controlar los días de alquiler, y avisar al J.O. del límite de coste asignado en el estudio de obra, o el envío de petición de retirada al proveedor.
- Ofrecer una base de datos con geolocalización del proveedor más cercano, precios y plazos de entrega.

Los resultados obtenidos de las encuestas se muestran en la Tabla III (ver Anexo).

2.1.4. Proceso de control de plazos y calidad

2.1.4.1. Planificación de la obra

Actualmente la empresa realiza un cronograma por subcontrata y el control se realiza por visita a obra o por información del encargado. La App permitiría generar un cronograma sencillo, conectado a los consumos de materiales del proceso de compra y con los costes de producción del proceso, de modo que se compare lo real con lo planificado. La aplicación permitiría:

- Evitar retrasos por falta comunicación, pues la aplicación notificará al J.O. los registros diarios.
- Registrar y vincular datos (costes y plazos).

2.1.4.2. Seguimiento del plan de calidad y de medio ambiente

El problema detectado al validar manualmente los formularios, se resume en los siguientes ítems:

- Más gastos generales.
- Mayor tiempo.
- Olvido en su preparación.
- Desplazamientos.
- Transferencia para su firma.
- Pérdidas y deterioros.

El caso más desfavorable es el plan de calidad, documento extenso que permite inspeccionar cada unidad ejecutada. Asimismo, existen actividades que requieren control y decisiones para evitar excesos en la gestión de residuos. La aplicación permitiría:

- Reconocer fechas y unidades en ejecución desde el planning, para mejorar el control de la calidad, notificando días sin control.

- Localizar gestores de residuos y plantas próximos.
- Ayudar a implantar medidas para la gestión de residuos y eficiencia energética.
- Controlar los registros de ensayos.
- Desarrollar y enviar los formularios del sistema de gestión.

Los resultados se exponen en la tabla IV (ver Anexo).

2.1.5. Seguimiento y control de costes

2.1.5.1. Control de costes

La dirección de empresas exige unos controles mensuales sobre la marcha de la

obra, gastos, imprevistos, etc., para disponer de datos en la toma de decisiones (Fig. 2).

El problema consiste en no detectar los excesos e imprevistos hasta analizar las cuentas mensuales, en parte, por no disponer de datos hasta contabilizar los albaranes. La aplicación permitiría:

- Registro diario de las unidades ejecutadas y material consumido.
- Volcado de los consumos y certificación mensual de obra.
- Las certificaciones y facturas se obtienen con un toque.
- Aplicación de técnicas modernas para el seguimiento y control de cos-

tes (Técnica del Valor Ganado [8]).

- Control de desviaciones de costes (IAC, Índice de Actuación en Costes o CPI, *Cost Performance Index*)
- Control de desviaciones de plazos (IAP, Índice de Actuación en Plazo o SPI, *Schedule Performance Index*)

Esta actividad estaría enlazada con otras permitiendo un volcado diario de datos (Fig. 3).

El sistema recogería datos y generaría gráficas para su análisis facilitando la toma de decisiones.

Como ejemplo, se muestran las tablas (coste real-coste presupuestado) que medirían la evolución real de los costes, y las desviaciones presupuestarias. Los gráficos de dispersión (Fig. 4) son útiles para ilustrar los patrones [9]. Los resultados se exponen en la Tabla V (ver Anexo).

2.1.6. Procesos de control de seguridad y salud en la obra

2.1.6.1. Control del personal

El control del personal se realiza mediante el registro de entrada a obra y control de su documentación. La primera permite conocer el coste imputable del salario del empleado en cada obra, y la segunda permite el control del personal subcontratado.

Actualmente la subcontrata envía la documentación al contratista y éste debe revisarla, clasificarla e imprimirla para desplazarla a obra. El resultado de este proceso son demoras y falta de actualización del libro de la subcontratación (Fig. 5).

La aplicación permitiría:

- Evitar los retrasos por falta de documentación y retenciones de pagos a subcontratas.
- Mejorar el control en obra del personal y la documentación asociada.
- Evitar la entrada de personal no autorizado.

2.1.6.2. Control de la seguridad y salud

Se pretende que la App sea una herramienta de ayuda y mejora de la comunicación y archivo documental de seguridad, entre los agentes implicados: Encargado, J.O., Coordinador y el servicio de Prevención externo de la empresa. Los resultados se muestran en la Tabla VI (ver Anexo).

2.1.7. Proceso de atención al cliente

Esta actividad está ausente en la mayoría de constructoras al no existir un responsable con funciones específicas

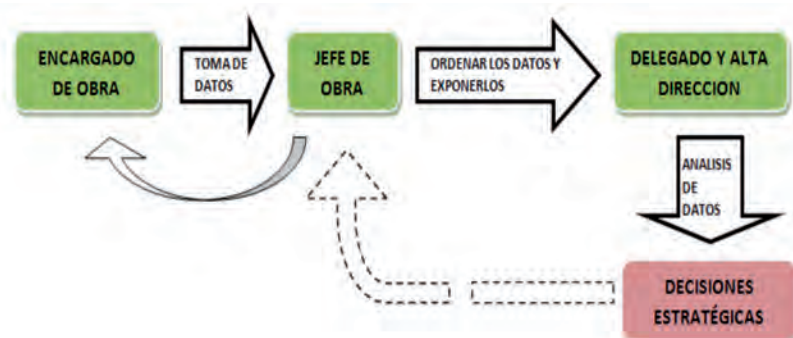


Fig. 2: Ciclo del control mensual de los costes de la obra

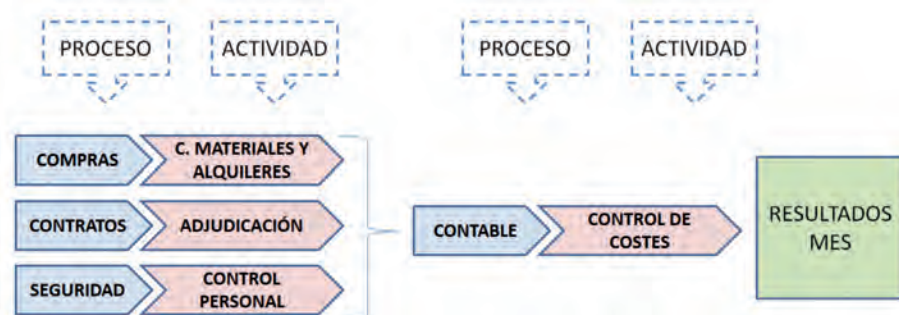


Fig. 3: Dependencia del control de costes con otras actividades

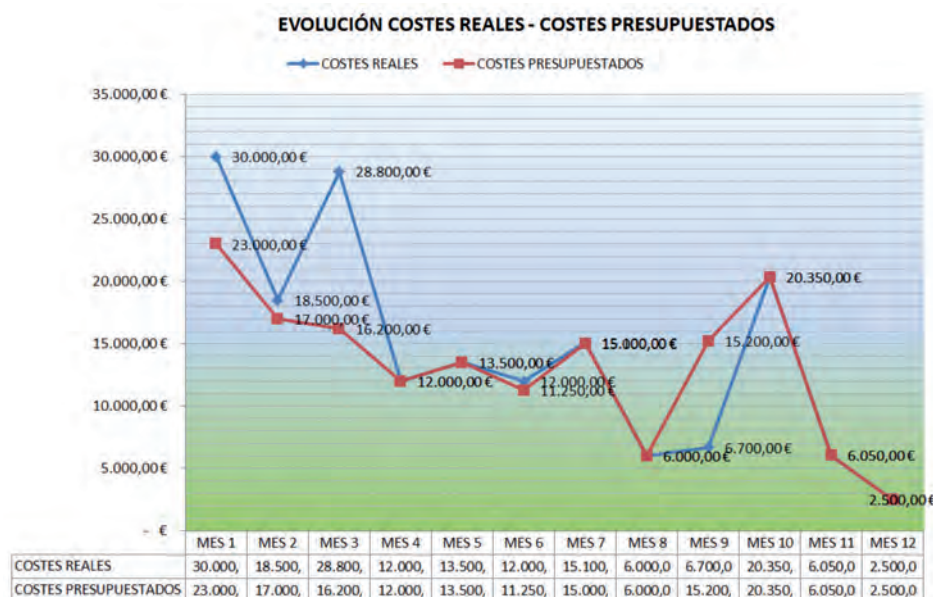


Fig. 4: Gráficos de costes reales y presupuestados



Fig. 5: Comparativa entre ciclo esperado y real en la entrega de documentación

para dicha misión, y un departamento encargado de atender las reclamaciones de clientes. Por esta razón, las reclamaciones de los clientes van a los J.O. que por sobrecarga de trabajo no disponen de la capacidad suficiente para solucionarlas. La aplicación permitiría emitir informes temporales (diarios o semanales) de incidencias, así como mantener informado al cliente de cualquier desviación en precio, plazo o cambios en el proyecto.

- Los usuarios accederían a informes de seguimiento y documentación propia de la obra (contrato, actas, certificaciones, planning, seguimiento y control de costes y plazos, desviaciones y acciones correctoras, manuales de funcionamiento y mantenimiento, y acceso a fichas técnicas).
- Al mismo tiempo, se pretende abrir una ventana a la obra para que el cliente esté informado de su evolu-

ción, por lo que tendría la posibilidad de instalar en su dispositivo móvil la App para realizar las siguientes tareas (Fig. 6):

- Acceso al cronograma para ver las desviaciones de costes y plazos en tiempo real.
- Acceso al 'Diario de Obra' para consultar el planning, desviaciones, acciones correctoras y observaciones.
- Fotografías de la obra.

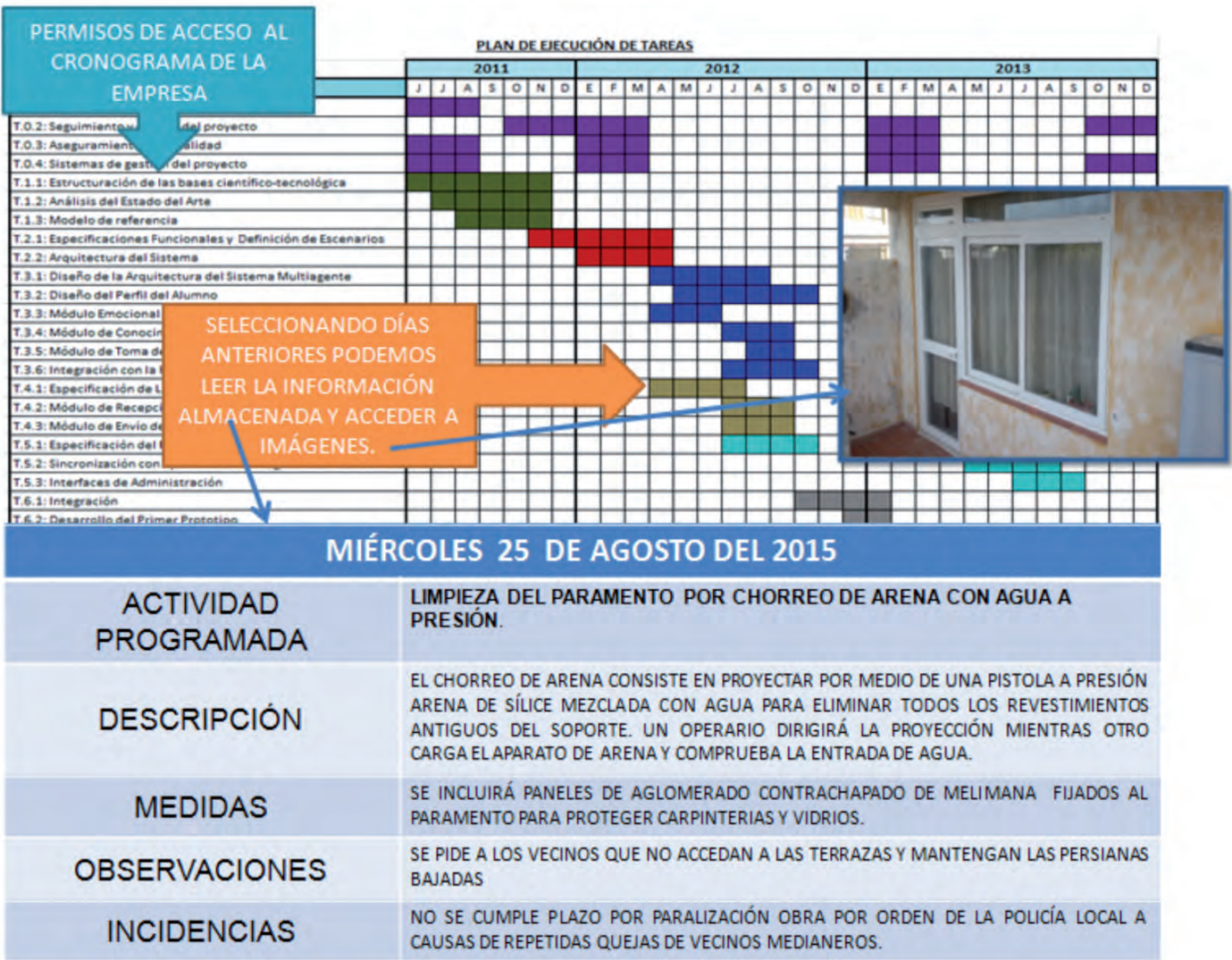


Fig. 6: Acceso del cliente a la información de la obra

- Un apartado de cambios consensuados u otras incidencias.

- Conexión entre promotor-constructor y project management, permitiendo sinergias de colaboración, y ofreciendo al cliente un proyecto mejor definido y actualizado.

Este apartado es de gran interés, pues actualmente estos dos grupos actúan de modo independiente. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla VII (ver Anexo).

3. CONCLUSIONES

La aplicación a desarrollar en un futuro, sería fruto de la experiencia y de los resultados observados en las encuestas realizadas, y su puesta en práctica, permitirá mejorar la capacidad de gestión y control, para los procesos de estudio, contratación y ejecución de obras de construcción como alternativa a la metodología actual. Su potencialidad y facilidad de manejo, permitiría mejorar los resultados en los procesos, controlar mejor los plazos de ejecución y reducir los costes de producción en constructoras pequeñas o medianas, sin renunciar a competir con las grandes, sin merma de calidad o seguridad, y garantizando la plena satisfacción del cliente. Asimismo, además de optimizar el seguimiento y control de obra, se podría mejorar la calidad de los procesos y la gestión de la comunicación entre los distintos agentes implicados. Con los resultados obtenidos en el estudio se garantiza que:

- Esta App permitiría recuperar tiempos y esfuerzos para conseguir objetivos orientados a la reducción de costes y plazos de ejecución, y al aumento del volumen de contratación anual de obras.
- Los agentes externos de la empresa mejorarían los canales de comunicación con su cliente, la eficacia en la oferta y la coordinación de los pedidos, ofreciendo precios más ajustados.
- El número de fallos en los procesos se reduciría, y especialmente se eliminarían en los más sencillos, como la contratación, obteniendo como resultado menores disputas, y recuperación del tiempo utilizado en desplazamientos ociosos. Además, se reducirían costes debido a la eliminación de las causas que generan retrasos en el inicio de las obras, lo que ocasiona la paralización de los

trabajos, la devolución de materiales o la anulación de pedidos, entre otras consecuencias.

- El acceso diario y en tiempo real sobre datos de la obra, permitiría disponer de un análisis real de costes y plazos, y con ello mayor rapidez y eficacia en la toma de decisiones y procesos de mejora mediante la puesta en marcha de acciones correctoras. Los datos son un activo fundamental en cualquier empresa, y sería la ventaja competitiva diferencial.

Dentro de las nuevas aportaciones se encontrarían: la atención al cliente, la mejora de canales de comunicación y la gestión del conocimiento (know-how), así como la mejora continua, y la ampliación de la capacidad interna de la empresa, pues muchas empresas han demostrado sus consecuencias y beneficios con aspectos comerciales y de atención al cliente [10]. Con la aplicación se conseguiría:

- Un nuevo canal de comunicación con la posibilidad de subir fotografías, grabaciones de voz y chat on-line, cuyas ventajas han sido demostradas con aplicaciones ya disponibles en Google Play o App Store.
- La creación de bases de datos que permitirían compartir toda la información sobre precios, proveedores y experiencias mejorando el intercambio de información y la colaboración interna, y eliminando la falta de comunicación entre los J.O. y otros departamentos o proveedores.
- La mejora del know-how, con la participación de los usuarios mediante la aportación de sus experiencias sobre sistemas constructivos y uso de materiales poco comunes, incidencias inesperadas, procedimientos poco habituales, etc., evitando de esta forma, la pérdida de conocimiento por la movilidad del mercado laboral.
- Un apartado para clientes con el objetivo de mejorar la transparencia y su satisfacción en el producto final a lo largo de todo el procedimiento constructivo.

Respecto a otras tecnologías alternativas, como un software específico o tecnología tipo PDA, una aplicación bajo sistema Android o iOS en un dispositivo móvil, no requeriría del pago de licencias, costosos cursos de formación, largos períodos de adaptación, dependencia de un

ordenador o costes más altos de mantenimiento, entre otros.

Además, este trabajo podría ser la base para estudios alternativos sobre el uso de dichos sistemas en la construcción, e incluso se podría mejorar aumentando el número de empresas usuarias hasta alcanzar su estandarización en el mercado creando una red nacional de colaboración entre proveedores y constructoras.

PARA SABER MÁS

- [1] Estudio del sector de la construcción, perspectivas de futuro, renovación generacional e inmigración. Zaragoza: Fundación Laboral de la Construcción de Aragón, 2008. 281p. En línea: http://www.aragon.es/estaticos/GobiernoAragon/Organismos/InstitutoAragonEmpleo/Documentos/6_informe_sectoriales.pdf
- [2] Project Management Institute (PMI). Guía de los Fundamentos de la Dirección de Proyectos (PMBOK). 3ª edición. Pennsylvania: PMI, 2004. 409p. ISBN: 1-930699-73-5.
- [3] Otero-Mateo M, Pastor-Fernández A, Portela-Núñez JM. Creating value through Management and Project Management. DYNA. Ene 2015. Vol. 90-1. P. 18-18. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7182>.
- [4] Camp RC. Benchmarking: la búsqueda de las mejores prácticas de la industria que conducen a un desempeño excelente. Mexico: Panorama Editorial, S.A., 1993. 336p. ISBN: 968-380-359-8.
- [5] Comité de Automoción. Herramientas para la calidad. Madrid: Asociación Española para la Calidad, 2004. 424p. ISBN: 978-84-89359-38-3.
- [6] Caballero Fernández G, García Vázquez JM. La importancia de los stakeholders de la organización. Investigación Europea de Dirección y Economía de la Empresa. Sep 2007. Vol. 13-2. p. 13-32.
- [7] Gracia Villar S, Dzul López LA. Modelo PEF de costes de la calidad como herramienta de gestión en empresas constructoras: una visión actual. Revista Ingeniería de Construcción. Abr 2007. Vol. 22-1. p. 43-56.
- [8] Valderrama FG, Guadalupe García, R. "Dos modelos de aplicación del Método del Valor Ganado (EVM) para el sector de la construcción". En: XIV International Congress on Project Engineering. Madrid, 2010. p. 58-73. ISBN: 978-84-614-2607-2
- [9] López Cachero M. Fundamentos y Métodos de Estadística. 9ª edición. Madrid: Pirámide, 1990. 670p. ISBN: 84-368-0425-2.
- [10] Jaría-Chacón N, Arias-Aranda D. Mobile device platforms and servitization: towards an integrative model. DYNA Management. Ene 2014. Vol. 2-1. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/MN7047>

Análisis del comportamiento del hormigón en masa con adición de fibras de polipropileno

Behavior analysis of mass concrete with added polypropylene fibers

Rubén Serrano-Somolinos, María-Isabel Prieto-Barrio, Inmaculada Martínez-Pérez y Sonsoles González-Rodrigo
Universidad Politécnica de Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8197>

1. INTRODUCCIÓN

Puesto que el hormigón es el material estructural más empleado, se hace necesario estudiar materiales que mejoren su comportamiento, sobre todo en el caso de encontrarse sometidos a un incendio, en el que está en juego la seguridad de las personas. Cuando las estructuras de hormigón se encuentran sometidas a la acción del fuego, en su fase inicial se produce la vaporización de la humedad constitutiva del hormigón, lo que consume una parte importante de su energía térmica, a la vez que se produce un proceso de deshidratación del hidróxido cálcico. Este proceso hace que en esta primera fase aumente su resistencia mecánica hasta llegar a los 280 °C, punto a partir del cual decrece a medida que la temperatura en el interior del hormigón aumenta [1]. En esta disminución de resistencia influye la carga de fuego, la situación y forma de la pieza y el proceso de enfriamiento, que produce la retracción del hormigón, originando la aparición de fisuras en el interior de la matriz, que la debilitan [2,3]. Otra consecuencia importante, es la pérdida de durabilidad del elemento, ya que aumenta la fisuración y se reducen los recubrimientos al evaporarse de forma brusca el agua contenida en los poros, lo que provoca unas tensiones importantes que originan el desprendimiento explosivo del hormigón (efecto *spalling*) [4].

Puesto que el hormigón en masa es un material frágil, con una baja resistencia a la tracción, la incorporación de fibras de polipropileno puede servir de puente entre las fisuras que pueden desarrollarse, proporcionando "ductilidad" (post-agrietamiento). Las fibras son elementos

de pequeña longitud y sección, que se incorporan a la masa de hormigón para proporcionar un aumento de la resistencia a compresión y una mayor resistencia al desgarramiento y a la propagación de fisuras, aumentando así su extensibilidad [5,6]. Las fibras de polipropileno (PP), debido a sus características físicas y mecánicas, pueden reducir la permeabilidad y porosidad capilar por efecto de bloqueo de los poros en el hormigón, aumentando así la adhesión entre las fibras y el hormigón, siendo una cantidad óptima de polipropileno 0,7 kg/m³ [7,8].

Además, las macrofibras pueden colaborar estructuralmente. Sus longitudes varían de 20 mm a 60 mm y deben relacionarse con el tamaño máximo del agregado. También se utilizan para mejorar el comportamiento al fuego, ya que el número de fibras por kilogramo es muy alto. Además de sus características físico-químicas, las microfibras se caracterizan por su frecuencia, es decir, el número de fibras presentes en 1 kg, que depende de la longitud y el diámetro de las fibras [9].

Cuando el hormigón con fibras de polipropileno se encuentra sometido a la acción del fuego, la permeabilidad del hormigón aumenta entre 80 °C y 130 °C, para una vez alcanzado su punto de fusión, alrededor de 170 °C, fluir a través de las fisuras y favorecer la evacuación de los gases y del vapor de agua, lo que libera la presión en los poros y reduce el agrietamiento [10-13].

A pesar de existir investigaciones sobre el comportamiento de elementos de hormigón con fibras sometidos a fuego, no se han encontrado investigaciones sobre el comportamiento a compresión de elementos sometidos a ensayos de fuego directo, con los porcentajes de fibras añadidos y en el rango de temperaturas que se estudian en el presente trabajo, y por tanto, el objetivo de trabajo es estudiar el efecto de la incorporación de fibras de PP en estructuras de hormigón en masa, en comparación con hormigones de uso

común, cuando se encuentran sometidas a temperaturas máximas de 400°C en un ensayo a fuego real, con el fin de evaluar su capacidad mecánica, su fisuración y su interfase, antes y después de someterlas a una agresión térmica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar el efecto de las fibras de PP en el comportamiento a compresión del hormigón en masa, se realizaron dieciocho probetas cilíndricas (200 mm x 100 mm de diámetro) utilizando un hormigón en masa (HM-25) según la instrucción de hormigón estructural EHE 08 [14], con una dosificación de c: a: g: w = 1: 2: 3: 0,5, según la dosis utilizada en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid (ETSEM). De las dieciocho probetas, se realizaron seis sin adición, seis contienen un 1 % en peso de cemento de fibras de PP de 20 mm de longitud y 0,3 mm de diámetro (Sikafiber tipo M-12) y las seis restantes, contienen fibras de PP al 2% en peso de cemento. Para preparar las probetas, se procedió a pesar por separado cada uno de los materiales utilizados. La mezcla se realizó en una amasadora planetaria de eje vertical con una capacidad máxima de 100 litros, en la que se introdujeron los materiales en el siguiente orden: grava, cemento y arena. Para incorporar las fibras PP a la masa de hormigón, se realizó un amasado manual. Después de incorporar todos los materiales excepto el agua en la amasadora, se llevó a cabo el proceso de amasado con las paletas giratorias durante dos minutos, con el fin de homogeneizar toda la mezcla seca. Posteriormente, se vertió gradualmente el agua, teniendo en cuenta el contenido de humedad de los áridos, hasta que se observó visualmente una consistencia plástica del hormigón. La duración del proceso de amasado fue de aproximadamente 5 minutos, incluyendo los 2 minutos de amasado en seco. Una vez preparado el hormigón fresco, se procedió al llenado de los moldes, cuyas características geométricas cumplen con los parámetros establecidos en la norma UNE-EN 12390-1:2013 [15].

Después de llenar los moldes con el hormigón, de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-2:2009 [16], las probetas se mantuvieron durante 24 horas a una temperatura ambiente de laboratorio de



Fig. 1: a) Ensayo de resistencia a compresión, pre-factura y fisuración de la matriz del hormigón con fibras; b) Ensayo a fuego directo y probeta de hormigón después del incendio

aproximadamente 22 ± 3 °C y 60 % de humedad relativa antes de demoldarlas y curarlas en una cámara húmeda durante 28 días. A continuación, sobre la mitad de las probetas, se procedió a realizar el ensayo de resistencia a compresión de probetas de hormigón endurecido, según UNE-EN 12390-3 [17], en una prensa universal MIB 60 / AM, según se muestra en la Fig. 1a. El resto de las probetas fueron ensayadas a fuego directo según la norma ISO R-834 [18] y los diferentes criterios establecidos en las normas UNE-EN 1363-1, UNE-EN 1363-2 y UNE-EN 1365-4 [19-21], intentando reproducir las condiciones más similares posibles a un incendio real en el interior de un edificio y estudiar la exposición del elemento estructural al fuego directo, evitando la precisión de temperatura controlada en el horno a lo largo de la masa y causando diferencias en temperatura en sus diferentes zonas. Se consideró un potencial calorífico de 40 kg de madera por metro cuadrado (kg/m²), que es equivalente al valor medio del potencial calorífico en incendios de edificios. El ensayo se realizó durante una hora, midiendo la temperatura en la superficie de las muestras, mediante un termómetro compacto modelo "Testo 845" (Fig. 1b). La temperatura máxima alcanzada es 400 °C, con una temperatura media de 200 °C $\pm$ 25 °C. Una vez ensayadas a fuego, se dejaron enfriar lentamente las probetas, esperando a que el calor se disipase para retirarlas de la rejilla y evitar la concentración de tensiones y el aumento de la fisuración. Las probetas sometidas a la agresión térmica se ensayaron posteriormente a compresión, según UNE-EN 12390-3 [17].

La caracterización química y microscópica de las muestras se realizó después del ensayo a compresión. La microscopía electrónica de barrido (SEM), que permite la caracterización de la estructura de las probetas, fue utilizada para examinar la estructura interna del hormigón con fibras y compararla con el hormigón sin

fibras antes y después del ensayo a fuego directo. Las imágenes se obtuvieron con electrones secundarios y retrodispersados, y la escala de trabajo utilizada osciló entre 50 y 10000. Con el detector de rayos X (EDX) se realizaron microanálisis puntuales y zonales. El equipo SEM utilizado fue el JEOL JSM-820 con microanálisis. El software utilizado para la adquisición, procesamiento y evaluación de los datos EDX es Oxford ISIS-Link.

Las muestras obtenidas por el método de corte fresco fueron revestidas con oro para lograr la conductividad necesaria en la superficie. Mientras que las imágenes fueron tomadas utilizando el microscopio electrónico de barrido, se utilizó un sistema INCA con un detector de rayos X para el análisis semicuantitativo de la composición química de los materiales ensayados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor más característico del gráfico tensión-deformación es la resistencia del hormigón, a partir de los datos de la fuerza en kN y del área de la sección de la probeta cilíndrica en mm² y la longitud de la misma. Los resultados obtenidos de la resistencia a compresión del hormigón " σ_c " en N/mm² y la deformación del hormigón " ϵ_c ", se obtienen a partir de las fórmulas (1) y (2).

$$\sigma_c = F/A_c \quad (1)$$

$$\epsilon_c = \Delta L/L \quad (2)$$

En las gráficas tensión-deformación, los datos más representativos son analizados, entre los que se incluyen la tensión máxima del hormigón " σ_{max} ", la tensión última del hormigón " σ_{ult} ", la deformación máxima del hormigón " ϵ_{max} ", la deformación última del hormigón " ϵ_{ult} ", la máxima densidad de energía de la deformación E_{max} (N/mm²) y la densidad de energía de deformación última generada durante el ensayo " E_{ult} " (N/mm²). La densidad de energía de deformación es la energía de deformación por unidad de volumen, obtenida a partir de la siguiente fórmula (3).

$$E = \int_0^{\epsilon} \sigma \cdot d\epsilon \quad (3)$$

Fig. 2 muestra una comparación entre las probetas con 1 % y 2 % en peso de cemento de fibras de PP y probetas sin PP añadido, antes y después del ensayo a fuego directo. Antes del ensayo a fuego, las probetas de hormigón en masa con 1% y 2 % de fibras en peso de cemento muestran valores de resistencia similares independientemente del porcentaje de fibras. El aumento continuo de la carga

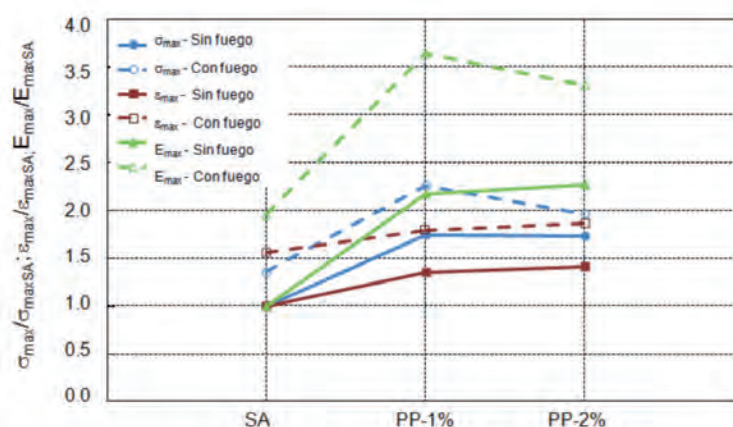


Fig. 2: Comparación de σ_{max} , ϵ_{max} y E_{max} entre hormigón con 1% y 2% de fibras de PP y sin adición, antes y después del ensayo a fuego directo

provoca el aumento de la deformación y la densidad de energía de deformación también aumenta con el porcentaje de fibras. Para ambos porcentajes de fibras, la tensión máxima es mucho mayor que en las probetas sin PP añadido, aumentando la resistencia hasta el 70 %.

Después del ensayo a fuego, la presencia de fibras de polipropileno en porcentajes del 1 % y 2 % mejora considerablemente la resistencia del hormigón cuando se someten a la acción del fuego para el rango de temperatura de $200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, aumentando la tensión hasta el 125 %, pero no mejora su comportamiento al aumentar el porcentaje de fibras añadido.

Fig. 3 muestra que la presencia de fibras de polipropileno hace que las temperaturas alcanzadas sean menores que en

las muestras sin adiciones, pero aún más importante es el enfriamiento gradual producido por las fibras, ya que evita fisuras en el material, como consecuencia del punto de fusión del polipropileno ($173\text{ }^{\circ}\text{C}$), que convierte las probetas en un material más elástico. No existen diferencias de temperatura significativas entre las probetas con 1 y 2 % de fibras de polipropileno.

El SEM revela en las probetas de HM-25 sin PP (Fig. 4a), la presencia del gel de silicato cálcico hidratado (CSH) formado por la hidratación de la pasta. Puede verse con claridad, que la zona comprendida entre el árido y la matriz presenta una textura globular con una perfecta adherencia, lo que indica una excelente homogeneización. Si se analiza más pormenori-

zadamente la matriz de un nódulo, puede observarse la formación de pequeños grumos gel de CSH, junto con finas fibras de silicato cálcico hidratado cristalizado en forma de acícula junto con otras algo más gruesas de etringita. La textura del material en forma acicular, que se observa en la figura a la derecha, permite apreciar que las fibras están orientadas radialmente hacia el exterior del nódulo, conformando una estructura cerrada y densa, perfectamente trabada.

El silicato cálcico hidratado es uno de los compuestos hidratados principales del cemento y el responsable de sus propiedades resistentes, confiriendo cohesión a la matriz cementicia y rigidez al conjunto pasta-árido.

En la Fig. 4b, se muestran los resultados del estudio microscópico sobre las probetas con adición de 1% y 2% en peso de cemento de PP. Como se puede observar, la unión entre el árido y la pasta de cemento es aún más definida, consiguiendo prácticamente que aparezca un único material continuo y homogéneo, alcanzando el monolitismo deseado. Los nódulos anidados de CSH también se muestran en una etapa más desarrollada, donde las matrices de gel de silicato se agrupan, dejando espacios cada vez más cerrados y trabados por las fibras de CSH y la fase AF_r. Como puede observarse en este caso, la propia fibra de PP está recubierta por una malla con formas aciculares de menor tamaño. Estos datos justifican el mejor comportamiento demostrado en los ensayos de resistencia a compresión en las probetas que contienen fibras de polipropileno.

Al mismo tiempo que se realizan las imágenes con el microscopio electrónico de barrido, se obtiene el análisis semicuantitativo de la composición química elemental de los áridos del hormigón y de la matriz mediante energía dispersa de rayos X. En las descripciones mineralógicas aparece la presencia de SiO₂, también llamado gel CSH, porque tiene la fórmula CaO SiO₂ H₂O. Es un silicato cálcico que ha sufrido una reacción de hidratación para convertirse en un gel cementoso. Generalmente, las pastas de cemento hidratadas están constituidas por un conjunto de fases cristalinas tales como: portlandita (Ca (OH)₂), etringita y monosulfoaluminato cálcico hidratado. Al fraguar el silicato cálcico hidratado, se consigue trabar el árido (arena y/o grava) con la propia matriz.

La presencia de CaO es un término que designa todas las formas físicas en las que el óxido de calcio puede aparecer y se obtiene como resultado de la calcinación de rocas calizas o dolomías. Finalmente men-

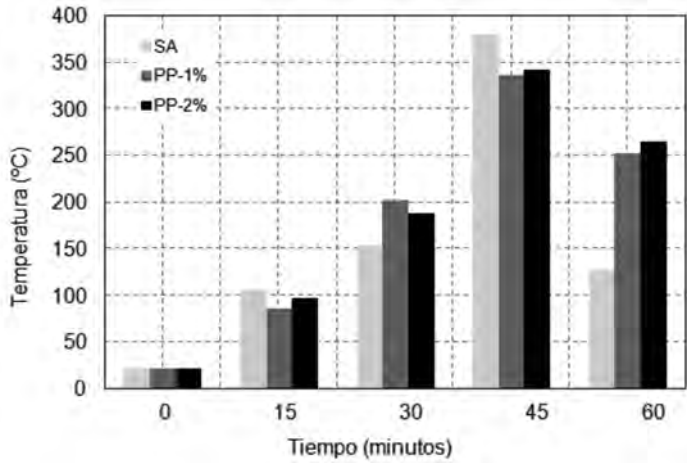


Fig. 3: Comparación de las temperaturas alcanzadas en el ensayo a fuego directo en probetas con fibras de polipropileno al 1% y 2% y sin adiciones

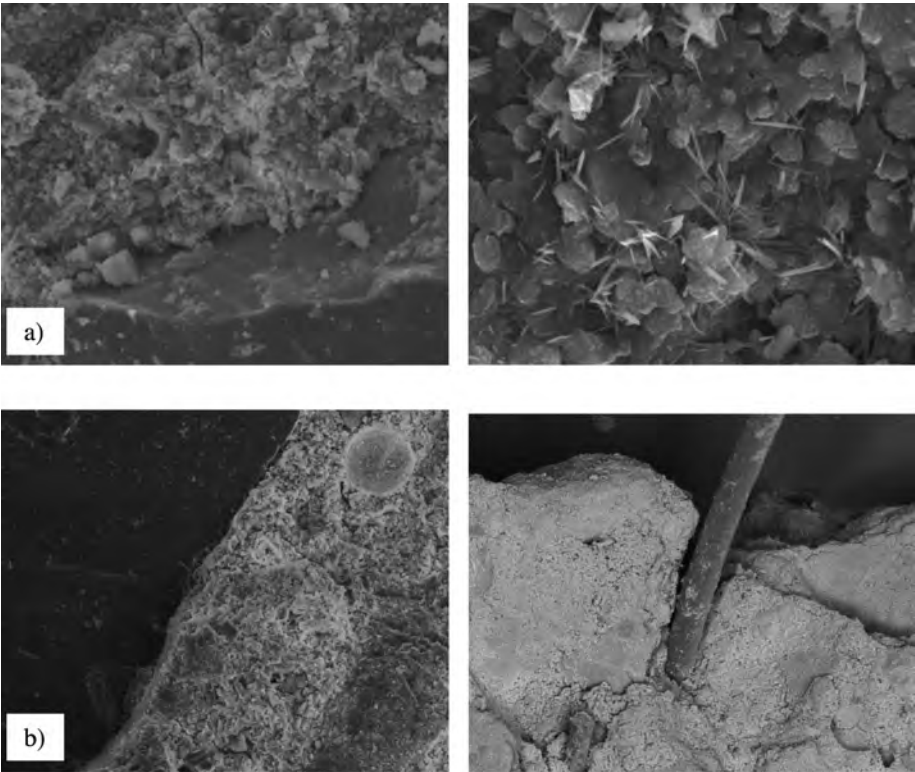


Fig. 4: Microscopía electrónica de barrido (SEM) en hormigón sin adiciones (a) y con PP al 1% y 2% (b)

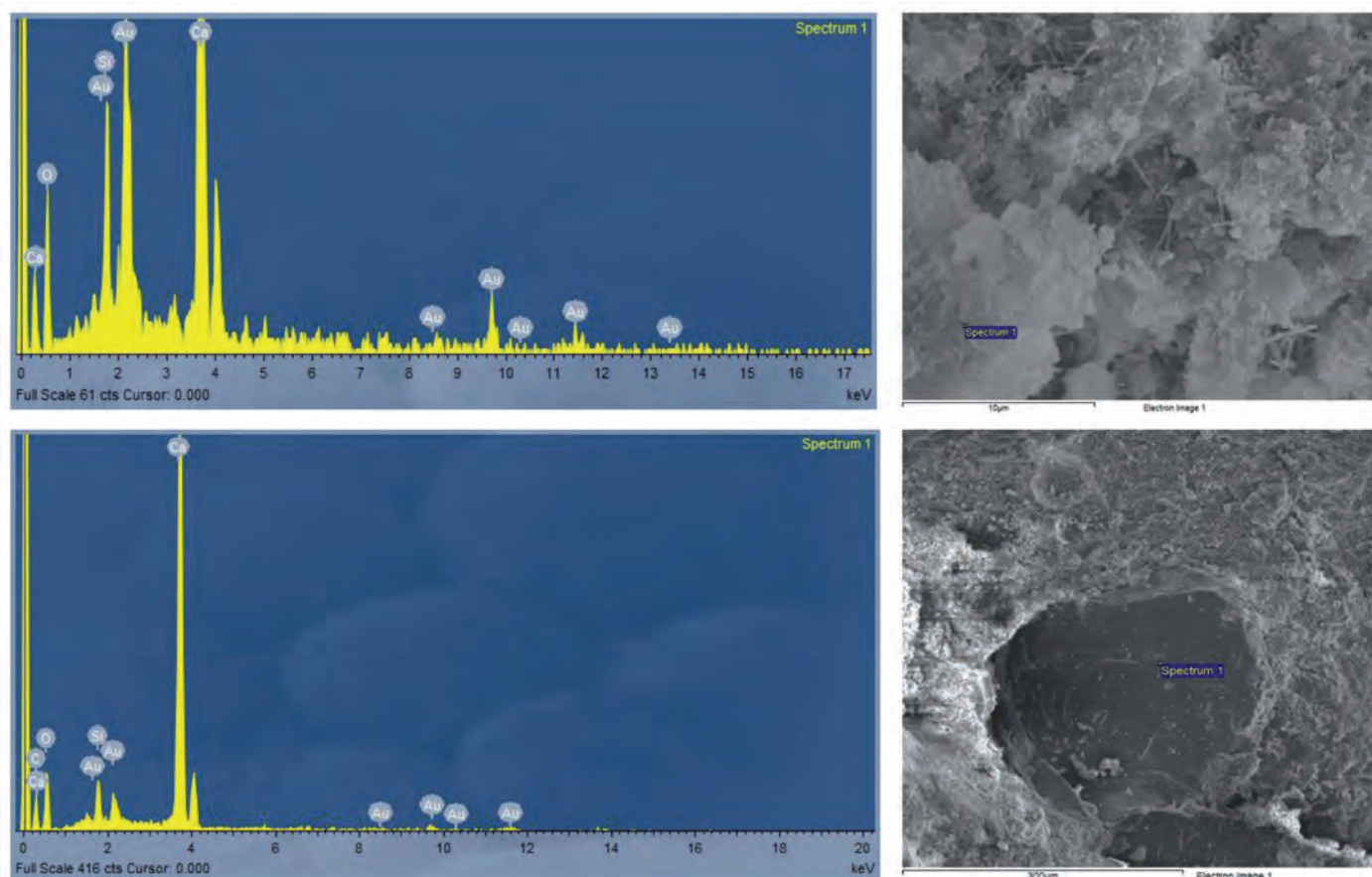


Fig. 5: Microanálisis por energía dispersa de rayos X en probetas sin adiciones (a) y con PP (b)

cionar que la presencia de oro (Au) se debe al recubrimiento de oro para lograr una superficie conductora. Este análisis muestra también la presencia de carbono en el espectrograma de la figura 5, que demuestra la existencia de polipropileno (PP) presente en forma de fibras. El polipropileno, al ser un polímero termoplástico, parcialmente cristalino, produce el efecto de mayor adhesión en el interior de la pasta.

Saber cómo varía la composición mineralógica y la disposición a nivel de las fibras en una probeta de hormigón después de una exposición al fuego, es necesario para explicar el diferente comportamiento en cuanto a su resistencia a compresión. Como puede verse en la Fig. 6a, la unión de la matriz cementicia y la fibra de polipropileno es casi perfecta, consiguiendo como resultado que el material trabaje solidariamente y permita sumar las propiedades intrínsecas de la fibra de polipropileno.

La Fig. 6b corresponde a una muestra sometida al ensayo a fuego directo, donde puede observarse con absoluta claridad una dispersión de las fibras de polipropileno por la matriz de cemento, aumentando la abertura de poros en la masa. La matriz cementicia fragmentada queda unida por las fibras de polipropileno diseminadas, que ocupan los espacios de los poros existentes de la deshidratación. El aumento

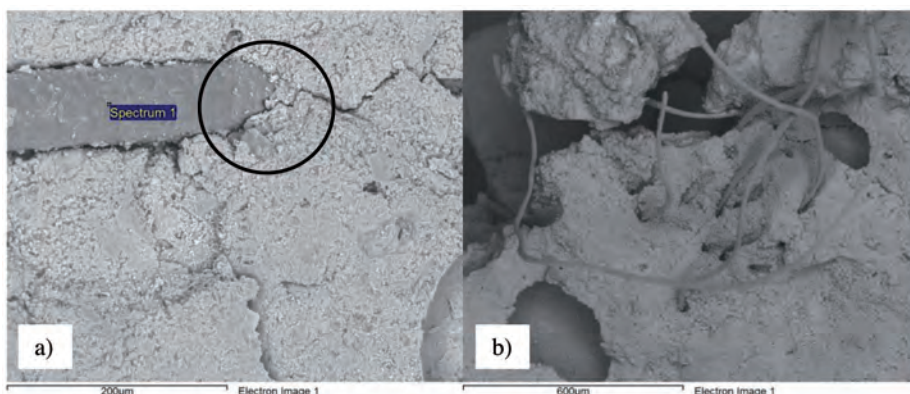


Fig. 6: Microscopía electrónica de barrido (SEM) en hormigón con PP, a) antes del ensayo a fuego y b) después del ensayo a fuego

de presión y temperatura en el interior del cemento provoca la fusión del polipropileno dada la temperatura media de 200 °C alcanzada en la probeta, fundiendo las fibras y generando numerosos hilos en estado plástico de polipropileno que ocupan los huecos de la matriz cementicia y reconstruyendo así los huecos y fisuras de las probetas, logrando un mejor comportamiento mecánico y con mejores resultados en este rango de temperatura.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo experimental se ha estudiado la influencia de la adición

de fibras de polipropileno en el comportamiento a compresión del hormigón de masa, tanto antes como después del ensayo a fuego directo, tanto desde el punto de vista de su resistencia como de su deformación, obteniendo las siguientes conclusiones:

- El hormigón de masa con adición de fibras de polipropileno en porcentajes del 1% y 2% en peso de cemento soporta mayores resistencias en comparación con el hormigón sin PP añadido. La elasticidad del material con adición de PP aumenta con la cohesión entre los materiales que lo forman y proporciona un mejor con-

trol de la fisuración evitando la abertura y la propagación de las fisuras, no existiendo diferencias significativas en el comportamiento entre las probetas con 1% y 2% en peso de PP añadido.

- El único inconveniente es que hay una mayor pérdida de ductilidad una vez que se alcanza la máxima resistencia.
- El hormigón con adición de polipropileno, sometido a un fuego directo de 400 °C de temperatura máxima, alcanza temperaturas más bajas y se enfría más lentamente que el hormigón sin adiciones, reduciendo la fisuración del hormigón.
- La resistencia a compresión del hormigón con fibras de polipropileno es mayor que la del hormigón sin adiciones, cuando se somete a agresiones térmicas de 400 °C de temperatura máxima, pero no mejora su comportamiento añadiendo más porcentaje de fibras de polipropileno.
- El uso del SEM ha permitido identificar el gel CSH, el silicato cálcico hidratado en forma de acícula y otras fibras más gruesas de etringita.
- Cuando se añaden fibras de polipropileno, las matrices de gel de silicato se agrupan, cada vez más cerradas, dejando la propia fibra de PP cubierta por una malla con formas aciculares más pequeñas, lo que corrobora el mejor comportamiento demostrado en las pruebas de resistencia a compresión de las muestras que contienen fibras de polipropileno.
- Cuando el hormigón con fibras de polipropileno se somete a la acción directa del fuego, el uso del SEM ha permitido observar el aumento de la porosidad en la matriz de cemento y la fusión de las fibras de polipropileno, que ocupan los poros del cemento y mejoran su comportamiento mecánico.
- Los resultados obtenidos indican que la incorporación de fibras de polipropileno es muy buena alternativa al hormigón tradicional, ya que mejora su resistencia y ralentiza su fisuración, especialmente en caso de ser sometido a la acción del fuego, o que sufren altas temperaturas.

Como continuación de este trabajo, el comportamiento del hormigón de masa será estudiado sujeto a la acción directa del fuego, con otras adiciones.

PARA SABER MÁS

- [1] Eamon CD, Jensen E, "Reliability analysis of reinforced concrete columns exposed to fire". *Fire Safety Journal*. November 2013. Vol. 62 –C. p.221–229. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.10.002>)
- [2] Bratina S, Cas B, et al. "Numerical modelling of behaviour of reinforced concrete columns in fire and comparison with Eurocode 2". *International Journal of Solids and Structures*. October 2005. Vol. 42–21–22. p.5715–5733. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.03.015>)
- [3] Doo-Yeol Y, Kyung-Hwan M, et al. "Shrinkage and cracking of restrained ultra-high-performance fiber-reinforced concrete slabs at early age". *Construction and Building Materials*. December 2014. Vol. 73. p.357–365. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.097>)
- [4] Lura P, Petro Terrasi G. "Reduction of fire spalling in highperformance concrete by means of superabsorbent polymers and polypropylene fibers. Small scale fire tests of carbon fiber reinforced plasticprestressed self-compacting concrete". *Cement & Concrete Composites*. May 2014. Vol. 49. p.36–42. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.02.001>)
- [5] López-Buendía AM, Romero-Sánchez MD, Climent V, et al. "Surface treated polypropylene (PP) fibers for reinforced concrete". *Cement and Concrete Research*. December 2013. Vol.54. p.29–35. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.08.004>)
- [6] Ramezaniapour AA, Esmaili M, et al. "Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers". *Construction and Building Materials*. July 2013. Vol. 44. p.411–418. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.076>)
- [7] Kakooei A, Akil HM; Jamshidi M, et al. "The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures". *Construction and Building Materials*. February 2012. Vol.27. p.73–77. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.015>)
- [8] Ding Y, Zhang C, et al. "Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire". *Construction and Building Materials*. June 2016. Vol. 113. p.456–469. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.070>)
- [9] AENOR. Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad. UNE-EN 14889-2:2008. España: AENOR, 2008.
- [10] Kalifa P, Chéné G, Gallé C. "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres. From spalling to microstructure". *Cement and Concrete Research*. October 2001. Vol. 31–10.p.1487–1499. (doi:10.1016/S0008-8846(01)00596-8)
- [11] Bošnjak J, Ozbolt J, Hahn R. "Permeability measurement on high strength concrete without and with polypropylene fibers at elevated temperatures using a new test setup". *Cement Concrete Research*. November 2013. Vol.53. p.104–111. (doi:10.1016/j.cemconres.2013.06.005)
- [12] Kalifa P, Menneteau FD, Quenard D. "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures". *Cement Concrete Research*. December 2000. Vol.30–12. p.1915–1927. (doi:10.1016/S0008-8846(00)00384-7)
- [13] Al Qadi A, Al-Zaidyeen S. "Effect of fiber content and specimen shape on residual strength of polypropylene fiber self-compacting concrete exposed to elevated temperatures". *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. January 2014. Vol. 26–1. p.33–39. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2012.12.002>)
- [14] MINISTERIO DE FOMENTO. Instrucción para el hormigón estructural (EHE-08). Con comentarios de la Comisión Permanente del Hormigón. Madrid: 2010
- [15] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes. UNE-EN 12390-1:2013. España: AENOR, 2013
- [16] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. UNE-EN 12390-2:2009. España: AENOR, 2009
- [17] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009. España: AENOR, 2009
- [18] ISO 834-1:1999, Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction –Part 1: General Requirements, 2015
- [19] AENOR, UNE-EN 1363-1: 2012, Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales, AEN/CTN 23 – Seguridad contra incendios, España, 2012
- [20] AENOR, UNE-EN 1363-2:2000, Ensayos de resistencia al fuego. Parte 2: Procedimientos alternativos y adicionales, AEN/CTN 23 – Seguridad contra incendios, España, 2000
- [21] AENOR, UNE-EN 1365-4:2000, Ensayos de resistencia al fuego de los elementos portantes. Parte 4: Pilares, AEN/CTN 23 – Seguridad contra incendios, España, 2012

Morteros adicionados con metacaolín: efecto de la proporción de agregado

Mortars added with metakaolin: effect of aggregate proportion

Gregorio García-López-de-la-Osa, Mariano González-Cortina, Mercedes del-Río-Merino y Fernando Magdalena-Layos
Universidad Politécnica de Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8194>

1. INTRODUCCIÓN

La vía tradicional de mejora de morteros y hormigones se ha basado en el uso de materiales puzolánicos. Son materiales con base silíceo o silicoaluminosa, con leves cantidades de hierro, calcio, magnesio, sodio y potasio. Las adiciones de humo de sílice y de cenizas volantes son las más habituales, incrementando en general la resistencia y la durabilidad. En los últimos años un nuevo producto, de naturaleza artificial, ha venido a sumarse con los mismos objetivos; el metacaolín. Existen múltiples publicaciones sobre su uso como sustituto puzolánico parcial del cemento y sus efectos [1-5]. Estos trabajos anteriores han demostrado que la incorporación de metacaolín a los hormigones y morteros realizados con cemento tipo portland incrementa significativamente varias propiedades de los mismos.

Se mejora la resistencia a compresión debido a la mayor calidad de la microestructura del cemento hidratado. Asimismo se mejora la resistencia al ataque de cloruros y la durabilidad en entornos de sulfato-cloruro. A estas mejoras se les añade una que tiene especial relevancia en el aspecto puramente práctico del uso de las masas, la mejora de la trabajabilidad de la mezcla en fresco. El proceso químico que explica la mejora se fundamenta de la forma siguiente:

- Como es ampliamente conocido, en un mortero normal la tobermorita (silicato dicálcico hidratado), que es la responsable de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la masa, se forma tras la hidratación de la alita (silicato tricálcico) y la belita (silicato bicálcico). En esta reacción se produce también portlandita (hidróxido de calcio).
- Cuando se añade metacaolín a la mezcla, éste reacciona fuertemente

con la portlandita, formando tobermorita y además gehlenita (aluminosilicato cálcico), e hidrogranates. Todos ellos también responsables del buen funcionamiento de las pastas.

El metacaolín es un aluminosilicato ($2\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) activado térmicamente mediante calcinación controlada, entre 650 y 800° C del caolín, en horno rotatorio, con posterior micronización. Para este trabajo se ha utilizado el metacaolín suministrado por BASF, concretamente el producto MetaMax, adecuadamente caracterizado. Se presenta en forma de material pulverulento, con un diámetro de partícula equivalente de 1,3 μm . Se compone básicamente en un 98 a 99,6% de caolín calcinado ($2\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) y un 0,4 a 2% de dióxido de titanio (TiO_2). Su tono es blanco y su estructura amorfa.

En una línea diferente a trabajos mencionados, en este no se sustituye el cemento por el metacaolín sino que se utiliza como una adición a la mezcla. El cemento utilizado es CEM II/B-M (P-L) 32,5N. Las adiciones se han realizado en relación al peso del conglomerante con unos porcentajes del 5%, del 10% y del 15%. Sendas proporciones para dosificaciones con relación cemento/arena de 1:3, 1:4 y 1:5, respetando así la relación de laboratorio y utilizando dos más, que tratan de aproximar el dispositivo experimental a los morteros utilizados habitualmente en obra para fábricas.

La arena utilizada en este trabajo ha sido elegida entre las posibles del mercado, adquirible en los almacenes de ma-

teriales de construcción. Se trata de una arena natural, que se extrae en cantera, en la provincia de Segovia. Previamente a su uso se ha caracterizado convenientemente, estableciendo sus características geométricas; granulometría y contenido de finos (UNE-EN 933-1) y físicas; densidad de las partículas y absorción de agua (UNE-EN 1097-6). Resultando un módulo de finura de 2,99 y un contenido de finos de 0,31%

Para lograr masas homogéneamente comparables, manteniendo los porcentajes citados de adición de metacaolín y las diferentes proporciones de arena, se ha utilizado el factor de la trabajabilidad, dosificando el agua en función de la misma. Buscando en cada caso, que permita obtener diámetros de ciento setenta milímetros en el ensayo de consistencia de la mesa de sacudidas (UNE-EN 1015-3), obteniéndose proporciones entre el 65 y 106% de agua en relación al peso de cemento.

Es de destacar la mejora que se produce de la trabajabilidad de los diferentes morteros, utilizando metacaolín, en comparación con los de referencia.

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

Para el presente estudio, en esta primera fase, se han llevado a cabo los ensayos básicos de estudio de los morteros; flexión, compresión (UNE-EN 1015-11), mediante prensa de banco de la casa Iber-test, densidad en fresco (UNE-EN 1015-6), densidad del mortero endurecido (UNE-EN 1015-10) y absorción (UNE-EN 1015-18). Realizando también durabilidad (mediante ciclos de hielo y deshielo) y adherencia (UNE-EN 1015-12).

2.1. COMPRESIÓN

Dados los resultados obtenidos para las tres dosificaciones y con las cuatro posibles proporciones de metacaolín (ver Figura nº 1), se pueden hacer las siguientes afirmaciones.

- No existe una relación lineal entre el incremento de la cantidad de metacaolín y el incremento de la resistencia a compresión de los morteros.
- En general el efecto del metacaolín es siempre positivo.

DOSIFICACIÓN			
ADITIVO	REL C:S	% ADITIVO	% AGUA
METACAOOLÍN	1:3	5%	0,65
	1:3	10%	0,70
	1:3	15%	0,73
	1:4	5%	0,85
	1:4	10%	0,87
	1:4	15%	0,88
	1:5	5%	1,03
	1:5	10%	1,05
	1:5	15%	1,06

Tabla 1: Dosificaciones utilizadas

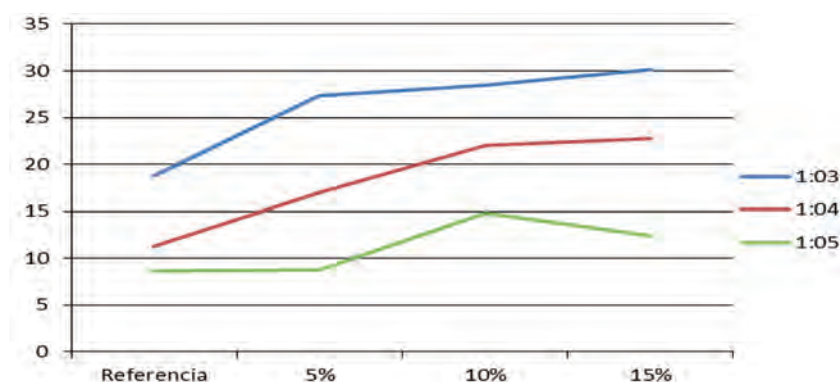


Figura 1: Resultados de compresión

- c. Existen variaciones de comportamiento en las diferentes relaciones cemento/arena.
- d. Para la dosificación 1:3 (c/a) se produce un fuerte incremento inicial de la resistencia con una adición del 5%, llegando a incrementarla un 40%, que se modera posteriormente, al 10% y el 15%, a lo largo de una recta con una pendiente del 4% aproximadamente. El incremento total de resistencia es de casi un 70% sobre la inicial sin adición de metacaolín.
- e. Para la dosificación 1:4 (c/a) el metacaolín logra duplicar la resistencia con el 15% de adición. Se mantiene el incremento de la resistencia, en la misma cantidad, en el primer escalón de aportación de metacaolín, siendo en este caso de menor importancia entre el 10% y el 15% de adición.
- f. Para la dosificación 1:5 (c/a) el efecto inicial del metacaolín es prácticamente nulo, produciéndose el efecto en el 10%, que logra casi la duplicación de la resistencia. Es relevante de este caso, el hecho de que el mayor porcentaje de aportación de metacaolín, no solo no incrementa el escalón anterior, sino que la resistencia se reduce, siendo, en cualquier caso, superior a la de la muestra de referencia.
- g. En sentido transversal se puede afirmar que la adición óptima de metacaolín se encuentra en el entorno del 10%. Coincide paralelamente con los resultados de Restrepo [6], aunque en su caso se procede a la sustitución de cemento por metacaolín.

2.2. FLEXIÓN

Dados los resultados obtenidos para las tres dosificaciones y con las cuatro

posibles proporciones de metacaolín (ver Figura nº 2), se pueden hacer las siguientes afirmaciones.

- h. Se mantiene y acentúa el comportamiento no constantemente lineal entre el incremento de la cantidad de metacaolín y el incremento de la resistencia.
- i. También se observa que el efecto del metacaolín es mucho menor en la dosificación con mayor cantidad de cemento.
- j. Para la dosificación 1:3 (c/a) el efecto del metacaolín genera un primer escalón de un 20% de incremento de resistencia.
- k. Para la misma dosificación se produce un valle en el 10% pendiente de comprobación, al no corresponderse con los resultados de otros ensayos.
- l. El mejor comportamiento se corresponde con la dosificación 1:4 (c/a), con un pico en el 10% que duplica la resistencia inicial. Este pico se ve acentuado por el descenso de resistencia que se produce con el nivel de adición del 15%.
- m. Para la dosificación 1:5 (c/a), en el primer escalón de adición, se observa un descenso de las resistencias, que también está siendo objeto de reestudio.

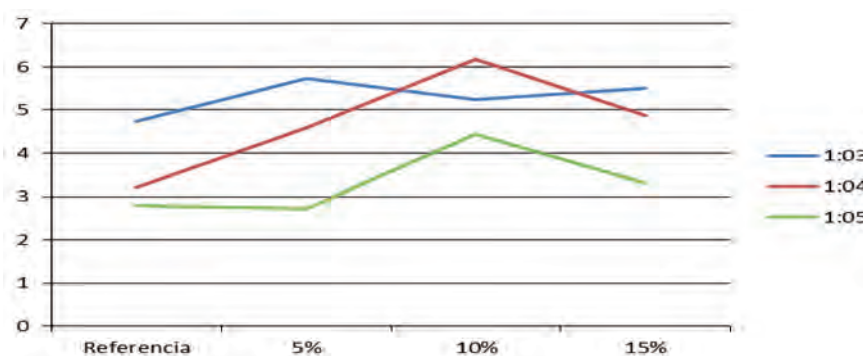


Figura 2: Resultados de flexión

m. Cabe destacar, el comportamiento homogéneo de la adición al 10% en todas las proporciones de arena/cemento.

2.3. ADHERENCIA

Los datos preliminares de adherencia indican que, utilizando metacaolín, el mejor comportamiento se produce con la dosificación con mayor contenido de cemento, es decir con la 1:3 (c/a), incrementándose de manera sustantiva en relación a las otras dos, que ofrecen unos resultados muy similares, con una leve deriva hacia la dosificación 1:5 (c/a).

2.4. DURABILIDAD

Los datos iniciales de las probetas sometidas a ciclos de hielo-deshielo y posteriormente sometidas a ensayos de compresión y flexión, muestran que el efecto del metacaolín es siempre beneficioso, siendo mejores los resultados de aquellas probetas con un mayor contenido de cemento. Cabe destacar que la compacidad de los morteros adicionados con el metacaolín, junto con el mejor funcionamiento mecánico de la pasta, logra que las probetas sometidas a veinticinco ciclos de hielo-deshielo posean resistencias mayores que las logradas con los morteros de referencia.

2.5. ASPECTOS ECONÓMICOS Y SOSTENIBLES

El beneficio económico del uso del metacaolín es indirecto, ya que representa un elevado coste directo de la elaboración del mortero, pudiendo establecerse en el entorno de diez a doce veces más que el cemento tipo portland. Sin embargo, estudios previos [7] demuestran la posibilidad de ahorrar hasta un 50% de la masa de Clinker, añadiendo el metacaolín directamente a la mezcla de producción de cemento. Con una segunda y muy importante consecuencia relacionada con la sostenibilidad cual es, la reducción de un 30% de las emisiones de CO₂.

3. CONCLUSIONES

Con los datos disponibles hasta la fecha, es posible realizar las siguientes afirmaciones:

- Primero, la confirmación de que el metacaolín mejora las propiedades de los morteros.
- Se destaca la mejora en dosificaciones mayores que el 1:3 (c/a), pero no de forma lineal continua, ya que dosificaciones, en el entorno del 1:5 (c/a), como la mayor de las utilizadas en este estudio, no son beneficiadas en la misma medida.
- El porcentaje más adecuado, entre los utilizados en este estudio, para el logro del incremento de las propiedades se encuentra en el 10% de adición, coincidiendo con estudios previos en los que, sin embargo, se ha procedido a la sustitución.

PARA SABER MÁS

- [1] Kostuch, J.A.; Walters, V.; Jones, T.R.: "High performance concretes incorporating metakaolin: a review", Concrete 2000 (1993), E&FN Spon, pp. 1799-1811
- [2] Sabir, B.B.; Wild, S.; Khatib, J.M.: "On the workability and strength development of metakaolin concrete", Concrete for Environmental Enhancement and Protection (1996), E&FN Spon, pp. 651-656.
- [3] Curcio, F.; Deangelis, B.A.; Pagliolico, S.: "Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars", Cem. Concr. Res., vol. 28, nº 6 (1998), pp. 803-809.
- [4] Sabir, B.B.; Wild, S.; Bai, J.: "Metakaolin and calcined clay as pozzolans for concrete: a review", Cement and Concrete Composites, vol. 23 (2001), pp. 441-454.
- [5] Siddique, R.; Klaus, J.: "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review", Applied Clay Science, vol. 43, nº 3-4 (2009), pp. 392-400.
- [6] Restrepo, J. C.; Restrepo, O. J.; Tobón, J. I.: "Efectos de la adición de metacaolín en el cemento portland", Revista de la facultad de minas de la Universidad Nacional de Colombia, vol. 73 (2006), nº 150, pp. 131-141.
- [7] Vizcaino, L.M.; Sánchez, S.; Damas, S.; Pérez, A.; Scrivener, K.L.; Martirena, J.F.: "Industrial trial to produce a low Clinker, low carbón cement", Materiales de Construcción, vol. 65, Issue 317, January-March 2015

AVENTICS^A

PNEUMATICS

IT'S THAT EASY

Lo más eficaz para su empresa.

"Aventics" para resultados rápidos, fáciles y fiables.

Gracias a nuestra experiencia y servicio, podemos proporcionarle soluciones de forma continua y productos a medida en aplicaciones neumáticas. Benefíciense de nuestro *know-how* y experiencia en tecnología neumática.

"Aventics", su *partner* profesional.



AVENTICS Spain
Av. de la Vía Augusta, 15-25
St. Cugat del Vallés
08174 Barcelona
Tel. (+34) 935 001 250
www.aventics.com
info.es@aventics.com

Rexroth
Pneumatics

Evolución con la edad de las propiedades mecánicas de hormigones autocompactantes reforzados con fibras de acero sometidos a compresión

Evolution over time of the mechanical properties of self compacting concret reinforced with steel fibers subjected to compression

J. L. Sánchez-Pérez¹, I. Mateos-Delso²,
A. Cobo-Escamilla¹, N. Llauro-Pérez¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid (España)

² LafargeHolcim (France)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8198>

1. INTRODUCCIÓN

Se puede definir al hormigón autocompactante (HAC) como un hormigón capaz de compactarse únicamente por la acción de la gravedad, que llena los encofrados y discurre entre las armaduras sin necesidad de aplicar medios internos o externos de compactación y manteniéndose, durante su puesta en obra, homogéneo y estable sin presentar segregaciones [1]. Las ventajas que presenta frente a un hormigón convencional (HC) son su facilidad de colocación, mejora del acabado final de las superficies, menor contaminación acústica, ahorro de mano de obra y de energía, baja permeabilidad y alta durabilidad del hormigón.

La incorporación aleatoria de fibras de acero a la matriz del hormigón modifica las propiedades del material base, aumentando su tenacidad y mejorando el control de la fisuración [2-5]. Las mejoras en la tenacidad dependen del tipo y del porcentaje de las fibras [6]. Las fibras con mayor resistencia a ser extraídas (fabricadas con formas rizadas u onduladas o con superficies deformadas) son más efectivas que las equivalentes de forma recta uniforme con la misma longitud y diámetro [7,8].

La resistencia a compresión del hormigón solo se ve afectada ligeramente con la presencia de las fibras [9-11]. Algunos investigadores han constatado incrementos en la resistencia que varían del 0 al 15% para un 1,5% de volumen de fibras [8]. En otros casos se han detectado pequeñas disminuciones en la resistencia a

compresión [12,5]. En todos los casos se han obtenido fuertes incrementos en la tenacidad, sobre todo cuando las fibras de acero poseen los extremos conformados [12,13]. Esta mejora en la tenacidad se produce porque las fibras limitan la fisuración transversal del hormigón, produciendo un estado de confinamiento en su interior, mejorando de forma significativa la tenacidad de los elementos [9,14].

Además de las ventajas propias del HAC y del HRFA, el empleo de un hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero (HACRFA) supone una sinergia del empleo de los dos hormigones anteriores en el siguiente sentido: debido a la mayor densidad de las fibras de acero respecto del resto de los componentes del hormigón, existe una tendencia a incrementar la proporción de fibras en la parte inferior de los elementos hormigonados respecto de la parte superior. Esto se produce fundamentalmente durante el vibrado de los elementos [15]. El empleo del HACRFA elimina el inconveniente anterior, obteniendo elementos más homogéneos a lo largo de la sección transversal.

La Instrucción EHE-08 [16] aborda el tema de los HAC en su anejo 17 en el que se especifica que su comportamiento en términos de resistencia puede considerarse similar al de un HC elaborado con los mismos materiales componentes. Sin embargo, se indica que cuando el valor del módulo de elasticidad sea crítico en el proyecto, éste debe evaluarse mediante ensayos específicos. Los HRFA se tratan en el anejo 14 en el cual no se indica nada acerca del comportamiento específico de este tipo de hormigones cuando se ensayan a compresión.

Las normas de diseño de estructuras aportan la formulación necesaria para obtener en HC la resistencia a compresión a distintas edades, el módulo de elasticidad

longitudinal o la resistencia en distintos tipos de probetas a partir del valor de la resistencia a compresión obtenida a los 28 días de edad sobre una probeta cilíndrica de 15cm de diámetro y 30cm de altura. Sin embargo, esta información no está disponible en las normas para HACRFA y la investigación realizada al respecto es muy escasa. En este trabajo y a partir de los valores experimentales obtenidos se ofrecen expresiones para aportar esa información en el caso de HACRFA.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la fabricación del hormigón empleado en este trabajo se ha empleado cemento CEM II/A-M (P-V) 42,5 R, con un contenido de 350 Kg/m³, una relación agua cemento de 0.56, como aditivos se han añadido 1.9 Kg/m³ de plastificante y 5.8 Kg/m³ de superplastificante. Como refuerzo se han utilizado fibras de acero trelladas en frío de 50 mm de longitud y 0.62 mm de diámetro (esbeltez 80.6), con una dosificación de 10 kg/m³ (0.13% en volumen), suministradas por la empresa Bekaert con la denominación comercial Dramix.

Se han fabricado 15 probetas cilíndricas de 15cm de diámetro y 30cm de altura y 15 probetas cúbicas de 15cm de lado. Las probetas se han curado en cámara húmeda durante 28 días, al 92% de humedad y 20°C. Posteriormente, las probetas se han mantenido en las condiciones ambientales del laboratorio, a una humedad aproximada del 35% y 24°C. Tres especímenes de cada probeta se han sometido a ensayos mecánicos de compresión hasta rotura a las edades de 7, 14, 28, 90 y 365 días. Los ensayos se han realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Las probetas se han ensayado con la prensa universal IBERTEST MIB60-AM equipada con software wintest 32. Los ensayos se han realizado con control de desplazamiento a una velocidad de 10⁻⁵ €/s. Para poder obtener el módulo de elasticidad longitudinal y el coeficiente de Poisson, en todas las probetas se han colocado 4 galgas extensométricas LY4 de HBM en posiciones vertical y horizontal con el fin de medir las deformaciones longitudinales y transversales en función de la tensión aplicada. Las galgas se han colocado por

parejas (vertical y horizontal) en caras opuestas. Previamente a la colocación de las galgas, se han lijado las probetas en la zona de pegado, se ha eliminado el polvo y se han trazado con un lapicero de dureza 5H sendas líneas verticales para asegurar que las galgas queden en posición paralela al eje de las probetas. Las galgas se han pegado utilizando un pegamento de la casa HBM que responde a la denominación "pegamento rápido 2 componentes X60/100g + 2x40ml. Las medidas se han registrado con un adquisidor de datos Quantum X MX840B de HBM.

3. RESULTADOS

Para garantizar que el hormigón estudiado posee características de autocompactable, se han realizado los ensayos de escurrimiento, embudo en V, caja en L y escurrimiento con anillo J según la Instrucción EHE-08. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos y su comparación con los límites fijados por el anejo 17 de la Instrucción EHE-08. Los resultados obtenidos permiten asegurar las características de hormigón autocompactable para el hormigón estudiado. En la Figura 1 se muestra un detalle de la torta durante el ensayo de escurrimiento, donde se puede comprobar la ausencia de segregación o exudación en el perímetro de la misma.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos. Se han facilitado los datos correspondientes a la resistencia a compresión en probeta cilíndrica ($f_{cm,cil}$), módulo de elasticidad longitudinal en probeta cilíndrica ($E_{c,cil}$) y resistencia a compresión en probeta cúbica ($f_{cm,cúb}$). Cada uno de los valores de la Tabla se ha obtenido como la media de tres probetas. Todos los resultados se muestran de la forma a/b , donde a representa la media y b la desviación típica.

En las Figuras 2 y 3 se muestra el momento de la rotura de probetas cilíndricas y cúbicas, respectivamente.

4. DISCUSIÓN

4.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN. EVOLUCIÓN CON EL TIEMPO

La rotura de las probetas se produce de forma gradual, sin estallidos, debido al cosido transversal de las fibras.

Los datos de la Tabla 2 muestran la evolución en el tiempo de la resistencia a compresión para las dos geometrías de probetas ensayadas. En probeta cúbica el crecimiento de la resistencia se produce de forma más gradual que en el caso de pro-

beta cilíndrica, en la cual desde los 7 a los 14 días se produce un fuerte incremento de resistencia que posteriormente se estabiliza en el tiempo. Para ambos tipos de probeta, el paso de 90 a 365 días supone

un incremento notable en la resistencia. El análisis de la varianza de los resultados de la Tabla 2 ofrece los valores $F=33.20$ y $F_{cr}=3.24$ por lo que se puede afirmar que no existe diferencia significativa entre las

Ensayo	Parámetro medido	Rango admisible
Escurrimiento	$T_{50} = 6.37 \text{ s}$	$T_{50} \leq 8 \text{ s}$
	$d_f = 700 \text{ mm}$	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 850 \text{ mm}$
Embudo en V	$T_v = 4.56 \text{ s}$	$4 \text{ s} \leq T_v \leq 20 \text{ s}$
Caja en L	$C_{BL} = 0.77$	$0.75 \leq C_{BL} \leq 1.00$
Escurrimiento con anillo J	$d_{Jf} = 695 \text{ mm}$	$\geq d_f - 50 \text{ mm}$

Tabla 1: Características de autocompactabilidad del hormigón estudiado



Fig. 1: Detalle de la torta durante el ensayo de escurrimiento

EDAD (días)	$f_{cm,cil}$ (MPa)	$E_{c,cil}$ (MPa)	$f_{cm,cúb}$ (MPa)
7	29.28/2.25	17053/978	42.93/0.31
14	41.28/1.24	27146/1289	47.10/4.16
28	43.56/3.07	33926/1410	53.23/0.13
90	44.57/0.67	35716/1326	56.37/2.89
365	66.31/1.32	52080/1217	70.61/7.76

Tabla 2: Resultados medios y desviación típica obtenidos en los ensayos a compresión



Fig. 2: Rotura de probeta cilíndrica ensayada a compresión

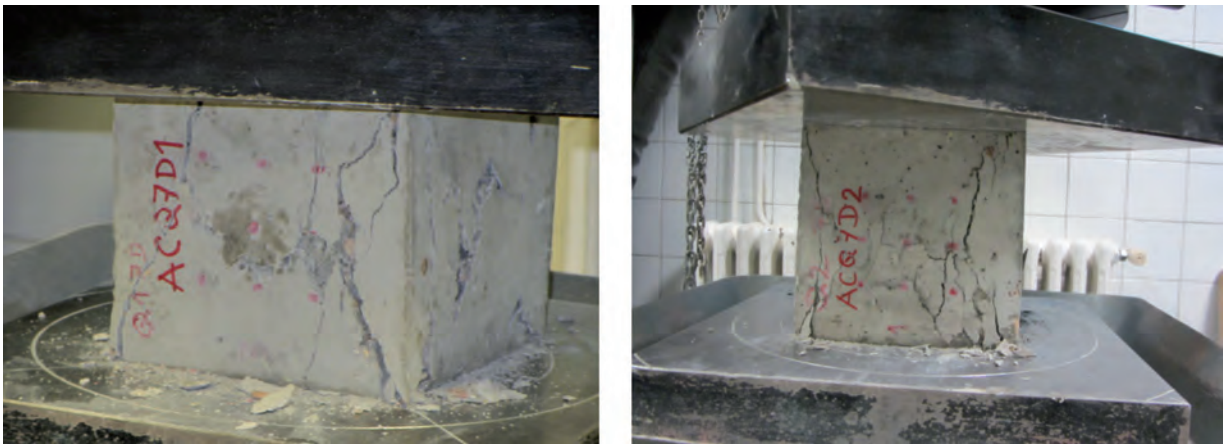


Fig. 3: Rotura de probeta cúbica ensayada a compresión

propiedades evaluadas en el tiempo.

Las normas ofrecen expresiones para predecir la evolución de las propiedades mecánicas con el tiempo. EHE 08 (artículo 31.3) indica la siguiente expresión para obtener a cualquier edad la resistencia media del hormigón a compresión a partir del valor de la resistencia media a compresión a la edad de 28 días:

$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm}$ (1)

Donde:
 $\beta_{cc}(t)$: Coeficiente que depende de la edad del hormigón

$\beta_{cct} = e^{s(1-28/t)}$ (2)

- f_{cm} Resistencia media a compresión obtenida mediante ensayo a los 28 días
- t Edad del hormigón en días
- s Coeficiente que depende de la

velocidad de endurecimiento del cemento, en este caso, cemento rápido, $s=0.2$

En la Tabla 3 se muestra la evolución en el tiempo (en tanto por 1) de la resistencia media a compresión para probeta cilíndrica, probeta cúbica y el valor estimado por EHE 08 (usando las ecuaciones 1 y 2) tomando como referencia el valor obtenido a 28 días.

El análisis de la Tabla 3 permite comprobar que a 7 días EHE 08 sobreestima la resistencia respecto de los valores experimentales, estando el valor obtenido sobre probeta cilíndrica más alejado que el obtenido sobre probeta cúbica. A los 14 días EHE 08 ofrece un valor intermedio y cercano a los obtenidos experimentalmente en ambos tipos de probeta, sobreestimando el resultado en probeta cúbica e infravalorando el de la cilíndrica. A las edades de 90 días EHE08 ofrece valores más altos

que los experimentales y a la edad de 365 días las resistencias estimadas son muy inferiores a las experimentales.

A las edades de 14 y 90 días, la diferencia entre los valores experimentales y la estimación de EHE08 no difiere en más de un 9%. Sin embargo, a la edad de 7 días las discrepancias son muy superiores, llegando a un máximo de un 22% para las probetas cilíndricas. A la edad de un año y con probetas cilíndricas es donde se producen los mayores desajustes entre los valores estimados por la Instrucción y los valores obtenidos experimentalmente (valores experimentales superiores en un 31% a los estimados analíticamente por medio de la Instrucción).

En la Tabla 4 se ofrecen las ecuaciones de las curvas de las Figuras 7 y 8 junto con el coeficiente de determinación (R^2). Los símbolos de las ecuaciones de las Tablas tienen los mismos significados que los de las ecuaciones (1) y (2). Las tensiones se miden en MPa y el tiempo en días.

El análisis de la Tabla 4 permite comprobar que las ecuaciones mostradas suponen un buen ajuste con los valores obtenidos experimentalmente. Los coeficientes de determinación son muy altos en ambos casos y permiten el empleo de las ecuaciones de la Tabla 4 para predecir valores de resistencia en el abanico de edad estudiado.

4.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN. COEFICIENTE DE CONVERSIÓN

EHE 08 establece un coeficiente de conversión de 0.90 para estimar la resistencia en probeta cilíndrica de 15cm de diámetro y 30cm de altura cuando se conoce la resistencia en probeta cúbica de 15cm de lado. En la Tabla 5 se muestra para cada edad el coeficiente de paso o de conversión obtenido para las resistencias medias alcanzadas experimentalmente en las probetas ensayadas.

EDAD (Días)	7	14	28	90	365
CILÍNDRICA	0.67	0.95	1.00	1.02	1.52
CÚBICA	0.76	0.88	1.00	1.06	1.33
EHE 08	0.82	0.92	1.00	1.09	1.16

Tabla III: Evolución con el tiempo de la resistencia media a compresión

TIPO DE PROBETA	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	R2
CILÍNDRICA	(3)	0.88
CÚBICA	(4)	0.97

Tabla IV: Ecuaciones de las funciones de regresión

Edad (días)	$f_{cm,cil}$ (MPa)	$f_{cm,cúb}$ (MPa)	COEFICIENTE DE PASO
7	29.28	42.93	0.68
14	41.28	47.10	0.88
28	43.56	53.23	0.82
90	44.57	56.37	0.79
365	63.31	70.61	0.90

Tabla V: Coeficiente de paso a distintas edades

El análisis de la Tabla 5 permite comprobar que únicamente a la edad de un año se alcanza el valor de 0.90, indicado por EHE08. A la edad de 14 días la diferencia entre los valores experimentales y el valor de la norma es mínimo, mientras que a las edades de 7 y 90 días las diferencias son apreciables (24% y 12%, respectivamente).

El análisis de la varianza de los resultados de la Tabla 5 ofrece los valores $F=1.40$ y $F_{cr}=5.32$ por lo que se puede afirmar que existe diferencia significativa entre las propiedades evaluadas en el tiempo.

La función de regresión encontrada entre las resistencias medias obtenidas en probeta cilíndrica y cúbica para las distintas edades analizadas responde a la ecuación (5).

$$f_{cm,cil}=1.11 \cdot f_{cm,cúb}-15.84 \quad (5)$$

Donde $f_{cm,cil}$ y $f_{cm,cúb}$ son las resistencias medias (MPa) en probetas cilíndricas y cúbicas, respectivamente. Esta función presenta un coeficiente de determinación muy alto ($R^2 = 0.94$), por lo que puede afirmarse que existe una buena relación entre los valores obtenidos experimentalmente.

4.3. EVOLUCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y DEL COEFICIENTE DE POISSON CON EL TIEMPO

El Eurocódigo 2, EC2 [17], EHE08 y el Código Modelo, CM10 [18] relacionan el valor del módulo de elasticidad longitudinal con el de la resistencia media a compresión. Además, EC2 y EHE08 ofrecen la misma formulación. La norma ACI [19] considera también el valor de la densidad para poder predecir el módulo de elasticidad longitudinal.

En la Tabla 6 se muestran los valores medios experimentales obtenidos para el módulo de elasticidad longitudinal del hormigón a las distintas edades de ensayo junto a los valores estimados por las normas anteriores. También se han incorporado en la Tabla las expresiones propuestas por las normas en las que E_c es el módulo de elasticidad longitudinal, f_{cm} es la resistencia media del hormigón a compresión y ρ_c es la densidad del hormigón.

El análisis de la Tabla 6 permite comprobar que en todos los casos el CM predice valores superiores de módulo de elasticidad que EHE08, EC y ACI. A las edades de 7 y 14 días el valor experimental es inferior al estimado por los documentos analizados. Particularmente, a la edad de 7 días se produce una discrepancia importante entre los valores

Edad (días)	f_{cm} (MPa)	E_c (MPa)			
		Experimental	EHE08/EC2 (2)	CM10 (3)	ACI (4)
7	29.28	17053	26198	30758	25465
14	41.28	27146	29376	34489	30315
28	43.56	33926	29908	35113	31754
90	44.57	35716	30137	35382	31955
365	63.31	52080	33877	39774	37297

Tabla VI: Valores experimentales y estimados para el módulo de elasticidad longitudinal

Edad (días)	Tensión (MPa)					
	5	10	15	20	25	30
7	0.15/0.010	0.15/0.011	0.14/0.012	0.15/0.010	0.15/0.012	0.15/0.012
14	0.19/0.011	0.18/0.010	0.19/0.010	0.18/0.011	0.19/0.012	0.19/0.013
28	0.23/0.010	0.24/0.010	0.24/0.011	0.25/0.009	0.27/0.014	0.27/0.015
90	0.25/0.010	0.27/0.012	0.27/0.012	0.27/0.010	0.28/0.013	0.28/0.014
365	0.28/0.009	0.28/0.011	0.28/0.012	0.29/0.011	0.29/0.014	0.29/0.015

Tabla VII: Evolución en el tiempo del cociente entre la deformación transversal y la deformación longitudinal

estimados y los experimentales, sobreestimando de una forma considerable las normas el valor del módulo de elasticidad. Sin embargo, a la edad de 365 días, todas las normas infravaloran el valor del módulo de elasticidad.

A continuación se indican las ecuaciones de regresión que relacionan el módulo de elasticidad experimental con la edad (6) y con la resistencia media a compresión (7), junto a su coeficiente de determinación.

$$E_c=1038.9f_{cm}-12942 \quad R^2=0.97 \quad (6)$$

$$E_c=7953.2\ln t+4048.7 \quad R^2=0.94 \quad (7)$$

Ambas ecuaciones presentan un coeficiente de determinación muy alto por lo que puede predecirse el módulo de elasticidad longitudinal en función de la edad o cuando se conoce la resistencia media a compresión.

En la Tabla 7 se muestran los valores obtenidos experimentalmente como cociente entre la deformación transversal y longitudinal de cada probeta (coeficiente de Poisson) en función del nivel de tensión aplicado y de la edad de ensayo. Solo tiene sentido hablar de coeficiente de Poisson cuando los materiales trabajan en régimen lineal, aproximadamente hasta el 33% de la tensión de rotura en el caso del hormigón. En este caso se ofrecen valores hasta los 30MPa, más allá del régimen

lineal. Para cada edad se ha marcado en negrita el valor correspondiente al 33% de la tensión de rotura y que debería tomarse como coeficiente de Poisson.

El análisis de la Tabla 7 permite comprobar que la variación del cociente entre la deformación transversal y longitudinal es mínima cuando se incrementa el nivel de tensión y aumenta conforme se incrementa la edad del ensayo (manteniendo constante la tensión). Los valores obtenidos al 33% de la tensión de rotura varían de una forma muy importante con la edad del ensayo, desde 0.15 a 7 días hasta 0.29 a 365 días, prácticamente el doble. Si se compara el valor obtenido a 28 días (0.24) con el indicado por la norma EHE08 (0.20), puede comprobarse que el valor experimental es superior en un 20% al indicado por la norma.

5. CONCLUSIONES

Debido a la enorme versatilidad y flexibilidad de los métodos de fabricación actuales, el HACRFA es un material de construcción económico y útil, resultando su uso ventajoso en muchas aplicaciones respecto al hormigón convencional. Por ejemplo, los paneles delgados prefabricados de HACRFA son viables económicamente en USA y Europa. En soleras, minería, túneles y aplicaciones en excavación, se ha utilizado HRFA en lugar de los reforzados con mallas de acero electrosolda-

das. Recientemente también se han empleado con éxito en losas prefabricadas.

En España el mayor campo de aplicación del HRFA corresponde al hormigón proyectado y a los pavimentos. La enorme tenacidad de este tipo de hormigones puede aconsejar su uso en zonas sísmicas o en elementos sometidos a impacto, como en aplicaciones militares. Su extraordinario comportamiento frente a retracción y la mejora que se produce en el comportamiento a flexión lo hacen muy competitivo en grandes soleras o en soleas sometidas a grandes cargas.

El campo de aplicación del HACRFA se encuentra en las mismas aplicaciones del HRFA donde además, debido a las dificultades de hormigonado por la complejidad del elemento o la cuantía de acero, se precisen para el hormigón características de autocompactable.

Lamentablemente no existe una doctrina recogida en las normas acerca del comportamiento a compresión del HACRFA. En este trabajo se ha pretendido aportar información útil al respecto. Con los resultados obtenidos, se pueden enumerar las siguientes conclusiones:

- En el caso de probetas cúbicas, el crecimiento de la resistencia a compresión del hormigón con el tiempo se produce de forma más gradual que en el caso de probeta cilíndrica.
- La estimación de la resistencia a compresión utilizando la expresión de EHE08 ofrece valores que no difieren en más de un 5% con los reales para edades de 14 y 90 días, en el caso de una edad de 7 días la diferencia obtenida es de un 22% mayor la estimada que la real.
- A ninguna edad del hormigón se alcanza el valor de 0.90 como coeficiente de conversión de las resistencias en probetas cilíndricas y cúbicas indicado por EHE08. A la edad de 14 días la diferencia entre los valores experimentales y el valor de la norma es mínimo, mientras que a las edades de 7 y 90 días las diferencias son apreciables (24% y 12%, respectivamente).
- Se han obtenido ecuaciones de regresión que relacionan la resistencia a compresión y la edad con coeficientes de determinación muy altos.
- Solamente a la edad de un año se ha obtenido un coeficiente de paso de 0.90, para el resto de edades los coeficientes son inferiores.
- Se ha encontrado una buena función de regresión para el coeficiente de paso entre probeta cilíndrica y

cúbica.

- Las estimaciones que realizan las normas estudiadas para evaluar el módulo de elasticidad longitudinal tienen un pésimo ajuste al valor real obtenido a los 7 días, mientras que se aproximan más, aun siendo todos superiores, a los 14 días y ofrecen un buen ajuste a la edad de 28 días, siendo el valor obtenido por el Código Modelo siempre superior al real obtenido.
- Se han obtenido funciones de regresión con coeficientes de determinación muy altos para predecir el valor del módulo de elasticidad longitudinal en función de la edad o de la resistencia a compresión.

PARA SABER MÁS

- [1] Burón M, Fernández J, Garrido I. "Hormigón autocompactante. Criterios para su utilización". Hormigón. 2006. Nº 887. p. 52-64.
- [2] ACI Committee 544. State of the art report on fiber reinforced concrete. Detroit USA, American Concrete Institute, 1996
- [3] Banthia N, Sappakittipakorn M. "Toughness enhancement in steel fiber hybridization". Cement and Concrete Research. 2007. Vol. 37. p. 1366-1372.
- [4] Wang ZL, Liu YS, Shen RF. "Stress-strain relationship of steel fibre reinforced concrete under dynamic compression". Constr Build Mater. 2008. Vol. 22-5. p.811-819.
- [5] Altun F, Haktanir TA. "Comparative experimental study of steel fibre-additive reinforced concrete beams". Mater Construcc. 2004. Vol 54-276. p. 5-15.
- [6] Johnston C D. "Definitions and Measurement of Flexural Toughness Parameters for Fiber Reinforced Concrete". ASTM, Cement, Concrete and Aggregates. 1982. Vol. 4-2. p. 53-60.
- [7] Brandshaug T, Ramakrishnan V, Coyle W V, Schrader E K. "A Comparative Evaluation of Concrete Reinforced with Straight Steel Fibers and Collated Fibers with Deformed Ends". Report No. SDSM&T-CBS 7801, South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City. May 1978, p. 52.
- [8] Johnston, C D. "Steel Fiber Reinforced Pavement Trials". Concrete International: Design & Construction, V. 6-12. p. 39-43.
- [9] Kaltakci MY, Arslan MH, Yilmaz US. "The effects of steel fibre reinforced concrete on system ductility". Mater Construcc. 2007. Vol. 57. p. 71-84.
- [10] Yazici S, Inan G, Tabak V. "Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC". Constr Build Mater. 2007. Vol. 21-6. p. 1250-1253.
- [11] Rizzuti L, Bencardino F. "Effects of fibre volume fraction on the compressive and flexural experimental behavior of SFRC". Contro Eng Sci 2014. Vol. 7-8. p. 379-390.
- [12] Turmo J, Banthia N, Gettu R, Barragán B. "Study of the shear behaviour of fibre reinforced concrete beams". Mater Construcc. 2008. Vol. 58- 292. p. 5-15.
- [13] Wang ZL, Shi ZM, Wang JG. "On the strength and toughness properties of SFRC under static-dynamic compression". Composites: Part B. 2011. Vol. 42 p.1285-1290.
- [14] Blaszczyński T, Przybylska-Falek M. "Steel fibre reinforced concrete as a structural material". Procedia Engineering. 2015. Vol. 122. p. 282-289.
- [15] Barros JAO, Sena Cruz JM. "Fracture energy of steel fibre reinforced concrete". Journal of Mechanics Composite Materials and Structures. 2001. Vol 8-1. p. 29-45.
- [16] Ministerio de Fomento. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. Madrid, 2008.
- [17] CEN. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization. Brussels, 2010.
- [18] FIP. Fib Model Code for Concrete Structures 2010 Lausanne, Switzerland, 2010.
- [19] ACI. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary. American Concrete Institute Farmington Hills, MI 48331, 2008.

Metodologías de identificación de materiales para la intervención en el patrimonio arquitectónico

Material identification methodologies for intervention in architectural heritage



Esther Moreno-Fernández, Francisco González-Yunta, Javier Pinilla-Melo, Cristina Mayo-Corrochano

Universidad Politécnica de Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8200>

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios y análisis de materiales son necesarios para la comprensión del bien a restaurar. En muchas ocasiones, suplen las carencias documentales, ayudan a identificar cronológicamente los materiales o sistemas, alteraciones antrópicas, origen de las lesiones, etc. y completan los conocimientos en el campo de la Historia de La Construcción.

En el campo de la Restauración y Conservación del Patrimonio construido, el conocimiento de las diferentes técnicas de estudio de materiales permite aplicarlas y combinarlas adecuadamente para obtener información relevante en la toma de decisiones sobre la intervención a realizar. Es necesario abordar su enfoque con un equipo multidisciplinar que combine los conocimientos científicos con el oficio de la restauración asegura la eficiencia en el proceso y su traslado al proceso de obra (Fig. 1).

En ocasiones, las técnicas de caracterización empleadas de forma habitual, no tienen el alcance necesario para proporcionar una información exhaustiva que determine la composición y el origen de los productos de alteración formados en la superficie de los elementos constructivos. Además, algunas técnicas son destructivas y, por lo tanto no aplicables en edificios de valor singular. Debido a la complejidad del proceso de restauración, el objetivo de este estudio es proporcionar alternativas adicionales mediante metodologías sencillas de aplicar.

Se presentan dos metodologías no habituales en el análisis de materiales pertenecientes al patrimonio construido. La principal finalidad de este trabajo es des-

acar la relevancia que tiene un estudio riguroso de los materiales en este tipo de intervenciones.

1.1. INTERVENCIÓN EN EL TEMPLETE DEL MUSEO CERRALBO

1.1.1. Elementos de la balaustrada

Se propone una metodología para identificar si el conglomerante de los balaustres es cemento natural, debido a que es difícil distinguirlo del cemento Portland y, en ocasiones, la confusión de estos dos materiales ha conducido a restauraciones erróneas [1].

En 1796 James Parker patentó el cemento natural o cemento romano [2]. Durante el siglo XIX y debido al crecimiento de las grandes ciudades, se extendieron la producción y el empleo de los cementos naturales por Europa, Estados Unidos y Rusia [3-5]. Originalmente, se empleó como mortero de junta y en las cimentaciones de los edificios, pasando posteriormente a usarse en fachadas, tanto en revocos como elementos ornamentales, compatibles con la piedra natural.

Este material ha demostrado a lo largo del tiempo gran durabilidad y resistencia a la intemperie. Las decoraciones de cemento natural presentes en las fachadas se encuentran en buenas condiciones de conservación, a pesar del prolongado tiempo de exposición. Por otra parte, muchos elementos constructivos de monumentos en los que originalmente se empleó cemento natural, se encuentran en mal estado debido a reparaciones inadecuadas llevadas a cabo con materiales incompatibles como el cemento Portland, que provoca daños en los elementos originales. Esto se debe, en muchos casos, al desconocimiento de la presencia de este material o a una incorrecta caracterización de los morteros históricos, ya que es difícil distinguir un cemento natural de un cemento Portland histórico [6-7].

El alto coeficiente de absorción del cemento natural favorece el ingreso de sales disueltas procedentes de cementos Portland empleados en la reparación. Los compuestos salinos cristalizan en el interior provocando desprendimientos del material original. Así mismo, la elevada rigidez del cemento Portland provoca tensiones que fisuran el cemento natural del soporte cuya rigidez es menor.

Por las razones anteriormente expuestas, es necesario caracterizar inequívocamente este material y así, emplear los materiales correctos en la rehabilitación del



Fig. 1: Proceso general de análisis en la intervención en patrimonio

elemento dañado. Por otro lado, la balastrada que corona el templete es distinta a la de la planta inferior que, a su vez, es igual a las existentes en el edificio principal. Se sospecha que fue reconstruida, pero no hay documentos que lo acrediten. Uno de los objetos de esta investigación es el análisis de la balastrada inferior para realizar una datación aproximada e indicar si se trata de un elemento original y tomar decisiones acerca de la reparación o restitución de los balaustres superiores, dado que presentan graves lesiones derivadas de las deformaciones estructurales del templete y las ocasionadas por el proceso patológico de la corrosión de las armaduras de acero.

1.1.2. Bustos escultóricos

La segunda metodología desarrollada en esta comunicación son las Técnicas de Proceso y Análisis Digital de Imágenes, centradas, en este caso, a la determinación petrográfica y los daños que presentan los bustos emplazados en el templete. En la documentación del museo, se refleja que son de mármol de "Carrara", si bien se desconoce el origen y la autoría de los mismos.

El aspecto inicial de los bustos revelaba alteración superficial, habiéndose perdido parte de su relieve debido a décadas de exposición de las inclemencias meteorológicas [8-9]. Una vez conocida su naturaleza petrográfica, es posible establecer una relación causal entre los factores ambientales y los daños o alteraciones producidas, pudiendo escogerse el tipo de tratamiento a prescribir más adecuado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para caracterizar los materiales, definir sus patologías y su estado de conservación se realizó un estudio exhaustivo sobre los mismos.

2.1. TÉCNICAS Y EQUIPOS EMPLEADOS

Difracción de Rayos X (cuadro de texto). El equipo usado es un difracto-

metro de polvo Bruker D8 Advance dotado de una fuente rayos X, ánodo de cobre, y un detector SOL-X.

Microscopía estereoscópica. El microscopio estereoscópico, cubre un rango de zoom de 0.75x a 11.25x.

Microscopía óptica de polarización (cuadro de texto).

Se ha empleado un microscopio Kyowa, mod. BIO-POL y una cámara Moticom modelo 2300 5Mpixel.

Microscopía electrónica de barrido con microanálisis (cuadro de texto).

Para el estudio del conglomerante se ha empleado el microscopio electrónico de barrido FEI Quanta 250 FEG de la Universidad de Artes Aplicadas en Viena. El estudio de las esculturas se ha realizado en el CAI de Ciencias Geológicas de la UCM, con un microscopio Jeol JSM-820.

2.2. METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN DEL CONGLOMERANTE

Durante la calcinación (800-1200°C) de calizas arcillosas o margas, se forman los siguientes compuestos:

- CaO que forma Ca(OH)_2 : Hidróxido de calcio, (CH) cal apagada.
- Ca_2SiO_4 : Silicato bicálcico o belita (C2S).
- $\text{Ca(AlO}_2)_2$: Aluminato monocálcico (AC).

En la fabricación de cemento Portland, la temperatura de calcinación de la materia prima ha de sobrepasar los 1.200°C para conseguir la sinterización del clínker. Se obtiene, además de Silicato bicálcico y Aluminatos, Silicato tricálcico Ca_3SiO_5 o alita (C3S). Por lo tanto, la presencia de Alita denotaría que el conglomerante es cemento Portland [10].

Se prepararon láminas delgadas a partir de las muestras tomadas de la balastrada para poder establecer patrones identificativos de los cementos naturales. Se aplica un método simplificado del desarrollado por el proyecto ROCARE [11-12] de identificación del cemento natural que aplica técnicas convencionales de microscopía óptica de polarización y microscopía electrónica de

barrido para identificar la Belita en las fases no hidratadas del mortero.

2.3. TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Las técnicas de Procesado Digital de Imágenes facilitan la detección de daños en monumentos, de una manera no destructiva. Se fundamentan en la discretización de la imagen extrayendo sus parámetros espaciales, tal como la distribución de fases y su morfología. Así, se pueden detectar porosidades, tamaños de grano, fases, áreas de alteración, humedades, pátinas, ensuciamientos, diferencias en fachadas, etc [13-16].

Se basa en la descomposición de la imagen en una matriz de puntos o datos (discretización) que tiene, información espacial. Metodológicamente se establecen tres niveles de operación: **captura** de imagen (en la que se incluye el proceso de calibración y escalado); **mejora** digital de la imagen y su **segmentación** que conforma el proceso a partir del cual se derivan los parámetros de medida y relación entre fases [17].

El programa utilizado para la obtención de estas imágenes y los datos asociados es Image-Pro Plus (de Optimas, Image Processin Image) versión 6.0 para Windows, con licencia de Media Cybernautics, Inc. (Georgia USA), si bien todas las imágenes pueden ser replicadas con el Image.J de libre distribución y disponible en la red [18].

3. RESULTADOS

3.1. IDENTIFICACIÓN DEL CONGLOMERANTE

La metodología propuesta parte de la preparación de las muestras en láminas delgadas pulidas y teñidas para poder distinguir con facilidad los poros e identificar sus componentes. La secuencia de análisis consiste en:

1. **Análisis visual.** Se observa el color de la muestra a con el microscopio estereoscópico. La muestra es de color marrón claro típico de los morteros de cemento natural en contraposición al color gris del cemento Portland.
2. **Observación** de las láminas delgadas con microscopio petrográfico a baja resolución. La estructura característica de los cementos naturales consta de margas infracalcinadas o sobrecalcinadas debido a que el proceso de calcinación de estos cementos era artesanal y no

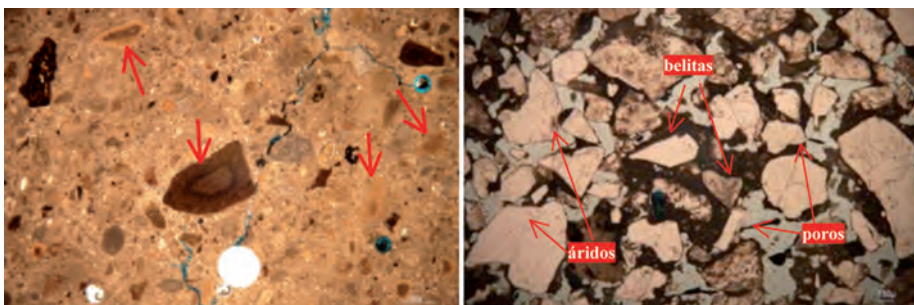


Fig. 2: Detalle de los fragmentos de margas calcinadas (izda). Lámina pulida de la muestra (dcha)

todas las margas estaban correctamente calcinadas. Como el proceso de molienda no era tan fino, quedaban fragmentos de margas calcinadas que se pueden identificar. La figura 2 (izda) muestra la imagen de una muestra de pasta de Cementos Naturales.

Aunque a simple vista el mortero parecía muy compacto (Fig. 2 dcha), al observar la lámina delgada se evidencia una gran porosidad con agregados muy angulosos. En el microscopio petrográfico observamos cristales de belita no hidratados en la matriz del aglomerante, pero no observamos los típicos fragmentos de margas calcinadas de los cementos naturales. Tampoco se encontraron cristales de alita.

3. Microscopio petrográfico a mayor resolución. Identificación de alita (silicato tricálcico) y belita (silicato bicálcico). En el caso del cemento natural, no aparecen cristales de alita. Para confirmar la ausencia de alita, se puede utilizar un reactivo de ataque, Nital (1 ml de ácido nítrico y alcohol propílico) y los cristales de alita adquieren tonalidad azul mientras que la belita permanece marrón (Fig. 3 izquierda).

4. Por microscopía electrónica de barrido se confirma la presencia de los cristales de belita y se realizan mediciones químicas semicuantitativas de determinadas zonas. La estructura es altamente porosa, combinando cristales fibrosos y laminares propia de los cementos naturales, pero la ausencia de fragmentos de margas hace concluir que no se trata de este material (Fig. 3, dcha).

5. Mediante microscopía electrónica de barrido ambiental con muestras en fractura fresca se observa una estructura fibrosa y laminar no tan compacta como tendría un cemento Portland.

Aunque se han identificado granos de cemento no hidratado correspondiente a belita, la ausencia de las características margas (infracalcinadas, sobreclacinadas y calcinadas a la temperatura adecuada),

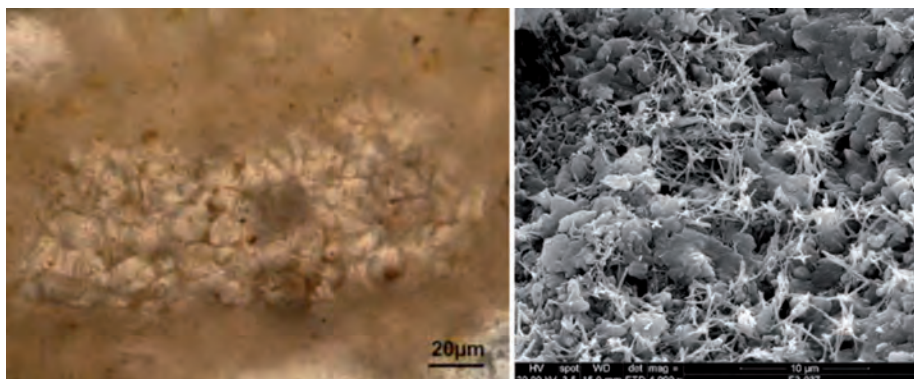


Fig. 3: Cristales de Belita luz transmitida (izda). Estructura del mortero (dcha)

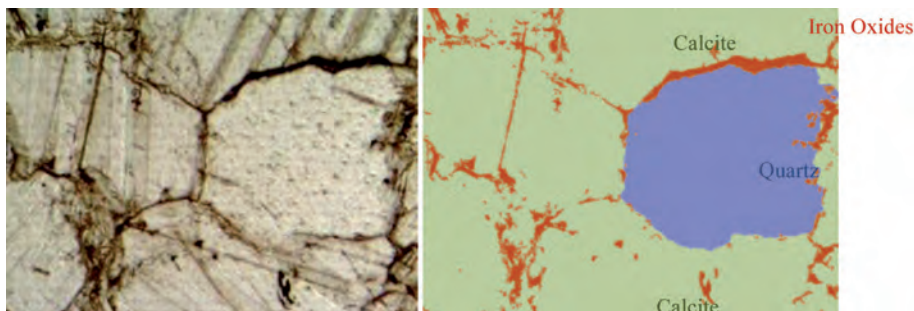


Fig. 4: Mejora de la imagen y segmentación de cada fase. En rojo se representan los óxidos de hierro y fases alteradas

indican que no se trata de un cemento natural. El conglomerante (a pesar de no haber encontrado nódulos de cal libre) se podría asemejar a una cal hidráulica pero con un mayor contenido de belita debido al mayor porcentaje de Silicio en la materia prima. Este material, denominado por algunos autores como "**cemento belítico artificial**", se obtenía por calcinación a baja temperatura.

3.2. IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL CONSTITUYENTE DE BUSTOS ESCULTÓRICOS

Mediante DRX y microscopía se han detectado, principalmente calcita y cuarzo. También Óxidos de hierro.

3.2.1. Procesado digital de imágenes.

Las microfotografías petrográficas se derivaron al procesador digital de imágenes. Las calcitas desarrollan su característico maclado polisintético cuya birrefringencia e índice de refracción es alto (color blanquecino en luz natural). El cuarzo, bajo el

mismo tipo de luz, tiene una birrefringencia alta, aunque su textura es "granular". No desarrolla planos de maclas y de tipo distribución polisintética (Fig. 4). Los óxidos e hidróxidos aparecen asociados a bordes de grano o zonas de fisuración, de tipo hidrotermal y lógicamente relacionados con la dinámica de los fluidos. Dan colores de interferencia y refracción más bajos (pardos).

La aplicación de filtros de tipo matricial a la imagen, como los reforzadores de bordes, facilita una clasificación mejor y delimitación de cada fase cristalina (grano). Este algoritmo busca las secuencias de refracción óptica asociadas a cada especie mineralógica (color, textura, morfología) con un nivel de gris o color específico.

El resultado (Fig. 4 dcha) es una imagen clasificada en la que la extracción de áreas de ocupación relativa (porcentajes) y su distribución espacial, es inmediata (estableciéndose el tipo de contacto entre fases, la densidad de la red de fisuración etc.).

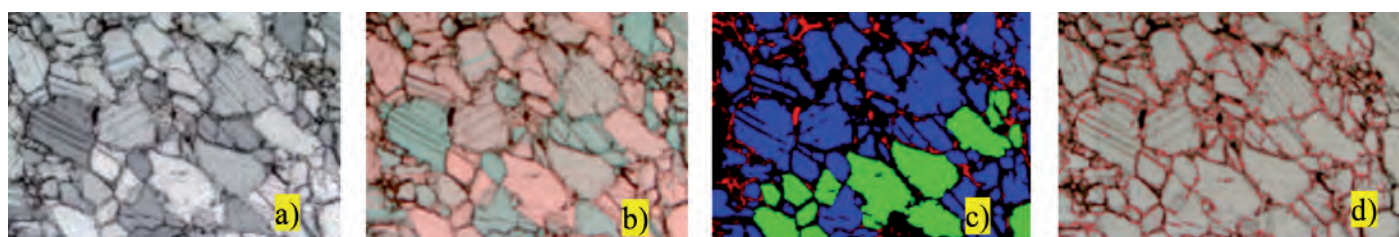


Fig. 5: a) micrografía luz polarizada. b) aplicación de algoritmos de filtrados. Azul, la calcita, rosa, el cuarzo, en siena las calcitas con orientaciones diferenciales c) combinación de bandas para identificar fases. d) extracción para el cálculo de bordes de grano

De esta imagen se extraen todos los parámetros de caracterización. La calibración (escala) se ha definido por la relación entre el número de píxeles que se corresponden al tramo o segmento marcado de 100 μm -176 píxeles. El factor de escala es 1760 para esta secuencia de imágenes.

La Figura 5 resume el proceso. Partiendo de imágenes registradas con luz natural (a) y polarizada (b) del mismo campo y ejecutando diferentes tipos de filtrados, se aísla cada componente (c) y (d) etiquetándose todas las fases existentes (calcitas, cuarzo y óxidos) y extrayendo sus parámetros espaciales y de distribución, porcentajes, tamaños de grano, elongación, y distancias (puntos en el plano o lámina delgada).

La imagen derecha (d) que muestra el proceso de cálculo de los bordes de grano debe corregirse. El campo resultante que quedaría, después de discriminar los granos incompletos, se corresponde con líneas de contacto. Se miden, en esta imagen, los siguientes parámetros: área, diámetro mayor, diámetro medio, perímetro y redondez.

La imagen clasificada (c) se etiqueta en colores, o códigos alfanuméricos de referencia. En azul, la calcita (CaCO_3); en verde, la fase Cuarzo (SiO_2) y Feldespatos (KAlSi_3O_8 - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) en sus múltiples variedades o series de desmezcla. Las Lutitas (filosilicatos) y Óxidos, se representan en color rojizo.

Este análisis se repite para el resto de las imágenes (campos de registro) a lo largo de toda la lámina delgada. Los resultados granulométricos (cuantitativos) obtenidos de la muestra confirman que el

patrón textural y composicional se repite, predominando las fases calcáreas, con distinta orientación de su eje de maclado, sobre los cuarzos y feldespatos. Algunas calcitas tienen un alto grado de fracturación.

El resultado se refleja en el diámetro medio D_0 de los granos de calcita, obteniendo un histograma (Fig. 6) que evidencia una enorme dispersión granulométrica. Esta "firma digital" es característica de una determinada región y cantera (Tabla 1).

- Donde,
- Objetos*: Se refiere a todos los granos considerados.
 - Área*: Superficie de los granos.
 - DiamX*: La mayor distancia posible en el objeto.
 - DiamM*: El principal segmento de cada grano.
 - Perim*: La longitud del borde de cada grano.
 - Redondez*: Es el factor que define la el cociente especial. Por ejemplo, para un mármol de Carrara, este valor es cercano a 0,8 mientras que en este estudio el valor es 0,07926.

3.2.2. Identificación

Petrográficamente, es un mármol con evidentes procesos de dolomitización; es decir, el catión calcio (Ca^{2+}) ha sido sustituido en la red base (o retícula de definición) parcialmente, por el catión magnesio (Mg^{2+}) con el desarrollo de una serie de minerales neoformados (como portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Esta sustitución parcial de ambos cationes produce una deformación reticular y la alteración y desarrollo de

procesos degradativos. Por la forma del histograma (fig. 6) no es un mármol de Carrara ya que aquél tiene una distribución morfológica y pureza monomineral totalmente diferente. Este, más heterogéneo y con mayor porcentaje de impurezas y con una acusada degradación, siendo el tipo de alteración más propia de un mármol Macael.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado dos metodologías de caracterización de materiales que proporcionan información útil la hora de identificar, evaluar y determinar las causas de deterioro de materiales de construcción.

La caracterización precisa del conglomerante (cemento belítico artificial) ha posibilitado tomar la decisión de reproducir la balaustrada con un material similar y con la forma de los elementos originales del Templete. La balaustrada de la planta de cubierta fue analizada con técnicas tradicionales, resultando que el conglomerante utilizado fue cemento Portland. Este resultado, unido a su diferencia morfológica con el resto del edificio, evidenciaba que se trataba de un ornamento añadido en la reconstrucción posterior a la Guerra Civil. La caracterización realizada en la balaustrada de la planta primera y el hallazgo de la utilización del cemento belítico, situaba claramente su origen en la construcción del templete y avalaba la decisión de sustituir el añadido en la planta de la cubierta por otro elemento con la forma original de la planta primera. Además, al no tratarse de cemento natural, se podrían realizar reconstrucciones en caso de ser necesario sin necesidad de utilizar este material.

El uso de técnicas de Análisis y Tratamiento Digital de Imágenes ha posibilitado una mayor precisión en la caracteriza-

Objetos	Area	DiamX	DiamM	Perim	Redondez
124 1040,38277		126,66698	67,96518	632,30009	0,07926

Tabla 1: Resumen de datos (unidad en micras)

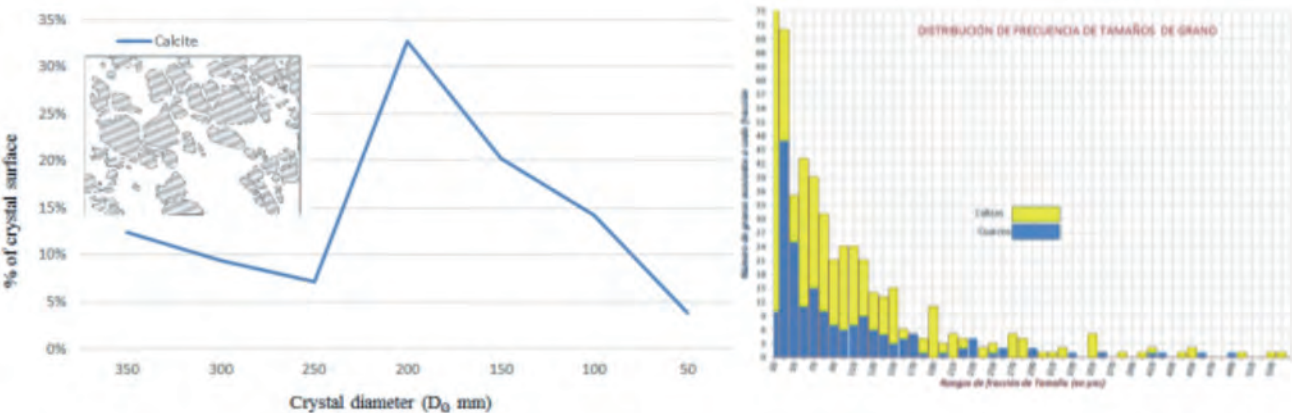


Fig. 6: Morfometría de los cristales de Calcita (izda). Histograma de calcitas y cuarzo (dcha)

ción del material pétreo constituyente de los bustos.

Si no se hubiera empleado esta técnica no hubiera sido posible detectar la presencia de fases asociadas a defectos reticulares que fatigan el material, atribuyendo esta patología, seguramente a procesos de dilatación o concentración térmica y no teniendo en cuenta que la presencia de óxidos en contacto con calcita y dolomita provocan fases (portlandita y grucita) enormemente expansivas que son la verdadera causa de la fragmentación del mármol.

De la observación textural y la morfología de los cristales se concluye que los bustos fueron esculpidos en mármol de Macael. No se encontró ningún que pudiese indicar la aplicación de un tratamiento superficial.

Los productos de alteración, en su mayoría óxidos de hierro, derivan de impurezas del material, que han lixiviado y acumulado en la superficie. Se ha revelado, además, el grado de daños o alteraciones en la superficie de los cristales. Esta información, ha orientado en la elección de productos de protección más eficaces y adecuados a este tipo de material calcáreo en tratamientos de protección de las esculturas.

PARA SABER MÁS

- [1] Varas MJ, Alvarez de Buergo M, Perez-Monserrat E, Fort R. "Decay of the restoration render mortar of the church of san Manuel and San Benito, Madrid, Spain: results from optical and electron microscopy" 59, 2008. 1531-1540. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2007.11.008>
- [2] Parker J. A certain Cement or Terras to be used in Aquatic and other Buildings and Stucco Work. British Patent 2120, 1796.
- [3] Kozłowski R, Hughes D, Weber J. Roman Cements. Key materials of the Built Heritage. of the 19th Century. Materials, technologies and Practice in Historic Heritage Structures 14, pp 259-277. 2010. DOI <http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-2684-2>.
- [4] Gosselin C, Verges-Belmin V, Royer A, Martinet G, "Natural cement and monumental restoration". Materials and Structures, Julio 2009, Issue 42, Issue 6 pp. 749-763 DOI: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-008-9421-7>.
- [5] Weber J, Gadermayr N, Bayer K, Hughes D, Kozłowski R, Stillhammerova M et al "Roman cement mortars in Europe's architectural heritage of the 19th century". J ASTM Int 4(8). 2007 doi:10.1520/JAI100667
- [6] Mayo, C. "El cemento natural en el Madrid de los siglos XIX y XX. Identificación de sus aplicaciones, estado de conservación y compatibilidad con los cementos actuales". Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- [7] Middendorf B, Hughes J.J, Callebaut K, Baronio G, Papayianni I. Investigative methods for the characterization of historic mortars- Mineralogical characterization. Chemical characterization. Materials and Structures. Vol 38, 8, 2005.
- [8] Adamski G, Bratasz L, Kozłowski R, Mayr N, Mucha D, Stilhammerova M, Weber J. Roman cement – key historic material to cover the exteriors of buildings. Workshop Repair Mortars for Historic Masonry. Ed. Groot.2009 <http://www.rilem.net>
- [9] Moropoulou A, Bisbikou K, Torfs K, Van Grieken R. Zezza F. Macri, F. Origin and growth of weathering crusts on ancient marbles in industrial atmosphere. Atmos. Environ. 32, 967-982, 1998.
- [10] Ingham J. Geomaterials under the microscope. A colour guide. CRC Press. Londres, 2010.
- [11] Varas MJ., Álvarez de Buergo M, Fort R. "Natural cement as the precursor of portland cement: methodology for its identification" Cement and concrete research. Vol 53 pp. 2055-2065, 2005 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.045>
- [12] Weber J. Et ROCARE Consortium Team, 2011. EU project ID: 226898: 19th century Roman cements – historic binders with properties of interest for purposes of restoration and healthy construction. www.rocarae.eu.
- [13] Weber J, Bayer K, Pintér F. "Nineteenth Century "Novel" Building Materials: Examples of Various Historic Mortars Under the Microscope. DOI <http://dx.doi.org/101007/978-94-007-4635-0-7>, 2012.
- [14] Vazquez MA, Galán E, Guerrero MA, Ortiz P. "Digital image processing of weathered stone caused by efflorescences: A tool for mapping and evaluation of stone decay" Construction and Building Materials, Vol. 25, 4, Abril 2011, pp. 1603-1611 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.003>
- [15] Brunetaud X, De Luca L, Janvier-Bados S, Beck K, AlMukhtar M. "Application of digital techniques in monument preservation" European Journal of Environmental and Civil Engineering. Vol 16, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2012.676365>
- [16] Cossu R, Chiappini L. "A color image segmentation method as used in the study of ancient monument decay" Journal of Cultural Heritage Vol 5, 4. 2004, pp 385-391 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2004.03.005>.
- [17] M.C. Angel, B. Martínez, F. Rodríguez, N. Prendes. "Monuments Deterioration Evaluation Using Digitized Images". Materiales de Construcción, nº 240, 47-57,1995. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.1995.v45.i240.545>
- [18] ImageJ. Open and public software. Available at <https://imagej.nih.gov/ij/>.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Proiescon S.L la financiación parcial de este estudio, al Doctor Nicanor Prendes (Ministerio de Obras Públicas) por el análisis digital de imágenes y al Doctor Johannes Weber del IATCS (Institute of Arts and Technology/conservation Sciences, Viena) por la identificación de los cementos naturales.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8200-1_spanish.pdf



Microestructura de morteros de albañilería fabricados con poliamida reciclada

Microstructure of masonry mortar with recycled polyamide

Miguel-Ángel Salas¹, Matthieu Horgnies², Jesús Gadea¹, Verónica Calderón¹

¹ Universidad de Burgos (España)

² Lafarge Centre de Recherche (France)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8195>

1. INTRODUCCIÓN

En un intento por reducir la gran cantidad de subproductos residuales y la cantidad de polímeros y plásticos en vertederos sin un uso adecuado, se plantean numerosas políticas orientadas al reciclaje y reutilización de este tipo de materiales. Aunque no existen muchas estadísticas detalladas que indiquen la cantidad de residuos de poliamida generados en la industria en general, la cantidad estimada es de alrededor del 20% del total de los desechos de polímero, lo que significa unas 200.000 toneladas de residuos al año [1]. Esto conduce a buscar una solución que de salida al empleo y la valorización de este residuo.

Por otro lado, a pesar de que existen numerosos estudios previos con la influencia que producen los residuos de poliméricos y plásticos en conglomerantes, como morteros [2], hormigones [3], betún [4] y yeso [5], es muy escasa la inclusión de poliamida en polvo [6].

Por esta razón, se han realizado algunas investigaciones previas sobre la caracterización de morteros reciclados y ensayos de durabilidad de estos materiales. Este estudio implica un trabajo innovador y contribuye a avanzar en este interesante tema.

Con la intención de analizar de forma más profunda estos productos, se han analizado a fondo la microestructura y la matriz, ya que las propiedades a nivel microscópico siempre influyen y determinan una correlación con el comportamiento macroscópico.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo se centra en determinar las variaciones de microestructura producidas por este residuo en la porosidad y permeabilidad, los

parámetros principales en la aplicación de estos morteros reciclados de albañilería o revestimiento.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El cemento utilizado es un cemento Portland tipo CEM I 42,5 R con una densidad de 3065 kg/m³, según la norma EN 197-1. [7]

Se emplea arena de río, tamizada entre 0 y 2 mm con una densidad de 2600 kg/m³, según EN 13139. [8]

El residuo de polvo de poliamida se obtiene a partir de materia prima residual generada en un proceso industrial de sinterización por láser. Su tamaño granulométrico es inferior a 1 mm, con una densidad real de 1070 kg/m³.

Preparación de muestras

La producción de morteros se lleva a cabo de acuerdo con las normas europeas actuales, sustituyendo porcentajes en volumen de 25%, 50%, 75% y 100% de arena convencional por residuos de poliamida en polvo. Se utiliza una relación 1/3 de cemento/agregado, considerando el agregado como la suma de la arena y el polímero. Además, se fabrican muestras de referencia con arena para contrastar las propiedades finales.

La cantidad de agua a añadir a cada mezcla será la cantidad necesaria para obtener morteros de consistencia plástica que obtengan un valor de escurrimiento de 175 ± 10 mm en la mesa de sacudidas siguiendo el procedimiento indicado en la norma EN 1015-3 [9]. Todos los morteros obtenidos tienen una resistencia a la compresión superior a 7 MPa para ser utilizados como materiales de albañilería.

Caracterización de muestras

La microscopía electrónica de barrido se realiza mediante un microscopio electrónico de barrido de alta resolución (SEM FEG Quanta 400 de FEI Company, EE.UU.). Las muestras fracturadas se analizaron en modo ambiental utilizando una presión de 3,2 Pa (para limitar la deshidratación).

Se utiliza la tomografía axial computarizada (TAC) para la obtención cuantitativa de tamaños de poro macroporosos de más de 170 μ m. El aparato consta de un sistema de rayos X con un tubo de Yxlon de 225 Kv/30mA y una cabina metálica de acero-plomo-acero, de modo que funciona con una radiación máxima de 225Kv/30mA dentro de la cabina.

La estructura microporosa del material se determina por técnica de porosimetría de intrusión de mercurio (MIP) (Autopore IV de Micromeritics, EE.UU.). El intervalo de presión del porosímetro abarca desde el sub ambiente hasta 400 MPa, cubriendo el intervalo de diámetro de poro de aproximadamente 360 μ m a 3 nm. Las muestras se secan en un horno a 45°C durante la noche antes de ser ensayadas.

La estructura de poro se ha asociado con la permeabilidad al vapor de agua de las mezclas. La norma específica que para encontrar el valor de permeabilidad, primero es necesario calcular la permeancia, que es el flujo de vapor de agua que pasa a través de una unidad de área en condiciones de equilibrio para cada unidad de diferencia de presión de vapor en ambos lados del mortero. [10] A continuación, se calcula la permeabilidad teniendo en cuenta el grosor de la muestra de ensayo.

3. RESULTADOS

La microscopía electrónica de barrido (SEM) muestra una buena compatibilidad entre la microestructura de las partículas de residuo de poliamida y la pasta de cemento. También se ha observado que el polímero se encuentra bien dispersado de manera homogénea en la matriz de mortero, con buena adhesión que conecta la pasta de cemento con las partículas de polvo [11].

Además, la microestructura de los morteros ha sido examinada en detalle a través de microscopía electrónica de barrido rápido (FESEM). La técnica de mapeo ha demostrado una distribución homogénea de materias primas en todas las muestras (Figura 1).

Por otro lado, mediante tomografía computarizada (TAC) se ha determinado de forma cuantitativa la macroporosidad de estos morteros (poros mayores de 170 μ m). Tanto las secciones transversales como las reconstrucciones tridimensiona-

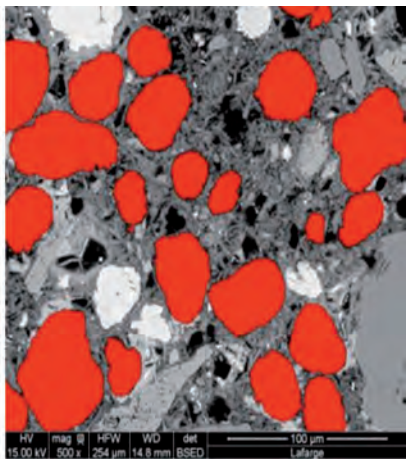
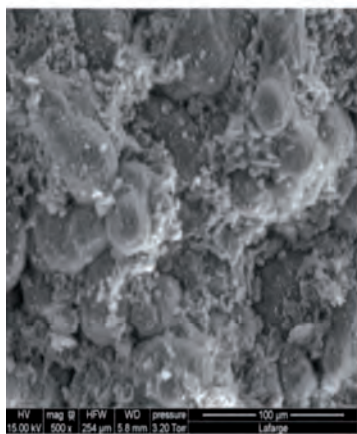


Fig. 1: Derecha: imagen SEM de la muestra 3PA100. Izquierda: Mapeado FSEM de la muestra

les han demostrado una distribución uniforme y homogénea de materias primas y macroporos [12]. La Figura 2 proporciona el porcentaje de macroporos calculados por TAC, obteniendo que la porosidad aumenta de manera proporcional al contenido de poliamida en la composición del mortero.

El tamaño, diámetro y porcentaje de volumen de microporos se ha obtenido por porosimetría de intrusión de mercurio (MIP). El empleo de residuos de polvo de poliamida en lugar de arena produce una influencia compleja sobre las propiedades de la microporosidad. Cuando se reemplaza un 25% de arena por poliamida, la microporosidad disminuye con respecto a las muestras de referencia, mientras que con mayores cantidades de polímero (50%, 75% y 100%), la porosidad aumenta proporcionalmente con el residuo.

Este comportamiento podría deberse a un “envasado” inicial que puede producir una distribución no homogénea que hace que los capilares sean más pequeños y de microporosidad menor [13]. Este efecto desaparece con mayores cantidades de poliamida (Tabla 1). Los resultados confirman un diámetro de poro crítico de 0,123 micras para la mezcla de 3PA25, posiblemente debido a la porosidad inherente de la pasta de cemento. Las muestras 3PA50, 3PA75 y 3PA100 muestran valores mayores de 1 micra.

Mortero	Ø crítico de poro (µm)	Microporosidad MIP (%)
M-3R	0.123	24.6
M-3PA25	1.030	22.6
M-3PA50	1.527	26.9
M-3PA75	2.710	29.9
M-3PA100	3.338	39.1

Tabla 1: Diámetro crítico de poro y microporosidad de morteros

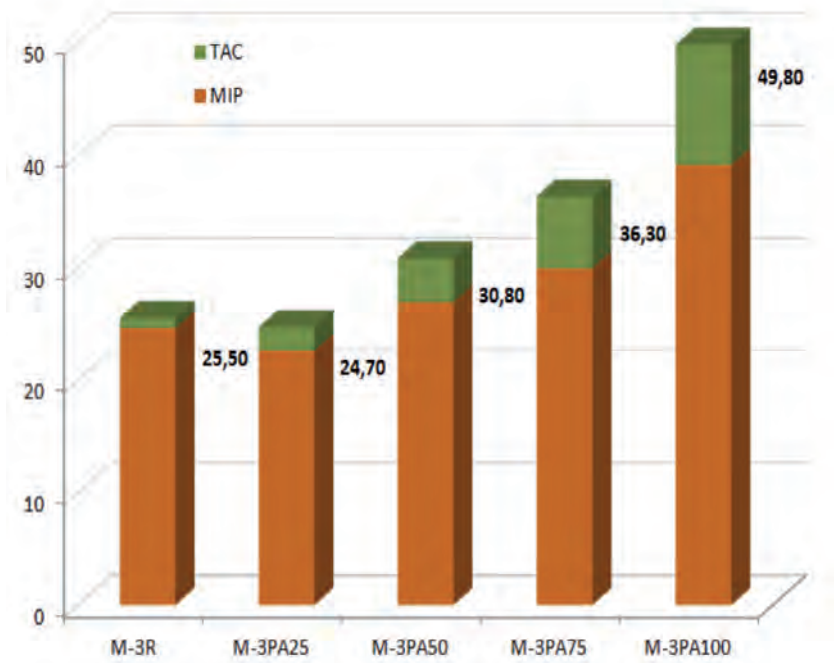
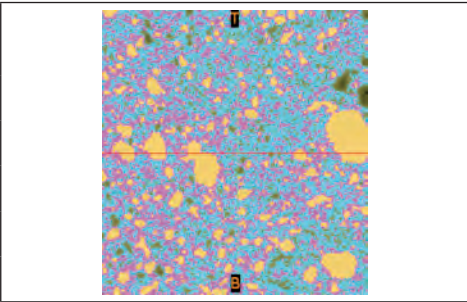


Fig. 3: Microporosidad (MIP) y macroporosidad (TAC) en porcentaje



Mortero	Macroporosidad TAC (%)
M-3R	0.9
M-3PA25	2.1
M-3PA50	3.9
M-3PA75	6.4
M-3PA100	10.7

Figura 2: Detalle de TAC del mortero 3PA75 y tabla con la macroporosidad de las mezclas

Finalmente, se ha llevado a cabo la estimación de la porosidad total de las mezclas, obtenida mediante la suma de los datos de macroporosidad (TAC) y la microporosidad (MIP). El MIP revela tamaños de poro de entre 170-200µm y 5nm, mientras que la técnica TAC identifica poros mayores de 170 µm aproximadamente (Figura 3).

La permeabilidad al vapor de agua aumenta considerablemente con la cantidad de poliamida, lo que se considera una ventaja interesante a tener en cuenta para estos materiales reciclados [14]. Los altos valores obtenidos en morteros con susti-

Mortero	Permeabilidad al vapor de agua (kg/m.s.Pa)
M-3R	5.35 E-12
M-3PA25	1.16 E-11
M-3PA50	4.07 E-11
M-3PA75	4.99 E-11
M-3PA100	5.08 E-10

tución del 50%, 75% y 100% son adecuados para permitir la difusión de vapor en las paredes y evitar la condensación del agua (Tabla 2). [15]

4. CONCLUSIONES

Además de los beneficios ambientales implícitos que representa la valorización de cantidades significativas de residuos poliméricos, esta investigación desarrolla la fabricación de morteros ligeros con residuos de polvo de poliamida en polvo con ventajas añadidas.

La porosidad de los morteros aumenta con la cantidad de residuo incorporado de poliamida, obteniendo materiales clasificados como morteros ligeros, con una adecuada distribución de materias primas y poros. Otros experimentos prospectivos se refieren a la influencia del aumento de la porosidad para la capacidad de aislamiento térmico y acústico, y por lo tanto estos compuestos podrían ser adecuados para ser empleados como morteros de mampostería.

La caracterización de la microestructura a través de la microscopía electrónica de barrido confirma una buena cohesión entre la pasta de cemento en la interfase poliamida-cemento.

La permeabilidad al vapor de agua incrementa con la cantidad de residuo polimérico. Esto se considera un factor favorable, para extender el empleo de estos conglomerantes reciclados como morteros de rehabilitación.

PARA SABER MÁS

[1] Plastics—the Facts 2016. An analysis of European latest plastics production, demand and waste data. European Association of Plastics Manufacturers (PlasticsEurope). Brussels. <http://www.plasticseurope.org/Document/plastics---the-facts-2016-15787.aspx?FoIID=2>

[2] C. Junco, J. Gadea, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, V. Calderón. Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam, *Cement Concrete Composites* 2012, 34:1174-1179. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.006>

[3] L. Courard. Evaluation of thermodynamic properties of concrete substrates and cement slurries modified with admixtures, *Materials and Structures* 2002, 35:149-155. doi:10.1007/BF02533583.

[4] B. Singh, L. Kumar, M. Gupta, G.S. Chauhan. Polymer-modified bitumen of recycled LDPE and maleated bitumen. *Journal of Applied Polymer Science* 2013, 127: 67-78. DOI: 10.1002/app.36810.

[5] L. Alameda, V. Calderón, C. Junco, A. Rodríguez, J. Gadea, S. Gutiérrez-González. Characterization of gypsum plasterboard with polyurethane foam waste reinforced with polypropylene fibers. *Materiales de Construcción*, 2016, 66: 324. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2016.06015>

[6] J. Gadea, M. A.Salas, S. Gutiérrez-González, M. Horgnies, V. Calderón. Recycled polyamide mortars modified with non-ionic surfactant: physical and mechanical strength after durability test. *Materials and Structures*, 2016, 49, 3385-3395. doi:10.1617/s11527-015-0726-z.

[7] EN 197-1. Cement composition, specification and conformity criteria. Part 1: common cements; 1994.

[8] EN 13139. Aggregates for mortar; 2002.

[9] EN 1015-3. Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). 1999.

[10] EN 1015-19. Methods of test for mortar for masonry. Part 19. Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars. 1999.

[11] I. Pochard I, Labbez C, Nonat A, Vija H, Jönsson B. The effect of polycations on early cement paste, *Cement and Concrete Research* 2010, 40:1488-1494. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.06.002>

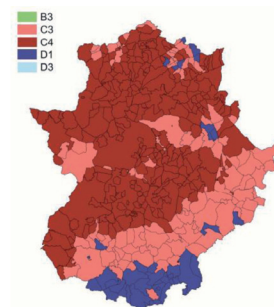
[12] E. Knapen, D. Van Gemert D. Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers. *Cement and Concrete Research* 2009, 39:6-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.10.003>

[13] L. Cui,J. H. Cahyadi. Permeability pore structure of OPC paste. *Cement Concrete Research* 2001, 31:277-282. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00474-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00474-9)

[14] J.L Ruiz-Herrero, D. Velasco Nieto, A. López-Gil, A. Arranz, A. Fernández, A. Lorenzana, S. Merino, J.A. De Saja, M.A Rodríguez-Pérez. Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste. *Construction and Building Materials* 2016, 104: 298-310. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.005>

[15] S. Caré, F. Derkx. Determination of relevant parameters influencing gas permeability of mortars. *Construction and Building Materials* 2011, 25:1248-1256. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.028>

Nuevo procedimiento para caracterización climática de regiones utilizable con el código técnico de edificación. Aplicación a Extremadura



New procedures to characterize climatically regions used according technical building code. Application in Extremadura



Fernando López-Rodríguez¹, Antonio Ruíz-Celma², Francisco Jesús Moral-García¹, Elena Pulido-Granado²

¹ Universidad de Extremadura. Departamento de Expresión Gráfica.

² Universidad de Extremadura. Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y Materiales. Avenida de Elvas, s/n - 06071 Badajoz.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7937> | Recibido: 18/01/2016 • Evaluado: 24/02/2016 • Aceptado: 03/11/2016

ABSTRACT

• The new quality requirements set by the European Directives in regard to the limitation of energy demand in buildings, require that the established levels are based on weather conditions. In this paper a methodology for determination of a variable is known as climatic severity of the municipalities in an zone or region, so that has been refined and clarified processes, studying more novel methods for the determination present more precise climatic zones.

You must have full climate records of municipalities, and if you do not have them or to complete them, following the rejection of traditional procedures for calculating sunshine hours, was introduced by interpolation, newest, used in other fields with corrections, thus improving the climate characterization it is done in the TBC.

With regard to climatic severities it is also novel correction is carried out with the degree-day, using an average altitude corresponding to the municipalities of Extremadura with climate records, or consistent novelty in the final detailed study of the municipalities that were in limits areas and possible mismatches that occur. Finally it discusses and describes the climate of the region, reaching associate most areas to C4 zone (cold winters and hot summers), against zoning TBC, which links southern Extremadura area to the D1, similar to the north of Spain, where the winters and the summers are cool, which does not match the current climate in the south of Extremadura.

The methodology developed in this work allows to establish the climatic zoning of any city in accordance with the Spanish Regulations on Energy Efficiency needed to meet these quality requirements Buildings, getting a more detailed zoning and accurate than existing previously.

• **Keywords:** Climate Severity, climatic zones, sunshine hours, degree-days.

Es necesario disponer de registros climáticos completos de municipios, y si no se dispone de ellos o para completarlos, tras el rechazo de procedimientos tradicionales para el cálculo de las horas de sol, se introdujo el de interpolación, más novedoso, utilizado en otros campos, con correcciones, mejorando así la caracterización climática que se realiza en el CTE.

El procedimiento se aplica a los 387 municipios de la Comunidad Autónoma de Extremadura, siguiendo directrices del Documento Básico HE Ahorro de energía, sección HE 1: Limitación de demanda energética del Código Técnico de la Edificación (CTE)

Por lo que respecta a las severidades climáticas es también novedosa la corrección que se lleva a cabo con los grados-día, utilizándose como altitud promedio la correspondiente a la de los municipios de Extremadura con registros climáticos, o la novedad consistente en el estudio final pormenorizado de los municipios que se encontraban en zonas límites y los posibles desajustes que se producen. Finalmente se discute y califica el clima de la región, llegándose a asociar la mayoría de las áreas a la zona C4 (inviernos fríos y veranos calurosos), frente a la zonificación del CTE, que asocia zona sur de Extremadura a la zona D1, similar a la del norte de España, donde los inviernos y los veranos son frescos, lo que no coincide con el actual el clima en el sur de Extremadura.

La metodología desarrollada en este trabajo permite establecer la zonificación climática de cualquier localidad acorde con las Normativa Española sobre Eficiencia Energética en Edificios necesarias para cumplir esas exigencias de calidad, consiguiendo una zonificación más detallada y precisa que las existentes anteriormente.

Palabras clave: severidad climática, zonas climáticas, horas de sol, grados día.

RESUMEN

Las nuevas exigencias de calidad establecidas por las Directivas Europeas en lo que se refiere a la limitación de la demanda energética en edificios, requieren que los niveles exigidos se basen en las condiciones climáticas. En el presente trabajo se presente una metodología para determinación de una variable que se conoce como severidad climática de los municipios en una zona o región, de forma que se han perfeccionado y precisado procesos, estudiando procedimientos más novedosos para la determinación más precisa de las zonas climáticas.

1. INTRODUCCIÓN

La normativa española ha tenido que adaptarse a las exigencias europeas en lo relativo a la eficiencia energética de los edificios, y así, mediante el Real Decreto 235/2013 [1], de 5 de abril se transpone parcialmente la Directiva 2010/31/UE [2] del Parlamento Europeo y se refunde el Real Decreto 47/2007 [3], de forma que se aprueba un procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios existentes y de nueva construcción, teniendo en consideración además la experiencia de la aplicación en los últimos cinco años del RD. 47/2007.

En el Documento Básico HE Ahorro de energía sección HE 1: Limitación de demanda energética del Código Técnico de la Edificación (CTE) [4], se establecen 12 zonas climáticas las cuales se clasifican en función de una variable definida para tal fin, severidad climática, que es el cociente entre la demanda energética de un edificio cualquiera en dicha localidad y la correspondiente al mismo edificio en una localidad de referencia.

Se define una severidad climática para el invierno (SCI) cuando la demanda energética utilizada en el cálculo es la demanda de calentamiento del edificio y otra para el verano (SCV) si la demanda energética utilizada es la de enfriamiento. En ambos casos se ha tomado Madrid como localidad de referencia, siendo, por tanto, su severidad climática la unidad.

Establecido el procedimiento, los reglamentos clasifican las 52 capitales de provincias Españolas en 12 zonas climáticas identificadas mediante una letra (A, B, C, D, y E), correspondiente a la división de invierno, y un número (1, 2, 3,4), correspondiente a la división de verano. Cuando una localidad no está incluida en la

lista anterior, se proponen diferentes métodos simplificados para el cálculo de la zona climática correspondiente.

Se han realizado distintas aproximaciones y estudios para poder establecer características climáticas en municipios de regiones europeas y Españolas como los de determinación de los registros de "años climáticos normalizados" [16], o los procedimientos de interpolación basados en el cuadrado de la distancia de Shepard [8], aplicados a la determinación de la radiación solar [13, 14], mejorados con los efectos orográficos y de altitud para cálculo de la distancia efectiva de Lefevre [10, 11] o los de Sánchez de la Flor et al. de zonificación climática [16]

En el presente trabajo, se presenta una metodología para determinación de las severidades climáticas en una región como Extremadura con climatología extrema (mucho calor y frío), de forma que se han perfeccionado y precisado procesos, estudiando procedimientos más novedosos que permiten la determinación más precisa de las zonas climáticas en donde se encuentran los 387 municipios de la Comunidad Autónoma de Extremadura, y finalmente se llega a calificar globalmente el clima de la mencionada región. Estos procedimientos permiten la determinación de la zonificación de cualquier municipio desde el punto de vista de pertenencia a una región, acorde con la Normativa Española sobre eficiencia energética en edificios.

La Fig. (1), muestra la zonificación climática actual según el CTE, para Extremadura.

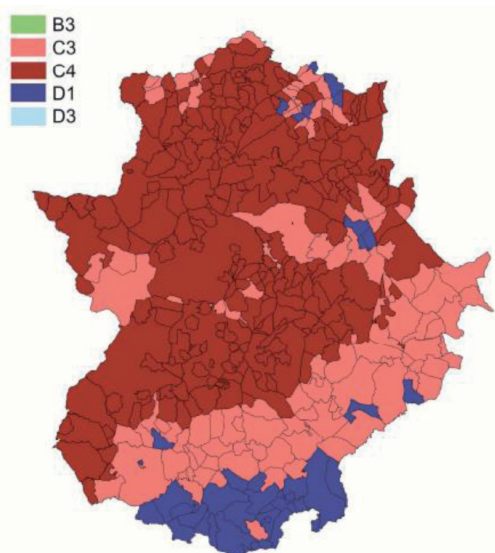


Fig. 1: Zonificación climática actual según Código Técnico de la Edificación para Extremadura

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Todo el proceso para la determinación de las severidades climáticas y posterior asignación de zonas climáticas se llevó a cabo en dos etapas. La primera fue la de obtención de registros climáticos normalizados de todos los municipios de la región incluidos los que disponían de variables climáticas y los que carecían de algunas o todas.

La segunda consistió en el establecimiento de la zonificación climática de los municipios con los registros y los datos climáticos anteriores, finalizando con el proceso de obtención de las severidades climáticas de toda la Región de Extremadura.

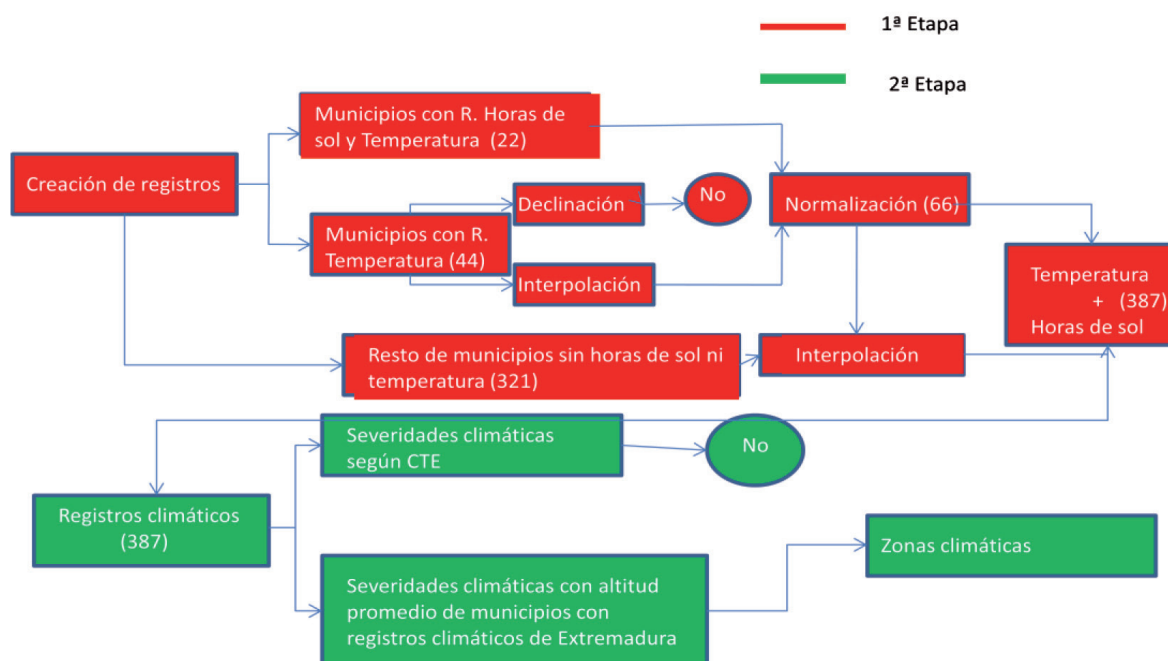


Fig. 2: Diagrama de flujo y resumen del proceso

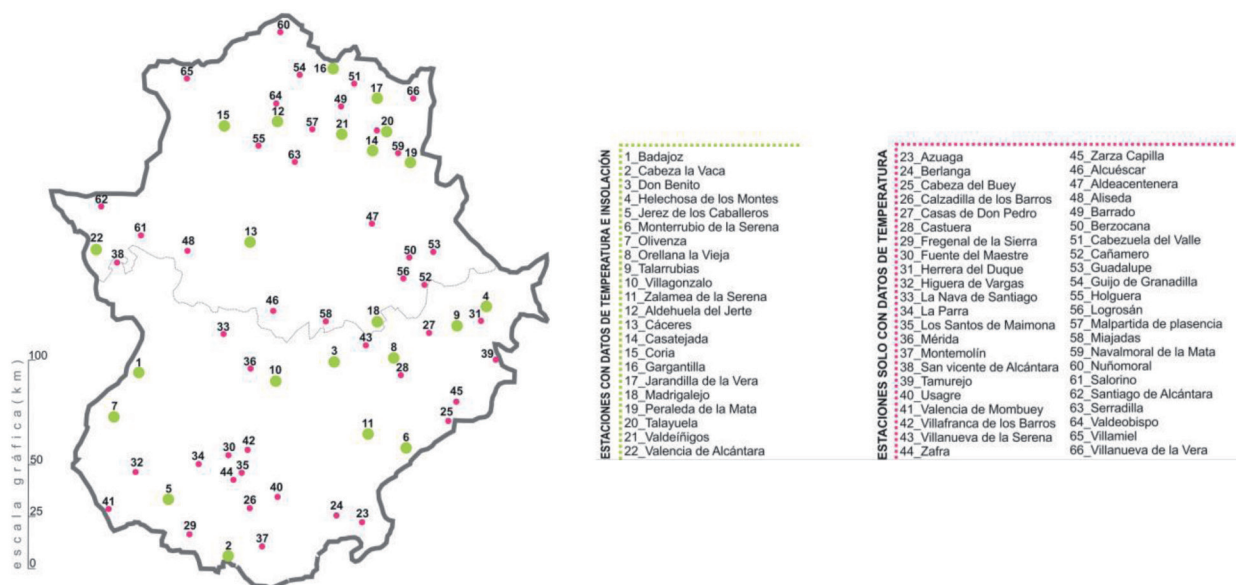


Fig. 3: Densidad y localización de las estaciones meteorológicas en Extremadura

La Fig. (2) muestra un diagrama de flujo en donde se resume todo el proceso.

La primera etapa, obtención y formalización de los registros climáticos, se llevó a cabo de acuerdo con las fases siguientes:

1. Creación de registros climáticos

Para la generación de los registros climáticos, la información meteorológica analizada procedió de Organismos Oficiales: Estado (AEMet) [5] y Gobierno de Extremadura [6], donde se registraban los datos de temperatura (T) y horas de sol (N) hasta el año 2015.

Estos registros se sometieron a un análisis estadístico para detectar anomalías y datos inconsistentes, generando una base de datos para un total de 66 municipios, de los que 22 disponían de registros de temperatura y horas de sol y 44 solo de datos de temperatura. La Fig.(3), muestra la densidad y localización de estaciones en la región de Extremadura.

De acuerdo con el CTE estas 44 estaciones habría que descartarlas, pero para no perder una cantidad importante de datos, se decidió utilizar la temperatura medida e intentar estimar las horas de sol de esos municipios, a partir de los datos que se disponía.

Las horas de sol máximas teóricas, es decir, las que se producirían en un día en ausencia de nubosidad, se calcularían para el día 15 de cada mes N_{dia15} con los procedimientos actuales, de la siguiente forma:

$$N_{dia15} = \frac{24w}{\pi} \quad (1)$$

Siendo,

N_{dia15} : Número de horas de sol teóricas del día 15 de cada mes

w: ángulo horario, es el ángulo correspondiente a la aparición y desaparición del sol en el plano horizontal

La expresión de w es la siguiente:

$$w = \cos^{-1}(-\tan(Declinacion_{15mes}) \tan(latitud)) \quad (2)$$

Siendo:

$Declinacion_{15mes}$: Declinación del día 15 de cada mes

La declinación se puede calcular mediante la ecuación de Cooper [7] siguiendo la expresión:

$$Declinacion_{15mes} = 23.45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284 + dia_{año_{mes}}}{365}\right) \quad (3)$$

Siendo,

$Dia_{año_{mes}}$: el día acumulado para cada mes

Finalmente, el número de horas de sol máximas teóricas de un mes será:

$$N = N_{dia15} \cdot dias_{mes} \quad (4)$$

Siendo:

N: número de horas de sol máximas teóricas de un mes

$dias_{mes}$: número de días que tiene el mes

Se observa en las expresiones (2) y (3) que la variable más sensible para el cálculo de w y N_{dia15} , es la latitud, siendo el intervalo de variación de latitudes de Extremadura el comprendido entre 37° 56' y 40° 29', por lo que las diferencias de horas de sol entre poblaciones extremas no deben ser muy significativas.

En la Fig. (4) se representa para Extremadura la variación de las horas de sol de los municipios que disponen de datos en relación con la latitud. Puede comprobarse que la latitud no influye en las

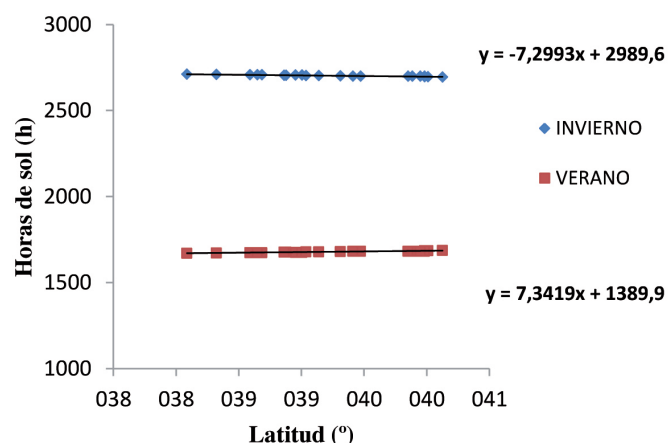


Fig. 4: Variación de las horas de sol con la latitud en Extremadura

horas de sol de los municipios, por lo que se rechazó este procedimiento, dado su falta de precisión.

Por ello, y con objeto de conseguir la máxima precisión en la obtención de datos, para aquellos municipios (44) que solo disponían de datos de temperatura, se recurrió a determinar las horas de sol mediante un proceso de interpolación, basado en el método del inverso del cuadrado de la distancia, o método gravitatorio de Shepard [8], que a su vez utiliza el desarrollado por Zelenka et al. [9], con aplicación de las siguientes penalizaciones:

- Penalización debida a la diferencia de altura, Zelenka et al. [9].
- Penalización por la distancia Norte-Sur o latitud calculada por Wald y Lefèvre [10, 11].

Estos procedimientos de interpolación ya han sido utilizados en otras aplicaciones, como por ejemplo cálculo de la radiación solar [13, 14], habiéndose obtenido buenos resultados.

Bajo estas premisas, se llevó a cabo la interpolación de forma que se establece la influencia que tiene cada municipio con registro climático sobre el municipio a interpolar, la cual está en función de la distancia geográfica, la diferencia de altura y la diferencia de latitud.

Este método asume que cada punto en el conjunto de datos tiene una influencia local que disminuye con la distancia y que, por lo tanto, los valores de los puntos cercanos al que se estudia tienen mayor peso en el valor que será asignado al mismo, teniendo influencia la latitud y la altura topográfica [10, 11].

La distancia geográfica entre dos municipios que se denominan 1 y 2, puede obtenerse con la expresión:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (5)$$

Siendo x e y las coordenadas UTM del municipio y z representa la altura sobre el nivel del mar, todas expresadas en km.

Para la primera penalización, referida a la altura entre municipios, se realiza la corrección debida a Zelenka et al. [9], que establece que 50 km de distancia horizontal es equivalente a 100 m de altitud para el cálculo de las horas de sol, por lo que la expresión (5) se modifica de la siguiente forma:

$$d = \sqrt{(d_{hor})^2 + [(z_1 - z_2)]^2} \quad (6)$$

donde la distancia horizontal, d_{hor} , viene dada por:

$$d_{hor} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (7)$$

El factor de corrección se introduce a continuación, por tanto f_d para obtener la distancia efectiva será:

$$f_d = \sqrt{(d_{hor})^2 + 500(z_1 - z_2)^2} \quad (8)$$

Como ya se ha indicado, la segunda corrección surge de la penalización por la diferencia en latitud F_{NS} , debida a Wald y Lefèvre [10, 11], que influye de la siguiente forma:

$$F_{NS} = 1 + 0.3 \cdot |\phi_2 - \phi_1| \cdot \left[1 + \frac{(\sin \phi_2 + \sin \phi_1)}{2} \right] \quad (9)$$

$$f_{dl} = F_{NS} \cdot f_d \quad (10)$$

Donde f_{dl} es el factor de corrección conjunto por diferencia de alturas y diferencia de latitudes, y ϕ es la latitud expresada en grados.

Por tanto, introducida las dos correcciones, como consecuencia de las penalizaciones, la distancia efectiva expresada en km viene dada por:

$$d_{dl} = \sqrt{F_{NS}^2 (d_{hor})^2 + 500(z_1 - z_2)^2} \quad (11)$$

El factor de ponderación para llevar a cabo la interpolación y obtener las horas de sol efectivas sería:

$$w_i = \frac{\frac{1}{(d_{dl}^2)^2}}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{(d_{dlj}^2)^2}} \quad (12)$$

Donde w_i es el factor de ponderación para el municipio de referencia i , rodeado de m municipios, que sirve para obtener las horas efectivas de sol.

Por tanto, la expresión para el cálculo de las horas de sol para los municipios que no disponen de registros climáticos es la siguiente:

$$n = \sum_{i=1}^m w_i \cdot n_i \quad (13)$$

donde i es la referencia del municipio, n son las horas de sol acumuladas y m es el número de municipios asumidos en el proceso de interpolación.

2. Normalización de registros climáticos

Los registros obtenidos en el apartado anterior no coincidían con los correspondientes a los utilizados en los programas de referencia para la calificación energética de edificios, surgidos a partir del RD 47/2007 o RD 235/2013 donde se dispone de años tipo para las capitales de provincia de España y, en concreto, para las dos capitales de provincia de Extremadura, en el periodo 61-90 (Guía resumida del clima en España 1961-1990) [15].

Se ha desarrollado una metodología capaz de generar lo que se ha llamado "años climáticos normalizados", siendo éstos el conjunto de registros mensuales de variables climáticas (en este caso de temperatura y horas de sol) generados a partir del año tipo de la capital de provincia a la que pertenece.

Esta metodología de tratamiento de datos climáticos ya ha sido utilizada en otras investigaciones [16] con buenos resultados, debiéndose obtener, en primer lugar, la desviación de temperatura y horas de sol para la capital de provincia.

La normalización consiste en la aplicación a cada municipio o estación meteorológica, y a cada una de las variables climáticas que cuentan con registros climáticos, las mismas desviaciones que las calculadas para su correspondiente capital de provincia, a la hora de normalizar datos climáticos.

3. Obtención del resto de registros por interpolación

Finalmente, se procedió de igual forma con el resto de los 321 municipios restantes, en este caso utilizando los mismos procedimientos de interpolación, tanto para las horas de sol como para la temperatura, y de la misma forma se tuvo en cuenta la distancia geográfica y las penalizaciones por altura y latitud.

En este caso, para la interpolación de temperaturas, la corrección toma una expresión similar a la (11), en donde la constante adquiere un valor de 100 como consecuencia de que 10 km en distancia horizontal equivalen a 100 m de altitud, por lo que la distancia efectiva en km viene dada por:

$$d_{dl} = \sqrt{F_{NS}^2 (d_{hor})^2 + 100(z_1 - z_2)^2} \quad (14)$$

Por tanto, las expresiones para llevar a cabo el cálculo de las temperaturas en los municipios que carecen de registros climáticos son idénticas a las (12) y (13).

La **segunda etapa** fue la de asignación de las zonas climáticas en Extremadura, para lo que se siguió el procedimiento descrito en el Documento Básico HE Ahorro de energía sección HE1 del CTE, denominado "Determinación de las zonas climáticas basada en registros climáticos"[4].

Para ello se ha utilizado la correlación que se define en el CTE, denominada severidad climática, una para invierno (SCI) y otra para verano (SCV), en donde la combinación de ambas severidades da lugar a las zonas climáticas. Ésta se obtiene a través de las dos variables que se exponen a continuación, las cuáles se calcularán para los meses de octubre a mayo, para el invierno, y para los de junio a septiembre, para el verano:

1. Grados-día: se determina mediante la temperatura media mensual en °C, su desviación tipo y la temperatura base (20°C), según la norma UNE-EN ISO 15927-6: Diferencias acumuladas de temperatura (en grados día) [17].

2. Relación entre horas de sol mensuales y horas de sol mensuales máximas: la primera se obtiene de registros climáticos y la segunda se calcula en función de la declinación solar y la latitud del lugar.

Mediante la utilización de los registros climáticos obtenidos anteriormente con una corrección final de los grados-días, debido a que la altura media de los municipios utilizados como referencia no tiene por qué coincidir con la del municipio interpolado, se obtiene la zonificación climática de estos municipios. Ello es debido a que los grados día dependen de la altitud incrementándose en invierno y disminuyendo en verano con el incremento de altitud, tal como puede apreciarse en la Fig. (5).

Las expresiones de las severidades climáticas de invierno y verano son las siguientes:

$$SCI = a \cdot GD + b \cdot \frac{n}{N} + c \cdot GD^2 + d \cdot \left(\frac{n}{N}\right)^2 + e \quad (15)$$

$$SCV = a \cdot GD + b \cdot GD^2 + c \quad (16)$$

dónde:

SCI: Severidad climática en invierno

SCV: Severidad climática en verano

a, b, c, d, e: Coeficientes establecidos en el mencionado anexo del CTE.

GD: media de los grados-día en base 20 para los meses de octubre a mayo para la SCI, y de junio a septiembre para la SCV.

n/N: cociente entre horas de sol para el municipio y el número de horas de sol máximas sumadas cada una de ellas por separado para los meses de octubre a mayo.

Los GD se calculan en base a la utilización de la norma UNE-EN ISO 15927-6, pero dado que la altura media de los municipios utilizados de referencia en el cálculo no tienen por qué coincidir con la del municipio objeto de estudio, se utilizará un factor de corrección que se extrae de la pendiente de la recta de invierno o verano, resultante del ajuste de GD en relación con la altitud.

$$GD_{inv} = GD_{inv} + (H - h) \cdot \frac{58.93}{100} \quad (17)$$

$$GD_{ver} = GD_{ver} - (H - h) \cdot \frac{13.71}{100} \quad (18)$$

siendo:

$GD_{inv, ver}$: grados día medio para los meses de invierno o verano

H: altura del municipio a calcular

h: altura promedio de las estaciones utilizada anteriormente, calculada siguiendo un procedimiento análogo al cálculo de las temperaturas y horas de sol.

$$h = \sum_{i=1}^m p_i h_i \quad (19)$$

en donde:

p_i : factor de ponderación similar al de las temperaturas y horas de sol para el cálculo de la altura promedio

h_i : altitud de los municipios con datos climáticos

Para el cálculo de severidades climáticas en toda España se han utilizado como municipios de referencia las capitales de todas las provincias españolas [16]. Pero en el caso estudiado, algunas de estas ciudades pertenecen a zonas climáticas que no se dan en Extremadura, por lo que se utilizó un valor único y procedente de la altura promedio de los municipios de Extremadura que disponían de registros climáticos, siendo ésta, otra de las precisiones introducidas.

En la Fig. (5) se representa el ajuste de los grados-día frente a la altitud, tanto para invierno como para verano.

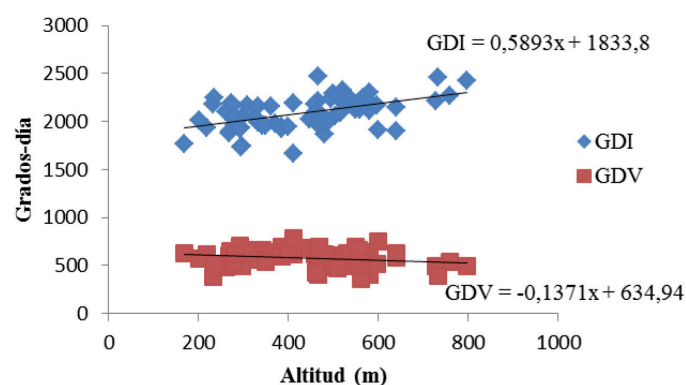


Fig. 5: Distribución de grados-día frente a la altitud para municipios de Extremadura

El documento "Escala de Calificación Energética para Edificios de Nueva Construcción" [4] fija para la asignación de las zonas climáticas seis divisiones para invierno y cuatro divisiones para verano. En la Fig. (6) se aprecia una vista parcial del esquema de calificación energética, donde se ubican los municipios de Extremadura, representados en este caso por un punto, con solo tres zonas climáticas en invierno y dos en verano.

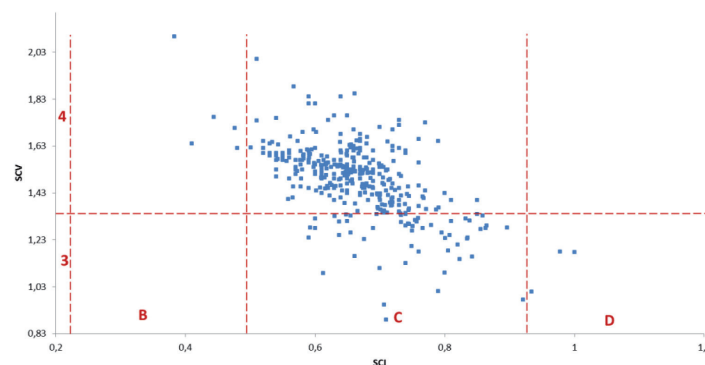


Fig. 6: Vista parcial del esquema de zonificación energética para los municipios de Extremadura

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. (5) se observa que en el ajuste de los grados-día frente a la altitud en invierno la dependencia es mayor que en el verano. Ello se debe a que los grados-día se contabilizan en base 20, y cuando aumenta la altitud, la temperatura de los municipios baja, y el cálculo para temperaturas inferiores a la temperatura base (20° C) se contabiliza en la mayoría de los días, despreciándose los días cuya temperatura es superior a 20° C.

En verano existe muy poca dependencia entre las dos variables, debido a que con la altitud aumenta el número de días con temperaturas inferiores a 20° C, que no son tenidos en cuenta para el cálculo de los grados-día.

Con los grados-día de invierno y verano corregidos, así como con las horas de sol, tanto de invierno y verano, se obtienen SCI y SCV, según las correlaciones establecidas por el CTE (15, 16).

La combinación de los procedimientos expuestos (para municipios con o sin registros climáticos) permiten la obtención de la zona climática para los 387 municipios de la región de Extremadura Fig. (6). La Fig. (7) muestra la nueva distribución de zonas climáticas en Extremadura, frente a la del CTE, obtenidas según el procedimiento descrito anteriormente.

La homogeneidad de la geografía extremeña queda reflejada en la poca variedad de zonas climáticas presentes. De los 387 municipios, 299 pertenecen a la zona C4 y 81 a la C3, quedando únicamente 5 en B3 y 2 en D3, correspondiéndose estos últimos con los lugares de mayores altitudes (superiores a 1000 m).

Si se compara la zonificación climática recogida por el CTE y la nueva distribución que se propone (Fig. 7), puede comprobarse que hay cambios importantes en la zonificación. Así, la zona sureste de la región aparece en la nueva zonificación con mayor severidad climática en invierno, igualando al de la mayoría de la región, lo que indica que el clima tiende a homogeneizarse.

Al mismo tiempo, y siguiendo con esta misma apreciación, desaparecen zonas de excesiva severidad climática en invierno, D1, y se homogeniza a las zona C4, que es la predominante, y aparecen zonas de clima más suave D3, que representan tal vez lugares con cierto microclima distinto al predominante, aunque no demasiado alejado.

Se ha llevado a cabo un análisis pormenorizado de aquellos municipios que se encontraban en el límite de zonas, para lo cual se han tenido en cuenta los valores de sus severidades climáticas y que éstos se hubiesen obtenido de datos medidos o interpolados, además de las zonas climáticas de su entorno y las condiciones del relieve de todo el término municipal.

De los 21 casos así estudiados, finalmente se consideró que debían cambiar de zona los municipios de Nuñomoral y Jaraíz de la Vera en Cáceres y de Puebla de Sancho Pérez en Badajoz, y en los resultados que se presentan ya aparecen con esta corrección (Fig. 7). Por ejemplo, el municipio de Nuñomoral según el CTE su zona climática era C4. Tras la aplicación del procedimiento su zona fue la D3 y posteriormente tras el análisis pormenorizado se le asignó la zona C3.

4. CONCLUSIONES

La metodología desarrollada se ha llevado a cabo en base a una serie de procedimientos ya utilizados en determinados estudios, perfeccionándolos y aplicándolos al tema tratado, de otros nuevos introducidos como consecuencia del rechazo a los tradicionales, y finalmente se ha concluido con una nueva caracterización climática de la región en este caso Extremadura.

En efecto, para poder utilizar los registros climáticos de municipios que carecían de horas de sol, se intentaron estimar éstas siguiendo un procedimiento normal que empleaba el ángulo horario y la declinación. Los resultados obtenidos no eran aceptables ya que no existía dependencia entre las horas de sol y la latitud del lugar, Fig. (4), lo que no es cierto.

Por ello se utilizaron procedimientos de interpolación que emplean registros completos de municipios, en base al inverso del cuadrado de las distancias de Shepard [8], con la corrección de altura topográfica de Zelenka [9] y la que tiene en cuenta la latitud de Lefebvre [10, 11], que ya se habían utilizado para el cálculo de la radiación solar [13, 14] con buenos resultados.

Posteriormente, se normalizaron los registros, dadas las diferencias que existían con los de los programas de referencia para calificación energética de edificios (Calener, Lider, etc.) [10], que

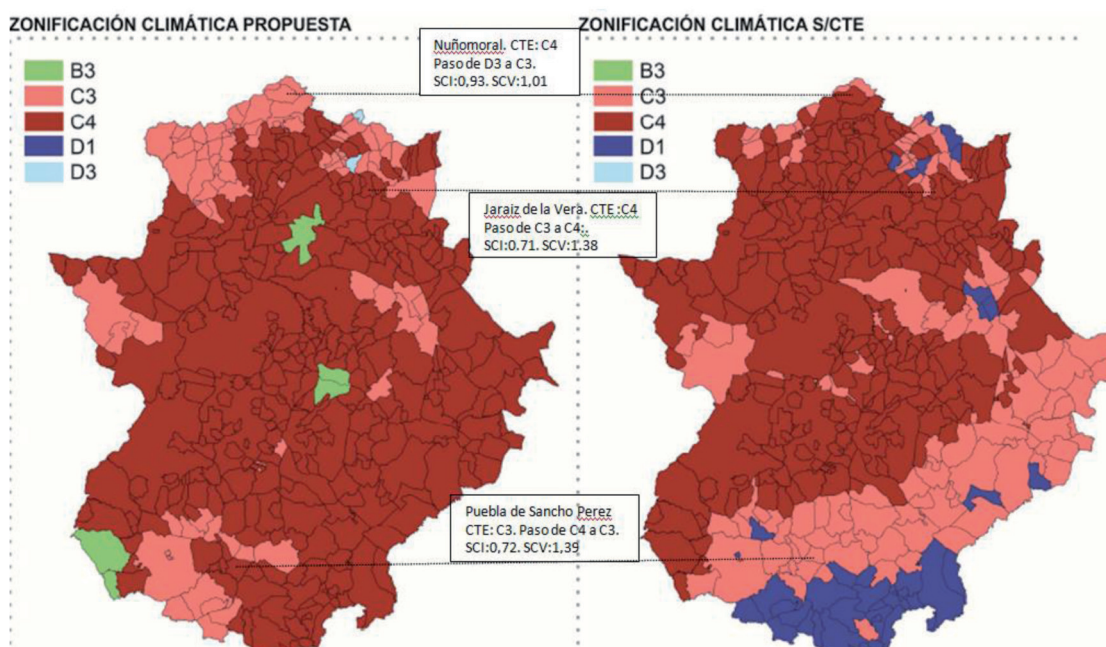


Fig. 7: Nueva distribución de zonas climáticas en Extremadura

habían utilizado los valores de las variables climáticas de la capital de la provincia, y que consistía en aplicar a los registros climáticos las mismas desviaciones que las calculadas para la capital de la provincia y que habían sido utilizados en otras investigaciones [16] con buenos resultados.

A continuación, para el resto de registros de los 321 municipios restantes se siguieron los mismos procedimientos de interpolación que ya se habían utilizado, en este caso para temperaturas y horas de sol pero usando factores de corrección diferentes para el caso de la temperatura y empleando los registros de municipios que disponían de temperatura y horas de sol ya normalizados para la interpolar, por lo que estos registros no hubo que volver a retocarlos, siendo ésta otra de las novedades del procedimiento.

Por lo que respecta a las severidades climáticas es también novedosa la corrección que se lleva a cabo con los grados-día, utilizándose como altitud promedio la correspondiente a la de los municipios de Extremadura obtenida con los mismos coeficientes utilizados para el cálculo de los grados-día para los municipios con registros climáticos, lo cual es mucho más real que utilizar las de otros municipios situados en zonas climáticas que no se dan en Extremadura, como se hace en el CTE o en otros estudios.

En este caso los grados día dependen de la altitud incrementándose en invierno en 58.93 unidades cada 100 metros y, en verano, disminuyen 13.71 unidades por cada 100 metros de incremento de altitud, tal como puede apreciarse en la Fig. (5).

Otra de las novedades del procedimiento consiste en el estudio final pormenorizado de los municipios que se encontraban en zonas límites, es decir las incongruencias o desajustes que en todo procedimiento de este tipo se producen. Tras el análisis de las severidades climáticas del municipio, el disponer de datos medidos o interpolados, zonas climáticas del entorno, y condiciones de relieve y orográficas, se decidió hacer las correcciones oportunas.

Posteriormente se establecieron las zonas climáticas siguiendo el procedimiento que establece el CTE de forma que se llega a la conclusión de que la homogeneidad climática de Extremadura se hace patente. Prácticamente hay tan solo 2 zonas climáticas, de las cuales predomina una, la C4, que es la representativa de un clima continental. El resto de zonas presentes son claramente minoritarias, correspondiéndose estas últimas con los lugares de mayor altitud (superiores a 1000 m). Es decir, la calificación climática que puede hacerse es que la mayoría de las áreas se asocian a la zona C4 (inviernos fríos y veranos calurosos), frente a la anterior zonificación que establece el CTE en donde la zona sur de la región está asociada a la zona D1, similar a la del norte de España, donde los inviernos y los veranos son frescos, lo que no coincide con el actual el clima en el sur de Extremadura.

Por tanto, se puede concluir que la metodología desarrollada es totalmente aplicable a cualquier municipio o región de España, siendo acorde con la Normativa Española sobre eficiencia energética en edificios, como se ha aplicado de manera específica para la Comunidad Autónoma de Extremadura, consiguiendo una zonificación más precisa que la existente anteriormente, resultando por tanto los niveles de demanda más acordes a la realidad climática del municipio.

Finalmente indicar que el procedimiento es de aplicación a los municipios de distintas regiones en donde no existen series de variables climáticas, lo que ocurre en la mayoría de los casos y en donde se utilizan las variables climáticas de la capital de la provincia, pero para ello será necesario disponer de un número suficiente de registros y que estos estén uniformemente distribuidos dentro de la región.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Real Decreto 235/2013 de 5 de abril, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación energética de los edificios.
- [2] Directiva 2010/31/EU del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, sobre la eficiencia energética de edificio. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. L 153/13
- [3] Real decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción.
- [4] Real decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.
- [5] Agencia Estatal de Meteorología (AEMet). Gobierno de España, 2015. Datos de radiación solar, horas de sol y temperatura de municipios de Extremadura.
- [6] Consejería de Agricultura, Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Energía. Gobierno de Extremadura, 2015. Datos de temperatura y horas de sol.
- [7] Cooper, P., (1969): The absorption of solar radiation in solar stills. Volume 12-3, pp. 333-346.
- [8] Shepard D., (1968) A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. Proceedings ACM National Conference 1968, pp. 517-524.
- [9] Zelenka, A., G. Czeplak, V. D'Agostino, J. Weine, E. Maxwell, R. Perez, M. Noia, C. Ratto and R. Festa (1992): Techniques for supplementing solar radiation network data, Volume 1-3. IEA Report No. IEASHCP-9D-1.
- [10] Herramienta unificada LIDER-CALENER (HULC), Nueva versión 1.0.1528.1109. www.codigotecnico.org/menu-recursos
- [11] Mireille Lefebvre, Jan Remund, Michel Aabysson, Lucien Wald. Study of effective distances for interpolation schemes in meteorology. Presented to the XXVII Annual Assembly, European Geophysical Society, Nice, April 2002, Geophysical Research Abstracts, vol. 4, April 2002, EGS02-A-03429.
- [12] Wald, L. and M. Lefevre (2001): Interpolation schemes - Profile Method (a process-based distance for interpolation schemes). SoDa Deliverable D5-1-1. Internal document.
- [13] Mapa de radiación solar de Andalucía. Agencia Andaluza de la Energía. <http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/Radiacion/radiacion1.php>
- [14] Mapade radiación solar de Extremadura. (2011). Agencia Extremeña de la Energía. <http://www.agenex.net/es/proyectos/43-bannersdestacar/bannersdestacarcat/202-radiacion>
- [15] Guía resumida del clima en España, 1961-1990. [Madrid]: Centro de Publicaciones, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1995.
- [16] Sanchez de la Flor, F.J., Alvarez S., Molina J.L (2008). Climatic zoning and its application to Spanish buildings energy performance regulations. Energy and Buildings. 40 (10): 1894-1990.
- [17] AENOR: Norma UNE-EN ISO 15927-6. Comportamiento higrométrico de edificios. Cálculo y presentación de datos climáticos. Parte 6. Diferencias acumuladas de temperatura (en grados día).

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha recibido el apoyo de la Universidad de Extremadura, el Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de los materiales y los grupos de investigación DTERMA y ALCANTARA.

Nuestro agradecimiento a la Consejería de Fomento, Vivienda, Ordenación del Territorio y Turismo de la Junta de Extremadura, Consejería de Agricultura, Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Energía, de la Junta de Extremadura, Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Grupo de Termotecnia de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla y la Agencia Extremeña de la Energía (Agenex).

Comportamiento del micropilote termoactivo como intercambiador geotérmico de baja entalpía en distintas épocas del año



Performance of thermoactive micropile as low enthalpy geothermal heat exchanger in different seasons



Manuel Plaza-García¹, Cristina de-la-Macorra-García², Teresa Magraner-Benedicto³

¹ PILOSUR GEOTERMIA. Calle Santo Domingo Savio, 18 - 23400 Úbeda (Jaén).

² UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO. Campus de Villanueva de la Cañada. Avenida Universidad, 1 - 28691 Villanueva de la Cañada (Madrid).

Tfno: +34 918 10 92 00

³ UNED. Calle de Juan del Rosal, 14 - 28040 Madrid. Tfno: + 34 913 98 60 00

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8048> | Recibido: 03/05/2016 • Evaluado: 04/05/2016 • Aceptado: 25/7/2016

ABSTRACT

- The aim of this article is to show the results obtained from the use of a deep foundation micropile as a shallow geothermal exchanger, so that the micropile has a double functionality: on the one hand to support and transmit the building load to deeper stratus and, on the other hand, to exchange the soil temperature for heating the building through a ground source heat pump.
In order to typify how the micropile performance as a geothermal exchanger is, we carried out several thermal response tests (TRT) in a micropile we made with this research purpose, that implements a reinforcing threaded steel bar designed for geothermal use. The micropile is located in a warehouse in the industrial area "La Planeta", in Mancha Real (Jaén).
This work has as purpose both to get to know the capacity of this micropile to exchange the ground heat and to typify its performance in a shallow geothermal heating system. To reach the first goal, micropile thermal resistance (R_b) is been calculated with the experimental data obtained from the thermal response tests. Meanwhile, for achieving the second objective, we made a range of heat insertion trials simulating the ground source heat pump performance in a building. This way, we determined how the soil temperature influences the heat exchange and the specific heat extraction power (W/m) we can get without thermally overloading the foundation. This value indicates the percentage of the building heating and cooling demand that can be covered by this geothermal system.
- **Keywords:** geothermal energy, energy efficiency, thermoactive foundation, self drilling micropile, geothermal heat pump.

RESUMEN

Este artículo tiene por objeto el mostrar los resultados obtenidos en el aprovechamiento de una cimentación profunda mediante micropilotes como intercambiador geotérmico de baja entalpía teniendo dicha cimentación ahora una doble funcionalidad, la de elemento transmisor de cargas del edificio a estratos más profundos y de mayor capacidad portante y la de elemento transmisor de calor con el terreno donde se consigue la climatización del edificio apoyado con una bomba de calor geotérmica.

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento del micropilote como intercambiador geotérmico, se realizan varios ensayos de test de respuesta térmica (T.R.T) en un mismo micropilote, ejecutado con esta finalidad investigadora, el cual implementa un tubo es-

tructural específico para aplicaciones geotérmicas. El micropilote se ubica en una nave industrial en el Polígono Industrial "La Planeta", Mancha Real (Jaén).

El fin de este trabajo es, por un lado, determinar la capacidad de transmisión de calor del micropilote descrito y, por otro, caracterizar su comportamiento dentro de un sistema de climatización geotérmica. Para lograr el primer objetivo se calcula la resistencia térmica del micropilote (R_b) a partir de los datos experimentales obtenidos en los test de respuesta térmica, mientras que para conseguir el segundo, se realizan una serie de ensayos de inyección de calor en el micropilote simulando el comportamiento de una bomba de calor en un edificio, determinando la influencia de la temperatura del terreno en el intercambio de calor y el ratio de potencia específica de extracción térmica (W/m) que se puede obtener sin saturar térmicamente la estructura. Este valor indica el tanto por ciento de la demanda total de calefacción y refrigeración del edificio que se puede cubrir con este sistema.

Palabras clave: energía geotérmica, eficiencia energética, cimentación termoactiva, micropilote autoperforante, bomba de calor geotérmica.

1. INTRODUCCIÓN

La alta eficiencia energética que presentan los sistemas geotérmicos de baja entalpía en relación a la climatización de edificios es actualmente bien conocida, mediante bombas de calor agua-agua geotérmicas con términos de eficiencia de dichos equipos de C.O.P. (*coefficient of performance*) y E.E.R. (*energy efficiency ratio*) entorno a 5, lo que supone un ahorro de aproximadamente el 60% de la energía primaria utilizada comparado con sistemas convencionales (ACLUXEGA, 2013).

Pero también es bien conocida la problemática que tienen estos sistemas, en términos económicos, por la necesidad de realizar en el terreno una serie de intercambiadores verticales u horizontales que suponen una mayor inversión inicial por parte del promotor.

Los precios actuales de mercado de bombas de calor geotérmicas comparadas con bombas de calor convencional son prácticamente similares a iguales potencias, por lo que si comparamos la climatización de un mismo edificio con un sistema geotérmico o con un sistema de bomba de calor convencional vemos que el secundario (distribución del calor) es similar en ambos casos, por lo tanto de igual coste, y la única y gran diferencia radicaría pues en la necesidad de realizar, en el sistema geotérmico, los intercambiadores de calor verticales u horizontales.

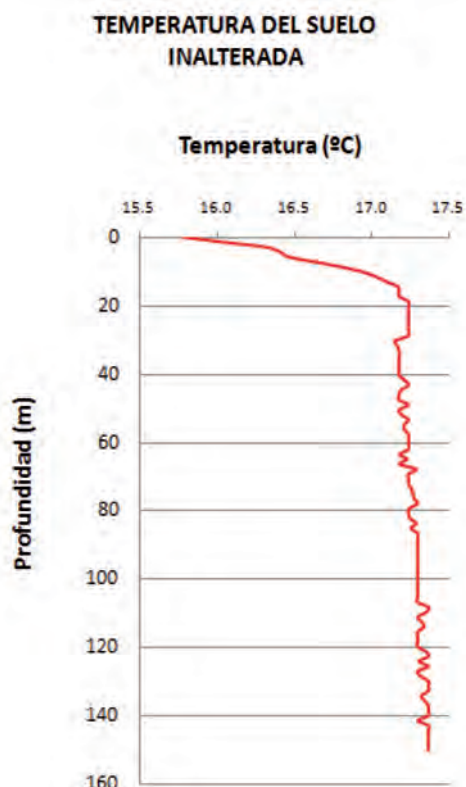


Fig. 1: Ensayo Test de Respuesta Térmica (TRT). Temperatura del suelo inalterada. (Fuente: Elaboración propia)

Esto último implica unos periodos de amortización contrastados de entorno a 8 o 10 años (ACLUXEGA, 2013), dependiendo del caso, que si bien resulta bastante interesante, teniendo en cuenta el ahorro económico que se consigue año tras año después de lograr la amortización, en la actual coyuntura económica supone una barrera a la hora de tomar la decisión siempre penalizada en los sistemas geotérmicos por el elevado desembolso inicial requerido.

Es aquí donde entran en acción las cimentaciones termoactivas. En el caso de edificaciones de nueva construcción que requieran la ejecución de pilotes, micropilotes o muros pantalla y de

edificaciones ya existentes que requieran un recalce de su cimentación mediante micropilotes, surge la oportunidad de aprovechar la perforación o excavación que se necesita realizar para utilizar el mismo elemento estructural como elemento de intercambio geotérmico con un ínfimo sobre coste. Se supera pues el inconveniente económico comentado en el párrafo anterior.

El tubo estructural seleccionado para este ensayo es el fabricado por Ischebeck llamado TITAN 73/53 de diámetro exterior 73 mm y diámetro interior 53 mm, muy habitual en cimentación nueva, recalce de cimentación e incluso muros pantalla de contención. Dentro de la serie TITAN 73 se encuentran el 73/53, 73/56, 73/45 y 73/35 donde solo pueden ser utilizados para aplicaciones geotérmicas, el 73/53 y 73/56 debido a que hace falta tener un espacio mínimo entre el interior del armado del micropilote (53 o 56 mm) y el diámetro exterior del tubo PEAD, polietileno de alta densidad, (32 o 40 mm) de 10 mm para poder circular el fluido caloportador de forma óptima, por lo que solo cumple esta geometría el tubo de PEAD diámetro 32 mm de los dos diámetros comerciales que hay, 32 y 40mm.

2. MICROPILETE BARRA ISCHEBECK TITAN 73/53. USO GEOTÉRMICO

Como se observa en la Figura 1 obtenida a partir de un test de respuesta térmica (TRT) en un sondeo geotérmico vertical cerrado Ø140 mm simple-U de 150 m de profundidad ejecutado en la misma nave industrial, a una profundidad de -20 m la temperatura del suelo permanece aproximadamente constante, en torno a los 17 °C aumentándose debido al gradiente geotérmico. Este hecho permite el aprovechamiento energético de la geotermia, bien mediante un ciclo de agua directo o bien mediante un segundo ciclo y una bomba de calor para una temperatura de servicio de aproximadamente 35 °C para su uso en suelo radiante (rendimiento óptimo de la bomba de calor). Comentar al respecto que el micropilote geotérmico estudiado tiene una profundidad de 15 metros y que por lo tanto el perfil de temperaturas de 0 a 15 metros se verá afectado por las condiciones externas y por el funcionamiento térmico del micropilote.

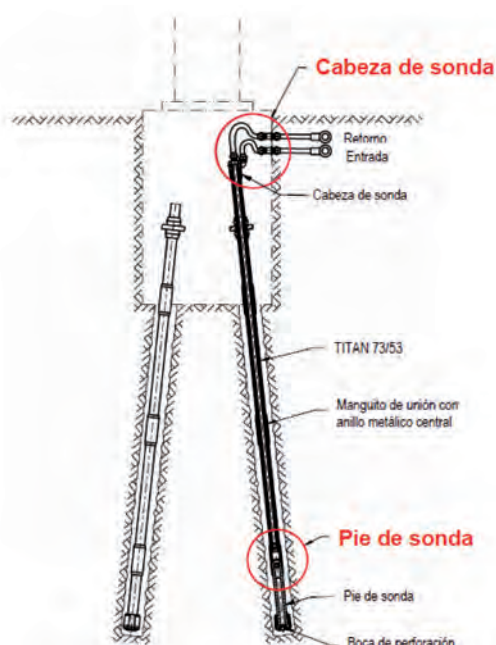


Fig. 2: Esquema micropilote geotérmico (Fuente: Ischebeck, 2011). En la instalación de estudio solo se cuenta con un micropilote geotérmico

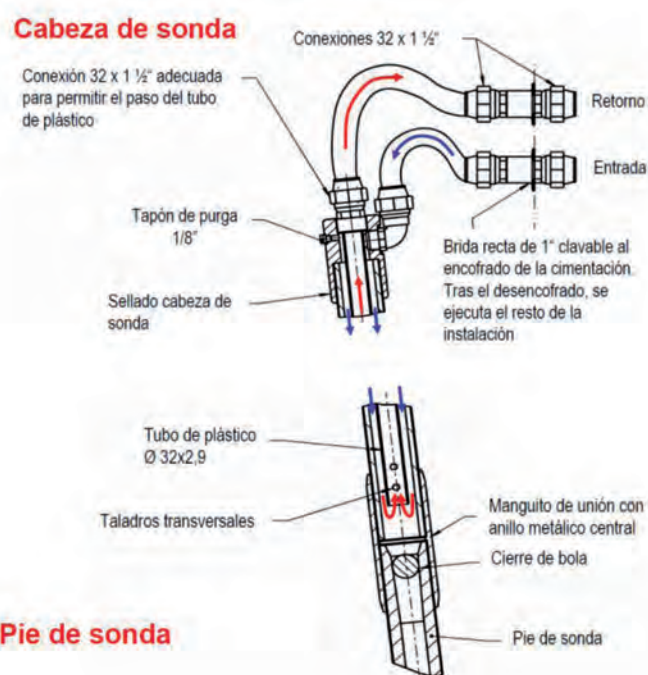


Fig. 3: Cabeza y pie de sonda (Fuente: Ischebeck, 2011)

El intercambiador geotérmico instalado en el micropilote es de la tipología coaxial a diferencia de los sondeos geotérmicos convencionales que disponen de sondas simple/doble U.

Tras el montaje de todos los elementos necesarios para la transmisión de las cargas (placas, tuercas, etc.) se coloca un tubo de polietileno Ø 32 x 2,9 mm en el interior del tubo metálico estructural como se observa en las Figuras 2 y 3, siendo el tubo metálico estructural la impulsión y el tubo de polietileno el retorno.

El tubo de polietileno tiene que quedar acoplado en la conexión superior, como se observa en la Figura 3, y debe de quedar firmemente sellado, después se rosca la pieza superior de la conexión. Antes de poner la sonda en funcionamiento debe realizarse una prueba de presión que garantice la no existencia de pequeñas fugas y por lo tanto la total estanqueidad.

3. EJECUCIÓN MICROPILOTE ISCHEBECK TITAN TERMOACTIVO

Los micropilotes autopercutores Ischebeck TITAN están constituidos de una barra – tubo roscado por laminación en frío como sección de acero portante y un cuerpo de cemento perimetral, que transmite las cargas de tracción y/o compresión principalmente por rozamiento desde dicha barra a través del cuerpo de inyección al suelo.

Estos micropilotes se denominan también micropilotes inyectados o micropilotes de inyección. Se componen de un tubo de acero roscado, empalmado mediante manguitos roscados externos con tope y juntas de estanqueidad centrales y provistos de una boca de perforación de un solo uso – pérdida: autopercusión.

El barrido de la perforación se efectúa con lechada de cemento que, a la vez, estabiliza el anular de la perforación, satura el terreno de cemento y finalmente, actúa como inyección propiamente dicha, esto es, autoinyección simultánea a la perforación. Operativamente, su principal ventaja es la rapidez en la ejecución y las grandes producciones alcanzadas, puesto que se eliminan las maniobras y el coste correspondiente de retirada del varillaje de perforación y/o entubados, la colocación de la armadura y la inyección y, el coste en baterías de perforación y fungibles.

La diferencia con respecto del micropilote convencional radica pues en que el interior del tubo roscado es lavado quedando totalmente libre de lechada con ayuda del cierre de bola existente en el pie de sonda como puede observarse en la Figura 3. Después de esto ya se puede introducir el tubo de plástico 32 x 2,9 mm utilizado para la circulación del fluido caloportador.

En la Figura 4 puede observarse el micropilote termoactivo ya terminado que se va a utilizar para la ejecución de los distintos Test de Respuesta Térmica (T.R.T). También se visualiza a la perfección el cabezal desde donde parten la impulsión y el retorno del fluido caloportador a la bomba de calor.

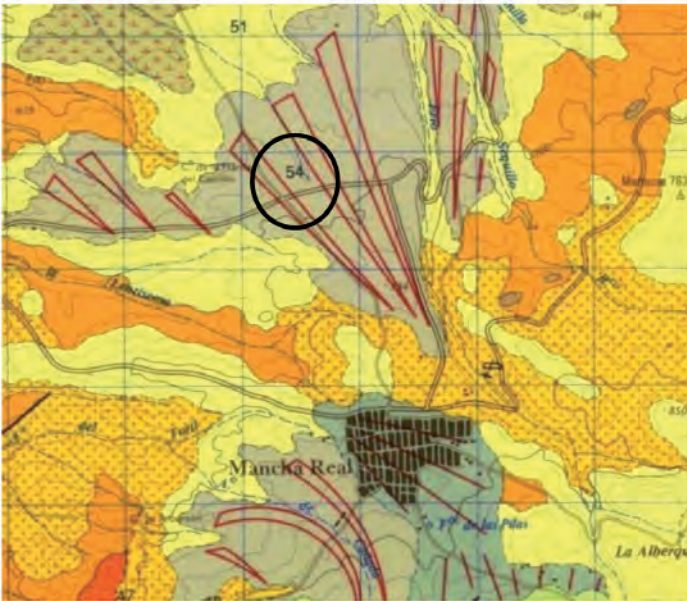


Fig. 4: Cabezal micropilote termoactivo (Fuente: elaboración propia)

4. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

Anexo al micropilote termoactivo ejecutado se realiza un sondeo a 17,7 metros de profundidad con la finalidad de conocer las características geológicas del terreno atravesado. La zona objeto de estudio es una nave industrial situada en la vía de servicio de la carretera A316, en el Polígono Industrial “La Planeta”, Mancha Real (Jaén). Las coordenadas UTM (ETRS 89) son X: 443.960 m e Y: 4.184.109 m.

En la Figura 5 se observa la situación geológica de la zona de estudio (Fuente: IGME) donde aparece material cuaternario de poca potencia en superficie seguido de margas de edad terciaria



PROFUN. (m)	CORTE GEOLOGICO	DESCRIPCION DEL TERRENO
0		0,6m SOLERA (10cm) + MATERIAL ANTRÓPICO.
2		MARGA ARCILLOSA DE BAJA PLASTICIDAD Y COLOR BEIGE CLARO. APARECEN CALICHES DE ESCALA MILIMETRICA MAS ABUNDANTES HACIA TECHO.
4		
6		5,60m GRAVA DE CANTO RODADO CON FRACCIONES ARENOSAS Y FINAS.
8		7,60m MARGA ARCILLOSA DE DE PLASTICIDAD MEDIA Y COLOR BEIGE.
10		9,07m GRAVA DE CANTO RODADO CON FRACCIONES ARENOSAS Y FINAS.
12		11,9m MARGA ARCILLOSA DE ALTA PLASTICIDAD Y COLOR BEIGE.
14		APARECEN INTERCALADOS PEQUEÑOS NIVELES DE CRISTALES DE YESOS.
16		
18		17,7m - FINAL DEL SONDEO

Fig. 5: Mapa Geológico (Fuente: IGME) y perfil litoestratigráfico (Fuente: Estudio Geotécnico GEOXAUEN)

a mayor profundidad. También se indica el perfil litoestratigráfico obtenido. Recalcar que no se ha detectado la presencia de agua.

5. ENSAYOS TÉRMICOS

La evaluación del comportamiento térmico del micropilote se ha efectuado con un equipo de test de respuesta térmica del terreno desarrollado por el Grupo PAIDI TEP250-INGEMER de la Universidad de Jaén. Este equipo está formado por un circuito hidráulico alimentado por un generador térmico de efecto Joule que se conecta a las tuberías del micropilote termoactivo. Por el circuito circula un fluido caloportador, en este caso agua, que intercambia calor con el terreno.

Para que el intercambio de calor se realice a potencia constante, el equipo de ensayo controla el caudal y la diferencia de temperatura entre las tuberías de entrada y salida al terreno, estando las sondas para la medida de la temperatura del terreno y la temperatura ambiental dentro del equipo. Además, el dispositivo asegura que el flujo circulante por el circuito sea turbulento ya que se asegura que el número de Reynolds (R_e) sea mayor de 2300, garantizando así la máxima transferencia de calor. Dicho equipo puede observarse en la Figura 6.



Fig. 6: Equipo TRT (Fuente: elaboración propia)

La caracterización térmica del micropilote termoactivo se ha realizado mediante dos pruebas. La primera de ellas ha consistido en un ensayo de test de respuesta térmica estándar, siguiendo las directrices fijadas por la *Ground Source Heat Pump Association* para pilotes térmicos de diámetro inferior a 300 mm (GSHPA, 2012). El objetivo de esta prueba ha sido caracterizar la capacidad del micropilote Ischebeck TITAN para la transferencia de calor, evaluando su resistencia térmica (R_b). Los datos del ensayo son los que se muestran en la Tabla 1.

Duración del ensayo	72 horas
Salto de temperatura (°C)	3
Potencia inyectada (W/m)	66,83

Tabla 1: Datos ensayo caracterización R_b del micropilote

En este ensayo se ha obtenido una temperatura del terreno inalterada en el emplazamiento de 12,6 °C y una conductividad

térmica del terreno de 2,01 W/mK. Este valor se encuentra dentro del rango de conductividades esperadas para las características geológicas de la zona (rango de conductividades de las margas según norma UNE 100715-1:2014, 1,1 – 2,9 W/mK).

El valor de la resistencia térmica del micropilote se ha determinado a partir de los valores del ensayo empleando el modelo de la línea infinita. Este modelo se basa en la aproximación de que el sistema de intercambio es una fuente lineal infinita, considerando el suelo como un medio homogéneo a una temperatura inicial constante (Ingersoll and Plass, 1948).

El valor de la resistencia térmica depende de la difusividad térmica del terreno que viene determinada por su conductividad y su capacidad térmica calorífica. El valor de la conductividad térmica se ha obtenido en el ensayo de respuesta térmica mientras que el valor de la capacidad térmica calorífica volumétrica considerado inicialmente es de 2 MJ/m³ K (valor para margas según norma UNE 100715-1:2014). Siguiendo un proceso iterativo con las variables de difusividad térmica y resistencia térmica del sondeo se obtiene un valor para este último parámetro de 0,08K/(W/m), con un error del 10%, un valor adecuado pero alejado del valor comercial especificado por Ischebeck (0,05 K/(W/m)).

Para corroborar los resultados del valor de R_b obtenido en el ensayo, se ha realizado un análisis teórico de este parámetro, partiendo de la geometría y de los materiales que conforman el micropilote. Su resistencia térmica estará compuesta por la suma de las resistencias térmicas de los elementos que lo forman: el fluido caloportador, la tubería de polietileno, la tubería metálica y el material de inyección. Este cálculo teórico se ha realizado a partir del modelo unidimensional simplificado propuesto por Zeng (Zeng, Diao y Fang, 2003), que considera una única tubería equivalente en el interior del sistema de intercambio térmico. La expresión que caracteriza este modelo es la siguiente:

$$R_b = \frac{1}{2\pi k_b} \ln\left(\frac{r_b}{r_p \sqrt{N}}\right) + R_p$$

Donde:

- k_b es el valor de la conductividad térmica del relleno, en este caso lechada de cemento (1,45 W/mK, valor medio según norma UNE 100715-1:2014).
- r_b radio del sistema de intercambio térmico (micropilote), en este caso, 36,5 mm.
- r_p radio exterior de la tubería por la que circula el fluido caloportador, en este caso, 26,5 mm.
- N nº de tuberías en el interior del micropilote, en este caso, 1.
- R_p la resistencia térmica de la pared de la tubería. Se considera el valor de 0,075 K/(W/m) correspondiente a la tubería interior de polietileno (PE SDR 11 1") despreciando la resistencia que puede ofrecer la tubería exterior de acero debido a su elevada conductividad térmica (60 W/mK según norma UNE 100715-1:2014).

El valor de R_b obtenido empleando esta aproximación es de 0,11 K/(W/m), valor más próximo al obtenido experimentalmente que al establecido por Ischebeck.

La segunda de las pruebas ha consistido en la inyección de calor en el terreno siguiendo una curva de inyección similar a la que estaría sometido el micropilote si trabajara como intercambiador de calor de una instalación de bomba de calor geotérmica en una vivienda.

Para ello, a lo largo de un periodo de trece días en marzo, de quince días en julio y de trece días en diciembre (año 2015) se ha inyectado al micropilote una potencia calorífica constante (según ISO 17628:2015) de 67 W/m durante 12 horas al día, dejando descansar a la estructura las 12 horas siguientes, simulando el comportamiento de una instalación de refrigeración en una vivienda (horario de 8:00 de la mañana a 20:00 de la tarde).

El objetivo del ensayo ha sido comprobar la capacidad de la termoestructura y del terreno de recuperarse ante inyecciones de calor prolongadas bajo diferentes condiciones de temperatura del terreno, ya que el micropilote se encuentra emplazado en una zona superficial en la que la temperatura del terreno está influenciada por la temperatura ambiente (Kusuda y Achembach, 1965). En las Figuras 8, 9 y 10 (material suplementario) se muestra la evolución de la temperatura de impulsión y retorno a lo largo de los ensayos. Como se puede observar, con el transcurso de los días, la temperatura del fluido caloportador aumenta ligeramente por el efecto de la saturación térmica del terreno aunque sin sobrepasar los 38 °C en el ensayo de marzo, los 40 °C en el ensayo de julio y sin sobrepasar los 36 °C en el ensayo de diciembre. Se puede fijar una temperatura límite de trabajo de las sondas geotérmicas instaladas en el micropilote de 40 °C (temperatura a partir de la cual el material PEAD puede sufrir una pérdida de sus características y reducir su vida útil), por lo que se puede concluir que el sistema estaría trabajando en condiciones adecuadas.

En cuanto a la regeneración térmica del terreno circundante, en las Figuras 11, 12 y 13 (material suplementario) se muestra la evolución, a lo largo de los días de ensayo de marzo, julio y diciembre, de la temperatura media del terreno imperturbado (Tmed TERRENO), medida después de las 12 horas de parada de la instalación, junto con la evolución de la temperatura ambiente en Mancha Real (Tamb) y la temperatura media del fluido caloportador durante el ensayo (Tmed TRT) que sería la media entre la temperatura de inyección y la de retorno.

Se observa que la temperatura media del terreno aumenta en el ensayo del mes de marzo influenciada no sólo por el calentamiento del mismo a causa del intercambio de calor, sino también por la temperatura ambiente. Esto es debido a que la profundidad del micropilote es tan solo de 15 metros, encontrándose a profundidades en las que la temperatura del terreno aún se ve influenciada por la temperatura ambiente.

En el ensayo del mes de julio, con una temperatura de terreno y una temperatura ambiente más próximas a la temperatura media del fluido caloportador, se puede ver como la temperatura media de terreno no se ve tan influenciada por el intercambio de calor con el sistema.

En el ensayo del mes de diciembre, con una temperatura de terreno y una temperatura ambiente más distantes en este caso a la temperatura media del fluido caloportador, se puede observar que la temperatura media del terreno no se ve influenciada por el intercambio de calor con el sistema y si con la temperatura ambiente debido de nuevo a la escasa profundidad del micropilote.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha caracterizado el comportamiento del micropilote termoactivo Ischebeck TITAN 73/53 en un terreno margoso de temperatura inalterada 12,6 °C en marzo, julio y diciembre de 2015. Se ha obtenido que la respuesta térmica del micropilote ante el intercambio de calor con el terreno Rb es superior a la indicada comercialmente por Ischebeck, sin embargo es un valor muy bueno en comparación con la resistencia térmica obtenida en

otras tipologías de intercambiadores verticales en la misma zona de ensayos.

Respecto a la capacidad de intercambio del micropilote bajo sollicitaciones térmicas continuas, se ha observado que el sistema es capaz de trabajar bajo condiciones de cargas térmicas elevadas sin superar las temperaturas límite de trabajo, aunque debido a su instalación superficial esta capacidad de intercambio se ve influenciada por la temperatura ambiente.

En cuanto a la capacidad de intercambio de calor del micropilote con el terreno ante diferentes condiciones ambientales (y por tanto de temperatura de terreno, ya que ésta está influenciada por la temperatura exterior), se puede concluir que la capacidad para disipar calor del micropilote prácticamente no disminuye trabajando bajo las condiciones más desfavorables (inyección de calor durante el mes de julio).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ACLUXEGA, Asociación Clúster da Xeotermin Galega. Manual de climatización geotérmica. Febrero 2013.
- [2] FENERCOM, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Guía de la Energía Geotérmica. 2008.
- [3] GSHPA, Ground Source Heat Pump Association. Thermal pile design, installation and materials standards. http://www.gshp.org.uk/pdf/GSHPA_Thermal_Pile_Standard.pdf. Issue 1.0. Octubre 2012.
- [4] IGME, Instituto Geológico y Minero de España (www.igme.es).
- [5] Ingersoll L.R., Plass H.J. "Theory of the ground pipe source for the heat pump". ASHVE Trans. 1948, vol. 54, p. 339-348.
- [6] Ischebeck, F. Micropilote geotérmico TITAN 73/53. 2011. <http://www.ischebeck.com/home/service/brochures.htm>
- [7] Kusuda T., Achenbach P.R. "Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States". ASHRAE Transactions. 1965, vol. 71, p. 61-75.
- [8] Zeng, H., Diao, N., Fang, Z. "Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers". International Journal of Heat and Mass Transfer. 2003, vol 46, p. 4467-4481.
- [9] AENOR. Diseño, ejecución y seguimiento de una instalación geotérmica somera, parte 1: sistemas de circuito cerrado vertical. UNE 100715-1. Madrid: AENOR, 2014.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8048-1.pdf



Diseño de un sistema constructivo modular bajo criterios pasivos a partir de un material compuesto por fibras de madera aglomeradas con cemento



Design of a modular low-energy building system from a composite material based on wood fibers agglomerated with cement



Carlos-Hugo Álvarez-Pérez, Jose-Florentino Álvarez-Antolín, Sergio Suárez-Fernández, Juan Asensio-Lozano

UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Dpto. de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Edificio Departamental Este. Calle Wifredo Ricart, s/n – 33204 Gijón. Tfno: +34 985 181949

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8133> | Recibido: 23/08/2016 • Evaluado: 29/08/2016 • Aceptado: 21/11/2016

ABSTRACT

- This paper will present the results obtained from the characterization of a 400 kg/m^3 density composite material formed by wood fibers agglomerated with cement, for its use as a structural element on a constructive modular system. To realize the mechanical characterization, several bending and compression tests were performed on the three spatial directions due to the fibers' orientation. The design and characterization of the junctions between modules were studied with tensile tests performed on 10 cm diameter steel rods inserted to the composite material not deeper than 30 cm and with different adhesives. The union between the fibers and cement was studied through the analysis of composite-material samples under an X-Ray Scanning Electron Microscope. The compressive strength rounds the 0,3 MPa, depending on the direction on which the load is applied, and the bending strength the 0,47 MPa. These results allow the material to be used as a structural element in housings with no more than 2 floors. The joints arranged with quick-setting and silicon carbide mortar show a tensile strength of 100 kp. The thermal conductivity has a value of $0,128 \text{ W/mK}$ in an environmental humidity of 60%. The cement used as agglomerate appears to be forming little isolated lumps that allow the material to have an elevated porosity and as a consequence, a high thermal isolation capacity. Based on this study, a complementary analysis on the constructive system was also carried out in order to make it possible to fit it into the Passivhaus demands.
- **Keywords:** Composite Material, Wood Fibers, Thermal Conductivity, Passivhaus Standard, Hygrothermal Characterization, Structural Characterization, Modular Building System, Scanning Electron Microscopy.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la caracterización de un material compuesto, constituido por fibras de madera aglomeradas con cemento y una densidad de 400 Kg/m^3 , para su empleo como elemento portante en un sistema constructivo modular diseñado bajo criterios pasivos. Para la caracterización estructural se realizaron ensayos de flexión y de compresión en las 3 direcciones del espacio debido a la orientación de las fibras. Para el diseño y caracterización de las posibles fijaciones entre módulos se realizaron ensayos de tracción sobre varillas de acero de 10 mm de diámetro insertadas en el material una profundidad de 30 cm. Se analizaron varias interfaces de unión entre el conjunto "varilla-adhesivo" y el material. Para estudiar la unión entre las fibras y la distribución del aglomerante se analizaron muestras

en el microscopio electrónico de barrido con energía dispersa de Rayos X. La resistencia a compresión, según la dirección de carga en servicio, ronda los 0,3 MPa, y la resistencia a flexión alcanza los 0,47 MPa. Estos valores únicamente capacitan a este material para su uso portante en viviendas de 1 o 2 plantas máximo. Las fijaciones con mortero de fraguado rápido y naturaleza silico-carbonática resistirían unos 100 kp. La conductividad térmica con un 60% de humedad alcanzó los 0.128 W/mK . El cemento, que actúa como aglomerante, aparece formando pequeños "grumos", separados entre sí para favorecer una elevada porosidad en el material, y por tanto, un elevado nivel de aislamiento térmico. Como complemento, se propone una mejora en el sistema constructivo modular con el objetivo de dar cumplimiento a las exigencias del estándar Passivhaus.

Palabras clave: Material Compuesto, Fibras de Madera, Conductividad Térmica, Estándar Passivhaus, Caracterización Higro-térmica, Caracterización Estructural, Sistema Constructivo Modular, Microscopía Electrónica de Barrido.

1. INTRODUCCIÓN

Es un objetivo generalizado en el sector de la construcción el desarrollo de sistemas de construcción modulares, que presenten un elevado nivel de aislamiento térmico, que incluyan materiales autóctonos respetuosos con el medio ambiente, y que resulten económicos. Compartiendo estos objetivos, en este trabajo se pretende caracterizar un material compuesto constituido por fibras de madera, aglomeradas con cemento, con el propósito último de diseñar un sistema constructivo modular constituido únicamente por este material. Para ello, este material debería combinar propiedades "*portantes*" y propiedades "*funcionales*" tales como el aislamiento térmico.

Los materiales compuestos constituidos por fibras o virutas de madera aglomeradas con cemento vienen siendo utilizados en la construcción desde hace muchos años. Se han utilizado por sus propiedades fonoabsorbentes, resistencia a la humedad y resistencia al fuego. Recientemente vienen empleándose con notable éxito en Suecia formando parte de la envolvente térmica del edificio, aunque sin requerimientos "*portantes*" [1]. Sin embargo, son mínimas las experiencias que incluyen este material como único elemento "*portante*". Esto permitiría desarrollar un cerramiento constructivo modular realizado íntegramente en este material y sin puentes térmicos. Algunos desarrollos van encaminados al diseño de sistemas constructivos económicos en zonas poco fa-

vorecidas aprovechando astillas de madera autóctonas [2], fibras vegetales [3], o fibras de maderas tropicales [4]. Existen ejemplos de materiales compuestos similares como es el caso de "pulpas" constituidas por fibras de madera aglomeradas con cemento, que presentan un excesivo porcentaje de cemento para conseguir una elevada dureza y resistencia a flexión [5]. Las propiedades de estos materiales dependen de la distribución porcentual entre cemento y las fibras de madera, además de las características de dichos elementos. Algunos estudios fijan porcentajes óptimos dependiendo del tipo de madera [6]. Para la caracterización de este tipo de materiales es común realizar ensayos de flexión en 3 puntos [7], ensayos de compresión [4], y ensayos de conductividad térmica [8]. Para densidades de 280 kg/m^3 , con fibras de maderas europeas se le podría asignar una resistencia a flexión que rondaría los 27 kPa y una transmitancia térmica de $0.19 \text{ W/m}^2\text{K}$ [1].

El objetivo de este trabajo es diseñar un sistema constructivo modular, económico y eficiente térmicamente, a partir de un material compuesto constituido por fibras de madera aglomeradas con cemento y densidad 400 Kg/m^3 , el cual debería actuar como único elemento portante y aislante. Para ello, se realizaron ensayos de flexión y de compresión en las 3 direcciones del espacio, y se estudiaron varias posibilidades de fijación entre módulos mediante ensayos de tracción realizados sobre varillas de acero "embutidas" en el material una profundidad de 30 cm, a través de varias "interfaces" de unión entre la varilla y el material. Para analizar estos sistemas de fijación se tomó como referencia el Documento Básico de Seguridad Estructural y Acciones en la Edificación (DB-SE-AE) del Código Técnico de la Edificación vigente en España (CTE) [9]. A su vez, se determinó la conductividad térmica del material en varias condiciones de humedad. La resistencia a compresión, según la dirección de carga en servicio, ronda los 0,3 MPa, y la resistencia a flexión alcanza los 0.47 MPa. La transmitancia térmica del material con un 60% de humedad relativa se puede aproximar a $0.322 \text{ W/m}^2\text{K}$. Se recomienda que el adhesivo de unión entre la varilla de fijación y el material sea un mortero de fraguado rápido con naturaleza silico-carbonática y densidad aparente de unos 2250 kg/m^3 . Bajo este supuesto el esfuerzo resistente de cada fijación superaría los 100 kp.

Los edificios son unos grandes consumidores de energía, destacando especialmente su demanda térmica. Como consecuencia de ello el peso de las emisiones de CO_2 derivadas de este consumo representan un 36% en Europa. Para reducir estas emisiones resulta clave minimizar la demanda térmica [10]. Es por ello, que complementariamente, se presenta una mejora sobre el sistema constructivo con el objetivo de disminuir la transmitancia térmica global hasta valores compatibles con el estándar alemán de construcción "Passivhaus" [11]. Para ello se propone un cerramiento constituido por 30 cm de este material compuesto y una capa interior de 8 cm lana mineral, alcanzándose una conductividad térmica global del cerramiento de 0.06 W/mK . Para asegurar la ausencia de posibles condensaciones y una pérdida energética elevada en los encuentros con el forjado, se analizó la solución constructiva con el software higo-térmico *Flixo Energy*, resultando válidos los "encuentros" diseñados entre cerramiento y forjado para este sistema constructivo. Existen ya en Europa más de 30.000 edificios construidos bajo el estándar de construcción Passivhaus. Desde el año 2007 todos los edificios públicos o rehabilitados en la ciudad de Frankfurt deben ejecutarse bajo este estándar. Desde el 2009, este mismo criterio es fijado en las ciudades alemanas de Friburgo y Hannover. En la ciudad de Bruselas este estándar es de obligado cumplimiento en edificios públicos desde el 2010. A su vez, la Directiva Europea 2010/31/UE introduce el concepto de "Edificios de

Consumo Energético Casi Nulo" y establece el 31 de Diciembre de 2018 para su aplicación en todos los edificios públicos de nueva construcción, y el 2020 para el resto de edificios.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos de flexión y compresión se realizaron sobre una máquina INSTROM 5582, con célula de carga de 100 KN. Las probetas de flexión fueron de sección cuadrada, con lado 100 mm, y con distancia entre apoyos de 250 mm. Las probetas de compresión fueron cubos de 150 mm de lado. La Figura 1 muestra la ejecución de dichos ensayos. La Figura 2 muestra las direcciones de ensayo y la disposición preferente de las fibras de madera en las probetas ensayadas. La dirección Z resulta ser la de carga en servicio del material, y a su vez, coincide con la dirección de relleno del durante la fabricación del material. Cabe destacar que la disposición de las fibras dependía de la dirección de ensayo. Se realizaron 12 ensayos de flexión y 12 de compresión en cada una de las 3 direcciones del espacio.



Fig. 1: (a) Ensayo de flexión; (b) Ensayo de compresión

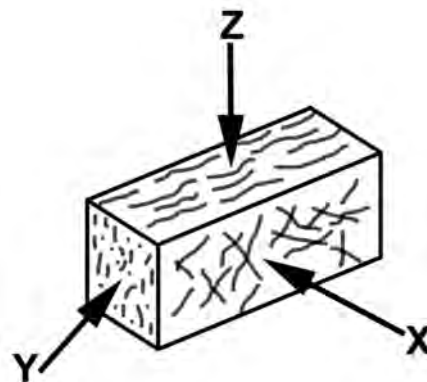


Fig. 2: Disposición preferente de las fibras de madera en las probetas ensayadas. Los ejes X, Y y Z representan las direcciones en las que se aplicaron los esfuerzos durante los ensayos de flexión y compresión. La dirección Z coincide con la dirección de relleno

Para la obtención de la transmitancia térmica en función de la humedad se ensayó el material en una "caja caliente" calibrada de 1 m^3 completamente aislada en toda su envolvente térmica, según la Norma ASTM C 1363-11, a la que se conectó un generador climático para poder crear un ambiente de ensayo bajo condiciones controladas de temperatura y humedad. Se empleó un marco de 40 cm de ancho para soportar la muestra objeto de ensayo que fue colocada y aislada sobre una de las caras de la caja caliente calibrada. Los objetivos de humedad relativa fueron 25%, 45%, y 75%. Los equipos de medición fueron:

1. Un registrador de datos "Sensirion EK-H3", el cual permite la aplicación de 20 sensores de temperatura y humedad, y la lectura de humedad relativa y temperatura de forma simultánea.

2. Sensores de flujo térmico "Hukseflux HFP01", que permiten la medición de la resistencia térmica y transmitancia térmica según las Normas ISO 9869, ASTM C1046 y ASTM 1155.
3. Unidades de lectura "Hukseflux LI-19" con registrador de datos integrado del sensor HFP01, que permiten transmitir los datos de lectura a un PC a través de un interface USB.

Para poder diseñar la unión de los diferentes módulos del sistema constructivo se realizaron ensayos de tracción sobre varillas de acero de 10 mm de diámetro insertadas en el material una profundidad de 30 cm. Para ello fue necesario realizar un taladro de 12 mm de diámetro y 30 cm de profundidad. Las dimensiones de las probetas del material fueron 500 mm x 390 mm x 400 mm. Se analizaron 4 tipos de adhesivos que fueron aplicados sobre el taladro para formar una "inter-cara" de unión entre las varillas de acero y el material. Se realizaron 3 ensayos por cada adhesivo y por cada ángulo entre varilla y fibra de madera (0° y 90°). Los adhesivos ensayados fueron:

- Adhesivo 1: Basado en poliéster libre de estirenos.
- Adhesivo 2: Basado en resina epoxi.
- Adhesivo 3: Basado en una mezcla de poliéster libre de estirenos y arena de cuarzo.

- Adhesivo 4: Basado en un mortero de fraguado rápido, con naturaleza del árido silico-carbonato, intervalo granulométrico 0-2.5 mm, agua de amasado 4 L/25 kg y densidad aparente de la mezcla 2250 kg/m³. El tiempo aproximado de fraguado fue de unos 60-70 minutos.

Para observar la disposición del aglomerante sobre las fibras se obtuvieron micrografías tomadas en un microscopio electrónico de barrido (SEM), y se analizaron la distribución de los principales elementos del cemento (Ca y Si) mediante energía dispersa de Rayos X (EDAX), incluyendo un "mapeado" de su distribución.

Complementariamente, se propuso evaluar el cumplimiento del estándar Passivhaus de un cerramiento constituido por 40 cm de este material compuesto y por una capa interior de 7 cm lana mineral. La Tabla I muestra las características de los principales componentes que constituirían este cerramiento. La Figura 3 muestra la estructura principal de este cerramiento, y el "encuentro" propuesto entre el muro y la cubierta. Para ello se determinó la transmitancia térmica de dicho cerramiento y se evaluó dicho "encuentro" con el software higo-térmico Flixo Energy para asegurar el mantenimiento del nivel de aislamiento y la ausencia de posibles condensaciones.

	Espesor (cm)	Densidad (kg/m³)	Mód. Elasticidad (MPa)	Tensión de rotura (MPa)	Cond. Térmica (W/mK)
Mat. Compuesto	30	400	31.13	0.35	0.12
Lana mineral	7	60	-	-	0.03

Tabla I. Componente del sistema de construcción propuesto para cumplir con el estándar Passivhaus

MPa	Tensión de rotura			Módulo de elasticidad		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Flexión	0,015	0,205	0,474	0,853	3,831	17,514
desv. stand.	0,003	0,026	0,070	0,10	1,80	4,48
Compresión	0,135	0,360	0,296	5,078	21,924	31,125
desv. stand.	0,001	0,009	0,004	1,02	3,54	4,07

Tabla II: Tensión de rotura

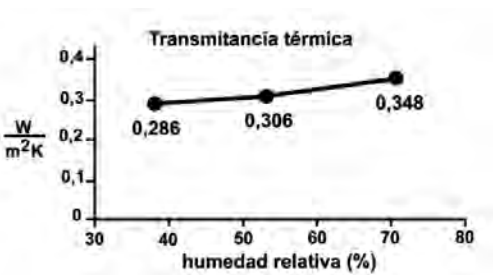


Figura 4: Transmitancia térmica en función de la humedad

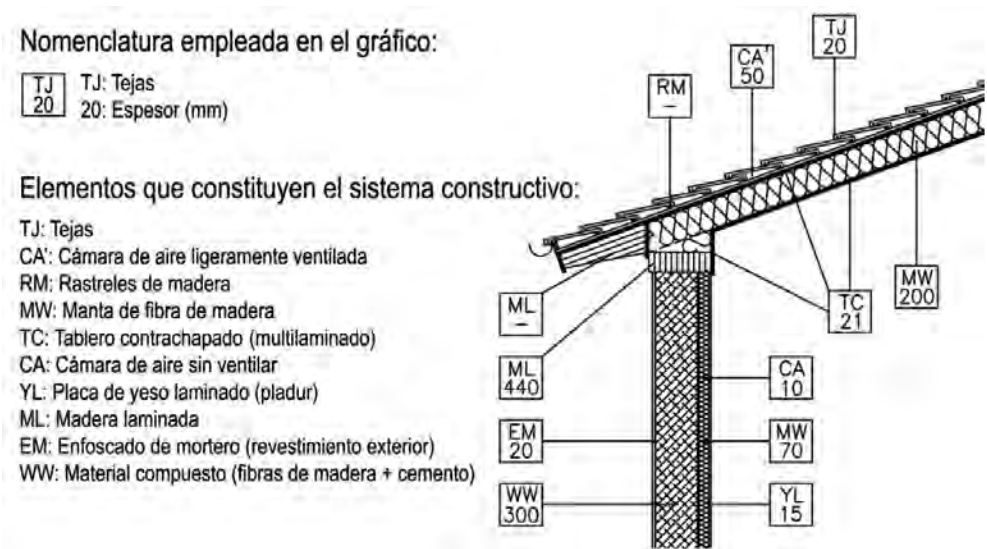


Figura 3: Estructura del sistema constructivo propuesto para cumplir con el estándar Passivhaus. Cada elemento constructivo es identificado con dos letras y un número. El número hace referencia al espesor en mm

3. RESULTADOS

La Tabla II muestra los valores promedios obtenidos sobre el material compuesto en los ensayos de flexión y compresión en cada una de las direcciones de aplicación de la carga, incluyendo la desviación típica derivada de la secuencia de ensayos. La rotura de este material se produjo sin deformación plástica. Los valores alcanzados resultan bajos y únicamente capacitan a este material para su uso portante en viviendas de 1 o 2 plantas.

La Figura 4 muestra los resultados de transmitancia térmica obtenidos, en función de la humedad, en el ensayo de caja caliente. Se observa como ésta aumenta con la humedad relativa.

La Tabla IV muestra los esfuerzos de tracción resistentes en el momento de la fractura producida en la "intercara" entre el conjunto varilla-adhesivo-material. El adhesivo 4 es el que mayor resistencia aporta al sistema de fijación, superando los 100 kp/fijación. Si tomamos como referencia de cálculo el Documento Básico de Seguridad Estructural y Acciones en la Edificación (DB-SE-AE) del Código Técnico de la Edificación vigente en España [9], el número de fijaciones por m² podrían quedar limitadas a 3 si considerásemos las condiciones climáticas más adversas señaladas en dicho Documento.

Las Figuras 5 a 7 muestran micrografías obtenidas a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM) sobre muestras

Adhesivo	kp (0°)	kp (90°)
Adhesivo 1	96.1	78.4
Adhesivo 2	94.8	120.5
Adhesivo 3	133.2	82
Adhesivo 4	118	138

Tabla IV: Esfuerzo de tracción resistente sobre las fijaciones. Ángulos de 0° y 90° entre la varilla y las fibras de madera

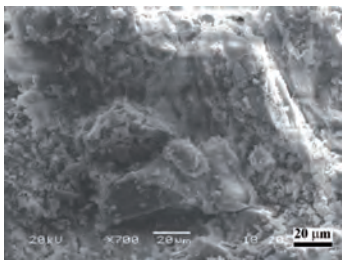


Figura 5: Vista general

Elemento	% en peso
C	12.54
O	50.06
Al	0.93
Si	4.99
Ca	30.36
Fe	1.11

Tabla V: Distribución en peso de los principales elementos químicos localizados

"metalizadas". Se analizó la distribución de los principales elementos químicos mediante energía dispersa de Rayos X (EDAX). La Figura 5 muestra una visión general de una de las muestras, donde se aprecia una de las fibras de madera con pequeños "grumos de cemento" que actúan como aglomerantes de las fibras de madera. La tabla V muestra la distribución en peso de los principales elementos químicos localizados sobre dicha fibra. Los elementos Ca, Si, y Al se asocian al cemento.

La Figura 6 muestra el extremo fracturado de una de las fibras. En este extremo se analiza la distribución del Ca y del Si, lo cual permite localizar la posición del cemento en dicho extremo. El C se asocia a la propia fibra y señala las zonas no aglomeradas por el cemento. En este caso particular, el extremo fracturado parece exento de dicho aglomerante. Parece deducirse que la proporción de cemento es la mínima necesaria para cumplir con la función de aglomerante, y que su distribución es heterogénea entre las fibras,

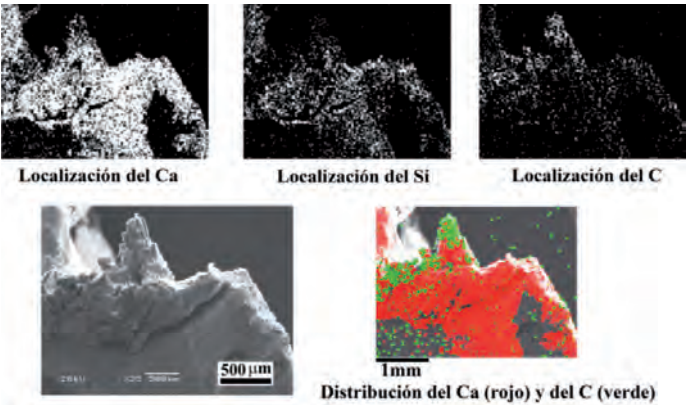


Figura 6: Localización del Ca, como componente representativo del cemento (color rojo)

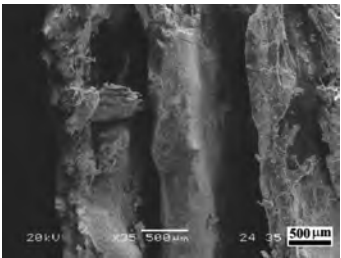


Figura 7: Imagen transversal de las fibras de madera

formando "grumos" de pequeño tamaño (desde unas 100 micras a pocos milímetros) separados entre sí varios mm para permitir que exista una elevada porosidad en el material para favorecer un elevado nivel de aislamiento térmico y una elevada permeabilidad al vapor de agua para reducir los riesgos de condensaciones intersticiales [12]. La Figura 7 muestra unas láminas transversales de fibras de madera, de donde se desprende que su espesor ronda las 300 micras.

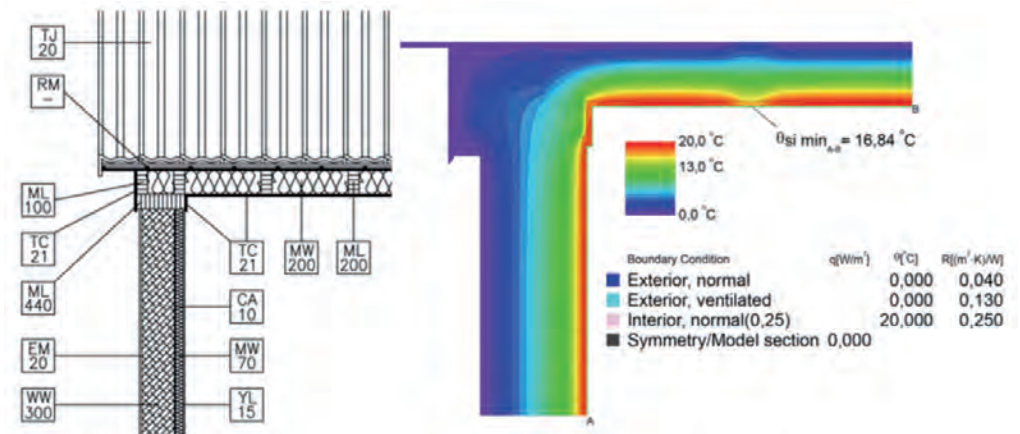


Figura 8: Resultados tras el análisis realizado con el software higró-térmico "Fliso-Energy" sobre el "encuentro" entre el muro del cerramiento y la cubierta inclinada. Misma nomenclatura que en la Figura 4

Complementariamente, se propuso añadir al cerramiento constituido por el material compuesto una capa interior de lana mineral para mejorar el nivel de aislamiento del sistema constructivo y evaluar el cumplimiento del estándar Passivhaus por parte de esta mejora. La Tabla I y la Figura 4 muestran los elementos que constituirían este sistema constructivo. La conductividad térmica global alcanzada es de 0.06 W/mK . La transmitancia térmica global de este sistema es inferior a $0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$, lo que supone una reducción de la demanda térmica exigida por el Código Técnico de la Edificación en fachadas superior al 70% para las zonas climáticas C y superior al 65% en las zonas climáticas D [13.] Se evaluaron los "encuentros" entre el muro del cerramiento y el peto de la cubierta inclinada con el software higo-térmico *Flixo Energy* para asegurar el mantenimiento del nivel de aislamiento y la ausencia de puentes térmicos [14] y posibles condensaciones, ya que estos "encuentros" resultan los más débiles desde el punto de vista térmico. La Figura 8 muestra los resultados alcanzados. En unas condiciones de temperatura exterior de 0°C y 20°C de temperatura interior, la temperatura más baja alcanzada en la superficie interior de la envolvente térmica sería de $16,84^\circ\text{C}$, superior a la temperatura de rocío con una humedad relativa media del 60%.

4. CONCLUSIONES

Una vez realizado los ensayos estructurales y funcionales para la caracterización de un material compuesto constituido por fibras de madera aglomeradas con cemento y densidad 400 kg/m^3 , se concluye que:

1. La tensión de rotura a flexión en la dirección de carga en servicio resulta superior a la obtenida a compresión por el efecto resistente de las fibras situadas mayoritariamente en una dirección perpendicular a la carga aplicada
2. La resistencia a compresión, según la dirección de carga en servicio, ronda los 0.3 MPa . La resistencia a flexión según esta misma dirección de carga superaría los 0.45 MPa . Estos valores únicamente capacitan a este material para su uso portante en viviendas de 1 o 2 plantas máximo.
3. La conductividad térmica con un 60% de humedad relativa es de 0.128 W/mK .
4. Para el diseño de un sistema modular de construcción se recomiendan sistemas de fijación, que actuando como adhesivo de unión entre las varillas metálicas y el propio material, estén constituidos por mortero de fraguado rápido y naturaleza silico-carbonática, con una densidad aparente de unos 2250 kg/m^3 . Bajo este supuesto el esfuerzo resistente de cada fijación superaría los 100 kp .
5. La distribución del cemento, que actúa como aglomerante de las fibras de madera, es heterogénea y aparece formando pequeños "grumos" de tamaño diverso entre unas 100 micras y menos de 2 mm , separados entre sí para que exista una elevada porosidad en el material y favorecer un elevado nivel de aislamiento térmico.

El sistema constructivo modular constituido por 30 cm de este material y 7 cm de lana mineral cumpliría los estándares de construcción Passivhaus, asegurando la ausencia de puentes térmicos, y una reducción de la demanda térmica exigida por el Código Técnico de la Edificación en fachadas superior al 70%, para las zonas climáticas C, y superior al 65% en las zonas climáticas D. A su vez, este sistema constructivo modular acorta los plazos de construcción, y por tanto de mano de obra, alquiler de equipos, grúas, etc., por lo que resultaría una solución atractiva y económica para la

construcción de viviendas unifamiliares que aspiren a cumplir con el estándar de fabricación Passivhaus. Complementariamente, los tiempos y costes de construcción podrían reducirse aún más si en el sistema constructivo se prescindiera del refuerzo de 7 cm de lana mineral. En este caso no se cumpliría con el estándar Passivhaus, pero se conseguiría una reducción de la demanda térmica exigida por el Código Técnico de la Edificación en fachadas superior al 40% en las zonas climáticas tipo C y superior al 28 % en las zonas climáticas tipo D, resultando un material y sistema constructivo muy económico, respetuoso con el medio ambiente y eficiente desde el punto de vista térmico.

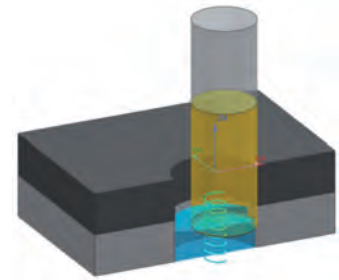
BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rückert M. "Traullit large wall elements". En: 11th Int. Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference (Madrid 5-7 de Noviembre de 2008), 2008. P. 163-168
- [2] Ramirez-Coretti A, Eckelman CA, Wolfe RW. "Inorganicbonded composite wood panel systems for lowcost housing: A Central American perspective". *Forest Products Journal*. 1998 .Vol.48-4 p.62-68
- [3] Arsene MA, Okwo A, Bilba K, et al. "Chemically and thermally treated vegetable fibers for reinforcement of cement-based composites". *Materials and Manufacturing Processes*. Vol.22-2 p.214-227. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10426910601063386>)
- [4] Fan M, Ndikontar MK. "Nature and Performance of Tropical Wood Natural Fiber Cementitious Composites". *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2014. Vol.26-7 p.214-227.
- [5] Naundorf W. "Compaction properties of pulps made from wood chips and cement". *Zkg International*. 2005. Vol.58-5 p. 33-38
- [6] Benmansour N, Agoudjil B, Gherabli A, et al. "Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building". *Energy and Buildings*. Vol.81 p. 98-104. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.032>)
- [7] Karam GN, Gibson LJ. "Evaluation of commercial woodcement composites for sandwichpanel facing". *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol.6-1 p.100-116 (DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)08991561\(1994\)6:1\(100\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)08991561(1994)6:1(100)))
- [8] Lakrafi H, Tahiri S, Albizane A, et al. "Experimental study of thermal conductivity of leather and carpentry wastes". *Construction and Building Materials*. Vol.48 p. 566-574. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.048>)
- [9] España. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación Boletín Oficial del Estado, 28 de marzo de 2006, núm. 74, p. 11816 a 11831
- [10] Romero-Amorrortu, A., Barreiro-Sánchez, E., Sanchez-Zabala, V. "Net positive energy buildings". *DYNA*. Vol.85(9) p. 746-759. (DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3842>)
- [11] Álvarez-Antolín JF, Galán-Feito M, Almagro-Medialdea J. "Materiales e Instalación Térmica en vivienda unifamiliar construida en Asturias bajo los requerimientos del estándar Passivhaus". En: 1ª Expo-Convección Mundial en Minería, Energía y Materiales (Gijón 17-19 de Junio de 2015), 2015.
- [12] Rougeron C. Aislamiento Acústico y Térmico en la Construcción. Luque-Maldonado R (trad.). Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1977. 233 p. ISBN: 84-7146-097-1
- [13] España. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación Boletín Oficial del Estado, (Documento Básico HE1, Tabla 2.3, página 15), 28 de marzo de 2006, núm. 74, p. 11816 a 11831.
- [14] Muñoz C, Bobadilla A. "Simulación y evaluación de puentes térmicos Soluciones constructivas típicas aprobadas por la Norma Térmica para elementos verticales en estructura de madera y metálicos en la Zona 4 Simulaciones con Therm y Usai y evaluación con Método de Cámara Térmica". *Revista de la Construcción*. 2012. Vol.11-2 p.92-111.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue promovido por la empresa Georenova, S.L, desarrollado por el grupo de investigación "Materials Pro" de la Universidad de Oviedo, y cofinanciado por la Unión Europea, a través de Fondos FEDER, y por la Consejería de Economía y Empleo del Principado de Asturias, a través de su Plan de Ciencia, Tecnología, e Innovación de Asturias. Agradecemos a la empresa GeoRenova y a las entidades públicas mencionadas el apoyo recibido para la ejecución de este trabajo.

Taladrado de materiales compuestos: problemas, prácticas recomendadas y técnicas avanzadas



Drilling of composite materials: problems, recommended practices and advanced techniques



Unai Alonso-Pinillos, Frank-Andrés Girot-Mata, Roberto Polvorosa-Teijeiro, Luis-Norberto López-de-Lacalle-Marcaide

Universidad del País Vasco UPV/EHU. Escuela de Ingeniería de Bilbao. Dpto. de Ingeniería Mecánica. Alda. Urquijo, s/n - 48013 Bilbao

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8106> | Recibido: 12/07/2016 • Evaluado: 21/09/2016 • Aceptado: 08/11/2016

ABSTRACT

- The components made of composite and hybrid materials such as composite- titanium laminates are increasing in the aerospace sector. Among the different machining processes, drilling is especially relevant due to the high number of operations that have to be performed and the consequences of the damages that can be originated in the workpiece. Thus, it is essential to understand the particularities of these new materials and advance in the development of new drilling techniques. The objective of this article it to provide a comprehensive review of the key aspects that must be considered when drilling composites and composite-titanium laminates. Emphasis is given to the possible damages in the material surface and to the wear mechanisms of the cutting tool. Moreover, several recommended practices are presented and three advanced techniques are described: orbital drilling, peck drilling and vibration-assisted drilling.
- **Keywords:** drilling, CFRP, stacks, wear, orbital drilling, vibration-assisted drilling.

RESUMEN

El sector aeroespacial requiere cada vez de un mayor volumen de piezas fabricadas en compuesto y en materiales híbridos como los stacks compuesto-titanio. Entre los diferentes procesos de mecanizado, el taladrado es especialmente relevante debido al elevado número de operaciones a realizar y a las consecuencias de los daños generados. Por ello, comprender las particularidades de estos nuevos materiales y avanzar en el desarrollo de nuevos procesos de taladrado resulta imprescindible. Este artículo tiene como objetivo ofrecer al lector una visión global de los diferentes aspectos a tener en cuenta en el taladrado de materiales compuestos y stacks. Así, se hace especial hincapié en los principales daños a evitar en la superficie del material y en los mecanismos de desgaste de la herramienta. Además, se presentan una serie prácticas recomendadas de cara a obtener agujeros de mejor calidad y se describen tres técnicas avanzadas de taladrado: el taladrado orbital, el peck drilling y el taladrado asistido por vibraciones

Palabras clave: taladrado, CFRP, apilados, desgaste, taladrado orbital, taladrado asistido por vibraciones.

1. INTRODUCCIÓN

Los componentes de compuesto en la industria aeronáutica y, especialmente, en la aviación comercial se han incrementado

exponencialmente como consecuencia del mayor conocimiento de sus características en servicio y de la mejora en el cálculo estructural. Si bien se empezaron utilizando en carenados y piezas como los spoilers, han comenzado a fabricarse en compuesto elementos estructurales como el *Center Wing box* y su uso está extendiéndose a las partes frías del motor. Por ejemplo, en el Airbus A350 el porcentaje de material compuesto supera ya el 50%.

Las calidad de las uniones entre las diferentes partes de la estructura depende en gran medida de la calidad del los agujeros. Sin embargo, las características especiales de los compuestos como la naturaleza abrasiva de las fibras o el hecho de que se comporten de forma anisótropa dificultan su mecanizado. Además, se han de evitar daños como la delaminación o el arranque de las fibras pues provocan una disminución de la vida a fatiga de la pieza.

El uso de *stacks* formados por láminas de compuesto y metal (generalmente aluminio o titanio) permite mejorar las propiedades mecánicas de la pieza manteniendo un peso reducido. Este tipo de materiales son empleados, por ejemplo, la zona de conexión entre las alas y el fuselaje del nuevo Boeing 787 Dreamliner.

La lámina de compuesto y la de metal se taladran en una única operación con el objetivo de minimizar el tiempo de mecanizado y los errores de posicionamiento. Sin embargo, estas operaciones son aún más complicadas debido a las diferentes propiedades mecánicas y térmicas de ambos materiales.

2. PRINCIPALES PROBLEMAS EN LA CALIDAD DEL AGUJERO

2.1. LA DELAMINACIÓN EN EL TALADRADO DE COMPUESTOS

A diferencia de los metales, la calidad del agujero viene determinada no sólo por la rugosidad superficial y la precisión dimensional sino principalmente por el nivel de delaminación producido. Además, este defecto es el que posee una mayor repercusión en las propiedades mecánicas de la pieza taladrada [1].

La delaminación puede producirse bien a la entrada de la herramienta en la pieza o bien a la salida de ésta (ver Fig. 1), pero los mecanismos físicos que dan lugar a éste fenómeno son diferentes en cada caso. Durante la entrada de la herramienta, la fuerza de corte tiende a desplazar las fibras en sentido ascendente hacia el canal helicoidal de la broca produciéndose una flexión en las láminas próximas a la superficie. En la salida, la componente axial de la fuerza de taladrado empuja el material sin mecanizar hacia el exterior provocándose una flexión que tiende a separar las distin-

tas capas del compuesto. El progresivo empuje de la herramienta provoca la aparición de grietas en el contorno del agujero y su propagación da lugar al desprendimiento de parte del material.

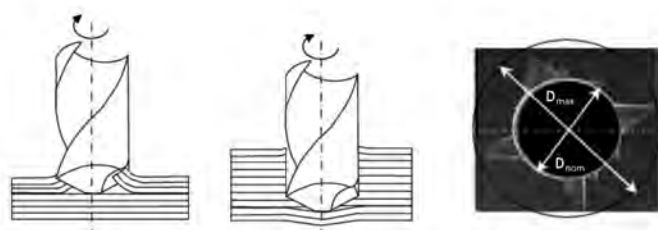


Fig. 1: Efecto de la delaminación a la entrada y salida del agujero [2]

En bibliografía pueden encontrarse diferentes metodologías para cuantificar el nivel de delaminación, pero habitualmente se emplean parámetros derivados del análisis de imágenes obtenidas con microscopía óptica. El más empleado en producción es el cociente entre el diámetro máximo de la zona de delaminación y el diámetro nominal del agujero (indicados como D_{max} y D_{nom} respectivamente en la Fig. 1):

$$Fd = D_{max} / D_{nom} \quad (1)$$

Para cuantificar la delaminación producida en el interior de la pieza puede resultar útil el empleo de técnicas no destructivas como la inspección por ultrasonidos mediante C-Scan o la tomografía por rayos X [3]. El grado de delaminación alcanzado se ve afectado por la selección de la velocidad de avance y la velocidad de corte. En este sentido, varios estudios han observado cómo el aumento de la velocidad de avance de la broca conlleva un incremento de la delaminación independientemente de la velocidad de corte seleccionada [1]. A modo de ejemplo, en la Fig. 2 se muestra la delaminación a la salida de un agujero realizado sobre GFRP con diferentes velocidades de avance. Esta tendencia se atribuye a la relación directa entre la velocidad de avance y la fuerza de axial. Por lo que se refiere a la velocidad de corte, no existe unanimidad respecto a su relación con el grado de delaminación provocado por lo que su efecto deberá analizarse para cada aplicación.



Fig. 2: Efecto del incremento de la velocidad de avance en la delaminación a la salida de la herramienta [4] (datos en mm/rev)

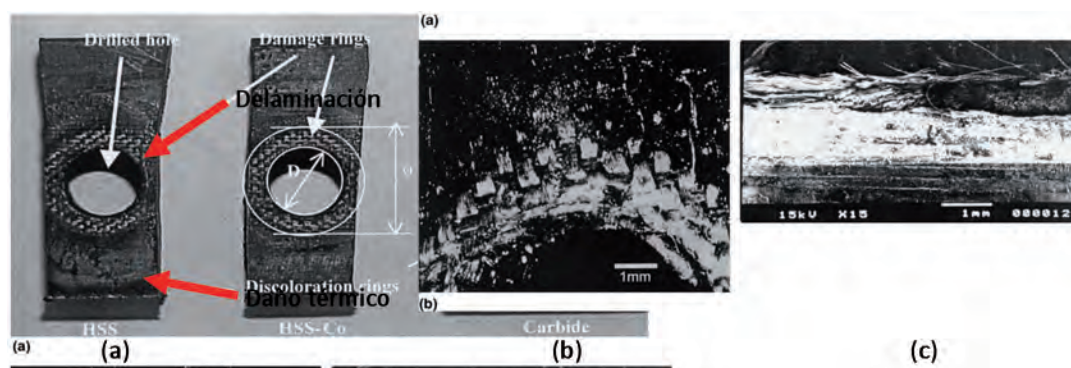


Fig. 3: Daños en la intercara de un apilado compuesto-titanio [7]

2.2. DAÑOS EN EL TALADRADO DE STACKS COMPUESTO-TITANIO

En el taladrado de *stacks* se han de considerar los posibles daños que pueden producirse en tres regiones: el material compuesto, la intercara entre los dos materiales y la lámina de titanio. La delaminación es uno de los mayores problemas en el taladrado del compuesto siendo el motivo del rechazo de en torno al 60% de las piezas en la industria aeronáutica [5]. Sin embargo, en el *stack* la posibilidad de que se produzca delaminación a la salida del compuesto se ve reducida por la resistencia adicional que ofrece la lámina de titanio. De hecho, si el espesor del titanio supera un valor crítico dicho efecto desaparece por completo [6].

Por otra parte, también se ha de prestar especial atención a las inestabilidades que puedan surgir en la intercara entre los dos materiales. El hecho de que los mecanismos de corte sean diferentes en ambos materiales provoca la aparición de fuertes vibraciones en la herramienta dando lugar a delaminaciones internas del compuesto. Así mismo, numerosos trabajos de investigación destacan también la relevancia de la dificultad de evacuar el calor y las virutas generadas en el proceso. Se ha de tener en cuenta que la acumulación de calor en el compuesto puede provocar la degradación de la matriz polimérica.

En la Fig. 3 se presenta el aspecto de una lámina de compuesto que ha sufrido daños severos en la zona de la intercara. En la Fig.3a puede observarse una zona de diferente coloración que se corresponde con la región dañada térmicamente. A la derecha, se puede ver una imagen superior y una sección transversal de la zona más próxima al centro del agujero que ha sufrido delaminación.

Los daños más severos se producen frecuentemente en el taladrado de la lámina de titanio y tienen su origen en las elevadas temperaturas alcanzadas entre el filo de corte y el material. Entre los distintos problemas que pueden aparecer en la superficie interna del agujero se encuentran la aparición de grietas, marcas de avance, restos de virutas adheridas, etc. Sin embargo, el problema clave es la generación de rebaba a la salida de la herramienta ya que su eliminación es imprescindible para el posterior ensamblaje de la pieza y, además, el desbarbado suele requerir el desmontaje del apilado.

3. EL DESGASTE DE LA HERRAMIENTA

El deterioro de la broca es una de las causas de la aparición de daños en el material y, por ello, es imprescindible conocer cómo se produce. En el caso del compuesto, el corte intermitente de las fibras, su elevada dureza y la baja conductividad térmica del material determinan en gran medida los mecanismos de desgaste de la herramienta. Así, los más relevantes son el desgaste abrasivo de las caras de incidencia y desprendimiento, el astillado del filo y la adhesión.

El desgaste mecánico provocado por fricción de las fibras con la herramienta es el más importante de los tres. En la Fig. 4a se muestra el estado de una broca de acero rápido que ha sufrido una abrasión severa durante el taladrado de GFRP. En dicha imagen pueden distinguirse los surcos característicos de

este tipo de desgaste. La abrasión también es la responsable de la desaparición del recubrimiento de la herramienta en la zona próxima al filo.

Este efecto puede observarse en el trabajo de Iliescu et al. [8] en el que se emplean brocas de recubiertas de diamante para taladrar fibra de carbono (Fig. 4b). En cuanto a la influencia de los parámetros de mecanizado, es evidente que el aumento de las velocidades de corte o avance favorece el desgaste abrasivo al incrementarse la velocidad relativa entre las fibras y la superficie de la herramienta.

En el taladrado de stacks compuesto-titanio, no es sencillo analizar por separado la influencia de cada material ya que los mecanismos de desgaste se encuentran interrelacionados en ambas fases. Además, los patrones de desgaste varían dependiendo del material de la herramienta por lo que es necesario analizarlos en cada caso concreto. Por ejemplo, Park et al. [10] comparan el desgaste de brocas de metal duro y diamante prolicristalino (PCD) en el taladrado de stacks CFRP/Ti. En la herramienta de metal duro destaca la adhesión de titanio mientras que la de PCD presenta una mayor tendencia al astillamiento (debido a su menor tenacidad) (Fig. 5b). Además, en ambos casos puede distinguirse el efecto de la abrasión en el redondeamiento de los filos y en el desgaste de flanco. Isbilar y Ghassemieh por su parte [11], estudian el desgaste de brocas recubiertas con TiAlN y concluyen que el origen del fallo de la herramienta se encuentra en el micro-astillado de ésta (ver Fig5c). En el trabajo presentado recientemente por Xu et al. [5] puede encontrarse una revisión más extensa de las investigaciones realizadas en esta línea en las últimas décadas.

4. PRÁCTICAS RECOMENDADAS PARA CONSEGUIR UN TALADRADO DE ALTA CALIDAD

4.1. TALADRADO DE MATERIALES COMPUESTOS

Una de las ideas clave para conseguir agujeros de calidad en materiales compuestos es que la fuerza axial durante el taladrado debe ser controlada ya que la delaminación comienza a producirse en el momento en el que dicha fuerza supera un valor límite

[12]. Las estrategias que se presentan a continuación persiguen dos objetivos: modificar dicho límite o reducir la intensidad de la fuerza axial.

a) Control de los parámetros de mecanizado

Varios trabajos de investigación coinciden en el que el parámetro que determina el valor de la fuerza axial es la velocidad de avance mientras que la velocidad de giro de la herramienta apenas tiene influencia [1]. En el trabajo de Khashaba et al. [13] puede verse que el aumento de la velocidad de corte posee un efecto despreciable si la herramienta es nueva. Sin embargo, a medida que el desgaste aumenta, la influencia de la velocidad de corte es cada vez mayor (ver Fig. 6).

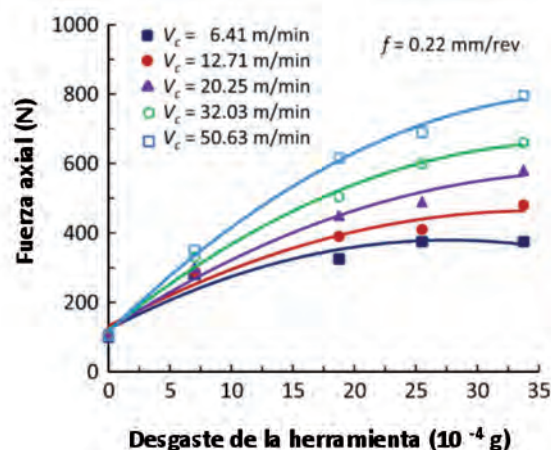


Fig. 6: Efecto del desgaste de la herramienta en la fuerza axial para diferentes velocidades. [13]

La reducción de la velocidad de avance en la entrada y la salida de la broca es una práctica muy extendida para controlar la fuerza axial y evitar la delaminación. De cara a seleccionar las velocidades de avance, puede ser útil recurrir a modelos analíticos que permitan estimar la fuerza axial crítica en cada etapa del proceso ya que ésta dependerá de otros factores como, por ejemplo, el espesor del material sin mecanizar [4,14].

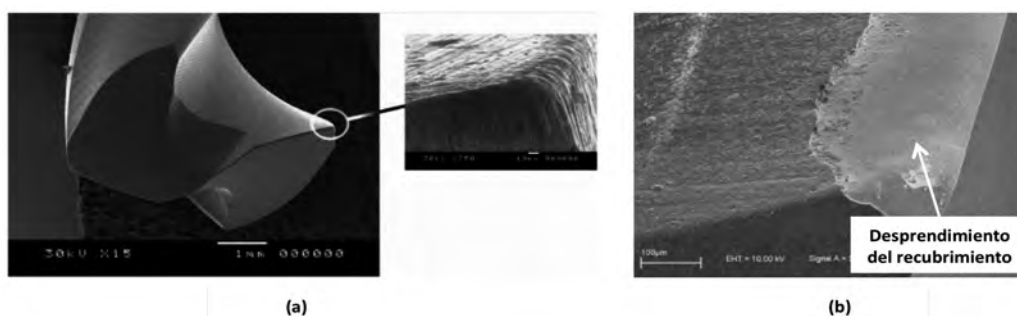


Fig. 4: Efecto de la abrasión en una broca de acero rápido (a) y en una broca recubierta de diamante (b) [8,9]

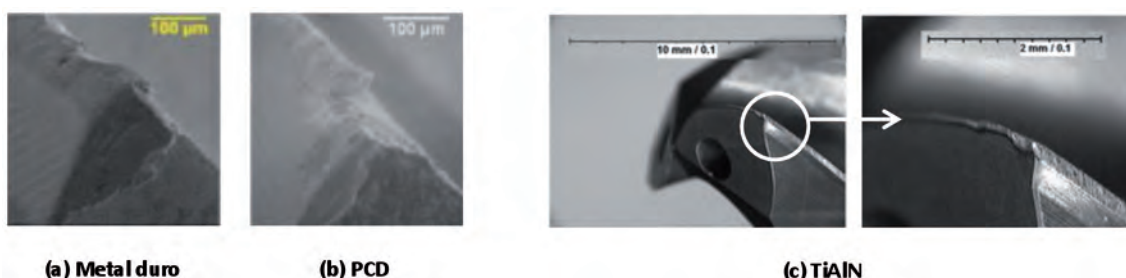


Fig. 5: Desgaste de herramientas en el taladrado de stacks CFRP/Ti [10,11]

b) Empleo de brocas adaptadas al mecanizado de compuestos

El control de la velocidad de avance puede ser suficiente si se mecanizan agujeros de diámetro pequeño, pero a medida que aumenta la geometría de la herramienta es determinante [14]. En este sentido, se ha observado que el incremento de ángulo de punta de la broca redonda en un aumento de la fuerza axial y es habitual encontrar herramientas comerciales con ángulos de punta en torno a los 90°. Además, la optimización de geometría de los filos de la herramienta también es especialmente relevante ya que la fuerza axial se reduce si se evita que ésta se concentre en la zona más próxima al centro de la broca. La Fig. 7 muestra las geometrías de herramienta más habituales en el taladrado de compuestos. Entre éstas, la (b) y (d) son las que producen una delaminación menor, siendo la (b) la más óptima en el taladrado de placas de pequeño espesor [2].

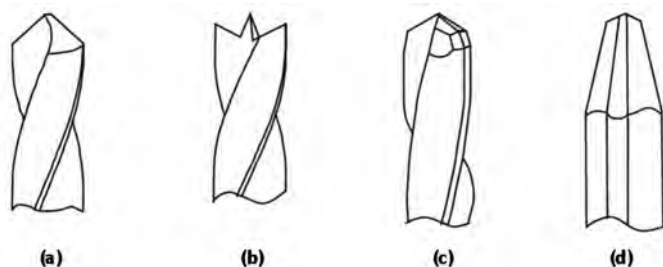


Fig. 7: Diferentes diseños de broca para el taladrado de materiales compuestos [2]

El material de la herramienta también es importante de cara a minimizar su desgaste y la fuerza axial. Las brocas de acero rápido no son adecuadas ya que presentan un desgaste por abrasión severo tras unos pocos agujeros. Resulta más adecuado emplear herramientas de metal duro con recubrimientos de diamante. Otra opción comercial muy habitual son las herramientas con inclusiones de PCD que son sinterizadas junto con el metal duro.

4.2. TALADRADO DE STACKS COMPUESTO-TITANIO

a) Parámetros de mecanizado

En el taladrado de stacks compuesto-titanio, la velocidad de avance es el parámetro que posee una mayor influencia en la fuerza axial y en la calidad del agujero. En este sentido, se ha observado que el empleo de avances elevados (0.05-0.1 rev/min) y velocidades de corte bajas (10-30 m/min) redonda en una mejora de la calidad del agujero en el titanio. Sin embargo, dichas condiciones resultan letales para la lámina de compuesto ya que la elevada fuerza axial aumenta el daño por delaminación. Para mecanizar dicho material, resulta mucho más ventajoso emplear velocidades de avance más bajas (0.01-0.05 rev/min) junto con velocidades de corte superiores (150-200 m/min). Partiendo de que los problemas ocasionados en el titanio son los más difíciles de evitar, la adopción de una solución de compromiso con velocidades de avance moderadas (en torno a 0.05 rev/min) y velocidades de corte bajas puede permitir obtener agujeros de calidad en los dos materiales.

b) La herramienta de corte

La selección de una broca para el taladrado de stacks es una tarea compleja ya que los mecanismos de desgaste en el corte de cada material son muy diferentes. En el compuesto, predomina la abrasión y el redondeo de los filos, mientras que en el titanio la elevada temperatura en el contacto favorece la adhesión de las virutas y el astillado del filo. Para mecanizar con éxito ambos materiales es necesario disponer de una herramienta de alta dureza y

tenacidad, de elevada conductividad térmica y con un comportamiento químico lo más inerte posible.

Hasta el momento, se ha estudiado la posibilidad de emplear herramientas de metal duro (con y sin recubrimiento) así como herramientas de PCD tipo "vein". En los trabajos de Jawahir [15] y Sousia et al. [16] se observa como los recubrimientos de TiN, Al_2O_3 y Ti[C,N] proporcionan resultados deficientes ya que su baja conductividad térmica es una barrera para la evacuación del calor generado en el corte. Fujiwara et al. [17] determinan que es más apropiado emplear recubrimientos tipo TiAlCr/TiSi que TiAlN o Ti-SiN. No obstante, los mejores resultados se obtienen empleando herramientas de PCD o recubiertas con diamante y, a día de hoy, es frecuente encontrar éstas en la oferta de los fabricantes.

El rendimiento de la herramienta depende también de su geometría. En este sentido, se ha observado que las brocas con un mayor ángulo de hélice permiten evacuar mejor la viruta y el calor generado dando lugar a fuerzas de corte y temperaturas más bajas. El efecto del ángulo de punta es analizado por SenthilKumar et al. [19] y concluyen que las herramientas con un mayor ángulo (130°) presentan un mejor rendimiento que aquellas con uno menor (118°). Por otra parte, la precisión del agujero mejorará si se emplean brocas con geometría escalonada ya que éstas poseen un efecto auto-centrante. El modelo Corodril 452.4 de Sandvik-Coromant® es un ejemplo de este tipo de herramienta (ver Fig. 8).



Fig. 8: Soluciones de Sandvik-Coromant® para el taladrado manual de stacks CFRP-Ti (a y b) y para el taladrado con avance automático (c)

c) Las condiciones de refrigeración

La introducción de fluido de corte presenta numerosas ventajas tanto en el taladrado de la lámina de compuesto como en la de titanio: reducción del coeficiente de fricción, evacuación del calor y de la viruta, reducción de la adhesión etc. Dichos beneficios dependen en gran medida de la cantidad de refrigerante que alcanza la zona de corte por lo que el empleo de brocas con refrigeración interna es muy positivo de cara a mejorar el proceso. En este sentido, Brinksmeier et al. [Bri02] han observado que la implementación de la técnica de mínima cantidad de lubricante (MQL) a través de los canales internos de la broca puede ser una alternativa viable en el taladrado de apilados.

5. TÉCNICAS DE TALADRADO AVANZADAS

5.1. TALADRADO ORBITAL

El taladrado orbital es una alternativa con creciente aplicación en componentes de fuselaje formados por stacks de compuesto-titanio y compuesto-aluminio. En este proceso, el taladrado se realiza implementando un movimiento circular al eje de la herramienta además del avance axial. La superposición de estos movimientos simultáneos genera una trayectoria helicoidal, y su peculiaridad radica en que los agujeros se realizan con fresa en lugar de con broca como en un taladro convencional (Fig. 9).

La principal ventaja del taladrado orbital es su alta flexibilidad para realizar agujeros de diferentes tamaños utilizando para ello

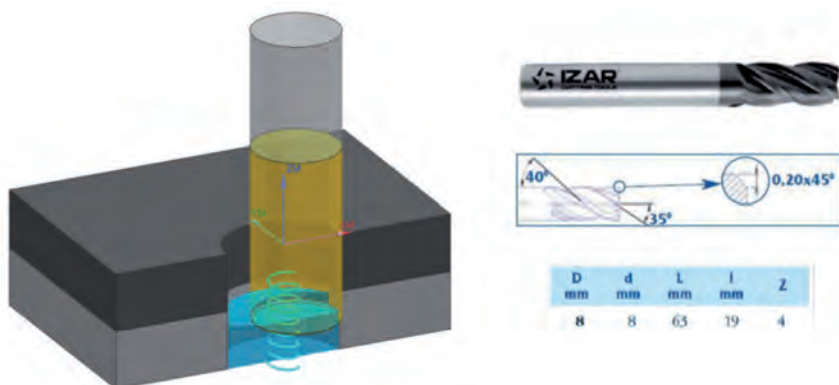


Fig. 9: Representación de taladrado orbital y fresa frontal de 4 labios con hélice variable de Izar

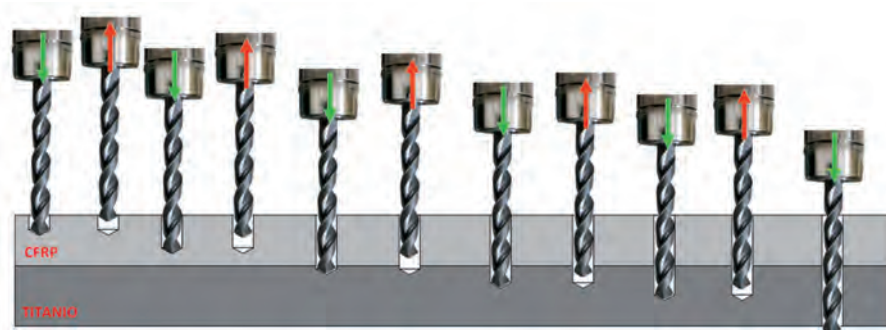


Fig. 10: Taladrado de un apilado CFRP/Titanio con una secuencia de "Peck drilling"

la misma herramienta. Además, la extracción de la viruta es más efectiva y la temperatura se reduce debido a la mejor refrigeración de la herramienta. Estas dos últimas características son especialmente críticas en taladrado convencional donde la punta de la broca y sus filos se encuentran confinados en el agujero que está siendo taladrado.

El mecanizado orbital también tiene desventajas como, por ejemplo, un mayor tiempo de operación con respecto al taladrado convencional para un agujero de las mismas dimensiones, o problemas de flexión de herramienta que pueden llevar a defectos de diámetro que hacen necesario compensar las trayectorias para cumplir los criterios de calidad de los agujeros. A pesar de esto, este proceso ha demostrado tanto su alta productividad como el descenso de costes de fabricación.

Como se ha comentado previamente, las condiciones de mecanizado para uno de los materiales del stack no son adecuadas para el otro. Por ello, es necesario emplear unas condiciones de compromiso que satisfagan el mecanizado de ambos materiales evitando la variación de condiciones mientras la herramienta está procesando el material. En general, las velocidades de corte óptimas son mayores en el material compuesto que en el titanio, al igual que sucede con los avances axiales, siendo unos valores de referencia típicos de 180 m/min y 110 mm/min respectivamente para el compuesto, y de 80 m/min y 25 mm/min para el titanio. En cambio, el paso de la hélice orbital o avance por revolución para el caso del caso del compuesto es menor que para el caso del titanio. En el aluminio, todos los parámetros de mecanizado se ven incrementados con respecto al compuesto y titanio. Otros criterios de calidad para estas operaciones aconsejan que el sentido de la hélice sea en la misma dirección que el giro de la herramienta, y también taladrar en el sentido compuesto/titanio para reducir los niveles de delaminación y rebaba a la salida de la herramienta.

Debido a la creciente demanda de materiales compuestos para su utilización en la estructura de aeronaves, han surgido nuevas

soluciones comerciales como alternativa a las tradicionales basadas en grandes máquinas *gantry* o robots antropomórficos. En este sentido, la empresa Novator en colaboración con Sandvik Coromant ha desarrollado un sistema portátil de taladrado orbital. Este tipo de soluciones ya se emplean para taladrar algunas partes del fuselaje de alta sollicitación y difícil acceso en operaciones de ensamblaje como, por ejemplo, en la unión del fuselaje y la caja central del ala del Boeing 787 Dreamliner.

5.2. PECK DRILLING

Cuando la configuración del ensamblaje de la aeronave lo permite, el emplear estrategia de taladrado en la que la lámina de compuesto apoya sobre la parte metálica limita el riesgo de delaminación causada por el esfuerzo axial. Sin embargo, esta opción requiere una evacuación eficaz de las virutas metálicas calientes generadas durante el corte ya que las virutas atascadas en las acanaladuras de la herramienta pueden provocar daños de la superficie del material compuesto. En el caso de los stacks CFRP/metal, esas virutas largas dañan al CFRP y conducen a un diámetro de agujero

más grande en el CFRP que en el metal (20 a 50 μ m de diferencia). Además, las virutas largas impiden al refrigerante hacer su labor, permitiendo así que el calor se acumule en el agujero y cause un desgaste excesivo de la herramienta. En última instancia, este fenómeno puede conducir a un fallo catastrófico de la herramienta.

Una posible solución para controlar el tamaño y la forma de las virutas es el uso de ciclos de mecanizado especiales. La mayoría de los controles de las máquinas herramientas ofrecen ciclos de "Peck drilling" en los que el taladrado se produce de forma interrumpida en etapas. Así, una vez que la broca ha penetrado una valor determinado ("picotazo") ésta se retira una pequeña distancia que permite romper la viruta y, a continuación, sigue penetrando (ver Fig.10). Este tipo de ciclos permiten romper las virutas de manera que sean lo suficientemente pequeñas para fluir hacia arriba a través de las estrías de la herramienta sin causar daño a la superficie o sin un desgaste prematuro de la herramienta. La desventaja de los ciclos de "Peck drilling" es que necesitan más tiempo para realizar cada agujero. En grandes series de producción, estas deficiencias pueden ser un problema grave.

5.3. TALADRADO ASISTIDO POR VIBRACIONES

Otra posible solución para evitar la generación de virutas excesivamente largas consiste en superponer al avance continuo de la broca un movimiento axial alternativo. Para generar dicho movimiento vibratorio, o bien se reduce la rigidez axial del sistema de mecanizado (excitación libre) o bien se impone un movimiento a la herramienta (excitación forzada).

En el primer caso, la menor rigidez axial del sistema mecánico conllevará que éste sea más sensible al chatter generado por el mecanizado. Como consecuencia, las micro-vibraciones generadas serán amplificadas y mantenidas (es un taladrado con vibraciones autosostenibles). Cabe señalar que esta técnica es difícil de incorporar industrialmente en un sistema de mecanizado de una manera robusta. En el caso de imponer una excitación forzada, el

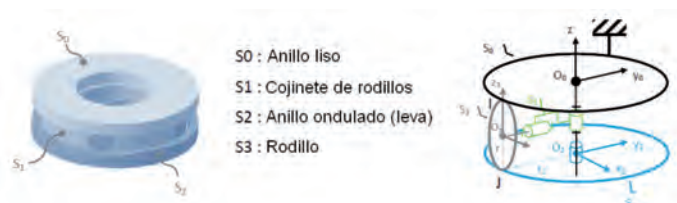


Fig. 11: Sistema vibratorio MITIS (Concept SINEHOLING®) [20]

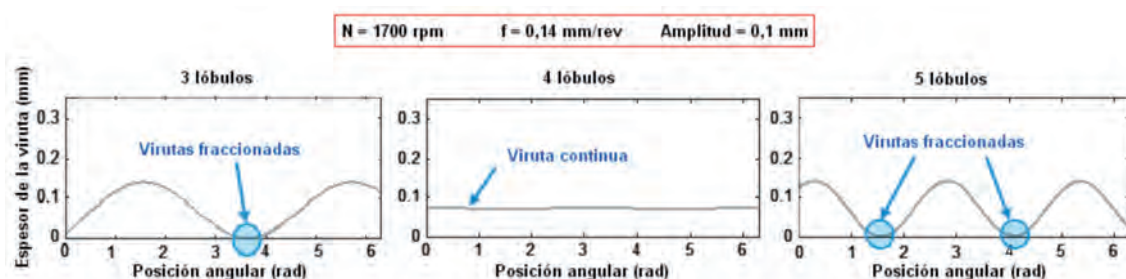


Fig. 12: Evolución del espesor de viruta para una broca de dos dientes en función del número de lóbulos de la leva del sistema MITIS. [20]

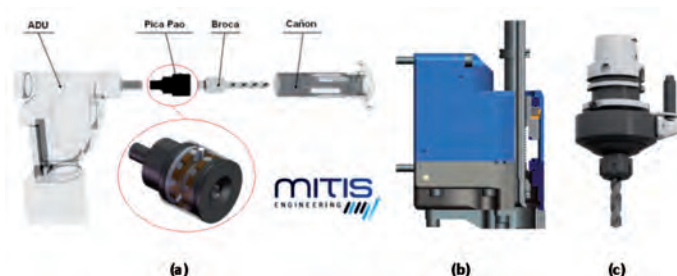


Fig. 13: El sistema MITIS (a) montado en un ADU, (b) integrado en el ADU y (c) integrado en el porta-herramienta para máquina CNC

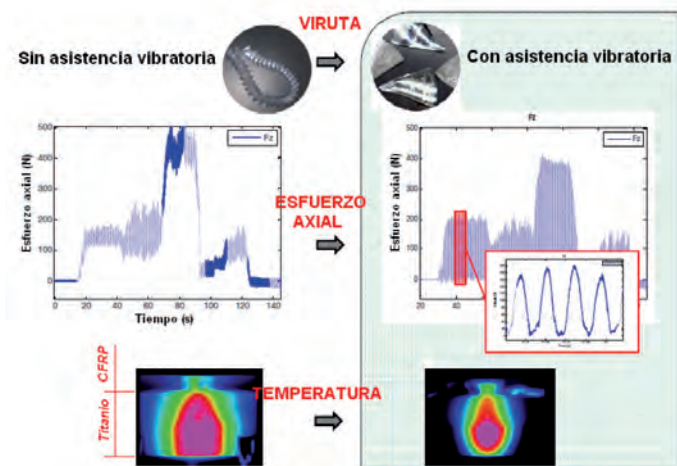


Fig. 14: Efecto de la asistencia vibratoria MITIS en la geometría de la viruta, el esfuerzo axial y la temperatura durante el taladrado de un apilado CFRP/Titanio [20]

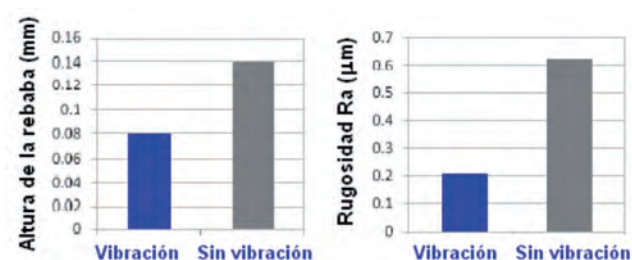


Fig. 15: Calidad del agujero realizado con una broca de diámetro 9.52 mm sin y con asistencia vibratoria MITIS [20]

movimiento vibratorio puede implementarse mediante diferentes tecnologías. Entre los más comunes están los sistemas piezoeléctricos, electromagnéticos, hidráulicos, de engranaje no circular, de leva, etc. La elección de una técnica u otra depende de la importancia de la frecuencia de excitación y la amplitud deseada.

Uno de los sistemas más novedosos es el propuesto por MITIS. En este caso, el sistema vibratorio consiste en un cojinete de rodillos (S1) entre dos anillos (S_0 y S_2). Este sistema puede ser similar

a un cojinete axial de los cuales uno de los dos anillos es ondulado (S_2) y actúa como una leva (ver Fig. 11). Este último gira mientras que el anillo liso permanece fijo (S_0). Además, un conjunto de arandelas de resorte (no mostrado en la figura) mantiene el contacto entre

el rodillo y la leva. Así, las variaciones en la altura del anillo ondulado inducen un movimiento de traslación axial alterno que se superpone al movimiento de avance de la herramienta y fragmenta la viruta.

La condición para obtener una variación del espesor y una fragmentación de la viruta es tener un desfase entre dos pasadas de los filos de corte. Para ello, es necesario adecuar el número de lóbulos del anillo ondulado al número de dientes o aristas de la broca (o viceversa). Así, por ejemplo, si se emplea una broca con un número par de aristas de corte, la variación en el espesor de la viruta únicamente se producirá si se dispone un número impar de lóbulos (ver Fig.12).

Una de las ventajas del sistema MITIS es que se puede integrar tanto en los sistemas de taladrado semi-automáticos (ADU o Automatic Drilling Unit) neumáticos como eléctricos, así como en los centros de mecanizado CNC.

La aplicabilidad de esta variante del proceso de taladrado es analizada en profundidad por Jallegas [20]. El autor observa que las fuerzas de corte son inferiores a las obtenidas sin asistencia vibratoria y que el empleo del taladrado asistido por vibraciones permite también reducir la cantidad de calor generada en el corte. Este efecto, puede observarse en la Fig. 14 en la que se muestran las imágenes termográficas de una pieza de apilado compuesto-titanio taladrada sin y con asistencia vibratoria. Además, el autor también observa como un aumento de la amplitud de los lóbulos redonda en una disminución mayor de la temperatura. La disminución también es significativa cuando el número de lóbulos aumenta.

Se ha de tener en cuenta que la reducción de la temperatura presenta importantes ventajas tanto en el taladrado de la lámina de compuesto como en el titanio. En el caso del compuesto ayuda a prevenir la degradación de la matriz polimérica.

Para la parte metálica, se traduce en una menor generación de rebaba y un aumento de la calidad del agujero a la salida de la herramienta. Ade-



Broca utilizada para los ensayos

más, la asistencia vibratoria también permite mejorar la calidad superficial (rugosidad) del agujero. A modo de ejemplo, en la Fig. 15 se muestran los resultados obtenidos en [20] para una misma operación de taladrado de apilado-compuesto titanio con y sin el empleo del sistema MITIS. En este caso, se observó una reducción de la altura de la rebaba de entorno al 40% y una reducción de la rugosidad del agujero de más del 60%.

6. CONCLUSIONES

El taladrado de materiales compuestos y *stacks* compuesto-titanio presenta notables diferencias en comparación con el mecanizado de metales. A continuación se resumen las ideas clave presentadas en este trabajo:

- En el taladrado de materiales compuestos, el defecto que posee una mayor influencia en la calidad del agujero es la delaminación. Éste defecto está relacionado con la fuerza axial generada durante el proceso y puede ser controlado mediante la correcta selección de los parámetros de mecanizado o el empleo de brocas con una geometría adaptada.
- Entre los parámetros de mecanizado, la velocidad de avance es el que posee una mayor influencia en la fuerza axial. El incremento de la velocidad de avance conllevará un aumento proporcional de la fuerza axial y del nivel de delaminación. La influencia de la velocidad de corte es menor, pero es más importante a medida que aumenta el desgaste de la herramienta.
- La abrasión provocada por la elevada dureza de las fibras del compuesto es el principal mecanismo de desgaste de las brocas. El empleo de herramientas de metal duro recubiertas o de PCD permitirá alargar la vida de éstas.
- En el taladrado de *stacks* compuesto-titanio, se ha de prestar especial atención a los problemas que pueden surgir en la intercara entre los dos materiales. La inestabilidad del corte en esta zona y la dificultad para evacuar las virutas de titanio pueden conducir a una delaminación interna del compuesto. Además, las elevadas temperaturas pueden dar lugar a la degradación de la matriz polimérica. En la lámina de titanio, la rebaba generada a la salida de la herramienta es el defecto más relevante.
- Los problemas generados en la lámina de titanio son los más difíciles de evitar. El empleo de condiciones de mecanizado con velocidades de avance moderadas (en torno a 0,05 rev/min) y velocidades de corte bajas puede permitir obtener agujeros de calidad en ambos materiales.
- El taladrado de *stacks* puede facilitarse mediante el empleo del taladrado orbital, el *peck drilling* o el taladrado asistido por vibraciones. El taladrado orbital es un proceso flexible que permite realizar agujeros de diferente tamaño empleando la misma herramienta (fresa). Sus principales ventajas son el aumento de la refrigeración de la herramienta y la efectividad en la extracción de la viruta. En el *peck drilling*, el taladrado se produce en ciclos consecutivos de penetración y retirada de la broca. La interrupción del taladrado permite generar virutas pequeñas cuya evacuación es más sencilla. El taladrado asistido por vibraciones también persigue este mismo objetivo. Sin embargo, en este caso la rotura de la viruta no se produce por la interrupción del proceso de corte sino por la reducción del espesor de la viruta.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Liu D., Tang Y., Cong W. L. "A review of mechanical drilling for composite laminates". *Composite Structures*. Vol. 94-4 p. 1265-1279. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.024>).
- [2] Ahmad J. *Machining of polymer composites*. Springer, 2009. 315p. ISBN:978-0-387-35539-9.
- [3] Durão L., Tavares J., de Albuquerque V. et al. "Drilling Damage in Composite Material". *Materials*. Vol. 7-5 p. 3802-3819. (DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ma7053802>).
- [4] Khashaba U., El-Sonbaty I., Selmy I. et al. "Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part I – Effect of machining parameters". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Vol. 41-3 p.391-400. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.04.011>).
- [5] Xu J., Mkaddem A., El Mansori M. "Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composites: A state-of-the-art review". *Composite Structures*. Vol. 135 p.316-338. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.028>).
- [6] Qi Z., Zhang K., Li Y., Liu S. et al. "Critical thrust force predicting modeling for delamination-free drilling of metal-FRP stacks". *Composite Structures*. Vol. 107 p. 604-609. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.07.036>).
- [7] Ramulu M., Branson T., Kim D. "A study on the drilling of composite and titanium stacks". *Composite Structures*. Vol. 54-1 p. 67-77. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00071-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00071-X)).
- [8] Iliescu D., Gehin D., Gutierrez M. E., et al. "Modeling and tool wear in drilling of CFRP". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 50-2 p.204-213. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.10.004>).
- [9] Abrão M., Rubio J. C. C., Faria P. et al. "The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fiber reinforced plastic composite". *Materials & Design*. Vol. 29-2 p.508-513. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.016>).
- [10] Park K. H., Beal A., Kim D. et al. "Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools". *Wear*. Vol.271-11 p. 2826-2835. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2011.05.038>).
- [11] Isbilir O., Ghassemieh E. "Comparative study of tool life and hole quality in drilling of CFRP/titanium stack using coated carbide drill". *Machining Science and Technology*. Vol. 17-3 P.380-409. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10910344.2013.806098>).
- [12] Hocheng H., Tsao C. C. "The path towards delamination-free drilling of composite materials". *Journal of Material Processing Technology*. Vol.167 p.251-264. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.039>).
- [13] Khashaba U.A., El-Sonbaty I.A., Selmy A. I. et al. "Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part II – effect of drill wear". *Composites: Part A*. Vol.41 p.1130-1137. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.04.011>).
- [14] Won M.S., Dharan C.K.H. "Chisel edge and pilot hole effects in drilling composite laminates". *Journal of Manufacturing Science and Technology*. Vol. 124 p.242-247. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1448317>).
- [15] Jawahir I.S., van Luttervelt C.A. "Recent developments in chip control research and applications". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. Vol. 42-2 p.659-693. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62531-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62531-1)).
- [16] Ben Soussia A., Mkaddem A., El Mansori M. "Effect of coating type on dry cutting of glass/epoxy composite". *Surface and Coatings Technology*. Vol.215 p.413-420. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.04.098>).
- [17] Fujiwara J., Nagaura R., Tashiro T. "Drilling of CFRP/Ti6Al4V stack board". *Int. J. Autom. Technol*. Vol.7 p.426-432. (DOI: <http://dx.doi.org/10.20965/ijat.2013.p0426>).
- [19] SenthilKumar M., Prabukarthi A., Krishnaraj V. "Study on tool wear and chip formation during drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP)/titanium alloy (Ti6Al4V) stacks". *Procedia Engineering*. Vol. 64 p.582-592. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.133>).
- [20] Jallegas Jeremy, "Optimisation du perçage de multi-matériaux sur unité de perçage automatique (UPA)". Tesis doctoral. Université Sciences et Technologies – Bord

Ajuste de la conductividad térmica de diseño fijada por el código técnico de la edificación para materiales de fachada



Adjusting the design thermal conductivity considered by the spanish building technical code for façade materials



José María Pérez-Bella¹, Javier Domínguez-Hernández¹, Enrique Cano-Suñén¹, Juan José del Coz-Díaz², Beatriz Rodríguez Soria³

¹ Universidad de Zaragoza. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Área Ingeniería de la Construcción. c/ María de Luna, s/n – 50018 Zaragoza.

² Universidad de Oviedo. Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón. Dpto. Ingeniería de la Construcción. Edificio departamental Viesques, 7 – 33204 Gijón.

³ Centros Universitarios de la Defensa. CUD Zaragoza. Academia General Militar. Ctra. Huesca, s/n – 50090 Zaragoza.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8005> | Recibido: 21/03/2016 • Evaluado: 30/03/2016 • Aceptado: 25/06/2016

ABSTRACT

• The Spanish Technical Building Code establishes a temperature of 10°C and an equilibrium moisture content with a relative humidity of 50% and 23°C, respectively, as reference to determine the design thermal values of construction materials. However, these reference values are not consistent with the actual climatic conditions of the country, resulting in optimistic designs of the building thermal envelopes and higher energy consumptions than expected by design.

This article analyses these differences, reviews the weaknesses of the Spanish Code in this area, and uses a recently developed procedure to determine the actual thermal conductivity of façade materials with similar precision and less calculation effort that the standard UNE-EN ISO 10456. All this would contribute to improve the thermal design currently defined for the Spanish buildings.

• **Keywords:** Design thermal conductivity, Temperature, Moisture content, Façade design, Spanish Technical Building Code (CTE).

RESUMEN

El Código Técnico de la Edificación vigente en España establece, como condiciones de referencia para determinar los valores térmicos de diseño de los productos de construcción, una temperatura de 10°C y un contenido de humedad en equilibrio a 23°C y 50% de humedad relativa. Sin embargo, estos valores de referencia no son coherentes con las condiciones climáticas reales del país, lo que se traduce en diseños optimistas de la envolvente térmica de los edificios y en consumos de energía superiores a los previstos en el diseño.

Este artículo analiza estas divergencias, revisa las debilidades del Código Técnico de la Edificación en la materia y estima la conductividad térmica real de los materiales de fachada mediante un nuevo procedimiento, capaz de obtener una precisión similar a la norma UNE-EN ISO 10456 con un menor esfuerzo de cálculo. Todo ello ha de contribuir a mejorar el diseño térmico actualmente establecido para los edificios españoles.

Palabras clave: Conductividad térmica de diseño, Temperatura, Humedad, Diseño de fachadas, Código Técnico de la Edificación.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos del diseño de la envolvente térmica de los edificios es reducir el consumo de energía necesario

para alcanzar el bienestar térmico en su interior [1-3]. Limitar la transmitancia térmica de los cerramientos que integran dicha envolvente, es una de las medidas de mayor importancia para alcanzar este objetivo [4-6]. La conductividad térmica de los productos de construcción determina esta transmitancia, constituyendo una de las principales características higrotérmicas a considerar para el diseño del edificio [7].

No obstante, la conductividad térmica de los materiales se ve afectada por la temperatura y humedad relativa ambiental presente en cada emplazamiento [8-10]. Así, en general un incremento de la temperatura o del contenido de humedad en la matriz porosa de los materiales, incrementa su valor de conductividad térmica [11,12]. En el actual contexto de limitación de la demanda energética, caracterizar adecuadamente la conductividad térmica que presentarán los productos de construcción en sus condiciones reales de operación, es una tarea clave para diseñar envolventes térmicas más ajustadas a las prestaciones requeridas [13,14].

A pesar de ello, numerosas normativas de construcción utilizan valores estandarizados de conductividad, basados en condiciones ambientales de referencia que son independientes de las realmente presentes en cada emplazamiento [15-18]. En España, el Código Técnico de la Edificación (CTE) establece como condición de referencia una temperatura de 10°C y un contenido de humedad en equilibrio a 23°C y 50% de humedad relativa (CTE DB-HE1.6.1.7) [19].

La conductividad de un material bajo estas condiciones concretas de temperatura T (°C) y humedad relativa ϕ (-) puede calcularse a partir de la conductividad proporcionada por el fabricante (conductividad declarada), utilizando el procedimiento recogido en la norma UNE-EN ISO 10456 [20]. Este procedimiento utiliza factores de conversión asociados a la temperatura (F_T), al contenido de humedad (F_M) y al envejecimiento del material (F_A), para aproximar la conductividad térmica del material en cualesquiera condiciones ambientales específicas λ_2 (W/(m·K)), a partir del valor de conductividad declarado en base a otras condiciones ambientales λ_1 (W/(m·K)). Como se observa en la Ec. (1), estos factores de conversión se obtienen a partir de coeficientes f_t (K⁻¹) y f_ψ (m³/m³) tabulados para diversos materiales, y de la diferencia de temperatura $T_2 - T_1$ (K) y de contenido de humedad en el material $\psi_2 - \psi_1$ (m³/m³) entre ambas condiciones ambientales. Cuando el valor de conductividad λ_1 considera los efectos del envejecimiento del material (como es habitual en los valores declarados por los fabricantes), puede obviarse el factor F_A [20].

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot F_T \cdot F_M \cdot F_A = \lambda_1 \cdot e^{f_t(\tau_2 - \tau_1)} \cdot e^{f_\psi(\psi_2 - \psi_1)} \cdot F_A$$

(1)

Las condiciones de los edificios españoles, sometidos a moderadas o elevadas temperaturas ambientales y condiciones interiores de confort próximas a 20°C, hacen que los materiales que integran los cerramientos se encuentren habitualmente a temperaturas superiores a los 10 °C fijados por el CTE. La humedad relativa del 55% establecida por el CTE para espacios interiores sin elevada producción de humedad y los aún mayores valores de humedad relativa ambiental frecuentes en el país, hacen que tampoco sea realista considerar un valor ϕ igual al 50% en los materiales de construcción [21].

Estos desajustes provocan que la conductividad térmica de los materiales en sus condiciones reales de servicio sea superior al valor fijado por el CTE para el cálculo térmico del edificio [11, 12, 22, 23]. El cálculo térmico así realizado puede provocar diseños inadecuados e insuficientes de la envolvente térmica, pérdidas energéticas superiores a las inicialmente previstas y un mayor consumo de energía asociado a las instalaciones de climatización.

Por otra parte, el ajuste definido por la Ec. (1) tampoco resulta funcional para calcular los valores reales de conductividad en cada posible diseño térmico. Para su aplicación se necesita un laborioso cálculo que determine los valores de T y ϕ en cada hoja del cerramiento, así como el contenido de humedad presente en la matriz porosa de cada material [24]. Dado que el contenido de humedad en las matrices porosas no es directamente proporcional a la humedad relativa ambiental, es necesario determinar curvas isotermas de sorción empíricas que relacionen específicamente ambas magnitudes para cada material [25-26]. Cualquier variación de las condiciones de diseño (parámetros ambientales, espesor de los materiales u orden de las hojas del cerramiento), obligaría a repetir nuevamente dichos cálculos. Esta escasa funcionalidad ha propiciado que las normativas de construcción opten por agilizar el diseño, asumiendo simplifícadamente condiciones estandarizadas para fijar la conductividad, tal y como sucede en el CTE.

No obstante, un procedimiento desarrollado recientemente permite soslayar estas dificultades, estimando la conductividad de los materiales de construcción con una precisión similar a la norma UNE EN ISO 10456 y un menor esfuerzo de cálculo [22]. Utilizando este procedimiento, el trabajo corrige los valores de conductividad establecidos por el CTE para materiales de fachada en las capitales de provincia y ciudades autónomas españolas (en adelante, simplemente capitales). Para ello se evalúan en cada emplazamiento las condiciones ambientales que se presentan a lo largo del año, calculando el factor de corrección más conservador asociado a dicha climatología. Finalmente, se proporcionan las herramientas necesarias para implementar un diseño térmico del edificio de mayor prestación en el actual CTE.

2. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE REFERENCIA UTILIZADAS PARA FIJAR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS PRODUCTOS DE CONSTRUCCIÓN EN ESPAÑA

La norma UNE-EN ISO 10456 establece 4 conjuntos de condiciones en base a las cuales los fabricantes deben determinar los valores declarados de conductividad de sus materiales y productos para la edificación (Tabla I). La condición declarada "Ib" coincide con las condiciones de referencia adoptadas por el CTE (10°C y un contenido de humedad en equilibrio con una humedad relativa del 50% a 23°C), lo que permite utilizar directamente en el diseño térmico los valores declarados por los fabricantes, sin necesidad de ajustes adicionales [20].

Aunque el conjunto de condiciones "Ib" se utiliza habitualmente como referencia para el diseño térmico en países caracterizados por bajas temperaturas ambientales [18, 27], éste no resulta directamente extrapolable al contexto climático español [28]. Tal y como recoge el propio CTE, la temperatura media anual en las 52 capitales del país puede oscilar desde 9,9°C en Burgos, hasta 18,5°C en Almería (alcanzando hasta 21°C en las capitales de las Islas Canarias). Además, estas temperaturas pueden sufrir acusadas variaciones estacionales, con diferencias entre los meses de verano e invierno de hasta 19°C. La humedad relativa presenta oscilaciones similares, con cambios estacionales de hasta un 35% y valores medios anuales que varían desde 56,4% en Madrid, hasta 80,3% en Ceuta [21].

Por su parte, las condiciones de confort higrotérmico más habituales en el interior de los edificios, se establecen para el cálculo en 20°C y una humedad relativa del 55% (considerando una clase higrotérmica 3, establecida por el CTE para zonas sin una elevada producción de humedad como oficinas, tiendas, almacenes y el interior de edificios residenciales), condiciones éstas mantenidas a lo largo de todo el año mediante las preceptivas instalaciones de climatización y renovación de aire [21]. En conjunto, todas estas condiciones de contorno sugieren que los valores de referencia adoptados por el CTE para determinar la conductividad de diseño de los materiales de construcción (condición declarada "Ib"), son poco realistas en la mayoría de los emplazamientos y a lo largo de la mayor parte del año.

Para valorar la magnitud de esta divergencia, se propone el análisis de la transmitancia térmica asociada a dos cerramientos de fachada (A y B), representativos de los convencionalmente utilizados en todo el país. La Fig. 1 muestra la composición de ambas soluciones constructivas, la conductividad térmica de sus materiales según la condición "Ib" fijada por el CTE (λ_{ib}), y los valores f_t y f_ψ tabulados en la norma UNE-EN ISO 10456 para la aplicación de la Ec. (1). Ambos cerramientos se analizan en cuatro capitales

PROPIEDAD	CONJUNTO DE CONDICIONES			
	I		II	
	a)	b)	a)	b)
Temperatura de referencia	10°C	10°C	23°C	23°C
Humedad	u_{seco}	$u_{23,50}$	u_{seco}	$u_{23,50}$
Envejecimiento	envejecido	envejecido	envejecido	envejecido
u_{seco} es un contenido de humedad bajo, conseguido mediante secado. $u_{23,50}$ es el contenido de humedad cuando hay equilibrio con el aire a 23°C y humedad relativa de 50%.				

Tabla I: Condiciones ambientales asociadas a los valores declarados de conductividad, según la norma UNE-EN ISO 10456:2012

españolas (Burgos, Almería, Madrid y Ceuta), considerando los valores mensuales más extremos de T y ϕ que se producen a lo largo del año en todas ellas [21].

Dado que el CTE establece la condición de referencia "Ib" indistintamente para todo el territorio, la transmitancia U (W/(m²·K)) de cada cerramiento es la misma en las cuatro ciudades analizadas (Tabla II). Para este cálculo se han considerado unas resistencias térmicas superficiales iguales a 0,04 y 0,13 m²·K/W, para los ambientes exterior e interior respectivamente [29]. El valor U de ambos cerramientos puede calcularse también adoptando las conductividades térmicas que presentarían los materiales bajo las condiciones declaradas "Ia", "IIa" y "IIb", así como bajo las condi-

ciones ambientales reales correspondientes a los meses más extremos de verano e invierno en los cuatro emplazamientos.

La conductividad de cada material considerando cada conjunto de condiciones ambientales, ha sido calculada utilizando el laborioso procedimiento recogido en la norma UNE-EN ISO 10456 (Ec. 1). Así, se han determinado los factores de conversión F_T y F_M asociados a la temperatura y contenido de humedad en cada hoja de ambos cerramientos. El contenido de humedad de cada material se ha estimado mediante las isoterms de sorción proporcionadas por el software WUFI Light 5.3, desarrollado por el *Fraunhofer Institute for Building Physics* [30]. Así, a cada condición de humedad relativa en el material, le corresponde un determinado contenido de

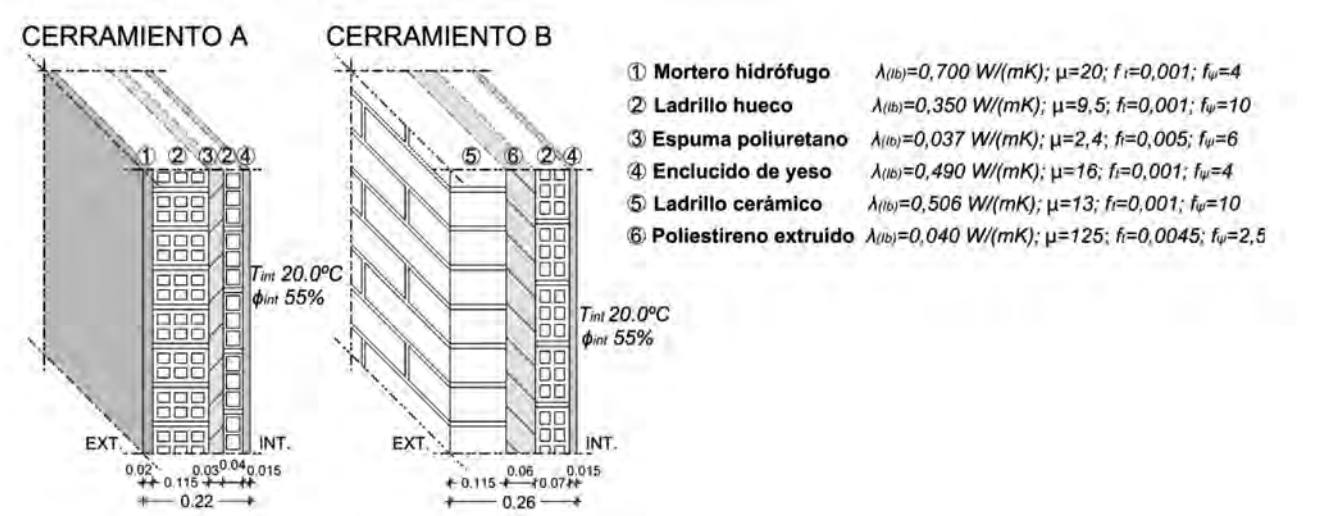


Fig. 1: Composición de los cerramientos de fachada analizados y propiedades higrotérmicas asociadas a sus materiales

Transmitancia térmica a considerar en el diseño térmico (m²K/W)								
Cerramiento A								
	Mes [21]	T (°C)	φ (%)	U _{UNE}	U _{Ia}	U _{Ib (CTE)}	U _{IIa}	U _{IIb}
Burgos	Ene. ^(*)	2,6	86	0,682	0,663 (-2,8%)	0,674 (-1,2%)	0,690 (+1,2%)	0,702 (+2,9%)
	Ago.	18,3	62	0,696	0,663 (-4,7%)	0,674 (-3,2%)	0,690 (-0,9%)	0,702 (+0,9%)
Almería	Ene.	12,4	70	0,692	0,663 (-4,2%)	0,674 (-2,6%)	0,690 (-0,3%)	0,702 (+1,4%)
	Ago.	26,0	66	0,703	0,663 (-5,7%)	0,674 (-4,1%)	0,690 (-1,8%)	0,702 (-0,1%)
Madrid	Ene.	6,2	71	0,698	0,663 (-5,0%)	0,674 (-3,4%)	0,690 (-0,9%)	0,702 (+0,6%)
	Jul.	24,4	37	0,699	0,663 (-5,2%)	0,674 (-3,6%)	0,690 (-1,3%)	0,702 (+0,4%)
Ceuta	Ene.	11,5	87	0,694	0,663 (-4,5%)	0,674 (-2,9%)	0,690 (-0,6%)	0,702 (+1,2%)
	Ago.	22,2	87	0,702	0,663 (-5,6%)	0,674 (-4,0%)	0,690 (-1,7%)	0,702 (+0,0%)
(*) En este caso concreto, se ha añadido una barrera de vapor para evitar condensaciones intersticiales en el cerramiento.								
Cerramiento B								
	Mes [21]	T (°C)	φ (%)	U _{UNE}	U _{Ia}	U _{Ib (CTE)}	U _{IIa}	U _{IIb}
Burgos	Ene.	2,6	86	0,474	0,466 (-1,7%)	0,470 (-0,8%)	0,489 (+3,2%)	0,493 (+4,0%)
	Ago.	18,3	62	0,487	0,466 (-4,3%)	0,470 (-3,5%)	0,489 (+0,4%)	0,493 (+1,2%)
Almería	Ene.	12,4	70	0,482	0,466 (-3,3%)	0,470 (-2,5%)	0,489 (+1,5%)	0,493 (+2,3%)
	Ago.	26,0	66	0,495	0,466 (-5,9%)	0,470 (-5,1%)	0,489 (-1,2%)	0,493 (-0,4%)
Madrid	Ene.	6,2	71	0,477	0,466 (-2,3%)	0,470 (-1,5%)	0,489 (+2,5%)	0,493 (+3,4%)
	Jul.	24,4	37	0,492	0,466 (-5,3%)	0,470 (-4,5%)	0,489 (-0,6%)	0,493 (+0,2%)
Ceuta	Ene.	11,5	87	0,482	0,466 (-3,3%)	0,470 (-2,5%)	0,489 (+1,5%)	0,493 (+2,3%)
	Ago.	22,2	87	0,492	0,466 (-5,3%)	0,470 (-4,5%)	0,489 (-0,6%)	0,493 (+0,2%)

Tabla II: Transmitancia térmica de ambos cerramientos considerando diferentes condiciones de referencia, y desviación comparativa respecto de los valores de transmitancia ajustados según norma UNE-EN ISO 10456.

$$\psi_{diseño} \approx \frac{\left(\frac{P_{v\ ext} + P_{v\ int}}{2}\right)}{610,5 \cdot e^{\left(\frac{17,269 \left(\frac{T_{ext} + T_{int}}{2}\right)}{273,3 + \left(\frac{T_{ext} + T_{int}}{2}\right)}\right)}} \cdot 0,0107 \quad (2)$$

humedad, caracterizado por su curva de sorción característica. El factor de resistencia a la difusión de vapor μ (representado en la Fig. 1), permite referenciar el material concreto seleccionado en la amplia base de datos del software. Por su parte, los valores de T y φ que presenta cada material en las condiciones reales de los meses de verano e invierno, se han obtenido mediante simples relaciones higrotérmicas proporcionadas por el propio CTE, considerando un ambiente interior con una clase higrotérmica 3 [21,24].

Como se aprecia en la Tabla II, la transmitancia térmica de los cerramientos se ve modificada por las condiciones ambientales presentes en cada emplazamiento y época del año. Pueden identificarse así importantes variaciones estacionales y geográficas, que no son consideradas por el CTE al asumir simplificadaamente unas condiciones de referencia estandarizadas.

Por su parte, la transmitancia térmica asociada a las condiciones declaradas "Ia", "Ib", "IIa" y "IIb", resulta progresivamente mayor cuanto más elevado es el valor de T y φ que las caracteriza. Como resultado, los valores U_{Ia} y U_{Ib} (establecidos a una temperatura de 10°C), siempre resultan inferiores al valor ajustado según la norma UNE, incluso en aquellos emplazamientos y meses de menor temperatura (véase Burgos, mes de enero). En el caso de la condición adoptada por el CTE ("Ib"), la transmitancia calculada

resulta entre un 0,8% y 5,1% inferior a la real a lo largo de todo el año, lo que se traduce en diseños optimistas de la envolvente y pérdidas energéticas mayores que las previstas en el diseño.

Considerando los actuales esfuerzos por alcanzar una mayor eficiencia energética en las edificaciones (con modelos de edificios de energía cero, normativas de construcción más exigentes o herramientas de diseño térmico más sofisticadas y precisas), estas desviaciones no resultan despreciables y por lo tanto, deberían ser corregidas. En este sentido, solo el conjunto de condiciones declaradas "IIb" ofrece valores de transmitancia habitualmente superiores a los de la norma UNE y por lo tanto, conservadores desde el punto de vista del cálculo térmico durante la mayor parte del año. Sin embargo, la utilización de un único conjunto de condiciones estandarizadas seguiría sin ajustar la prestación de cada cerramiento a las condiciones climáticas específicas en cada emplazamiento.

2.1. ESTIMACIÓN FUNCIONAL DE LA CONSTRUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISEÑO MEDIANTE FACTORES CORRECTORES

Para alcanzar un diseño ajustado a la prestación requerida en cada emplazamiento, el laborioso procedimiento de cálculo recogido en la norma UNE-EN ISO 10456 debería ser sustituido por otro más práctico y funcional. Así, ha sido recientemente desarrollado un procedimiento capaz de soslayar el cálculo de la temperatura, humedad relativa y contenido de humedad en cada material del cerramiento, cuyas bases teóricas se desglosan en las siguientes referencias [22,23].

Para ello, este procedimiento utiliza únicamente los valores de temperatura y humedad relativa que definen las condiciones de

$$\lambda_{diseño} \approx \lambda_{Ib\ (CTE)} \cdot CCF = \lambda_{Ib\ (CTE)} \cdot e^{0,0036\left(\frac{T_{ext} + 20}{2} - 10\right)} \cdot e^{4,96(\psi_{diseño} - 0,0053)} \quad (3)$$

Transmitancia térmica para el diseño térmico (m²K/W)							
Cerramiento A							
	Mes [21]	T (°C)	φ (%)	CCF (3)	U _{UNE}	U _{CCF}	U _{Ib (CTE)}
Burgos	Ene. (*)	2,6	86	1,0166	0,682	0,684 (+0,3%)	0,674 (-1,2%)
	Ago.	18,3	62	1,0384	0,696	0,697 (+0,1%)	0,674 (-3,2%)
Almería	Ene.	12,4	70	1,0295	0,692	0,692 (+0,0%)	0,674 (-2,6%)
	Ago.	26,0	66	1,0551	0,703	0,707 (+0,6%)	0,674 (-4,1%)
Madrid	Ene.	6,2	71	1,0195	0,698	0,686 (-1,7%)	0,674 (-3,4%)
	Jul.	24,4	37	1,0425	0,699	0,700 (+0,1%)	0,674 (-3,6%)
Ceuta	Ene.	11,5	87	1,0315	0,694	0,693 (-0,1%)	0,674 (-2,9%)
	Ago.	22,2	87	1,0534	0,702	0,706 (+0,6%)	0,674 (-4,0%)
(*) En este caso concreto, se ha añadido una barrera de vapor para evitar condensaciones intersticiales en el cerramiento.							
Cerramiento B							
	Mes [21]	T (°C)	φ (%)	CCF (3)	U _{UNE}	U _{CCF}	U _{Ib (CTE)}
Burgos	Ene.	2,6	86	1,0166	0,474	0,477 (+0,6%)	0,470 (-0,8%)
	Ago.	18,3	62	1,0384	0,487	0,486 (-0,2%)	0,470 (-3,5%)
Almería	Ene.	12,4	70	1,0295	0,482	0,483 (+0,2%)	0,470 (-2,5%)
	Ago.	26,0	66	1,0551	0,495	0,494 (-0,2%)	0,470 (-5,1%)
Madrid	Ene.	6,2	71	1,0195	0,477	0,478 (+0,2%)	0,470 (-1,5%)
	Jul.	24,4	37	1,0425	0,492	0,488 (-0,8%)	0,470 (-4,5%)
Ceuta	Ene.	11,5	87	1,0315	0,482	0,484 (+0,4%)	0,470 (-2,5%)
	Ago.	22,2	87	1,0534	0,492	0,493 (+0,2%)	0,470 (-4,5%)

Tabla III: Transmitancia térmica de ambos cerramientos ajustados mediante la norma UNE-EN ISO 10456 y mediante el factor de corrección CCF

contorno interiores y exteriores del cerramiento, calculando una presión de vapor media en el cerramiento P_v (Pa) mediante relaciones higrotérmicas como las recogidas en el propio CTE [21]. Como resultado, el contenido de humedad real de todos los materiales presentes en un cerramiento de fachada convencional, se aproxima simplifícadamente mediante la Ec. (2).

Aplicando diferentes simplificaciones al método recogido en la norma UNE-EN ISO 10456, estos mismos datos de partida permiten también corregir la conductividad térmica fijada por el CTE para los materiales presentes en estas fachadas ($\lambda_{ib(CTE)}$). Así, tomando una clase higrotérmica 3 como condiciones interiores de diseño, la Ec. (3) permite realizar esta corrección con un menor esfuerzo de cálculo y una precisión similar a la de la norma UNE. Los coeficientes mostrados en las Ecs. (2) y (3) se determinan a partir de aproximaciones y promedios basados en los valores tabulados por la propia norma UNE [22,23]. Pueden a su vez adaptarse para corregir la conductividad en otros tipos de cerramiento (por ejemplo, cubiertas), así como en fachadas carentes de hojas de albañilería. Del mismo modo, podría ser necesario su ajuste en caso de utilizar materiales aislantes naturales (como la lana de oveja), dada la mayor relevancia del comportamiento higroscópico en su desempeño térmico.

Multiplicando con este factor de corrección adimensional (*CCF* o *conductivity correction factor*), el valor de conductividad térmica de todos los materiales presentes en los cerramientos mostrados en la Fig. 1, se aprecia como los nuevos valores U_{ccf} obtenidos se ajustan a las condiciones de operación previstas en cada emplazamiento y mes, reduciendo significativamente la desviación asociada al CTE (Tabla III).

Como se observa, el factor de corrección *CCF* identificado en todos los casos es mayor que la unidad, lo que sugiere la necesidad de incrementar la conductividad considerada por el CTE en todos los emplazamientos, incluso en los meses de menor temperatura o humedad relativa. Así, la desviación del nuevo valor U_{ccf} respecto al valor más próximo al real (calculado mediante la norma UNE-EN ISO 10456), no supera el 1,7% para el cerramiento A, mientras que mediante la condición "Ib" (CTE) ésta desviación ascendía hasta el 4,1%. A su vez, en el cerramiento B la desviación máxima se sitúa en el 0,8%, frente al 5,1% asociado al CTE.

3. AJUSTE DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISEÑO PARA MATERIALES DE FACHADA EN ESPAÑA

Estudios previos han demostrado igualmente la validez de estos factores de corrección para otras condiciones ambientales, emplazamientos y configuraciones de fachada. En todos los casos, la transmitancia térmica obtenida mediante dicha corrección aproxima el valor de *U* con mayor precisión que el cálculo establecido por el CTE [22,23]. No obstante, hasta el momento estos estudios se han centrado preferentemente en determinar los valores de *CCF* asociados a las condiciones climáticas medias anuales presentes en los emplazamientos.

Sin embargo, aunque estos valores medios anuales pueden ser utilizados para una corrección general de la conductividad, es necesario evaluar los datos climáticos extremos que se producen en cada emplazamiento para fijar valores de diseño conservadores a lo largo de todo el año. Con este objetivo se han analizado en este trabajo los registros medios mensuales de temperatura y humedad relativa en cada una de las 52 capitales españolas, determinando mes a mes el factor de corrección *CCF* asociado a dichas condiciones ambientales. La serie de datos climáticos utilizada para este cálculo se ha tomado de los valores tabulados en el propio

CTE [21]. En general, las condiciones ambientales de *T* y ϕ que determinan un mayor factor de corrección se producen durante los meses de julio y agosto, debido principalmente a las elevadas temperaturas habituales en los emplazamientos españoles durante el verano (Tabla IV).

Ciudad	Mes (*)	T _{ext} (°C)	Φ _{ext} (%)	CCF
Albacete	Agosto	23,7	50	1,0452
Alicante	Agosto	25,5	68	1,0547
Almería	Agosto	26,0	66	1,0551
Ávila	Julio	19,9	39	1,0351
Badajoz	Julio	25,3	50	1,0483
Barcelona	Agosto	23,0	72	1,0506
Bilbao	Agosto	19,8	75	1,0448
Burgos	Agosto	18,3	62	1,0384
Cáceres	Julio	26,1	37	1,0456
Cádiz	Agosto	24,5	69	1,0528
Castellón	Agosto	24,5	69	1,0528
Ceuta	Agosto	22,2	97	1,0534
Ciudad Real	Julio	25,0	47	1,0468
Córdoba	Agosto	26,7	49	1,0508
A Coruña	Agosto	18,9	79	1,0440
Cuenca	Agosto	22,1	46	1,0410
Girona	Agosto	22,4	68	1,0481
Granada	Julio	24,3	42	1,0439
Guadalajara	Julio	23,5	53	1,0458
Huelva	Agosto	25,7	54	1,0505
Huesca	Agosto	22,7	53	1,0442
Jaén	Agosto	27,1	45	1,0502
León	Julio	19,7	52	1,0383
Lleida	Agosto	24,0	54	1,0471
Logroño	Julio	22,2	55	1,0439
Lugo	Agosto	17,5	75	1,0402
Madrid	Julio	24,4	37	1,0425
Málaga	Agosto	25,3	63	1,0526
Melilla	Agosto	25,3	68	1,0542
Murcia	Agosto	24,6	74	1,0547
Orense	Julio	21,9	61	1,0450
Oviedo	Agosto	18,3	80	1,0431
Palencia	Julio	20,7	58	1,0418
Palma	Agosto	25,3	71	1,0552
Las Palmas	Septiembre	23,9	69	1,0516
Pamplona	Agosto	20,3	61	1,0419
Pontevedra	Julio	20,7	65	1,0438
S. Sebastián	Agosto	18,7	83	1,0447
Salamanca	Julio	21,0	50	1,0401
St. Cruz Ten.	Septiembre	24,4	63	1,0507
Santander	Agosto	19,5	78	1,0450
Segovia	Julio	21,6	47	1,0404
Sevilla	Agosto	26,8	52	1,0520
Soria	Julio	19,9	53	1,0389
Tarragona	Agosto	25,3	62	1,0523
Teruel	Julio	21,3	50	1,0407
Toledo	Julio	26,5	43	1,0484
Valencia	Agosto	24,5	69	1,0528
Valladolid	Agosto	21,3	46	1,0395
Vitoria	Agosto	18,5	70	1,0408
Zamora	Julio	21,8	47	1,0407
Zaragoza	Agosto	23,8	54	1,0467

(*) Combinación más desfavorable de *T* y ϕ respecto a las condiciones consideradas por el CTE ("Ib").

Tabla IV: Valores máximos anuales del factor de corrección *CCF* en las capitales españolas, considerando 20°C y una humedad relativa del 55% en el interior de los edificios (clase higrotérmica 3)

Los factores de corrección máximos calculados en las 52 capitales españolas oscilan entre 1,0351 (Ávila) y 1,0552 (Palma de Mallorca), lo que se traduce en la necesidad de incrementar la conductividad térmica de los materiales actualmente utilizada por el CTE entre un 3,51 y 5,52%. Para la implementación de esta corrección en el actual diseño térmico de las fachadas, únicamente sería necesario multiplicar los valores de conductividad térmica habituales, por el coeficiente corrector correspondiente al emplazamiento en el que se ubicará el edificio a diseñar.

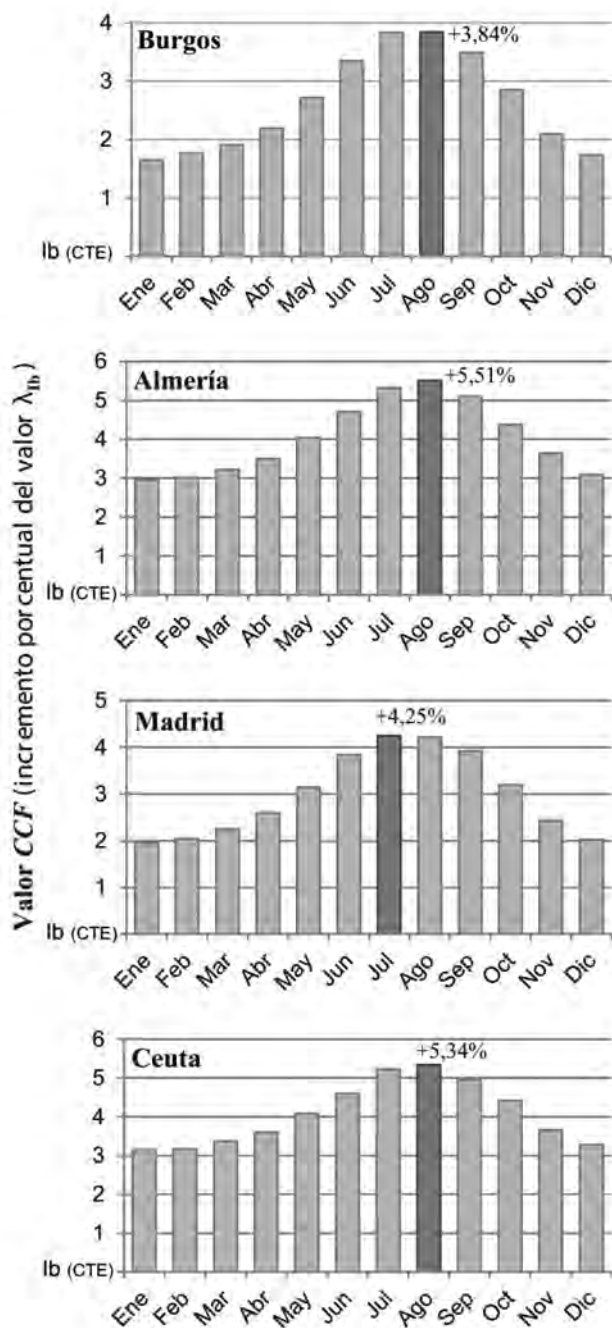


Fig. 2: Evolución mensual del factor corrector CCF en cuatro de los emplazamientos españoles analizados

La Fig. 2 representa la evolución anual de estos factores de corrección, tomando como ejemplo las mismas ciudades previamente analizadas en el apartado 2 (Burgos, Almería, Madrid y Ceuta). Como se aprecia, las correcciones necesarias son menores cuando las condiciones climáticas ambientales se aproximan a la temperatura (10°C) y humedad relativa (50%), establecidos por la condición Ib para los materiales. Todos los valores CCF obtenidos



Fig. 3: Mapa de corrección para la conductividad térmica de materiales de fachada (incremento porcentual del valor λ_{lb})

mensualmente en las 52 capitales son mayores que 1, lo que confirma la inadecuada elección de la condición declarada Ib para el contexto climático español, incluso en los meses invernales. Así, el factor de corrección mínimo se identifica durante el mes de enero en Ávila, con un valor de 1,0156 o lo que es lo mismo, aun en dicha situación sería necesario incrementar las conductividades térmicas consideradas por el CTE para los materiales un 1,56%.

Para analizar la distribución geográfica de estas correcciones, los valores CCF máximos presentados en la Tabla IV se han utilizado para elaborar un mapa de isolíneas, caracterizando mediante interpolaciones lineales el factor de corrección entre los emplazamientos analizados (Fig. 3). Dicho mapa de corrección puede facilitar la implementación del procedimiento en el actual CTE, estableciendo correcciones aproximadas incluso lejos de las capitales del país. Todo ello posibilita un ajuste funcional de la conductividad térmica de los materiales de fachada en cualquier emplazamiento español.

En el mapa elaborado se observa la necesidad de una mayor corrección de los valores $\lambda_{lb(CTE)}$ en las zonas costeras del mediterráneo, el suroeste de la Península Ibérica y las Islas Canarias (correcciones superiores al +5%), como resultado de la combinación de altas humedades relativas y elevadas temperaturas estivales. La menor necesidad de corrección se identifica en la sub-meseta norte y el sistema ibérico (inferior al +4%), aunque el análisis de un mayor número de emplazamientos permitiría caracterizar con mayor exhaustividad otras zonas específicas como los Pirineos, donde es también previsible una menor corrección.

La precisión de este mapa de corrección puede ser incrementada si se consideran datos climáticos más exhaustivos (referidos a registros diarios o incluso horarios) y si se analiza un mayor número de emplazamientos repartidos por todo el país. Recientes estudios elaborados para el territorio de dos regiones españolas (Aragón y Cataluña), son una buena muestra de estas mejoras potenciales [23]. A su vez, el procedimiento de cálculo permite que estos factores de corrección puedan ser también adaptados a otras condiciones de diseño para el ambiente interior (diferentes de la clase higrotérmica 3), ajustando los coeficientes utilizados en las Ecs. (2) y (3) [22, 23]. Del mismo modo, podrían elaborarse mapas de corrección para otros países donde las condiciones ambientales fijadas por la normativa no sean representativas de las condiciones reales (ajustando adecuadamente los coeficientes de las ecuaciones recogidas en el punto 2.1).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado los parámetros de referencia establecidos por el CTE para fijar la conductividad térmica de los productos de construcción. Se ha comprobado como dichos parámetros no resultan adecuados para la climatología presente en el territorio español, lo que puede provocar diseños térmicos optimistas, basados en transmitancias térmicas de los cerramientos inferiores a las reales. La utilización de un único conjunto de parámetros de referencia para todo el país, impide además ajustar este diseño a las prestaciones requeridas en cada emplazamiento.

Utilizando un novedoso procedimiento, capaz de estimar con elevada funcionalidad y precisión valores más adecuados de conductividad térmica, se ha propuesto una corrección funcional de los valores de conductividad establecidos por el CTE para materiales de fachada. Evaluando las condiciones ambientales mensuales en las 52 capitales de provincia y ciudades autónomas españolas, han sido identificados los factores de corrección que posibilitan un ajuste conservador de la conductividad térmica durante todo el año.

Estos factores de corrección incrementan los actuales valores de conductividad de los materiales entre un 3,51 y un 5,52%, según las condiciones climáticas presentes en cada ciudad analizada. En general, estas correcciones son mayores en áreas costeras y el sur de España, debido a las mayores temperaturas y humedades relativas habituales en los materiales de estos emplazamientos. Para su posible implementación en la normativa actual, estos factores de corrección han sido representados geográficamente mediante un mapa de isolinias.

El uso de estas correcciones ha de permitir utilizar valores de conductividad para los materiales más realistas, ajustados a las condiciones reales de operación presentes en cada emplazamiento. Todo ello representa una importante oportunidad de mejora para el diseño de las envolventes térmicas en los edificios españoles, ajustando su diseño a las prestaciones requeridas bajo cada condición climática característica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Omer AM. "Energy, environment and sustainable development". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.12 p.2265-2300. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2007.05.001>)
- [2] Horne R, Hayles C. "Towards global benchmarking for sustainable homes: an international comparison of the energy performance of housing". *Journal of Housing and the Built Environment*. Vol.23-2 p.119-130. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10901-008-9105-1>)
- [3] Chwieduk D. "Towards sustainable-energy buildings". *Applied Energy*. Vol.76 p.211-217. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619\(03\)00059-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619(03)00059-X))
- [4] Pacheco R, Ordóñez J, Martínez G. "Energy efficient design of building: a review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.16 p.3559-3573. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>)
- [5] Kossecka E, Kosny J. "Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building". *Energy and Buildings*. Vol.34-4 p.321-331. (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00121-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00121-9))
- [6] Rodríguez B, Domínguez J, Pérez JM, et al. "Review of international regulations governing the thermal insulation requirements of residential buildings and the harmonization of envelope energy loss". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.34 p.78-90. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.009>)
- [7] Zhang Y, Du K, He J, et al. "Impact factors analysis on the thermal performance of hollow block wall". *Energy and Buildings*. Vol.75 p.330-341. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.037>)
- [8] Domínguez F, Anderson B, Cejudo JM, et al. "Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials". *Energy and Buildings*. Vol.42 p.2159-2168. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1019/j.enbuild.2010.07.006>)
- [9] Ochs F, Heidemann W, Müller-Steinhagen H. "Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol.51 p.539-552. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.05.005>)

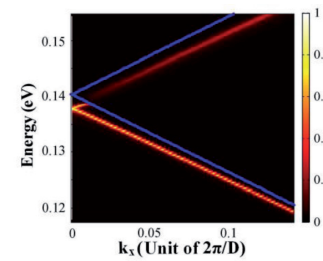
- [10] Jerman M, Černý R. "Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials". *Energy and Buildings*. Vol.53 p.39-46. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.002>)
- [11] Dell'Isola M, d'Ambrosio FR, Giovinco G, et al. "Experimental analysis of thermal conductivity for building materials depending on moisture content". *International Journal of Thermophysics*. Vol.33 p.1674-1685. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10765-012-1215-z>)
- [12] Abdou A, Budaiwi I. "Comparison of thermal conductivity measurements of building insulation materials under various operating temperatures". *Journal of Building Physics*. Vol.29 p.171-184. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1744259105056291>)
- [13] Prada A, Cappelletti F, Baggio P, et al. "On the effect of material uncertainties in envelope heat transfer simulations". *Energy and Buildings*. Vol.71 p.53-60. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.083>)
- [14] Moon HJ, Ryu SH, Kim JT. "The effect of moisture transportation on energy efficiency and IAQ in residential buildings". *Energy and Buildings*. Vol.75 p.439-446. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.039>)
- [15] ASHRAE. *ASHRAE Handbook of Fundamentals - Heat, air and moisture control in building assemblies*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), 2009.
- [16] CEN. *Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values*. EN 12524. Bruselas: European Committee for Standardization (CEN), 2007.
- [17] DIN. *Thermal insulation and energy economy in buildings - Hygrothermal design values*. DIN 4108-4. Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), 2004.
- [18] CIBSE. *CIBSE Guide A - Environmental design. Thermal properties of building structures - Section 3.3.7*. Londres: The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE), 2007.
- [19] Gobierno de España. *Código Técnico de la Edificación - Documento Básico HE1 Limitación de la demanda energética - Sección 6.1*. Madrid: Ministerio de Fomento, 2013.
- [20] AENOR. *Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño*. UNE-EN ISO 10456. Madrid: Asociación Española de Normalización (AENOR), 2012.
- [21] Gobierno de España. *Código Técnico de la Edificación - Documento de Apoyo DB-HE / 2 Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos - Apéndice C*. Madrid: Ministerio de Fomento, 2013.
- [22] Pérez JM, Domínguez J, Cano E, et al. "A correction factor to approximate the design thermal conductivity of building materials. Application to Spanish façades". *Energy and Buildings*. Vol.88 p.153-164. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.005>)
- [23] Pérez JM, Domínguez J, Cano E, et al. "Detailed territorial estimation of design thermal conductivity for façade materials in North-Eastern Spain". *Energy and Buildings*. Vol.102 p.266-276. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.025>)
- [24] AENOR. *Características higrotérmicas de los elementos y componentes de edificación. Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial. Métodos de cálculo*. UNE-EN ISO 13788. Madrid: Asociación Española de Normalización (AENOR), 2002.
- [25] Krus M. *Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials - Theoretical principles and new test methods*. Stuttgart: [Fraunhofer IRBVerlag], 1996.
- [26] AENOR. *Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificios. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica*. UNE-EN ISO 12571. Madrid: Asociación Española de Normalización (AENOR), 2000.
- [27] Finnish Government. *National Building Code of Finland, Document C4 - Thermal insulation guidelines 2003 - Section 4*. Helsinki: Ministry of the Environment, 2003.
- [28] Kottek M, Grieser J, Beck C, et al. "World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated". *Meteorologische Zeitschrift*. Vol.15 p.259-263. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>)
- [29] Gobierno de España. *Código Técnico de la Edificación - Documento de Apoyo DB-HE / 1 Cálculo de parámetros característicos de la envolvente - Apartado 2.1.1*. Madrid: Ministerio de Fomento, 2015.
- [30] Fraunhofer IBP Software. *WUFI light 5.3*. Disponible en Web: http://www.wufi.de/index_e.html [Consulta 15 de marzo de 2016]

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación y cofinanciada con fondos FEDER a través del proyecto de investigación BIA2012-31609.

Far-infrared perfect optical absorption in film supporting metallic grating structures

Absorción óptica perfecta de la radiación infrarroja lejana en estructuras de parrilla metálica soportadas por una película



Xiumei Chen¹, Xiaopeng Yan^{1,*}, Ping Li¹, and Wenqiang Wang²

¹ Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Beijing Institute of Technology, Zhongguancun South Street 5#, Beijing, 100081, China. * Corresponding author, email: yanxiaopeng@bit.edu.cn

² Center for Nanoscience and Nanotechnology and School of Physics and Technology, Wuhan University, Luojiashan, Wuhan, 430072, Hubei, China

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8176> | Recibido: 10/10/2016 • Evaluado: 11/10/2016 • Aceptado: 30/12/2016

RESUMEN

- Se demuestra la absorción óptica perfecta (POA) de la región infrarroja lejana en una estructura de rejilla metálica para baja longitud de onda sobre una película dieléctrica de apoyo y se investigan las características de la POA por cálculo teórico y por análisis bajo luz incidente transversal polarizada magnéticamente. En este estudio, se propuso por primera vez un diseño estructural sencillo para lograr la casi perfecta absorción en la región del infrarrojo lejano. La dependencia de la POA en la geometría se calculó mediante un riguroso análisis de ondas acopladas. Además, se investigaron el campo electromagnético, las distribuciones de densidad de flujo de energía y la dispersión de la absorción para la POA por simulaciones numéricas. Los resultados muestran que la POA en la región del infrarrojo lejano se obtiene utilizando una estructura de rejilla metálica soportada por película con las ventajas de una sintonización lineal de la longitud de onda del POA y un diseño estructural sencillo con una gran tolerancia geométrica. Además de los modos de resonancia de Fabry-Perot en las rendijas de la rejilla y de los plasmones polaritones de superficie excitados sobre las superficies, se demostraron también los modos de guía de ondas en la película en el caso de película gruesa, lo que cambia significativamente la región de pérdida de energía, pero con un efecto insignificante en el ancho del pico resonante de la POA. Las ventajas de la sintonización lineal de la longitud de onda, el diseño estructural sencillo y la gran tolerancia geométrica de la POA en la región del infrarrojo lejano demuestran su aplicación prometedora en la detección, detección y modulación de la radiación infrarroja.
- Palabras clave:** Absorción, Plasmón Polaritones de Superficie, Estructura de Rejilla para Baja Longitud de Onda, Modos de Guía de Ondas.

ABSTRACT

Perfect optical absorption (POA) in the far-infrared region is demonstrated in the subwavelength metallic grating structure with a supporting dielectric film, and the features of the POA are investigated by theoretical calculation and analysis under normal transverse magnetic polarized incident light. In this study, a simple structure design was first proposed to achieve nearly perfect absorption in the far-infrared region. The dependence of the POA on the geometry was calculated by rigorous coupled wave analysis. Furthermore, the electric field and energy flow density distributions and absorption dispersion for the POA were investigated by numerical simulations. Results show that the POA in the far-in-

frared region is obtained using the film supporting metallic grating structure with the advantages of linear tunability on the POA wavelength and simple structure design with a large geometric tolerance. The waveguide modes in the film is demonstrated to play an important role for the perfect absorption, which significantly change the energy loss region, but with negligible effect on the POA resonant peak width, besides the Fabry-Perot resonant modes in the grating slits and the surface plasmon polaritons excited on the surfaces. The advantages of wavelength linear tunability, simple structure design, and large geometric tolerance of the POA in the far-infrared region demonstrate its promising application in infrared sensing, detection, and modulation.

Keywords: Absorption, Surface plasmon polaritons, Subwavelength grating structure, Waveguide modes.

1. INTRODUCTION

Perfect optical absorption (POA) in microstructures/nanostructures has attracted considerable attention because of its potential applications in sensing, detection, photovoltaics and modulation. The phenomenon has been investigated for several decades since enhanced absorption was first demonstrated by metallic gratings in 1976 [1]. Many grating structures have been designed to obtain the perfect absorption, and several mechanisms have been presented to explain the phenomenon in recent years. Thus far, most of POA designs and features are studied in the visible region. Only a few designs for the POA have been reported in the infrared region; even less in the far-infrared region. Considering the important role of the absorption efficiency on the detection sensitivity, and far-infrared is an important band for the infrared sensor and detector, it is significant to realize the POA in the far-infrared region for the applications of infrared sensing and detection. Furthermore, it is also valuable to investigate the features of the POA in the far-infrared region because of the big difference in the metallic behaviors in the visible and far-infrared regions.

2. STATE OF THE ART

POA is near total absorption of the incident energy by modeling structures to suppress both transmission and reflection to approach zero. Since the enhanced absorption by grating structures was observed, various designs were proposed to achieve the perfect absorption, such as lamellar gratings [2], crossed gratings [3], and metallic gratings [4–6]. And many POA designs have been

used in the applications of solar cells [7, 8], resonance sensing [9], photodetectors [10], and thermal emitters [11]. Recently, the utilizations of hot electrons generated by surface plasmon decay further boost the interesting in catalysis, therapy, detection, and photovoltaics [12]. On the other hand, the phenomenon of the enhance absorption were also studied based on different designs, which were explained as the excitation of surface plasmon polaritons (SPPs) on corrugated metallic-dielectric surfaces [13, 14, 15], the Fabry-Perot (FP) resonant modes [16, 22], and the coupling of electric and magnetic responses in metamaterials [17, 18].

The infrared absorbing component is an important part of infrared sensor and detector and the maximum infrared absorption efficiency of the traditional infrared absorbing material such as gold film is only approximately 50% [19]. To improve the absorption efficiency of the absorbing component is one of the effective methods to improve the detection efficiency [19]. Hence, the investigation of the enhanced absorption for the infrared materials was also considered in recent years. So far, several compound multilayer structures were designed for the infrared perfect absorption, such as two-dimensional structures for near-infrared [20, 21] and mid-infrared [10] and seven-layer one-dimensional structure for far-infrared [22]. The metamaterial was also considered for the perfect absorption in the mid-infrared region [17]. Furthermore, a single-layer structure with rectangular grooves [23] was designed for near-infrared. In view of the microfabrication process, the multilayer design makes the structure difficult to integrate the layers together, and the metamaterial is more complicated than metallic gratings. Although, the single-layer is really simpler on the structure form than aforementioned multilayer structures, it is also difficult in practical fabrication because of the freestanding design and embedded rectangular grooves. The features of the POA in infrared region were also investigated with different designs, which were explained as SPPs [20, 21], FP modes [22], and horizontal surface plasmons at the horizontal metallic boundaries and vertical cavity modes inside the slits [23]. Overall, only a seven-layer structure was designed for far-infrared perfect absorption which is difficult to fabricate, and the mechanism of the POA in different structure designs are not totally in agreement. Therefore, it is important to design a real simple structure for the POA in the far-infrared region considering both structure form and microfabrication process. And it is also valuable to study the features of the POA in the new structure design.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 3 introduces the grating structure model and the theoretical calculation and analysis method. Section 4 describes and analyzes the results of POA dependence on the geometry, electric field and energy flow density distributions, and absorption dispersion. Section 5 summarizes the conclusions.

3. METHODOLOGY

3.1. GRATING STRUCTURE MODEL

The subwavelength structure model is selected as the two-layer metallic grating structure with a supporting dielectric film because it is simple on both structure form and microfabrication process which can be considered as one advantage of the structure design. This structure is regarded as air/grating/film/air with air as the filling material in the grating slits. The dielectric film is attached to the bottom of the grating as a supporting film. The schematic of the film supporting grating structure is shown as in Fig. 1, together with the coordinate system and the geometry

notations. The incident vector lies in the xOy plane from above with the magnetic field oriented perpendicular to the propagation direction, i.e., transverse magnetic (TM) polarization. The normal incident light is considered, with the angle of incidence measured from the surface normal as $\theta = 0$, i.e., the magnetic field vector is parallel to the grating line direction. The grating period (D), grating thickness (T), grating width (w), slit width (s) (slit ratio $k=s/D$), and supporting dielectric film thickness (T_d) are the important grating structure geometric parameters.

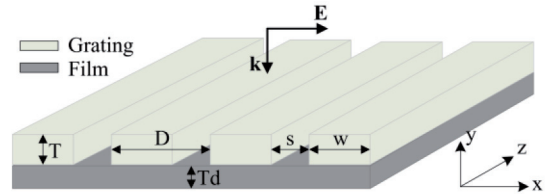


Fig. 1: Schematic of the film supporting grating structure

Given that the metal permittivity changes with the incident light wavelength, the permittivity of the metallic grating is calculated using the Drude model expressed in Eq. (1):

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} + i \frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)} \quad (1)$$

where ω is the frequency of the incident light. Gold is selected as the metallic material of the grating, which is often used as the metal for surface plasmon excitation because of its low loss and stability. The permittivity of gold is calculated using the Drude model [24], with the following relevant coefficients in Eq. (1) as $\varepsilon_{\infty}=1$, $\omega_p=1.15 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$, and $\gamma=0.9 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$. The refractive index of the supporting dielectric film is taken 1.4 for example, which approximately represents silica in the infrared wavelength.

3.2. THEORETICAL CALCULATION AND ANALYSIS METHOD

The ratios of reflection, transmission, and absorption are related to the incident light wavelength, incident angle, grating structure geometric parameters, and material permittivity. The transmittance and reflectance of p-order diffraction under the TM-polarized incident light are calculated as follows:

$$R_p = \delta_{0,p} - \frac{\omega/c}{\alpha_p} g_p (A - B_u) \quad (2)$$

$$T_p = \frac{\omega/c}{\alpha_p} g_p (A_u - B) \quad (3)$$

where $\delta_{0,p}$ is the Kronecker function with $\delta_{0,p}=1$ when $p=0$ and $\delta_{0,p}=0$ when $p \neq 0$. When the incident wavelength is more than the grating period with $g_0=0$ and $\alpha_0=\omega/c$ in the case of normal incident light, the transmittance and reflectance of zero-order diffraction are $r_0=1-(A-B_u)$ and $t_0=A-B_u$. The total absorption of the metallic grating structures is derived as follows:

$$A = 1 - \sum_{p=-\infty}^{\infty} R_p - \sum_{p=-\infty}^{\infty} T_p \quad (4)$$

So the absorption is defined as $A = 1 - T - R$, where T is the transmittance and R is the reflectance, with T/R as the sum of T_p/R_p for all propagation orders. The reflection and transmission are cal-

culated using the rigorous coupled wave analysis (GD-Calc [25]). The diffraction orders up to 100 are considered to achieve good convergence.

According to the principle of energy conservation, the absorption is the result from the energy loss in the grating structure. From the Poynting theorem [26]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{S} = -\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \quad (5)$$

The energy loss in the grating structure is caused by the work down of the electromagnetic forces on the electric charges, where $\mathbf{S}$ is the Poynting vector, u is the electromagnetic energy density, and $\mathbf{J}$ is the total current density. To calculate and visualize the electric field and energy flow density distributions are the effective ways to explain the physical mechanism of the perfect absorption.

The maximum absorption efficiencies of several specific incident wavelengths in the far-infrared region were calculated with the optimized geometric parameters firstly in order to confirm the perfect absorption can be achieved in this two-layer grating structure for far-infrared. Secondly, the dependence of the perfect absorption on geometric parameters and the refractive index of the supporting film were investigated in the far-infrared region. Finally, the electric field distribution, energy flow density distribution, and absorption dispersion were calculated and analyzed to explain the physical mechanism of the POA phenomenon. For the electric field and energy flow density distributions, a commercial finite differential time domain software (FDTD Solutions, Lumerical Solutions Inc., Vancouver, Canada) with nonuniform grids was used to calculate with the energy cutoff 10⁻⁵ for simulation convergence.

4. RESULT ANALYSIS AND DISCUSSION

4.1. ABSORPTION DEPENDENCE ON GEOMETRY

The maximum absorption efficiency of incident light in the metallic grating structure is obtained via suppressing the reflection and transmission by optimizing the structure parameters. Thus, the absorption dependence on the structure geometric parameter was investigated firstly. Fig. 2 shows the optical absorption spectrum curves with a single grating structure parameter changed as the grating slit width, grating thickness, film thickness, and grating period.

Firstly, the absorption efficiency was calculated with the varied slit ratio k from 0.04 to 0.6 by step size as 0.04, with other structure geometric parameters as the grating period $D = 8.85 \mu\text{m}$, grating thickness $T = 1 \mu\text{m}$, and film thickness $T_d = 0.5 \mu\text{m}$. As shown in Fig. 2(a), the absorption peak redshifts when the absorption peak increased, then blueshifts when the absorption peak decreased. The maximum absorbance is 98.35% as nearly perfect absorption at wavelength $9.006 \mu\text{m}$ when $k = 0.08$. These phenomena can be explained by the behavior of FP resonant modes in the grating slits for the narrow and wide slits. When the slits are

less than one third of the grating period, i.e., the narrow slit case, only a single fundamental transverse electromagnetic mode exists in the grating slits. Thus, the absorption peak redshifts with the slit increasing. When the scattering phase contributed by FP resonant modes achieves a certain value, the absorption efficiency approaches the maximum as the POA. By contrast, when the grating slits are larger than one third of the grating period, i.e., the wide slit case, more surface diffraction waves contribute to the surface plasmon modes and the absorption wavelength is near the grating period. More FP resonant modes exist in the grating slits in the wide slit case, which increase the radiation loss and reduce the absorption efficiency.

Next, the influence of the grating thickness on the absorption efficiency was studied as shown in Fig. 2(b). The grating thickness T is varied from $0.6 \mu\text{m}$ to $1.5 \mu\text{m}$ by step size as $0.1 \mu\text{m}$ with other structure parameters as $D = 8.85 \mu\text{m}$, $k = 0.086$, and $T_d = 0.5 \mu\text{m}$. It can be observed that the absorption peak always redshifts when the grating thickness increased. This can be explained that the grating thickness affects the scattering phase contributed by the transverse electromagnetic mode in the grating slits, thus, the absorption peak redshifts with the increasing grating thickness.

In addition, the absorption dependence on the film thickness was also investigated as shown in Fig. 2(c). The film thickness T_d is varied from $0 \mu\text{m}$ to $3 \mu\text{m}$ by step size as $0.1 \mu\text{m}$ with other structure parameters as $D = 8.85 \mu\text{m}$, $T = 1 \mu\text{m}$ and $k = 0.086$. It can be seen that the absorption peak also only redshifts when the film thickness increased. However, the absorption peak redshifts can't be explained by FP resonant mode in the slits as the grating thickness case. This phenomenon is due to the increasing phase contribution by multiple scattering waves inside the film and more electromagnetic mode contributions on the grating/film surface. Though it is not shown, we also calculated the absorption dependence on the refractive index of film, the changing trend of the absorption spectra is similar as it does with increasing film thickness. Thus, the refractive index of film material is not discussed

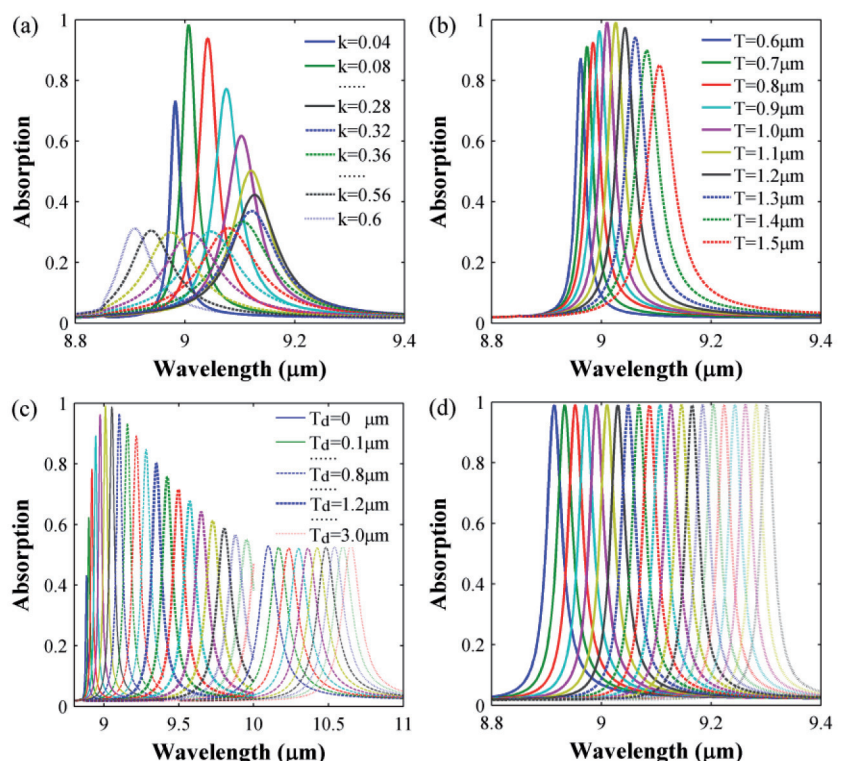


Fig. 2: Absorption Dependence on the (a) grating slit width, (b) grating thickness, (c) film thickness, and (d) grating period under normal TM-polarized incident light

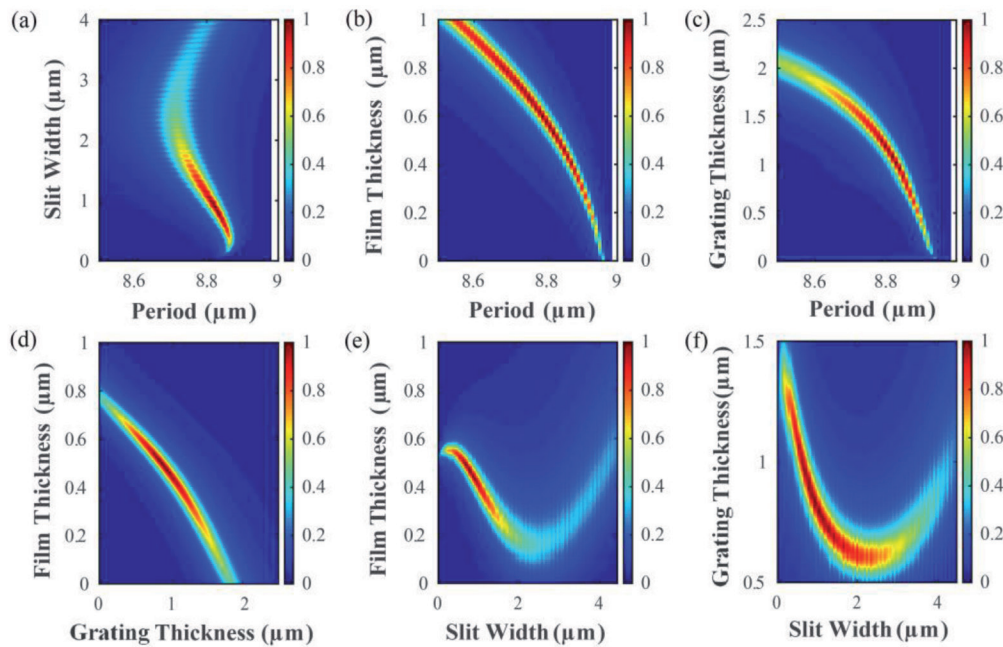


Fig. 3: Optimized geometric contour for the POA of normal TM-polarized incident light with the wavelength of 9 μm

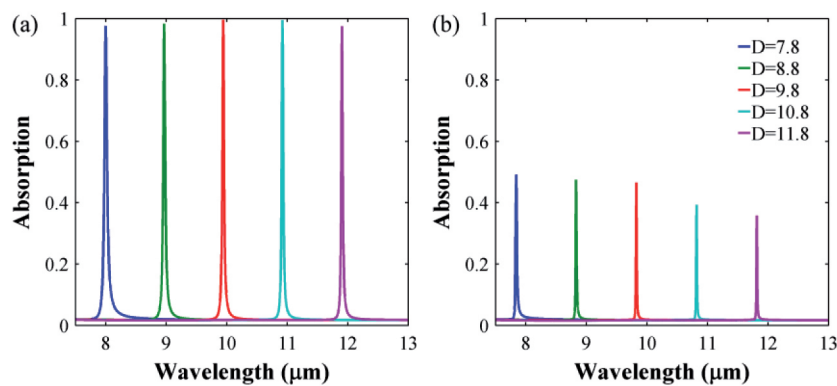


Fig. 4: Absorption spectra (a) with and (b) without the supporting film under normal TM-polarized incident light with the grating periods from 7.8 μm to 11.8 μm and the basic geometric parameters of $T = 1 \mu\text{m}$, $k = 0.1$ and $T_d = 0.5 \mu\text{m}$

here, as its effect can be fully replaced by film thickness design. However, both the thickness and refractive index of the supporting film could be optimized for the perfect absorption.

Finally, as shown in Fig. 2(d), the linear dependence of the perfect absorption on the grating period is observed in the case of grating period D that varied from 8.75 μm to 9.15 μm by step size as 0.02 μm with other structure parameters as $T = 1 \mu\text{m}$, $k = 0.086$, and $T_d = 0.5 \mu\text{m}$. Considering the excitations of surface plasmon modes for thin gratings are closely related to the grating period, the relationship between the POA and surface plasmon modes excitation are obvious. The linear and broad tuning of the absorption peak presents another advantage of the structure design as the linear tunability on the POA wavelength.

For the purpose to further study the absorption dependence on the geometric parameters and get all optimized structures for a specific incident light in the far-infrared region, the influences of various geometric parameters on the perfect absorption were comprehensively considered. Fig. 3 shows the optimized geometric contour for the POA of the specific incident light with wavelength of 9 μm . The basic geometric parameters include the grating period $D = 8.85 \mu\text{m}$, grating height $T = 1 \mu\text{m}$, slit width $s = 0.761 \mu\text{m}$, and film thickness $T_d = 0.5 \mu\text{m}$.

Fig. 3(a), Fig. 3(b), and Fig. 3(c) show the perfect absorption

spectra when the grating period varied from 8.5 μm to 9 μm with different slit width, film thickness and grating thickness. It is seen that the perfect absorption can be achieved when the grating period varied from 8.8 μm to 8.85 μm and slit width varied from 0.5 μm to 0.9 μm as shown in Fig. 3(a). Fig. 3(b) shows that the perfect absorption occurs when the grating period varied from 8.7 μm to 8.9 μm and film thickness varied from 0.3 μm to 0.7 μm . And Fig. 3(c) shows that the perfect absorption appear when the grating period varied from 8.8 μm to 8.85 μm and grating thickness varied from 0.7 μm to 1.1 μm . Compared the results shown in the three figures, it can be found that the range of grating period for perfect absorption is more sensitive to the influence of the grating slit width and grating thickness.

Fig. 3(d) shows the perfect absorption spectra when the grating period varied from 0 μm to 2.5 μm and the film thickness varied from 0 μm to 1 μm . As shown in Fig. 3(d) that the perfect absorption can be achieved when the grating thickness varied from 0.7 μm to 1.1 μm and film thickness varied from 0.3 μm to 0.7 μm . And the perfect absorption spectra when the grating slit width varied from 0 μm to 4.5 μm with different film thickness and grating thickness

are shown in Fig. 3(e) and Fig. 3(f). Considering these three figures together, the perfect absorption can be achieved with the film thickness from 0.3 μm to 0.7 μm , grating thickness from 0.7 μm to 1.1 μm and grating slit width from 0.5 μm to 0.9 μm .

Considering all the results shown in Fig. 3, the optimized structures for the POA at $\lambda = 9 \mu\text{m}$ are with the geometric parameters as the grating period $D = 8.8-8.85 \mu\text{m}$, film thickness $T_d = 0.3-0.5 \mu\text{m}$, grating thickness $T = 0.7-1.1 \mu\text{m}$, and slit width $s = 0.5-0.9 \mu\text{m}$. From the calculated results, the grating period is more sensitive for the POA than other parameters and the influence of the grating thickness and slit width on POA grating period range are more sensitive than the film thickness. When the grating period is determined, other parameters have approximately 50 nm tolerance. Furthermore, the optimized structure geometric parameters can be used as the fabrication windows and the film supporting grating structure can be processed by core-shell method [27], and then integrated with film together.

As the analysis for the absorption dependence on the geometric parameters, it is also demonstrated that the FP resonance in grating slits and surface plasmon excitation on the grating surfaces both contribute to the perfect absorption as it explained in the visible region case[5]. However, the film thickness case can't be explained by either FP resonant modes or surface plasmon

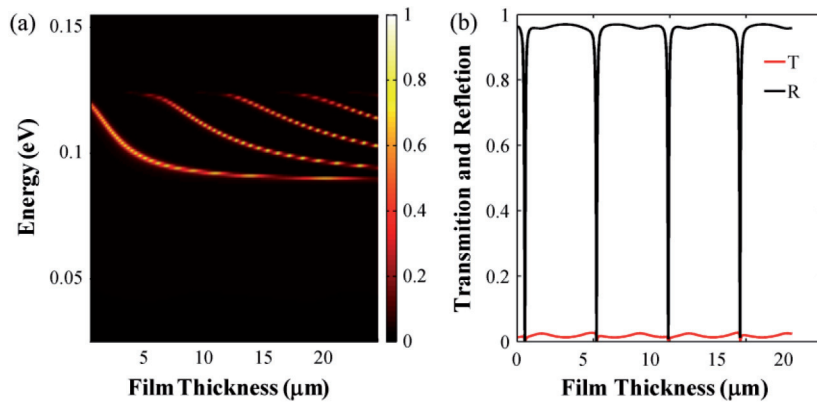


Fig. 5: (a) Absorption dependence on the incident energy and film thickness in the far-infrared region and (b) the transmittance and reflectance for a specific wavelength with different film thicknesses under the normal TM-polarized incident light at $\lambda = 9.02 \mu\text{m}$, and the basic geometric parameters are $D = 8.85 \mu\text{m}$, $s = 0.761 \mu\text{m}$, $T = 1 \mu\text{m}$, and $T_d = 0.5\text{--}18 \mu\text{m}$

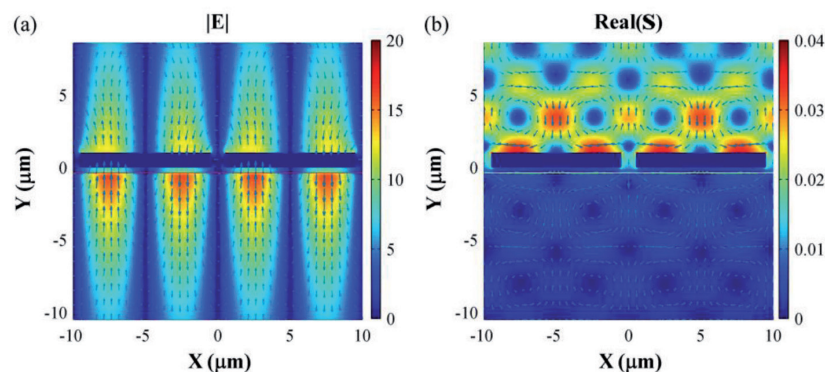


Fig. 6: (a) Electric field amplitude distribution and (b) energy flow density distribution in two periods for the POA under normal TM-polarized incident light at $\lambda = 10.11 \mu\text{m}$ with $D = 10 \mu\text{m}$, $T = 1 \mu\text{m}$, $s = 1 \mu\text{m}$, and $T_d = 0.38 \mu\text{m}$ in the thin film case

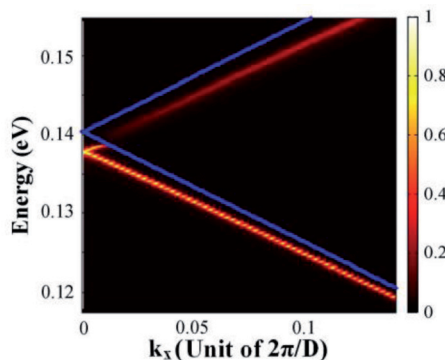


Fig. 7: Absorption dispersion in the thin film case with $D = 8.85 \mu\text{m}$, $T = 1 \mu\text{m}$, $s = 1 \mu\text{m}$, and $T_d = 0.38 \mu\text{m}$, with the blue guide line denoting the dispersion of surface plasmon on the air/grating interface (also the light line in air) and the red guide line denoting the dispersion of surface plasmon on the grating/film interface (also the light line in the dielectric film)

modes. In order to understand the role of the film for the perfect absorption, the maximum absorption efficiency in the grating structure with and without film supporting were both calculated for different far-infrared wavelength and the absorption spectra are shown in Fig. 4(a) with the film thickness $T_d = 0.5 \mu\text{m}$ and Fig. 4(b) without film supporting. It can be observed that near 99% absorbance can be obtained for all incident lights in the grating structures with the film supporting as shown in Fig. 4(a) and only 50% absorbance can be achieved in the grating without film supporting as shown in Fig. 4(b). It is observed from the comparison between Fig. 4(a) and Fig. 4(b) that the supporting dielectric film plays a key role in POA. A relatively narrow POA peak width indi-

cates that the resonance lifetime must be long enough for all incident energy to dissipate in the metals.

Since the film play a key role in POA, the absorption dependence on larger film thickness range was investigated in far infrared region as shown in Fig. 5. The absorption dependence on the incident energy and film thickness is shown in Fig. 5(a). It is clearly shown that more absorption peaks appear when the film thickness increases enough, with the absorption energy located between the air/grating and grating/film surface. The POA (calculated by $A = 1 - T - R$) occurred periodically with the increasing film thickness, as shown in Fig. 5(b), at the film thickness $T_d = 0.5, 5.2, 9.9, 14.6 \mu\text{m}$ for the specific POA incident wavelength of $9.02 \mu\text{m}$. As shown in Fig. 5, it is seen that more POA appear when the film thickness is more than half of the incident wavelength. Thus, only redshift of the absorption peak is shown in Fig. 2(c) because the film thickness is limited in $0\text{--}3 \mu\text{m}$, but more absorption peaks appear with more wavelength satisfied with the phase match condition when the film thickness is sufficiently large. Thus, two film thickness regions are discussed separately in the subsequent analysis as the thin film case, which the film thickness is less than half of the incident wavelength, and the thick film case, which the film thickness that is more than half of the incident wavelength.

4.2. FIELD DISTRIBUTION AND ABSORPTION DISPERSION ANALYSIS

In order to clarify the physical mechanism of the perfect absorption, especially the phase contribution in the film, the electric field distribution, energy flow density distribution, and absorption dispersion are calculated by FDTD to analyze and visualize the mechanism of POA in the far-infrared region.

(1) Thin Film Case

The electric field and energy flow density distributions in the thin film case for the POA under normal TM-polarized incident light at $\lambda = 10.11 \mu\text{m}$ with geometric parameters of $D = 10 \mu\text{m}$, $T = 1 \mu\text{m}$, $s = 1 \mu\text{m}$, and $T_d = 0.38 \mu\text{m}$ are shown in Fig. 6(a). The color and arrow length indicate the electric field amplitude, and the direction of the arrows indicate the relative ratio between amplitudes of E_y and E_x . The surface plasmon modes are strongly excited on the input and output surfaces, with asymmetric charge distributions. Although the wave guide mode in the film cannot be visualized, it is observed that the electric field on the film surface is significantly enhanced compared with that on the grating surface. In addition, the energy flow density calculated by the real part of the Poynting vector is plotted in Fig. 6(b). The arrows indicate the energy flow direction and it can be seen that the original energy flow direction is disturbed and energy vortices are formed as shown in Fig. 6(b). And the energy flow arrows end on the air/grating surface, indicating the metal absorption position.

Fig. 7 shows the absorption dispersion in the thin film case with geometric parameters of $D = 8.85 \mu\text{m}$, $T = 1 \mu\text{m}$, $s = 1 \mu\text{m}$, and

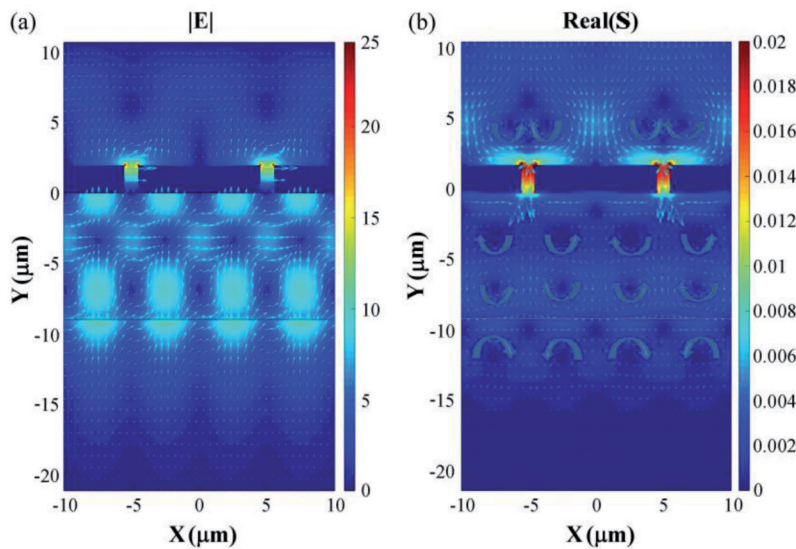


Fig. 8: (a) Electric field distribution and (b) energy flow density distribution in two periods for the POA under normal TM-polarized incident light at $\lambda = 11.422 \mu\text{m}$ in the thick film case with $D = 10 \mu\text{m}$, $T = 2 \mu\text{m}$, $s = 1 \mu\text{m}$ and $T_d = 9 \mu\text{m}$

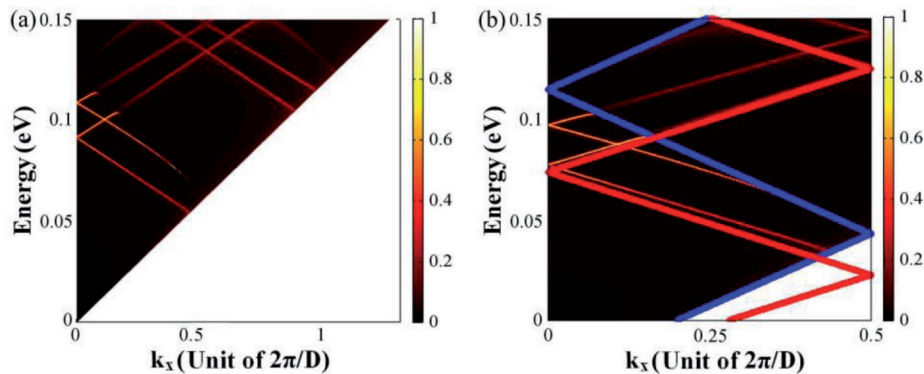


Fig. 9: (a) Absorption dispersion and (b) partial enlarged absorption dispersion and surface plasmon modes in the thick film case with $D = 10 \mu\text{m}$, $T = 2 \mu\text{m}$, $s = 1 \mu\text{m}$, and $T_d = 9 \mu\text{m}$, with the blue guide line denoting the dispersion of surface plasmon on the air/grating interface (and light line in air) and red guide line denoting the dispersion of surface plasmon on the grating/film interface (and light line in the dielectric film)

$T_d = 0.38 \mu\text{m}$. The blue line is the dispersion of the surface plasmon on the air/grating interface (also the light line in air, which cannot be differentiated from the surface plasmon line), and the red line is the dispersion of the surface plasmon on the grating/film interface (also the light line in the dielectric film, which cannot be differentiated from the surface plasmon line). The deviation of the absorption dispersion is partly due to the phase contribution of the film thickness, which is further demonstrated in the thick film case.

(2) Thick Film Case

Fig. 8 shows the electric field and energy flow density distributions in the thick film case for the POA under normal TM-polarized incident light at $\lambda = 11.422 \mu\text{m}$ with geometric parameters as $D = 10 \mu\text{m}$, $T = 2 \mu\text{m}$, $T_d = 9 \mu\text{m}$, and $s = 1 \mu\text{m}$. Compared Fig. 8(b) with the thin film case shown in Fig. 6(b), the energy flow is mainly through the slits in the thick film case rather than on the air/grating surface in the thin film case, with the corresponding electric field amplitude also shifting from the air/grating surface to the slits. This phenomenon is caused by more contributions of the grating/film surface plasmon modes and the prominent phase contribution of the film for larger thickness, thus, the POA wavelength redshifts from $10.11 \mu\text{m}$ in the thin film case to $11.422 \mu\text{m}$ in the thick film case. Fig. 8 also shows the multiple scattering

waves that are bouncing back and forth in the dielectric film, which introduces a phase contribution related to film thickness.

The absorption dispersion in the thick film case with geometric parameters of $D = 10 \mu\text{m}$, $T = 2 \mu\text{m}$, $s = 1 \mu\text{m}$, and $T_d = 9 \mu\text{m}$ is shown in Fig. 9. The blue and red solid lines indicate the dispersion for surface plasmon modes on the air/grating and grating/film interfaces (also the light line in air and in the dielectric film, which cannot be differentiated from the surface plasmon line), respectively. First, more absorption peaks appear as the film thickness increases in the thick film case. The multiple scattering waves in the film have no loss and only contribute the phase, thus, the narrow absorption peak feature is maintained and the absorption peak wavelength shifts from the air/grating surface plasmon mode wavelength to the grating/film surface plasmon mode wavelength with the increasing film thickness. Second, the modes on the input grating surface play a negative role in the absorption peaks, which are the so-called Rayleigh anomalies, whereas the modes on the output grating surface play a positive role in absorption. Third, the waveguide modes in the dielectric film introduce new absorption peaks, thus, the waveguide modes play a dominant role in POA. These two surface dispersion lines draw the lower and upper energy limits for resonant absorption in the thick film supporting grating structures, as clearly shown in Fig. 9.

4. CONCLUSION

A simple film supporting metallic grating structure was proposed for the demonstration of POA in the far-infrared region. The absorption dependence on geometric parameters was investigated to understand its basic properties. The features of POA in the far-infrared region were analyzed using the electric field and energy flow density distributions and absorption dispersion. The following conclusions were obtained:

- (1) POA was demonstrated as near 99% absorption in the far-infrared region with the film supporting metallic grating structure as air/grating/film/air under normal TM-polarized incident light, with the advantages of linear tunability on the POA wavelength and simple structure design with a large geometric tolerance.
- (2) The importance of the dielectric supporting film for POA was proven and analyzed. It was demonstrated that the dielectric supporting film introduces the asymmetric structures and provides the necessary phase contributions, which

are important for the POA phenomenon. More absorption peaks were observed when the film thickness increased.

- (3) In addition to the FP resonant modes in the grating slits and the surface plasmon excitations on the grating surfaces, the waveguide modes in the dielectric film were demonstrated in the film supporting structure and even visualized in the thick film case for the perfect absorption, which significantly change the energy loss region, but with negligible effects on the POA resonant peak width. The negative role of the modes on the input grating surface and the positive role of the modes on the output grating surface were observed for the absorption.

It is significant to observe the POA in the far-infrared region, not only because of the much small skin depth for gold in the far-infrared region, but also for its potential applications in infrared sensing, detection and modulation. The advantages of the simple film supporting grating structure design for the POA in far-infrared region make it easier to implement in practical fabrication. However, the structure design is limited for TM incident light. Thus, the perfect absorption for transverse electric incident light in the far-infrared region with a simple structure design should be further investigated. In addition, the features of this phenomenon should be further investigated for the measurable conditions of the POA.

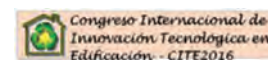
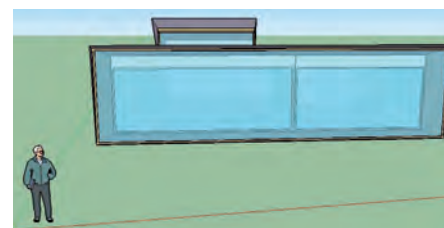
BIBLIOGRAPHY

- [1] Hutley MC, Maystre D. "The total absorption of light by a diffraction grating". *Optics Communications*. December 1976. Vol. 19-3. p.431-436. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0030-4018\(76\)90116-4](http://dx.doi.org/10.1016/0030-4018(76)90116-4)
- [2] Perchec Le, Quémérais P, Barbara A, et al. "Why metallic surfaces with grooves a few nanometers deep and wide may strongly absorb visible light". *Physical Review Letters*. February 2008. Vol. 100-6. p.1431-1432. DOI: <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.066408>
- [3] Popov E, Maystre D, McPhedran RC, et al. "Total absorption of unpolarized light by crossed gratings". *Optics Express*. April 2008. Vol. 16-9. p.6146-6155. DOI: <https://dx.doi.org/10.1364/OE.16.006146>
- [4] Kravets VG, Goldberg SN. "Plasmonic blackbody: Almost complete absorption of light in nanostructured metallic coatings". *Physical Review B*. November 2008. Vol. 78-20. p.2599-2604. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.78.205405>
- [5] Liao Y, Zhao Y. "Near-perfect absorption with a metallic grating and dielectric substrate". *Journal of Nanophotonics*. February 2015. Vol. 9-1. p.093087-093087-6. DOI: <https://dx.doi.org/10.1117/1.JNP.9.093087>
- [6] Nie J, Li H, Liu W. "Perfect Anomalous Absorption of TM Polarized Light in Metallic Grating Situated in Asymmetric Surroundings". *IEEE Photonics Journal*. December 2014. Vol. 6-6. p.1-8. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/JPHOT.2014.2363439>
- [7] Wang Y, Sun TY, Paudel T. "Metamaterial-plasmonic absorber structure for high efficiency amorphous silicon solar cells". *Nano Letters*. December 2011. Vol. 12-1. p.440-445. DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/nl203763k>
- [8] Abass A, Le KQ, Ali A, et al. "Dual-interface gratings for broadband absorption enhancement in thin-film solar cells". *Physical Review B Condensed Matter*. March 2012. Vol. 85-11. p.115449-115449-8. DOI: <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.85.115449>
- [9] Ameling R, Langguth L, Hentschel M, et al. "Cavity-enhanced localized plasmon resonance sensing". *Applied Physics Letters*. December 2010. Vol. 97-25. p. 2531161-2531161-3. DOI: <https://dx.doi.org/10.1063/1.3530795>
- [10] Rosenberg J, Shenoi RV, Vandervelde TE. "A multispectral and polarization-selective surface-plasmon resonant midinfrared detector". *Applied Physics Letters*. October 2009. Vol. 95-16. p.161101-161101-3. DOI: <https://dx.doi.org/10.1063/1.3244204>
- [11] Diem M, Koschny T, Soukoulis CM. "Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime". *Physical Review B*. July 2008. Vol. 79-3. p.033101-033101-4. DOI: <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.79.033101>
- [12] Brongersma ML, Halas NJ, Nordlander P. "Plasmon-induced hot carrier science and technology". *Nature Nanotechnology*. January 2015. Vol.10-1 p.25-34. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/nnano.2014.311>
- [13] Tan WC, Sambles JR, Preist TW. "Double-period zero-order metal gratings as effective selective absorbers". *Physical Review B*. May 2000. Vol. 61-19. p. 13177-13182. DOI: <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.61.13177>
- [14] Pendry JB, Martin-Moreno L, Garcia-Vidal FJ. "Mimicking surface plasmons with structured surfaces". *Science*. September 2004. Vol. 305-5685. p.847-848. DOI: <https://dx.doi.org/10.1126/science.1098999>
- [15] Huang XR, Peng RW, Fan RH. "Making metals transparent for white light by spoof surface plasmons". *Physical Review Letters*. December 2010. Vol. 105-24. p.119-127. DOI: <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.243901>
- [16] Garcia-Vidal FJ, Martin-Moreno L, Ebbesen TW, et al. "Light passing through subwavelength apertures". *Reviews of Modern Physics*. March 2010. Vol. 82-1. p.729-787. DOI: <https://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.82.729>
- [17] Liu X, Starr T, Starr AF, et al. "Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance". *Physical Review Letters*. May 2010. Vol. 104-20. p.207403-207403-4. DOI: <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.207403>
- [18] Aydin K, Ferry VE, Briggs RM, et al. "Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers". *Nature Communications*. November 2011. Vol. 2-1. p. 193-198. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/ncomms1528>
- [19] Rogalski A. "Thermopiles". *Infrared Detectors*, 2nd ed., FL. CRC Press 2011.
- [20] Liu N, Mesch M, Weiss T, et al. "Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor". *Nano Letters*. July 2010. Vol. 10-7. p. 2342-2348. DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/nl9041033>
- [21] Chen Y, Li X, Luo X, et al. "Tunable near-infrared plasmonic perfect absorber based on phase-change materials". *Photonics Research*. June 2015. Vol. 3-3. p.54-57. DOI: <https://dx.doi.org/10.1364/PRJ.3.000054>
- [22] Kang GG, Vartiainen I, Bai BF, et al. "Enhanced dual-band infrared absorption in a Fabry-Perot cavity with subwavelength metallic grating". *Optics Express*. January 2011. Vol. 19-2. p.770-778. DOI: <https://dx.doi.org/10.1364/OE.19.000770>
- [23] Gao H, Gu C, Zheng ZY, et al. "Nearly perfect absorption in a single-layer metallic grating with rectangular grooves on its front surface". *Applied Physics B*. December 2014. Vol. 117-3. p.875-883. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s00340-014-5903-1>
- [24] Collin S, Pardo F, Teissier R, et al. "Horizontal and vertical surface resonances in transmission metallic gratings". *Journal of Optics A pure Et Applied Optics*. August 2002. Vol. 4-5. p.S154-S160. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1464-4258/4/5/364>
- [25] Innovation KJ. "GD-Calc". February 2016. <http://www.kjinnovation.com/>
- [26] Jackson JD. "Maxwell Equations, Macroscopic Electromagnetism, Conservation Laws". *Classical Electrodynamics*, 3rd ed., Wiley. 1999
- [27] Collin S, Vincent G, Haidar R, et al. "Nearly perfect fano transmission resonances through nanoslits drilled in a metallic membrane". *Physical Review Letters*. January 2010. Vol. 104-2. p.358-359. DOI: <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.027401>

APPRECIATION

This work was supported by the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2015CB932400), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11404247, 11134013, 11227407).

Análisis de la simulación y monitoreo real de un invernadero en la implicación térmica de un edificio. Un caso práctico



Simulation and monitoring campaign in a sunspace, analysis of its influence over the building thermal performance. A case study



Rubén Felices-Puértolas¹, Carmen Viñas-Arrebola¹, Juan-Carlos Losada-González²

¹ Universidad Politécnica de Madrid, ETS Edificación, Dpto. Tecnología de la edificación, Avda. Juan de Herrera, 6, 28040 Madrid, Tfno. +34 913 367603. ruben.felices@upm.es

² Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas, Dpto. Ingeniería Agroforestal, Avda. Puerta de Hierro, 2, 28040 Madrid, +34913365867

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8202> | Recibido: 04/11/2016 • Evaluado: 07/11/2016 • Aceptado: 01/02/2017

ABSTRACT

• The thermal performance of a sunspace attached to a bioclimatic building in Madrid has been studied. As a passive strategy, combines naturally the effect of the direct solar radiation and the absorption of the opaque constructive systems and the thermal properties of the air enclosed in the sunspace. During the winter, the sun warms the air enclosed allowing to use it as a natural collector of warm air to introduce it in the inner areas. During the summer, it's a buffer space who prevent the influence of the ambient conditions in the inner areas.

In the case studied, most of the recommended passive strategies formulated in other theoretical studies has been implemented. The experimental results show a thermal performance which prevent the overheating effect in summer, shown in other studies. In this case, the higher values of temperatures in the sunspace are reached during the winter, not in summer; it demonstrate the potential saving of energy consumption of the inner areas attached to the sunspace. The experimental data were compared with numerical results using EnergyPlus, showing a good accuracy among them and validating the simulation; predict the thermal performance makes easier the design phase.

• **Keywords:** Monitoring; Energy simulation; Bioclimatic architecture; Sunspace.

Los datos experimentales fueron comparados con los resultados simulados usando EnergyPlus, mostrando que el programa concuerda con los datos experimentales y validando la simulación; predecir el comportamiento experimental con una buena precisión facilita la labor de diseño.

Palabras clave: Monitorización; Simulación; Arquitectura bioclimática; Invernadero.

1. INTRODUCCIÓN

El cumplimiento de la Directiva Europea 2010/31[1] pasa por la integración de sistemas constructivos que ayuden a conseguir un mejor confort térmico; de hecho, es la Medida 1 en el 2º Plan de acción nacional de eficiencia energética en España 2011-2020 [2], en cuanto a la rehabilitación energética de la envolvente térmica de los edificios. En un trabajo [3] presentando como parte del proyecto ARFRISOL [4] por el que se simulan y construyen edificios en uso en los que se han ejecutado multitud de estrategias pasivas y activas, el ahorro favorecido por el diseño se cifra en el 50%, similar a la influencia de la integración de energías renovables en los mismos.

Multitud de estudios se han realizado evaluando las diferentes estrategias que se pueden usar en la región mediterránea para mejorar la eficiencia energética de los edificios [5]–[11]. De entre ellas, en este estudio nos centramos en los espacios invernaderos, que en el ámbito de la edificación se imponen dada la facilidad de su integración en el diseño arquitectónico; además, la rehabilitación de la envolvente con esta solución tiene la mejor relación coste-ahorro según Bakos [12] para el área mediterránea.

Estudios llevados a cabo mediante simulaciones muestran este problema en el sur de Europa, Mihalakakou [13] compara el comportamiento de estos recintos resaltando la problemática del sobrecalentamiento en Atenas y proponiendo su uso en combinación con la ventilación natural, ventilación nocturna y sistemas geotérmicos. Bataineh et al. [14] simulan el comportamiento de estos espacios bajo el clima de Jordania y obtienen similares conclusiones tras haber investigado la relación entre el espacio acristalado y el cerramiento opaco envolvente; como conclusión, proponen el uso de cristales inclinados para minorar la ganancia solar en verano de forma natural. Oliveti et al. [15] estudia en un espacio invernadero determinado, la importancia del área acristalada respecto del área opaca; para la orientación sur, con cristales simples el coeficiente de absorción es el mismo independientemente de

RESUMEN

El comportamiento térmico de un espacio invernadero en un edificio bioclimático en España ha sido estudiado. Esta estrategia pasiva combina el efecto de la radiación solar al ser absorbida por los elementos opacos y las propiedades térmicas del aire encerrado en el invernadero. Durante el invierno, el sol templará el aire encerrado y puede ser usado como una estrategia pasiva de calentar los recintos interiores. Durante el verano, su función lo convierte en un espacio tampón que previene de la influencia de las condiciones climáticas exteriores.

En el caso en estudio se han llevado a cabo la mayoría de propuestas de mejora del comportamiento energético expresadas en otros artículos teóricos para condiciones climáticas similares. Los resultados experimentales muestran un comportamiento que evita el sobrecalentamiento del espacio, alcanzando mayores temperaturas interiores en invierno que en verano, lo cual ayuda a disminuir la demanda energética de los espacios interiores anexos.

si sólo está acristalada la cara sur o también en sus laterales. En cambio, con cristales dobles se incrementa el coeficiente de absorción, de media, un 10%. En otro estudio suyo [16] se detalla que el coeficiente de absorción térmico varía entre un 0,4 y un 0,6 según la configuración de la cara interior de ese espacio sea acristalada o cerrada por masa opaca.

Respecto a estudios experimentales y comparativos en el ámbito de edificación, Mottard y Fissore [17] construyen en su estudio un espacio invernadero del que toman medidas experimentales y simulan en estado transitorio; su conclusión es que los errores entre los resultados simulados y los datos tomados alcanzan los 2,4°C puntualmente y cifran en un 11% el error total en cuanto a la energía transmitida al recinto adyacente. Debido a la magnitud del error que se puede encontrar en la comparación, Asdrubali et al. [18] centran su estudio en la comparación de los diferentes programas de simulación respecto de los datos reales, usando para ello programas de simulación en estado estacionario: Method 5000 [19] y UNE EN-ISO 13790 [20]; y en estado dinámicos: TRN-SYS [21] y EnergyPlus [22]. De este estudio se concluye que los procesos de simulación con modelos transitorios consiguen resultados con menor error respecto de los datos reales; siendo el motor de cálculo transitorio EnergyPlus el más preciso. Este programa ha sido utilizado bastamente en todo el mundo para el análisis del comportamiento térmico en el campo de la edificación [23]–[29] con resultados válidos, siendo, por tanto, el que se usará en este estudio.

Tomando como base los trabajos anteriores, en este trabajo se analiza la variable de temperatura alcanzada en los recintos estudiados durante diferentes épocas del año, se muestra la in-

fluencia en los resultados experimentales obtenidos sobre un espacio invernadero en el que se aúnan las propuestas de mejora expresadas de forma teórica en el conocimiento previo del sistema constructivo.

La comparación con los resultados obtenidos con EnergyPlus, permite observar errores derivados de la adaptación del motor de cálculo EnergyPlus a la metodología de cálculo de la demanda energética de los edificios establecida por la Unión Europea, lo que puede llevar a que en cada país los resultados sean diferentes para cada investigador. La comparación de los resultados simulados con los datos experimentales demuestran que el motor de cálculo transitorio EnergyPlus permite un correcto análisis simulado del comportamiento térmico real del edificio.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. OBJETO DE ESTUDIO

La monitorización se ha realizado sobre el espacio invernadero integrado en el CREAS, un edificio situado dentro del Centro de Educación Ambiental de Pozuelo de Alarcón, Madrid (Figura 1). Construido en 2010 y diseñado de acuerdo a principios bioclimáticos y sostenibles, el edificio de una sola planta está compuesto por cuatro módulos conectados por un pasillo; el situado más al oeste se usa como sala de conferencias y oficina, con un espacio invernadero común en la orientación sur del edificio.

El espacio invernadero tiene una longitud de 10m., 2m. de ancho y 4m. de alto; la orientación sur y norte están acristaladas, la este y la oeste son fachadas tradicionales de doble hoja, el suelo y la cubierta están cubiertos de vegetación; una cornisa en el techo previene la radiación solar en verano y la permite en invierno.

2.2. ELEMENTOS DE INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍA

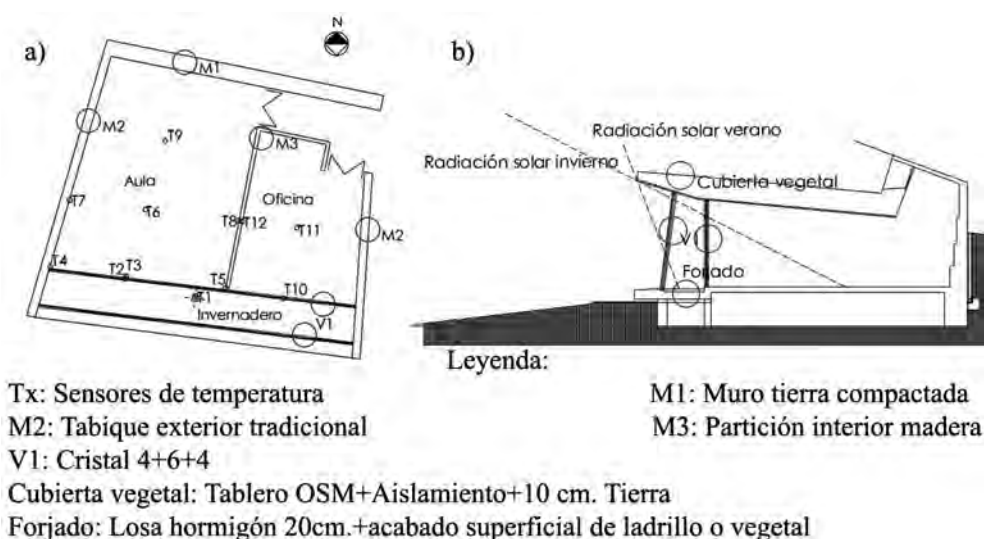
El sistema de monitorización utilizado en este estudio se compone de datalogger de la marca Lufft [30]: OPUS 200 Y OPUS 208; conectando a ellos 12 termopares tipo k de largo variable y situados a una altura de 1,5 m. en cada posición (Figura 2). Siguiendo la metodología validada en estudios previos realizados [31], los datos recogidos durante el ensayo se muestran cada 10 minutos; aquellos sensores que eran susceptibles de mostrar error en los datos debidos a la radiación solar directa se protegieron, acoplando una lámina de aluminio al sensor, con una distancia suficiente para permitir la convección del aire alrededor del termopar.

Los datos fueron recogidos en dos sesiones diferentes para mostrar las diferencias entre el comportamiento en verano y en invierno. Como se observa en otros



Edificio CREAS Coordenadas geográficas: 40° 25' 52"N 3° 46' 58"O

Figura 1: a) Centro de Educación Ambiental (recinto en estudio a la izquierda) b) Localización del edificio



Tx: Sensores de temperatura
M2: Tabique exterior tradicional
V1: Cristal 4+6+4
Cubierta vegetal: Tablero OSM+Aislamiento+10 cm. Tierra
Forjado: Losa hormigón 20cm.+acabado superficial de ladrillo o vegetal

Figura 2: a) Plano de los recintos en estudio b) Sección constructiva

artículos [32], [33], la monitorización se propone en cada estación del año para un corto periodo climático de referencia; siendo la campaña estival entre el 18 y el 25 de Julio de 2014 y la campaña invernal entre el 22 de Enero y el 8 de Febrero de 2015.

3. RESULTADOS

3.1. MONITORIZACIÓN DE TEMPERATURA DURANTE LA CAMPAÑA DE VERANO

Dentro de la campaña estival, sólo dos días se muestran en este estudio experimental, debido a sus similares condiciones ambientales, los resultados son mostrados en la figura 3. En esta figura, los datos recogidos por los sensores T1, T6 y T11 (ver Fig. 2) fueron seleccionados por encontrarse en el centro de cada habitación (T1 en el invernadero, T6 en la sala y T11 en la oficina), tal y como se recomienda en la norma UNE-EN ISO 7730 [34]. Además, los registros de temperatura y radiación solar exteriores fueron recogidos de una estación meteorológica situada a 5 km del edificio (IES UPM).

Los datos recogidos mostraron que, durante el día, el invernadero tuvo una temperatura intermedia entre el exterior y los recintos interiores, de ahí que se considere la función de este espacio como amortiguador de temperaturas. La influencia de la radiación solar se descarta porque se hubieran producido periodos de sobrecalentamiento en el interior, descritos en artículos referenciados, gracias a la cornisa. La temperatura de los recintos interiores evoluciona durante el martes de la misma forma que la temperatura exterior, lo que muestra que fueron abiertas las ventanas; mientras que el miércoles las temperaturas durante la mañana crecen a un ritmo mucho menor que las exteriores, debido a que las ventanas permanecieron cerradas.

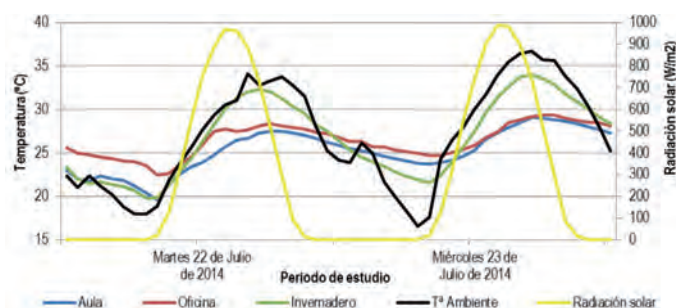


Figura 3: Resultados experimentales de temperatura obtenidos durante el periodo de monitorización de verano

3.2. MONITORIZACIÓN DE TEMPERATURA DURANTE LA CAMPAÑA DE INVIERNO

En la Figura 4 se observan los datos recogidos durante la campaña de invierno de 2015 con el mismo esquema de representación seguido en la campaña estival. Dentro del periodo de monitorización, se escogen dos días con similares condiciones climáticas: temperatura exterior similar y día soleado, para mostrar la influencia del espacio invernadero. El resto de días, no soleados, se activó la calefacción del edificio, por lo que se excluyen de este estudio.

En días soleados, la temperatura alcanzada en el invernadero es mucho mayor que la temperatura ambiente. La cornisa del edificio sí que permite la radiación solar directa sobre el invernadero llegando hasta el interior del edificio; en cuanto la radiación solar comienza, la temperatura interior se eleva, tomándose tempera-

turas mayores de 40°C en el invernadero y de 30°C en los recintos interiores sin influencia de sistemas de calefacción interiores del edificio.

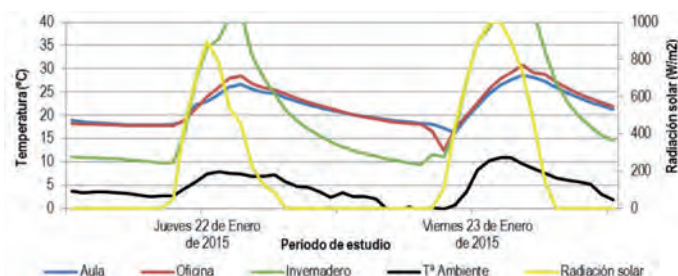


Figura 4: Resultados experimentales de temperatura obtenidos durante el periodo de monitorización de invierno

3.3. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL ESPACIO INVERNADERO

Tomando como objeto de estudio las temperaturas recogidas a medio día para un día en cada campaña (Figura 5), la diferencia en la función del invernadero queda establecida gracias a la cornisa presente en el caso de estudio. Tomando como factores la radiación solar y la temperatura ambiente; en verano, la radiación solar queda anulada por la cornisa y la temperatura ambiente influye por transferencia de calor por convección y conducción; en invierno, la radiación solar influye con la transferencia de calor por radiación en la temperatura alcanzada en el edificio, al ser mayor que la pérdida de energía calorífica por conducción y convección a través de la envolvente hacia el ambiente exterior.

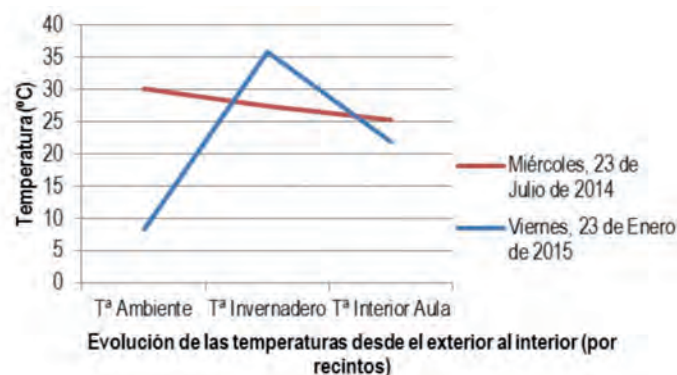


Figura 5: Comparación de temperaturas en las dos épocas en estudio a las 12h. del medio día

A través de un espacio acristalado se influencia de manera pasiva al resultado de la temperatura interior del edificio; con diferentes condiciones ambientales de temperatura y la misma radiación solar, se alcanzan similares temperaturas en los recintos

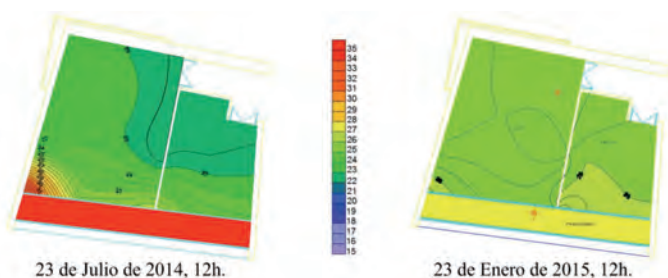


Figura 6: Temperatura (°C) registrada en los recintos para las dos estaciones del año en estudio

interiores (Figura 6); la disposición de sensores permitió monitorizar todo el recinto y observar que, en verano las condiciones ambientales se transmiten por conducción, mientras que en invierno, la radiación solar influye determinantemente en la temperatura interior.

3.4. SIMULACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS PARA SU REPRESENTACIÓN GRÁFICA

Para posteriores análisis en profundidad, se decidió realizar un acercamiento a las metodologías de simulación vistas en otros artículos, introduciendo la geometría en estudio en el motor de cálculo EnergyPlus. Se utilizó el software SketchUp [35] con el plugin OpenStudio [36] y se modelizó el espacio invernadero y los recintos interiores (Figura 7).

Para establecer esta comparación se utilizaron los datos horarios obtenidos durante las dos campañas completas que se realizaron, estos datos se compararon con los resultados obtenidos en el motor de cálculo EnergyPlus para los mismos días, introduciendo el valor climático de la ciudad de Madrid.

La introducción de datos requiere de un conocimiento profundo de la normativa vigente en nuestro país y una adaptación de los recursos que ofrece el programa a ella.

El problema encontrado a este respecto es que el programa modeliza un edificio estanco, olvidando los puentes térmicos y las infiltraciones que sí han de tenerse en cuenta para obtener la demanda energética real del edificio según la norma UNE-EN ISO 13790 [20] y el reglamento vigente en España RITE [37]. Se ha observado esta problemática en la mayoría de estudios referenciados, en los que no se resuelve, y por lo que se consideran mejorables en sus resultados. Se ha solventado añadiendo los puentes

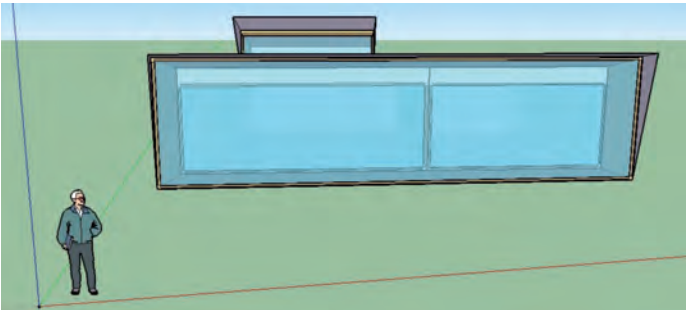


Figura 7: Modelo del edificio simulado con EnergyPlus

Diferencia entre los datos reales y los resultados EnergyPlus		Verano 2014	Invierno 2015
		Diferencia entre los datos reales y los resultados EnergyPlus	
Aula	Error medio (Temp. Aire)	1.09 °C	1.84 °C
	Coef. Correlación	0.91	0.89
Invernadero	Error medio (Temp. Aire)	2.13 °C	6.5 °C
	Coef. Correlación	0.96	0.87
Oficina	Error medio (Temp. Aire)	0.93 °C	2.34 °C
	Coef. Correlación	0.96	0.86

Tabla I: Comparación entre resultados con EnergyPlus y datos experimentales en cada periodo de estudio

térmicos como sub-superficies alrededor de cada una de las aberturas encontradas, así como en los encuentros de los forjados superiores e inferiores acorde a lo establecido por el Código Técnico de Edificación (CTE) DB HE [38].

Las zonas térmicas, los periodos de uso del edificio y la renovación del aire de los recintos también ha sido adaptada a la normativa de España, para ello se han usado los datos establecidos por el CTE DB HS-3 [39] referente a la salubridad en los edificios para cambiar los datos que el programa tiene por defecto, los cuales corresponden a la normativa americana ASHRAE 55-2013 [40]. La temperatura de consigna para cada estación del año se ha obtenido de los valores establecidos por RITE [37].

Por último, el programa EnergyPlus muestra los resultados en un rango horario de multitud de variables físicas, en este caso se han obtenido las temperaturas durante los días referidos en el estudio y se han comparado con los datos reales. Esta comparación se ha llevado a cabo utilizando el programa Statgraphics XVI.II y las herramientas estadísticas de comparación de variables independientes, entre las temperaturas reales en cada recinto y las obtenidas con la simulación en EnergyPlus. Los resultados se muestran en la Tabla I.

El test estadístico de correlación de Pearson muestra una fuerte probabilidad de la relación entre ambos grupos de valores de temperatura. Sin embargo, el error medio es mayor de 1°C en la mayoría de los casos. Esta cuestión puede ser explicada: en invierno es debido al archivo climático por defecto que usa el programa; en este estudio dos días soleados fueron tomados como referencia, lo que es raro en esta estación del año; la radiación solar fue fuerte durante el día y su influencia en las temperaturas interiores se puede ver en los datos recogidos.

Durante la campaña de verano, la relación entre ambos grupos y el error medio es mejor, pero hay un porcentaje de variabilidad que no puede ser explicado por el programa: los hábitos humanos, este patrón de comportamiento no puede ser implementado en el software.

EnergyPlus ha sido validado para simular el comportamiento térmico de un edificio con una buena precisión en términos de la relación entre los datos experimentales y los resultados del programa.

4. CONCLUSIONES

- 1. El espacio invernadero estudiado tiene una gran influencia en la temperatura interior, alcanzando, en periodo estival, en valor promedio, temperaturas de 24°C; siendo la temperatura del invernadero de 33°C en valor promedio. Este comportamiento de la temperatura interior del aula es semejante en el periodo de invierno, alcanzándose con una temperatura del invernadero de 27°C en valor promedio.
- 2. La combinación de un espacio invernadero con un diseño constructivo, en el alero de la cubierta, que asegure una mínima captación de radiación solar directa en el interior, en periodo de verano y una máxima captación de radiación solar durante el periodo de invierno tienen un gran potencial como climatizador natural del edificio, en sustitución del uso de sistemas de calefacción.
- 3. Los coeficientes de correlación obtenidos entre el modelo experimental y el simulado, mayor de 0.90 en periodo de verano y mayor de 0.85 en periodo de invierno, muestran que el motor de cálculo EnergyPlus es validado como software de simulación transitoria del comportamiento térmico de un edificio.
- 4. EnergyPlus es un código que puede utilizarse, en la fase de

diseño, de viviendas que incorporen sistemas pasivos, para optimizar su eficiencia energética.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión Europea, "Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios," Boletín Oficial, vol. L135, pp. 13–35, 2010.
- [2] IDAE, "Plan de ahorro y eficiencia energética 2011-20 (Spanish National Renewable Energy Plan (NREP) 2011-2020)," IDAE, p. 268, 2011.
- [3] R. Heras, "Eficiencia Energética en la Edificación y en entornos urbanos," in *Semana de la ciencia en Castilla y León*, 2014.
- [4] M. D. E. Econom, C. Secretar, P. Nacional, and P. S. Estrat, "Hacia una nueva generación de edificios de consumo energético casi nulo y cero emisiones," Gobierno de España, 2011.
- [5] E. Azar, C. Nikolopoulou, and S. Papadopoulos, "Integrating and optimizing metrics of sustainable building performance using human-focused agent-based modeling," *Applied Energy*, vol. 183, pp. 926–937, 2016.
- [6] A. F. Tzikopoulos, M. C. Karatzas, and J. A. Paravantis, "Modeling energy efficiency of bioclimatic buildings," *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 5, pp. 529–544, 2005.
- [7] A. D. Stavridou, "Breathing architecture: Conceptual architectural design based on the investigation into the natural ventilation of buildings," *Frontiers of Architectural Research*, vol. 4, no. 2, pp. 127–145, 2015.
- [8] H. Goudarzi and A. Mostafaeipour, "Energy saving evaluation of passive systems for residential buildings in hot and dry regions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, no. October 2016, pp. 432–446, 2017.
- [9] F. Ascione, R. F. De Masi, F. de Rossi, S. Ruggiero, and G. P. Vanoli, "Optimization of building envelope design for nZEBs in Mediterranean climate: Performance analysis of residential case study," *Applied Energy*, vol. 183, pp. 938–957, 2016.
- [10] E. Cuerda, M. Pérez, and J. Neila, "Facade typologies as a tool for selecting refurbishment measures for the Spanish residential building stock," *Energy and Buildings*, vol. 76, pp. 119–129, 2014.
- [11] F. AlFaris, A. Juaidi, and F. Manzano-Agugliaro, "Energy retrofit strategies for housing sector in the arid climate," *Energy and Buildings*, vol. 131, pp. 158–171, 2016.
- [12] G. C. Bakos and N. F. Tsagas, "Technology, thermal analysis and economic evaluation of a sunspace located in northern Greece," *Energy and Buildings*, vol. 31, no. 3, pp. 261–266, 2000.
- [13] G. Mihalakakou, "On the use of sunspace for space heating/cooling in Europe," *Renewable Energy*, vol. 26, no. 3, pp. 415–429, 2002.
- [14] K. M. Bataineh and N. Fayed, "Analysis of thermal performance of building attached sunspace," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 8, pp. 1863–1868, 2011.
- [15] G. Oliveti, M. De Simone, and S. Ruffolo, "Evaluation of the absorption coefficient for solar radiation in sunspaces and windowed rooms," *Solar Energy*, vol. 82, no. 3, pp. 212–219, 2008.
- [16] G. Oliveti, N. Arcuri, M. De Simone, and R. Bruno, "Solar heat gains and operative temperature in attached sunspaces," *Renewable Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 241–249, 2012.
- [17] J. M. Mottard and A. Fissore, "Thermal simulation of an attached sunspace and its experimental validation," *Solar Energy*, vol. 81, no. 3, pp. 305–315, 2007.
- [18] F. Asdrubali, F. Cotana, and A. Messineo, "On the evaluation of solar greenhouse efficiency in building simulation during the heating period," *Energies*, vol. 5, no. 6, pp. 1864–1880, 2012.
- [19] Comisión Europea, *European passive solar handbook Preliminary edition: Basic principles and concepts for passive solar architecture*, Trafalgar. Brussels: Trafalgar Square Publishing, 1986.
- [20] Comité Técnico AEN/CTN 92, ISO 13790:2008 Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling. 2008.
- [21] L. Thermal Energy System Specialists, "TRNSYS," 2016. [En línea]. Enlace: <http://www.trnsys.com/>. [Accedido: 05-Jul-2016].
- [22] U. S. D. of E. (DOE), "EnergyPlus," 2016. [En línea]. Enlace: <https://energyplus.net/>. [Accedido: 27-Jun-2016].
- [23] A. R. Rempel, A. W. Rempel, K. V. Cashman, K. N. Gates, C. J. Page, and B. Shaw, "Interpretation of passive solar field data with EnergyPlus models: Un-conventional wisdom from four sunspaces in Eugene, Oregon," *Building and Environment*, vol. 60, pp. 158–172, 2013.
- [24] J. S. Sage-Lauck and D. J. Sailor, "Evaluation of phase change materials for improving thermal comfort in a super-insulated residential building," *Energy and Buildings*, vol. 79, pp. 32–40, 2014.
- [25] J. Zhao, B. Lasternas, K. P. Lam, R. Yun, and V. Loftness, "Occupant behavior

and schedule modeling for building energy simulation through office appliance power consumption data mining," *Energy and Buildings*, vol. 82, pp. 341–355, 2014.

- [26] G. Dall'O', L. Sarto, N. Sanna, and A. Martucci, "Comparison between predicted and actual energy performance for summer cooling in high-performance residential buildings in the Lombardy region (Italy)," *Energy and Buildings*, vol. 54, pp. 234–242, 2012.
- [27] G. Dall'O', L. Sarto, A. Galante, and G. Pasetti, "Comparison between predicted and actual energy performance for winter heating in high-performance residential buildings in the Lombardy region (Italy)," *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 247–253, 2012.
- [28] A. J. Marszal, P. Heiselberg, J. S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, and A. Napolitano, "Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 4, pp. 971–979, 2011.
- [29] M. Owraq, M. Aminy, M. T. Jamal-Abad, and M. Dehghan, "Experiments and simulations on the thermal performance of a sunspace attached to a room including heat-storing porous bed and water tanks," *Building and Environment*, vol. 92, pp. 142–151, 2015.
- [30] Lufft, "Opus 200/300," Lufft, 2001.
- [31] R. Felices, C. Viñas, and J. C. Losada, "General methodology applied to monitoring a building and assess its energy performance," in *Book of extended abstracts. III International congress on construction and building research*, 2015, pp. 33–34.
- [32] O. Guerra-Santin and C. A. Tweed, "In-use monitoring of buildings: An overview of data collection methods," *Energy and Buildings*, vol. 93, pp. 189–207, 2015.
- [33] A. Monge-Barrio and A. Sánchez-Ostiz, "Energy efficiency and thermal behaviour of attached sunspaces, in the residential architecture in Spain. Summer Conditions," *Energy and Buildings*, vol. 108, pp. 244–256, 2015.
- [34] Comité Técnico AEN/CTN 81, "UNE-EN ISO 7730:2006 Ergonomía del ambiente térmico Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local," Asociación Española de Normalización (AENOR), 2006.
- [35] Trimble, "SketchUp." Sunnyvale, California, USA, 2016.
- [36] National Laboratory of the U.S. Department of Energy, "OpenStudio." USA, 2016.
- [37] Gobierno España, *Reglamento de instalaciones térmicas de los edificios*. Spain: MINETUR, 2013.
- [38] Ministerio de Fomento, Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación. España, 2013, pp. 67137–67209.
- [39] Gobierno España, Documento Básico HS Salubridad. Spain, 2009, p. 144.
- [40] ASHRAE, *ASHRAE Handbook 2013 Fundamentals*, vol. 53, no. 9. 2013.

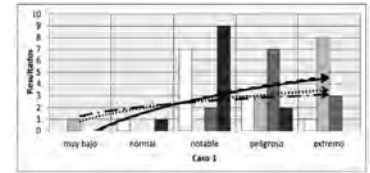
AGRADECIMIENTOS

Al Ayuntamiento de Pozuelo de Alarcón y al Aula de Educación Ambiental, por el convenio firmado con la Universidad Politécnica de Madrid gracias al que se puede llevar a cabo este estudio.

Juan C. Losada agradece el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad Español Proyecto No. MTM2012-39101-C02-01.

Idoneidad y discrepancia de métodos de evaluación de riesgos en seguridad y salud aplicados en obras de construcción

Suitability and discrepancy of health and safety risk assessment methods applied to construction works



Antonio-José Carpio-de-los-Pinos¹, María-Nieves González-García¹, Covadonga Moreu-de-la-Vega², Kenzo Hosokawa-Menéndez³

¹ Universidad Politécnica de Madrid. ETSE. Avda. Juan de Herrera, 6 - 28040 Madrid.

² Brandon Ingenieros, S.L. Calle Juan Bravo, 51- 28006 Madrid.

³ Eneres Tecnológica, S.L. Calle Apolonio Morales, 29 - 28036 Madrid.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8201> | Recibido: 04/11/2016 • Evaluado: 07/11/2016 • Aceptado: 08/02/2017

ABSTRACT

- This paper discusses four methods of risk assessment. These methods have been selected based on the ability to better adapt to the characteristics of the construction sector: INSHT, ANACT, RNUR and FINE. They have been applied to three building constructions of different features. In each construction work, three high accident phases were analyzed: structure, façades and roofs. The research studies 10 working risks, classified according to the technique used against that particular risk, that is: safety at work (4), (2) industrial hygiene, ergonomics (2) and (2) applied psychology. Results show that there are very significant differences in terms of risk types and levels of risk that each method is capable of signaling, depending on the type of work analyzed.
- **Keywords:** Prevention; safety at work; methodology; risk assessment; construction.

RESUMEN

En este trabajo se analizan cuatro métodos de evaluación de riesgos, seleccionados con el criterio de mejor adaptación a las características propias del sector construcción: INSHT, ANACT, RNUR y FINE. Se han aplicado sobre tres obras de construcción de características distintas, analizándose en tres fases de alta siniestralidad laboral: estructuras, cerramientos y cubiertas. Se ha trabajado sobre 10 riesgos laborales, clasificados en función de la técnica de lucha contra el riesgo que los estudia: seguridad en el trabajo (4), higiene industrial (2), ergonomía (2) y psicología aplicada (2). Los resultados muestran que existen diferencias muy significativas en cuanto a los tipos de riesgo y los niveles de riesgo que cada método es capaz de detectar en función del tipo de obra analizado.

Palabras clave: prevención, seguridad en el trabajo, metodología, evaluación de riesgos, construcción.

1. INTRODUCCIÓN

Los accidentes laborales constituyen un gran problema económico y social, representando una pérdida económica permanente para empresas, administraciones, trabajadores y la sociedad en general. Entre los sectores profesionales, la industria de la construcción ha tenido siempre una alta tasa de accidentes de trabajo [1]. Aunque las estadísticas han mejorado gradualmente durante los últimos años [2], la industria de la construcción todavía tiene

una tasa de incidencia decepcionante, con enormes costos directos e indirectos. En Europa, y en otras partes del mundo, la reducción de la siniestralidad laboral es una prioridad social inmediata, siendo la prevención de accidentes y la gestión del riesgo un tema crucial [3].

Esta alta siniestralidad se debe a una serie de circunstancias que no se dan en otros sectores: temporalidad, elevada subcontratación, bajo nivel educativo de los trabajadores, falta de formación profesional, falta de cultura preventiva, problemas de comunicación, la complejidad y continuos cambios naturales propios del ambiente de trabajo, que cada proyecto de construcción es único y, en múltiples ocasiones, el alto número de trabajadores inmigrantes que no están familiarizados con la construcción, materiales, métodos empleados, e incluso el idioma local. Estas circunstancias "especiales" requieren un análisis detallado de los diferentes riesgos a los que están expuestos los trabajadores de la construcción. Una técnica apropiada para este análisis es la evaluación de riesgos, proporcionando información útil para reducir los accidentes de trabajo.

La seguridad y salud en el trabajo es por tanto una preocupación importante para muchos países. Su mejora es a través de legislación, reglamentación, normas y pautas de seguridad, recopilación de mejores prácticas, estadísticas de accidentes, investigaciones e inspecciones, análisis de los sistemas de gestión de la seguridad y el comportamiento personal. Para luchar contra los accidentes laborales es preceptivo integrar la prevención de riesgos en todas las fases de actuación empresarial [4-5], implantando un plan de prevención de riesgos laborales que emplea como herramienta la evaluación de riesgos [6-7], para realizar la planificación preventiva y poder luchar contra los accidentes de trabajo.

Para evaluar los riesgos en el sector construcción se debe considerar todo el proceso de construcción de un edificio, desde la concepción del proyecto hasta la entrega del mismo y el posterior mantenimiento. Los procesos constructivos son una actividad dinámica y compleja, que requieren la coordinación de los diferentes trabajadores interdependientes, con una sucesión de distintas fases de obra donde van cambiando continuamente oficios, tareas, exposición a condiciones climáticas adversas, materiales, maquinaria, medios auxiliares, altura de trabajo, altas proporciones de trabajadores no cualificados y temporales, coincidencia en el tiempo de distintas operaciones que pueden generar mayor riesgo de lesión, etc. [8].

La consideración de la seguridad desde la fase de diseño es una técnica efectiva para reducir o eliminar las situaciones de riesgo [9]. Sin embargo, minimizar los riesgos es una tarea pluridisciplinar que requiere la participación de todos los agentes que intervienen en la obra [10].

Tixier [11], indica que generalmente se identifican tres fases principales a la hora de realizar un estudio de evaluación de riesgos laborales:

Fase 1 - Identificación de los peligros potenciales.

Fase 2 - Evaluación de los riesgos, cuyo objetivo es cuantificar el riesgo.

Fase 3 - Jerarquización.

Los distintos métodos de evaluación de riesgos pueden clasificarse desde simples, abarcando un solo paso, a métodos más complejos, incluyendo los tres pasos anteriores. Sus parámetros de salida pueden ser cualitativos, tales como recomendaciones, o cuantitativos en forma de un índice del nivel de riesgo [8].

La evaluación de riesgos permite identificación de factores de riesgo, su valoración y priorización [12], a partir de la cual se procede a establecer mecanismos para controlar los riesgos. Su finalidad es determinar si el nivel de riesgo es aceptable o, en caso contrario, tomar medidas para controlarlo y reducirlo. Para ello, se analiza la probabilidad de que se produzca un daño a un trabajador en base a la exposición frente al peligro. Jannadi y Almishari [13] estudiaron la evaluación de riesgo de las principales actividades de construcción, definiendo el riesgo como una medida de la probabilidad, la gravedad y la exposición a los peligros de una actividad. Barandan y Usmen adoptaron el mismo enfoque, basado en la definición del riesgo como el producto de la probabilidad (frecuencia) y la gravedad, estudiando 16 oficios de la construcción [14]. Observaron que la consideración simultánea de frecuencia y gravedad da resultados más amplios que el análisis de riesgos basado exclusivamente en la frecuencia o en la gravedad.

Para Williams [15] el riesgo depende de dos factores; probabilidad de ocurrencia e impacto que se cuantifica como las consecuencias sobre el trabajador y su entorno. Usando una descripción matemática, lo anterior se puede describir como $R = P \cdot I$.

Faber [16] define el mismo concepto en el riesgo técnico, como las consecuencias esperadas asociadas a una actividad determinada. Teniendo en cuenta una actividad con un solo evento, el riesgo R es, la probabilidad de que este evento ocurra P , multiplicado por las consecuencias, C . Es decir: $R = P \cdot C$.

Existen dos maneras principales de obtener la probabilidad de ocurrencia de un riesgo: mediante un análisis subjetivo basado en la estimación directa de la probabilidad de ocurrencia de un riesgo y que requiere un alto nivel de experiencia; y un análisis objetivo que necesita datos históricos para poder realizar la evaluación, y que en algunos casos no es viable para todos los riesgos debido a la falta de información.

La cuantificación de las consecuencias del riesgo es una tarea difícil debido a que un mismo accidente puede producir múltiples consecuencias y pueden existir distintas apreciaciones para evaluar la severidad de un mismo daño [17].

2. OBJETIVO Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL REALIZADA

Este trabajo persigue el análisis de la metodología de evaluación de riesgos y su aptitud frente a las características "especiales" de una obra de edificación. Para ello se han compilado y analizado diversas metodologías de evaluación de riesgos laborales (INSHT, ANACT, THREP, SHERPA, RNUR, ÁRBOL DE SUCESOS, LEST, FINE,

ANÁLISIS ERGONÓMICO y FACTORES PSICOSOCIALES) y se han seleccionado y justificado las metodologías que se ajustan mejor a la complejidad del desarrollo de una obra de edificación. Estos métodos son INSHT, ANACT, RNUR y FINE.

El objetivo de este trabajo es comprobar, no sólo, la idoneidad de la aplicación de los cuatro métodos seleccionados, de evaluación de riesgos laborales en la construcción de obras de edificación, uno de ellos utilizado de forma generalizada desde hace dos décadas, prácticamente como único recurso; sino la discrepancia de resultados frente a un mismo punto de observación para su evaluación.

El trabajo experimental se ha realizado seleccionando tres obras de edificación reales, en España, con características diferentes; de promoción pública, privada, de obra nueva y rehabilitación; y situadas en pequeños municipios y en ciudades; para estudiar las condiciones de seguridad durante la obra:

- Caso 1: Promoción privada de una vivienda unifamiliar y garaje en Bargas (Toledo). Desarrollada en dos plantas sobre rasante y una planta semisótano. Superficie construida de 644,81 m² y presupuesto de obra de 239.825'80 €. Proyectada en el 2011 y finalizada en 2013.
- Caso 2: Promoción pública para una intervención medioambiental en un espacio urbano del casco histórico de Toledo; con la restauración de las fachadas (1.595,33 m²), las cubiertas (548,88 m²) y acondicionamiento de la calle (235,50 m²). Presupuesto de obra de 466.123,86 €. Proyectada en 2009 y finalizada en 2011.
- Caso 3: Promoción pública de edificio para uso docente en El Casar de Escalona (Toledo). Desarrollada en dos plantas sobre rasante y una planta en semisótano. Superficie construida de 2.741,68 m² y presupuesto de obra de 2.292.164,83 €. Proyectada en 2010 y finalizada en 2012.

Las tres obras estudiadas han tenido diferencias notables en materia de prevención durante su construcción. Así, en el caso 1 el entorno de seguridad y salud laboral fue muy complicado debido a la total falta de disposición para la prevención por parte del Contratista, en el caso 2 al entorno de seguridad y salud se le sumó la constante presencia de vecinos, aumentando los riesgos para controlar, y en el caso 3 el entorno de seguridad y salud de la obra estuvo adecuadamente controlado.

En cada una de las obras se analizan tres fases constructivas de alta siniestralidad laboral: estructuras, cerramientos y cubiertas. Los riesgos laborales que se han evaluado son los más representativos y que con más frecuencia aparecen en estas fases de obra considerando la experiencia en este tipo de obras de los autores.

En las tres obras se ha trabajado sobre los siguientes 10 riesgos laborales, clasificados en función de la técnica de lucha contra el riesgo que los estudia:

- Seguridad en el trabajo (4): caída a distinto nivel, caída al mismo nivel, atrapamiento y proyección de partículas.
 - Higiene industrial (2): estrés térmico y deficiencias en iluminación.
 - Ergonomía (2): desplazamiento y manejo de cargas.
 - Psicología aplicada (2): relaciones y organización incorrecta.
- Se han aplicado cuatro metodologías de evaluación de riesgos laborales que se adaptan a la complejidad en el desarrollo de una obra de edificación y al objetivo del trabajo:
- INSHT. Método propuesto por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo [8], estima la tolerancia del riesgo en cuanto a probabilidad y consecuencias.
 - ANACT. Método de la Agence Nationale pour l'Amélioration des Conditions de Travail [19]. Establece la importancia del

trabajo a través de una encuesta para evaluar las condiciones del trabajo.

- RNUR. Método de perfiles de puesto, de la Régie Nationale Des Usines Renault. Valora objetivamente todas las variables del puesto de trabajo para mejorar la seguridad personal y del entorno, en base al nivel de satisfacción del trabajador [20].
- FINE. Método de William T. FINE [21]. Método matemático que calcula el riesgo cuantificado debido al peligro, teniendo en cuenta las posibles consecuencias de un accidente, el factor de exposición y el factor de probabilidad.

Estos métodos utilizan unos niveles o clasificación del riesgo muy similares. INSHT hace una evaluación del riesgo en trivial, tolerable, moderado, importante e intolerable. ANACT evalúa el riesgo en bien, regular, mal. RNUR analiza si la situación de riesgo es, muy satisfactoria, satisfactoria, aceptable, peligrosa y muy peligrosa. FINE hace una evaluación del riesgo como aceptable, posible, notable, alto y muy alto.

Por lo tanto, se han manejado tres obras, tres fases constructivas de alta siniestralidad laboral, diez riesgos seleccionados y cuatro metodologías de evaluación de riesgos, obteniendo una muestra total de 360 resultados.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados se han clasificado en función de las técnicas de lucha contra el riesgo (seguridad en el trabajo, higiene industrial, ergonomía y psicología) y del nivel del riesgo. Los niveles de riesgo se han clasificado como muy bajo, normal, notable, peligroso y extremo (como parámetros cualitativos). Estos niveles de riesgo coinciden con los definidos por los métodos de evaluación estudiados, pero

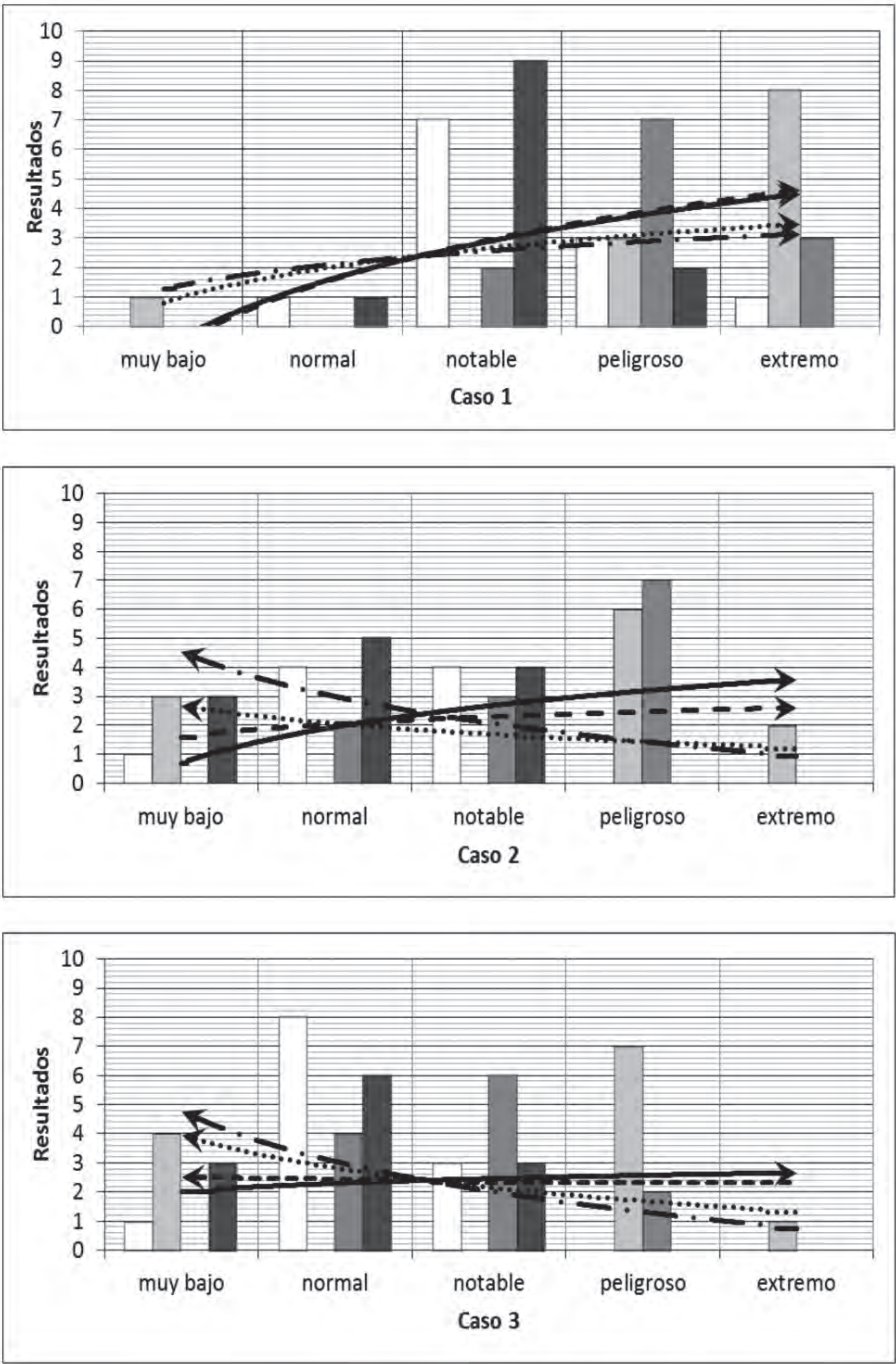


Fig. 1: Análisis de riesgos y Tendencia de los riesgos en cada método

con un nombre distinto. En la Tabla I se identifican los parámetros de cuantificación para el valor cualitativo de los riesgos. Para

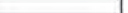
Valor cualitativo de los riesgos	Muy Bajo	Normal	Notable	Peligroso	Extremo
Valor cuantitativo	1	1	1	1	1
Realidad de la situación. Figura 1					
Valor cuantitativo	1	3	9	27	81
Destaca el riesgo extremo. Figura 3					
Métodos de Evaluación. Figuras 1 2 3	INSHT	ANACT	RNUR	FINE	
Código de color					
Código de línea					
Riesgos característicos. Figura 4	Seguridad	Higiene	Ergonomía	Psicosociología	
Código de trama					

Tabla I: Parámetros cualitativos y cuantitativos y códigos gráficos de los métodos y riesgos analizados

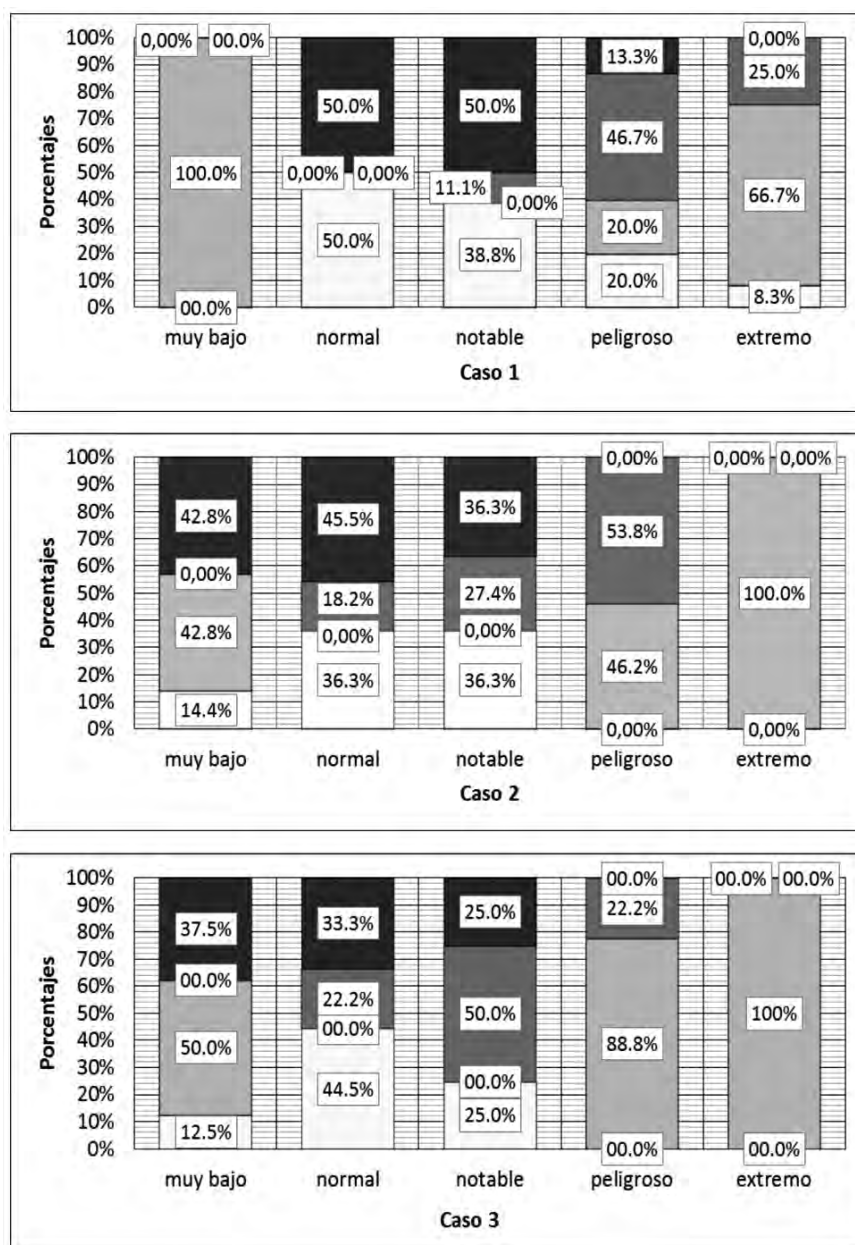


Fig. 2: Porcentaje de métodos en cada nivel de riesgos

cuantificar el resultado se ha dado el valor 1 a cada factor de riesgo; con ello se observa la realidad de la situación. Para destacar el riesgo extremo se ha expresado el valor de cuantificación en variable exponencial con base 3 (3^x), donde x toma los valores desde 0 hasta 4. Además, en la misma Tabla, se indican los códigos gráficos utilizados para diferenciar los métodos de evaluación y las cuatro técnicas de lucha contra el riesgo los riesgos característicos analizados.

La Figura 1 muestra los resultados del análisis efectuado para cada uno de los riesgos, en cada una de las fases constructivas y para cada método de evaluación, utilizando los valores cuantitativos de la Tabla I. Así, por ejemplo, en el caso 1 se indican con valor de 7 los riesgos notables evaluados según el método del INSHT. Eso significa, que se ha realizado la evaluación de riesgos según el método del INSHT, para los 10 riesgos indicados (4 de seguridad en el trabajo, 2 de higiene, 2 de ergonomía y 2 de psicología) en cada una de las tres fases críticas de obra (estructura, cerramiento y cubierta) obteniendo siete riesgos moderados (notables). A partir de los resultados, se ha procedido a generar una línea logarítmica

de la tendencia del riesgo para cada uno de los métodos de evaluación y en cada una de las obras. La tendencia del riesgo en cada método de evaluación se expresa con los códigos de líneas indicados en la Tabla I. Se observa que la tendencia del riesgo coincide con los antecedentes descritos sobre la realidad de las obras. Como se puede apreciar los riesgos del caso 1 tienen tendencia hacia peligrosos y extremos. Los riesgos del caso 2 están equilibrados entre los riesgos normales y notables. Los riesgos en el caso 3 expresan una tendencia hacia los riesgos normales y muy bajos.

La Figura 2 indica para cada nivel de riesgo los métodos de evaluación de riesgos empleados que son capaces de identificarlos en tanto por ciento, para los tres casos. El análisis global de los resultados sobre los tres casos permite afirmar que los resultados obtenidos sobre los casos 2 y 3 son muy similares y muy diferentes a los del caso 1. Además para cada caso existe una gran diferencia en los porcentajes de riesgo que son capaces de identificar cada método de evaluación. Así, por ejemplo, en el caso 1 los riesgos muy bajos son identificados únicamente por ANACT, los riesgos normales sólo los identifican INSHT y FINE, los riesgos peligrosos son identificados por los cuatro métodos y los notables y extremos por tres. En el caso 2 los métodos de INSHT, RNUR y FINE se concentran en la banda de los riesgos normales y notables. Y en el caso 3 se observa una ligera tendencia de los métodos para identificar y concentrarse en la banda de los riesgos muy bajos, normales y notables. En los casos 2 y 3 los riesgos extremos únicamente los identifica el método ANACT.

Para resaltar e identificar los riesgos peligrosos y extremos, del resto de riesgos analizados, se ha expresado el valor de cuantificación en variable exponencial con base tres (3^x) (Figura 3). Se aprecia que los cuatro métodos advierten de la peligrosidad del riesgo en el caso 1 pero con discrepancias de valores. En el caso 2 los métodos indican moderación de los niveles de peligrosidad, en comparación a los del caso 1. Y en el caso 3, los métodos INSHT, FINE y RNUR indican una situación controlada del riesgo extremo, en discrepancia con los valores de ANACT. Estos resultados muestran que la situación del riesgo extremo en cada uno de los casos de obra analizados está de acuerdo con la situación real de seguridad de las mismas durante su ejecución, aunque con discrepancias en sus valores.

En la Figura 4 se expresan para cada método de evaluación los porcentajes de los riesgos que identifican agrupados según la técnica de lucha contra el riesgo que los estudian. Su disposición, de abajo hacia arriba es, riesgo de seguridad, higiene, ergonomía y psicología (código gráfico de la Tabla I). El análisis global de esta Figura da una información muy similar a la obtenida sobre la Figura 2: los resultados obtenidos sobre los casos 2 y 3 son muy similares y distintos a los del caso 1. Además para cada caso

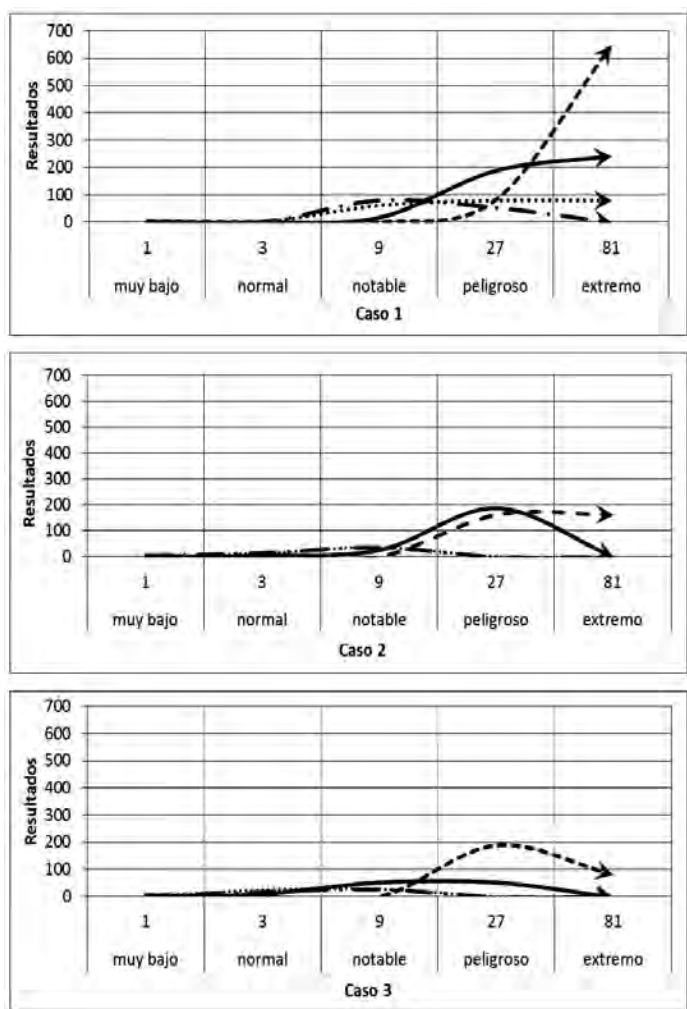


Fig. 3: Cantidad de riesgo extremo

existe una gran diferencia en los porcentajes de riesgos agrupados por técnicas de lucha contra el riesgo que identifican cada uno de los métodos de evaluación analizados. En el caso 1 se puede comprobar que el INSHT tiene más capacidad de detectar riesgos psicosociales (51,3%) que el resto de métodos de evaluación. Sin embargo, FINE tiene mayor capacidad para detectar riesgos de seguridad (46,2%). En los casos 2 y 3 se puede comprobar que los riesgos psicosociales se detectan muy mal en los cuatro métodos y los riesgos de higiene se detectan razonablemente bien por los cuatro métodos de evaluación.

Realizando una estimación conjunta de los resultados discrepantes de las evaluaciones de los cuatro métodos, los riesgos predominantes en el caso 1 fueron los riesgos de seguridad y psicosociales. En el caso 2 destacan los riesgos de seguridad, higiénicos y ergonómicos; y en el caso 3 los riesgos que más destacaron fueron los higiénicos y los ergonómicos. En la tabla II se muestra una comparación de los cuatro métodos de evaluación de riesgos, en base a la ponderación de los resultados de evaluación en los tres casos de estudio, en un espectro de riesgos desglosando los riesgos en las cuatro técnicas de lucha contra el riesgo: seguridad, higiene, ergonomía y psicosociología. Los resultados obtenidos son discrepantes entre los cuatro métodos, que detectan los riesgos de forma diferente. En Seguridad el espectro abarca los riesgos muy bajos, normales, notables, peligrosos y extremos. Los métodos INSHT, ANACT y FINE identifican los riesgos normales. Los métodos INSHT, RNUR y FINE identifican riesgos notables. Sin embargo para los riesgos muy bajos, peligrosos y extremos los resultados son discrepantes entre los cuatro métodos.

En Higiene el espectro abarca los riesgos normales, notables, peligrosos y extremos. Los métodos INSHT, RNUR y FINE identifican riesgos notables. Sin embargo para los riesgos normales, peligrosos y extremos los resultados son discrepantes entre los cuatro métodos.

En Ergonomía el espectro abarca los riesgos normales, notables, peligrosos y extremos. Los métodos INSHT, RNUR y FINE identifican riesgos notables. Los métodos INSHT, ANACT y RNUR identifican riesgos peligrosos. Sin embargo para los riesgos normales y extremos los resultados son discrepantes entre los cuatro métodos.

En Psicología el espectro abarca los riesgos muy bajos, normales, notables, peligrosos y extremos. Los métodos INSHT, RNUR y FINE identifican riesgos normales y notables. Sin embargo para los riesgos muy bajos, peligrosos y extremos los resultados son discrepantes entre los cuatro métodos.

De esta forma se deduce que si se emplea un único método de evaluación, los resultados obtenidos se alejan de la realidad. Por ejemplo, existen métodos que no son capaces de detectar riesgos extremos o muy bajos en ninguna de las técnicas de lucha contra el riesgo.

4. CONCLUSIONES

Se han utilizado cuatro métodos de evaluación de riesgos sobre tres obras de edificación. El análisis de resultados obtenidos permite indicar que:

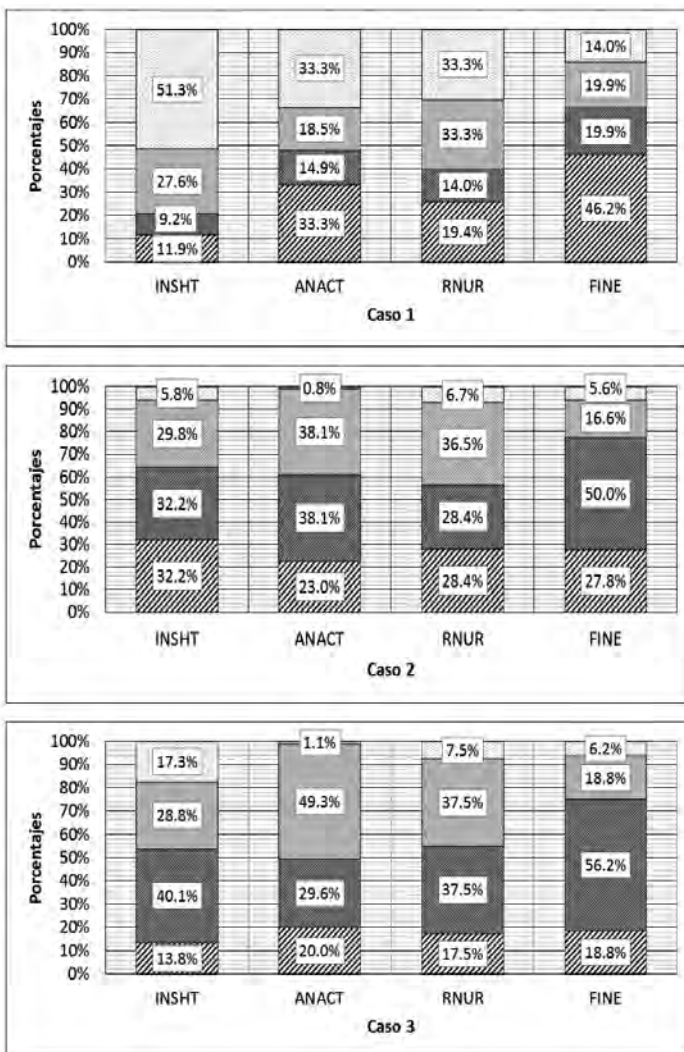


Fig. 4: Riesgos característicos de cada obra

Técnicas de lucha	Métodos	Muy bajo	Normal	Notable	Peligroso	Extremo
Seguridad	INSHT					
	ANACT					
	RNUR					
	FINE					
Higiene	INSHT					
	ANACT					
	RNUR					
	FINE					
Ergonomía	INSHT					
	ANACT					
	RNUR					
	FINE					
Psicosociología	INSHT					
	ANACT					
	RNUR					
	FINE					

Tabla II: Comparación entre los riesgos de seguridad, higiene, ergonomía y psicosociología

- Es fundamental que los métodos de evaluación incorporen y unifiquen conceptos propios de las obras de edificación, adaptándose a la complejidad de organización y gestión. No se deben de basar únicamente en valoraciones cualitativas, como en el método INSHT o en los métodos ANACT y RNUR centrados en el entorno social de la empresa, y muy difíciles de interpretar en obras de edificación, sino que además se deben de introducir factores cuantitativos, como en el método FINE para obtener valoraciones más reales.
- De los cuatro métodos estudiados en este trabajo, INSHT y FINE son los más idóneos para su aplicación en obras de edificación. Sin embargo el método FINE es el que mejor se adapta al incorporar, en su metodología, parámetros adaptables a la realidad de las obras y abarcando las cuatro técnicas de lucha contra el riesgo; pese a la antigüedad del mismo.
- Si se emplea un único método de evaluación, los resultados obtenidos discrepan de la realidad. Existen métodos que no son capaces de detectar riesgos extremos o muy bajos en ninguna de las técnicas de lucha contra el riesgo. Por lo que en el caso concreto de obras de edificación es necesario establecer una nueva metodología de evaluación de riesgos que sea capaz de detectar, para cada técnica de lucha contra el riesgo, todos los niveles de riesgo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Segarra, M, Villena, BM, et al. "Occupational risk-prevention diagnosis: A study of construction SMEs in Spain". 2017. Safety Science, Vol.92, p.104-115. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2016.09.016>)

[2] Eurostat – official EU statistics, 2016. <http://ec.europa.eu/eurostat> (accessed on 20 December 2016)

[3] Martínez, MD, Rubio, MC et al. "The impact of occupational health and safety regulations on prevention through design in construction projects: perspectives from Spain and the United Kingdom". 2016. WORK: A Journal of Prevention, Assessment & Rehabilitation, 53, p.181-191. (doi: <http://dx.doi.org/10.3233/WOR-152148>)

[4] BOE. "Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales". Boletín Oficial del Estado, 10 de noviembre de 1995, nº 269. Última modificación 29 de diciembre de 2014.

[5] BOE. "Ley 54/2003, de 12 de diciembre, de reforma del marco normativo de la prevención de riesgos laborales". Boletín Oficial del Estado, 13 de diciembre de 2003, nº 298.

[6] Takala, J. "Trabajos saludables. Bueno para Ti. Buen negocio para Todos. Buenas Prácticas en Evaluación de Riesgos". Mayo 2009. Dyna. Vol. 84-4, p.289-292.

[7] BOE. "Real Decreto 39/1997, de 17 de enero por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención". Boletín Oficial del Estado, 31 de enero de 1997, nº 27. Última modificación 9 de octubre de 2015.

[8] Pinto, A, "GRAM a Qualitative Occupational Safety Risk Assessment Model for the construction industry that incorporate uncertainties by the use of fuzzy sets". 2014. Safety Science. Vol.63, p.57-76. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2013.10.019>)

[9] Gambatese, JA, Behm, M, et al. "Design's role in construction accident causality and prevention: Perspectives from an expert panel. 2008. Safety Science. Vol 46, p.675-691. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2007.06.010>)

[10] Gangolells, M, Casals, M, et al. "Mitigating construction safety risks using prevention through design". 2010. Journal of Safety Research. Vol.41-2, p.107-122. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsr.2009.10.007>)

[11] Tixier, J, Dusserre, G, et al. "Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants". 2002. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Vol.15, p. 291-303.

[12] Conte, JC, Rubio, E, et al. "Occupational accidents model based on risk-injury affinity groups". 2011. Safety Science. Vol.49 (2), p.306-314. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2010.09.005>)

[13] Jannadi, OA, Almishari, S. "Risk assessment in construction". September/October 2003. Journal of construction engineering and management. Vol.129-5, p.492-500. (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2003\)129:5\(492\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:5(492)))

[14] Barandan, S, Usmen, MA. "Comparative injury and fatality risk analysis of building trades". May 2006. Journal of construction engineering and management. Vol.132-5, p.533-539.

[15] Williams, TM. "Risk-management infrastructures". 1993. International Journal of Project Management. Vol.11-1, p.5-10. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0263-7863\(93\)90003-6](http://dx.doi.org/10.1016/0263-7863(93)90003-6))

[16] Faber, MH, Stewart, MG. "Risk assessment for civil engineering facilities: critical overview and discussion". 2003. Reliability Engineering and System Safety. Vol.80-2, p.173-184. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320\(03\)00027-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320(03)00027-9))

[17] Pinto, A, Ribeiro, RA, et al. "Fuzzy approach for reducing subjectivity in estimating occupational accident severity". 2012. Accident Analysis and Prevention. Vol.45, p.281-290. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2011.07.015>)

[18] Gómez-Cano, M, et al. "Evaluación de riesgos laborales". 1996. INSHT. (NIPO: 211-96-013-5)

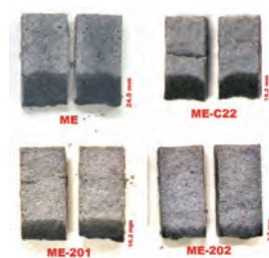
[19] Nogareda, C. "NTP 210: Análisis de las condiciones de trabajo: método de la A.N.A.C.T.". 1988. INSHT, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, España.

[20] Chavarría, R. "NTP-176. Evaluación de las condiciones de trabajo: Método de los perfiles de puestos". 1986. INSHT. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, España.

[21] Abdurrahman, MA. "Classifying accident risks in high-rise building construction". 2009. Journal Penelitian Teknik Sipil. Vol.4-2- p.126-133.

Influencia de la porosidad en el comportamiento de morteros fabricados con escorias de acería y aditivos en ambientes húmedos

The influence of porosity on the behaviour in humid environments of mortars made with steelmaking slags and additives



Congreso Internacional de Innovación Tecnológica en Edificación - CITE2016

Isabel Santamaría-Vicario, Ángel Rodríguez-Saiz, Juan García-Cuadrado, Carlos Junco-Petremont, Sara Gutiérrez-González

UNIVERSIDAD DE BURGOS. Dpto. de Construcciones Arquitectónicas e ICT. Calle Villadiego, s/n – 09001 Burgos (España). Tfno.: + 34 947 258932. arsaizmc@ubu.es

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8193> | Recibido: 04/11/2016 • Evaluado: 04/11/2016 • Aceptado: 26/01/2017

ABSTRACT

- The behaviour of water absorption by capillarity and the water vapour permeability of masonry mortars with added steelmaking aggregates consisting of steelmaking slags are studied. The steelmaking slags are a mixture of electric arc furnace slag (EAFS) and ladle furnace slag (LFS), for use as bonding mortars in construction and on vertical walls as renderings. In order to improve the properties of the mortars, appropriate additives (water retainer and air entraining/plasticizer) were added, that change the internal interaction of the blend's components. As porosity is one of the decisive factors of the investigation, the mortars were analysed by Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) and Computerized Axial Tomography (CAT), to determine the distribution and types of pores present in the blends. The results of this study indicate that the joint use of both steelmaking slags and additives give rise to masonry mortars with low water absorption by capillarity index, while water vapour permeability is high, which makes them appropriate for use on facings and in the bonding of external masonry, thus guaranteeing durability over time.
- **Keywords:** water absorption by capillary action, water vapour permeability, masonry mortars, steelmaking slags.

RESUMEN

La presente investigación estudia el comportamiento a la Absorción de Agua por Capilaridad y a la Permeabilidad al Vapor de Agua de morteros de albañilería dosificados con áridos siderúrgicos compuestos por escorias de acería, concretamente a partir de la mezcla de escoria negra de Horno Eléctrico de Arco (EAFS) y escoria blanca de Horno Cuchara (LFS), para su uso en juntas de fábricas de albañilería y en paramentos verticales de revestimientos. Para mejorar sus propiedades, los morteros se dosifican con aditivos apropiados (retenedores de agua y aireantes/plastificantes) que cambian la relación interna entre los materiales que componen las mezclas. Al ser la porosidad un factor determinante en el estudio de estos comportamientos, se analizan los morteros mediante Porosimetría de Intrusión de Mercurio (PIM) y Tomografía Axial Computarizada (TAC), para determinar la distribución y tipología de los poros presentes en las mezclas. Los resultados de la investigación indican que la utilización conjunta de ambas escorias de acería y aditivos, permiten obtener morteros de albañilería con Coeficientes de Absorción de Agua por Capilaridad bajos, mientras que la Permeabilidad al Vapor de Agua es elevada,

por lo que son adecuados para su uso en paramentos y sentado de fábricas exteriores, con garantías de durabilidad en el tiempo.

Palabras clave: absorción de agua por capilaridad, permeabilidad al vapor de agua, morteros de albañilería, escorias siderúrgicas.

1. INTRODUCCIÓN

Las escorias generadas en la fabricación del acero se han utilizado en la preparación de áridos siderúrgicos, gravas y arenas, bien conjuntamente con áridos silíceos o calizos convencionales [1,2] o diseñando líneas granulométricas específicas formadas por escoria negra y escoria blanca [3].

Son numerosas las investigaciones que han estudiado el uso de escorias de acería en la fabricación de morteros y hormigones, determinando su viabilidad, tanto desde un punto de vista técnico como económico [4,5,6,7], comprobando que responden de manera adecuada frente a los agentes agresivos externos, garantizando su durabilidad en el tiempo [8,9,10].

Por su naturaleza y composición, los hormigones y morteros dosificados con estos residuos de acería precisan de aditivos que mejoren su manejabilidad, con el objetivo de conseguir mezclas más dóciles y trabajables, y de este modo facilitar su puesta en obra [11]. Algunos de estos aditivos, singularmente los inclusores de aire y los plastificantes, modifican la red interna de poros, lo que determina mezclas menos densas y más porosas.

Por su función resistente los hormigones deben presentar estructuras muy compactas e impermeables, con bajas porosidades, que garanticen un buen comportamiento a la durabilidad en el tiempo, por lo que en su diseño se tendrá en cuenta esta propiedad [12].

Por el contrario, en los morteros de albañilería y de revestimiento se precisan mezclas con una baja absorción de agua por capilaridad para garantizar su durabilidad en el tiempo, especialmente cuando están expuestos a ambientes húmedos o con bajas temperaturas, a la vez que es preciso disponer de una red capilar suficiente, que permita el tránsito del vapor de agua hacia el exterior del edificio para que los paramentos transpiren, evitando las humedades intersticiales en los muros de fábrica.

Esta doble prestación, morteros impermeables al agua, pero permeables al vapor de agua, justifica el estudio de la estructura interna de poros de las mezclas, especialmente cuando intervienen en los mismos aditivos de diferente naturaleza. Algunos es-

tudios han orientado sus investigaciones en conocer cómo influye la hidraulicidad de la escoria negra en la estructura interna de los morteros [13].

Por todo ello, en esta investigación se estudia el comportamiento de los morteros fabricados con ambas escorias a la *Absorción de Agua por Capilaridad* y a la *Permeabilidad al Vapor de Agua*, determinando su microporosidad mediante Porosimetría de Intrusión de Mercurio (PIM) y la macroporosidad por Tomografía Axial Computarizada (TAC), lo que permite relacionar la estructura de poros de las mezclas y su comportamiento frente al agua.

2. ANTECEDENTES

Los morteros de albañilería que se estudian en esta investigación se han caracterizado en investigaciones precedentes, tanto en estado fresco como endurecido, obteniendo mezclas con prestaciones similares a las de los morteros tradicionales dosificados con áridos naturales [11,14].

Estos morteros se han dosificado con cemento Portland CEM-I 42,5-R, de 3150 Kg/m³ de densidad. La composición química del cemento, obtenido mediante fluorescencia de rayos X, permite comprobar que está compuesto básicamente por CaO y SiO₂.

El árido utilizado en las mezclas está formado a partir de subproductos de la industria de fabricación del acero, previamente acondicionados y estabilizados en vertedero, para evitar variaciones volumétricas como consecuencia de los procesos de hidratación del CaO y MgO libre [15,16].

El árido siderúrgico se diseña manteniendo una distribución uniforme por tamaños, tal y como se indica en la Fig.1, de acuerdo con el siguiente criterio de composición:

- Los tamaños comprendidos entre los tamices 0.063 mm y 2.00 mm: EAFS, con una densidad de 3645 kg/m³, compuesta principalmente por Fe₂O₃ (24.5%), CaO (26.7%), SiO₂ (20.9%) y Al₂O₃ (12.1%). El resto de componentes TiO₂, MgO, K₂O, MnO y P₂O₅ suponen un 8.95%.
- Los componentes finos, con tamaño inferior a 0.063 mm o filler de árido: LFS, con una densidad de 2860 kg/m³, com-

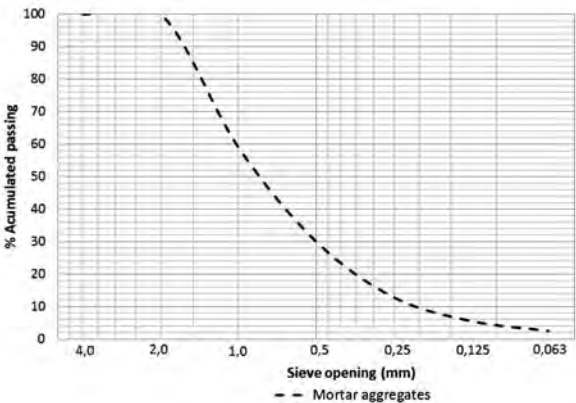


Fig. 1: Curva granulométrica

puesta por SiO₂ (17.72%), CaO (56.75%), MgO (9.56%) y Al₂O₃ (6.75%). El resto de componentes TiO₂, Na₂O, K₂O, MnO, Fe₂O₃ y P₂O₅ suponen un 2.97%.

Los morteros diseñados se dosifican en peso, mezclando 1 parte de cemento por 6 de árido y añadiendo aditivos aireantes-plastificantes y retenedores de agua para mejorar sus prestaciones y facilitar su puesta en obra. Los aditivos utilizados son:

- Cimsil C22: se trata de un aditivo retenedor de agua que se dosifica en polvo, con una densidad aparente de 480 kg/m³. Se añade 1 gramo por cada kg de mortero seco.
- PremorterMix 201: es un aditivo que incorpora aire a las mezclas y que también se dosifica en polvo, actúa como retenedor de agua de amasado y a su vez, como plastificante del mortero. Tiene una densidad de 1300 kg/m³. Se añade en un 0.60% respecto de la cantidad de cemento.
- PremorterMix 202: es un aditivo aireante-plastificante en polvo, con una densidad de 900 kg/m³. Se añade en un 0.15% respecto de la cantidad de cemento.

Los morteros se designan de acuerdo con las referencias recogidas en la Tabla 1. La cantidad de agua añadida a las mezclas ha sido la necesaria para obtener morteros de consistencia plástica, de acuerdo con el procedimiento de la norma EN-1015-3 [17].

Los morteros ME se amasan con dificultad y son muy poco trabajables. Si bien se dosifican para conseguir valores de escurrimiento de 175±10mm, los componentes sólidos del mortero no son capaces de retener el agua de amasado. El resultado es un mortero muy poco trabajable que precisa de aditivos para no perder el agua de amasado y garantizar las reacciones de fraguado y endurecimiento.

Para garantizar que los morteros objeto de estudio dispongan de la suficiente cantidad de agua para fraguar y endurecer, es preciso considerar la inclusión de aditivos en las mezclas. En este caso se han empleado aditivos retenedores de agua con referencia Cimsil C-22 y aditivos inclusores de aire y plastificantes con referencia PM-201 y PM-202.

Las propiedades de los morteros se muestran en la Tabla 1. La inclusión de aditivos mejora la manejabilidad de los morteros y modifica las propiedades de los mismos. El contenido de aire ocluido aumenta, por lo que su densidad y resistencias mecánicas disminuyen. No obstante todos los morteros cumplen con las especificaciones referidas en la Normativa Europea para morteros de albañilería EN-998-1 [18] y EN 998-2 [19], y se podrían designar como M-7,5 (ME-C22 y ME-201) y M-5 (ME-202).

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD

El procedimiento operatorio para determinar la absorción de agua por capilaridad de los morteros está contemplado en la norma EN 1015-18 [20]. Se preparan tres probetas normalizadas de

	CEM I (gr)	EAFS+LFS (gr)	w/c	C-22 (gr)	PM201 (gr)	PM202 (gr)	Aire ocluido (%)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a flexión (N/mm ²)	Resistencia a compresión (N/mm ²)	Adherencia (N/mm ²)
ME	300	1800	1.08	-	-	-	8.3	2303	5.09	17.84	0.83
ME-C22	300	1800	0.95	2.1	-	-	24.0	1982	2.79	10.62	0.62
ME-201	300	1800	0.83	-	1.8	-	22.0	2080	3.63	11.47	0.64
ME-202	300	1800	0.77	-	-	0.45	28.0	1834	1.83	5.04	0.20

Tabla 1: Designación y caracterización de los morteros

(40x40x160) mm³ de cada tipo de mortero ensayado y se introducen en una cámara húmeda de curado durante 28 días, con una temperatura constante de 20°C y una humedad relativa del 95%.

Una vez curadas las probetas a los 28 días, se secan en estufa a una temperatura de 60°C hasta conseguir masa constante. Posteriormente, se sellan las cuatro caras longitudinales con parafina y se rompen a flexión. Las piezas se colocan con las caras 'rotas' hacia abajo, de tal manera que no toquen el fondo de la bandeja, y se sumergen en agua hasta una altura de entre 5-10 mm.

Inmediatamente después, se divide cada probeta a lo largo de su longitud mayor y se mide la altura de penetración del agua en el centro de la probeta.

3.2. PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA

El procedimiento operatorio para el cálculo de la Permeabilidad al Vapor de Agua está definido en la norma EN 1015-19 [21]. Se elaboran cinco probetas cilíndricas de 160 mm de diámetro y 16 mm de altura. Las probetas se conservan en la cámara húmeda durante 28 días para su correcto curado.

A los 28 días de curado se disponen las probetas en los recipientes de ensayo con una disolución de nitrato de potasio (KNO₃) que proporciona en el interior del molde una humedad relativa del 93,2% a 20°C, y se sellan los bordes. La diferencia de presión entre el interior y el exterior de la probeta provoca que el agua de la disolución salina atraviese su masa, lo que produce la evaporación progresiva del agua con el paso del tiempo. Los recipientes se pesan a intervalos para obtener el valor del flujo de vapor de agua a través de la masa de mortero EG/Et (kg/seg), para calcular la Permeanza Λ (kg/m²·s·Pa) y posteriormente la Permeabilidad al Vapor de Agua W_{vp} (kg/m·s·Pa).

Los valores de W_{vp} son muy pequeños y resultan poco útiles al operar con ellos, por lo que los fabricantes de mortero referencian en las tablas de características el valor del Coeficiente "μ", obtenido por relación entre la permeabilidad del aire a 20°C y la del mortero.

3.3. ESTRUCTURA POROSA DE LOS MORTEROS

3.3.1. Porosimetría de Intrusión de Mercurio

Con el objeto de conocer la media del porcentaje de tamaño y volumen de los microporos de los morteros, se analizan muestras mediante la técnica de Porosimetría de Intrusión de Mercurio (PIM). El equipo empleado fue un *Micrometrics Autopore-IV-9500*, que alcanza presiones de hasta 32.000 Psi, lo que equivale a la determinación de tamaños de poro de hasta 0.0067 μm.

3.3.2. Tomografía Axial Computarizada

La técnica instrumental que se emplea para determinar los macroporos, poros de tamaño superior a 170 μm, es la Tomografía Axial Computarizada (TAC).

El equipo de rayos X empleado consta de un tubo Yxlon de 225 Kv/30mA, y se compone de una cabina metálica de acero-

plomo-acero, de forma que, operando con una radiación máxima de 225Kv/30mA dentro de la cabina, la dosis máxima de radiación a una distancia de 100 mm de su superficie externa no exceda de 2.5 μSv/h.

El equipo capta y recoge imágenes transversales de las muestras cada 0.2 mm. Estas imágenes se procesan mediante el software "Mimics 10.0", reconstruyendo posteriormente el cuerpo del sólido objeto de estudio.

Para el estudio se ha seleccionado una probeta de (40x40x160) mm³ de cada tipo de mortero. El ámbito de análisis estudiado comprende un fragmento de probeta ubicado en la zona central de la misma de 3 cm de altura y 40x40 mm² de sección.

4. RESULTADOS

4.1. ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD

La Tabla 2 recoge los valores del Coeficiente de Absorción de Agua por Capilaridad de los morteros y la altura que alcanza el agua absorbida en su interior, después de finalizar el ensayo a los 90 minutos.

De acuerdo con la clasificación establecida en la EN-998-1, todos los morteros dosificados con escorias se clasificarían como W2, por lo que se puede afirmar que tienen una buena resistencia a la filtración contra la penetración del agua en su interior y su uso sería adecuado para exteriores.

Como complemento al ensayo, y según se describe en el apartado experimental, se mide la altura media que alcanza el agua en

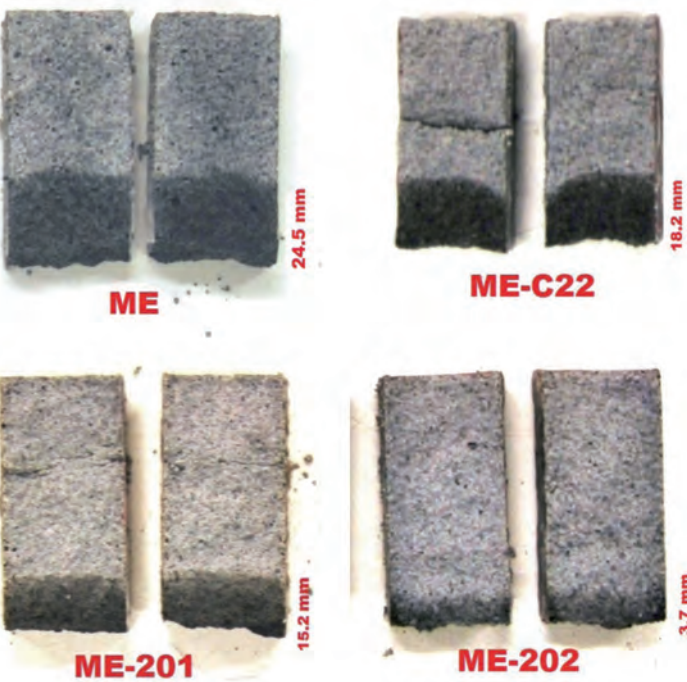


Fig. 2: Altura de penetración de agua en los morteros

	Coeficiente de absorción de agua por capilaridad kg/(m ² ·min ^{0.5})	Clasificación según EN-998-1	Altura de penetración del agua (mm)	Permeanza Λ Kg/ (m ² sPa)·10 ⁻⁰⁹	Permeabilidad W_{vp} Kg/ (m·s·Pa)·10 ⁻¹¹	Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua μ
ME	0.20	W2	24.5	0.65	1.03	18.76
ME-C22	0.15	W2	18.2	0.81	1.30	14.94
ME-201	0.16	W2	15.2	1.33	2.13	9.11
ME-202	0.07	W2	3.7	1.64	2.63	7.38

Tabla 2: Absorción de agua por capilaridad y permeabilidad al vapor de agua

el interior de las muestras parafinadas (Fig.2). En ningún caso la altura de penetración supera los 25 mm, por lo que de nuevo se confirma su aptitud para su uso en exteriores.

4.2. PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA

Los fabricantes de morteros secos especifican en sus fichas de características valores tabulados de μ de entre 4-15 para morteros de revoco y enlucido y entre 15-35 para los morteros que se utilizan en sentado de fábricas. El valor obtenido en el mortero ME se considera únicamente como valor de referencia ya que es un material inviable para su uso en obra. En cualquier caso, cuando los morteros incorporan aditivos a su dosificación, se obtienen morteros suficientemente permeables al vapor de agua, por lo que la transpiración de los muros donde estén colocados está asegurada.

La Tabla 2 muestra los valores obtenidos para la Permeanza (Λ), Permeabilidad al Vapor de Agua (W_{vp}) y los Coeficientes de Permeabilidad al Vapor de Agua de los morteros (μ).

Como se puede observar, las mezclas que incorporan aditivos presentan buen comportamiento frente al flujo de vapor de agua, con valores de μ por debajo de 15.

Cuando el aditivo dosificado es un plastificante inclusor de aire (PM202) se obtienen los mejores comportamientos frente a la Permeabilidad al Vapor de Agua con coeficientes de 7.

4.3. ESTRUCTURA POROSA DE LOS MORTEROS

4.3.1. Porosimetría de Intrusión de Mercurio

Los datos referidos a la microporosidad de los morteros se recogen en la Tabla 3. Los poros de menor tamaño presentan un diámetro de 7 nm, siendo el tamaño superior obtenido con este ensayo de 215 μ m. El estudio confirma los resultados del ensayo de aire ocluido, de tal manera que los morteros con más porosidad son aquellos que incorporan aditivos a las mezclas, alcanzando el valor máximo con el plastificante inclusor de aire PM202.

En el gráfico superior de la Fig.3 se representa el volumen intrusivo de mercurio acumulado de cada uno de los morteros objeto de estudio. De forma comparativa se muestra la diferencia que existe entre los morteros con aditivos ME-C22, ME-201 y ME-202, respecto del mortero ME.

En la imagen inferior de la Fig.3 se muestran las curvas derivadas del volumen intrusivo acumulado, en la que se aprecia el pico máximo de la curva de distribución, que indica el diámetro crítico de poro, es decir, el tamaño de poro interconectado que más veces se repite de manera continua.

En la Fig.4 se compara la distribución de poros en función de su diámetro. Se observa que en los morteros existe un gran porcentaje de capilares grandes y poros de aire y que éstos se incrementan siguiendo una distribución lineal, conforme se añaden los aditivos retenedores de agua C-22, retenedor plastificante PM-201 y el plastificante inclusor de aire PM-202.

De igual forma, se reduce proporcionalmente también el porcentaje de poros capilares en los tres casos, respecto del mortero sin aditivos ME.

4.3.2.Tomografía axial computarizada

A las imágenes obtenidas en el TAC se les asigna un código o "capa" por colores para cuantificar los diferentes materiales que forman el mortero en función de su densidad. Así, a los materiales más densos (escorias) se les asigna el color negro, a los menos densos (poros) el amarillo y a los que tienen una densidad intermedia (pasta de cemento) el color gris. Estas "capas" se pueden cuantificar, obteniendo los resultados de macroporosidad recogidos en la Tabla 3.

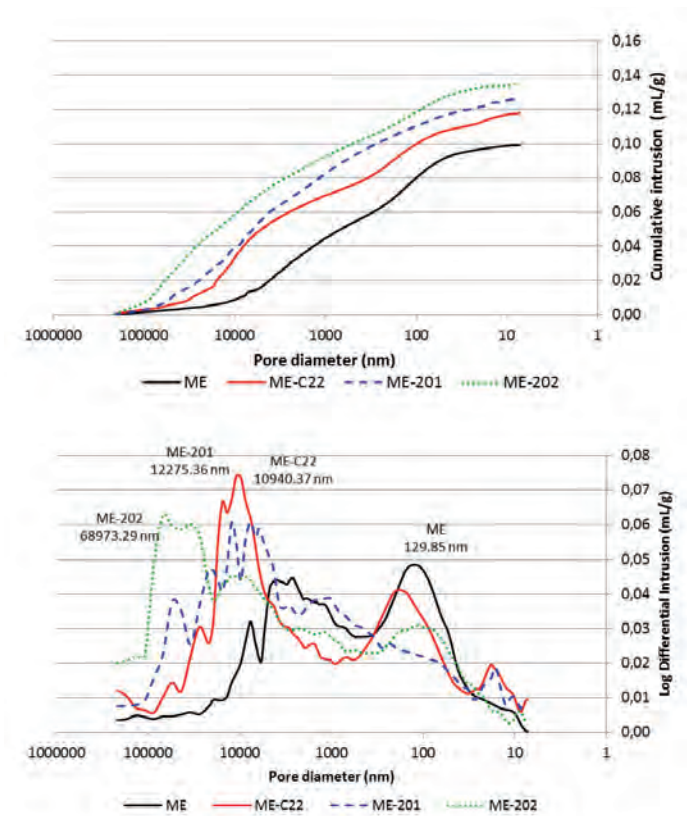


Fig. 3: Gráfica superior: Volumen intrusivo acumulado. Gráfica inferior: Curva derivada del volumen intrusivo (diámetro crítico de poro)

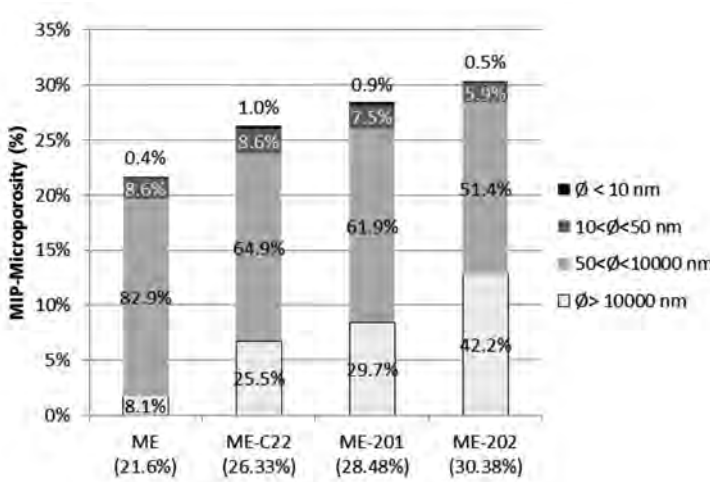


Fig. 4: Tipología de poros en morteros

En la Fig.5 se muestra una reconstrucción tridimensional de los poros dentro de la probeta de mortero, así como las secciones axiales de los mismos obtenidas en el TAC con la secuencia de colores descrita. Como se puede observar, la distribución de las partículas sólidas y de los poros es uniforme. Se puede comprobar que el tamaño de los poros varía según zonas y morteros, alcanzando valores de hasta 2 mm.

	Microporosidad (%)	Macroporosidad (%)
ME	21.62	8.5
ME-C22	26.33	15.4
ME-201	28.48	19.2
ME-202	30.38	22.1

Tabla 3: Microporosidad y macroporosidad de los morteros

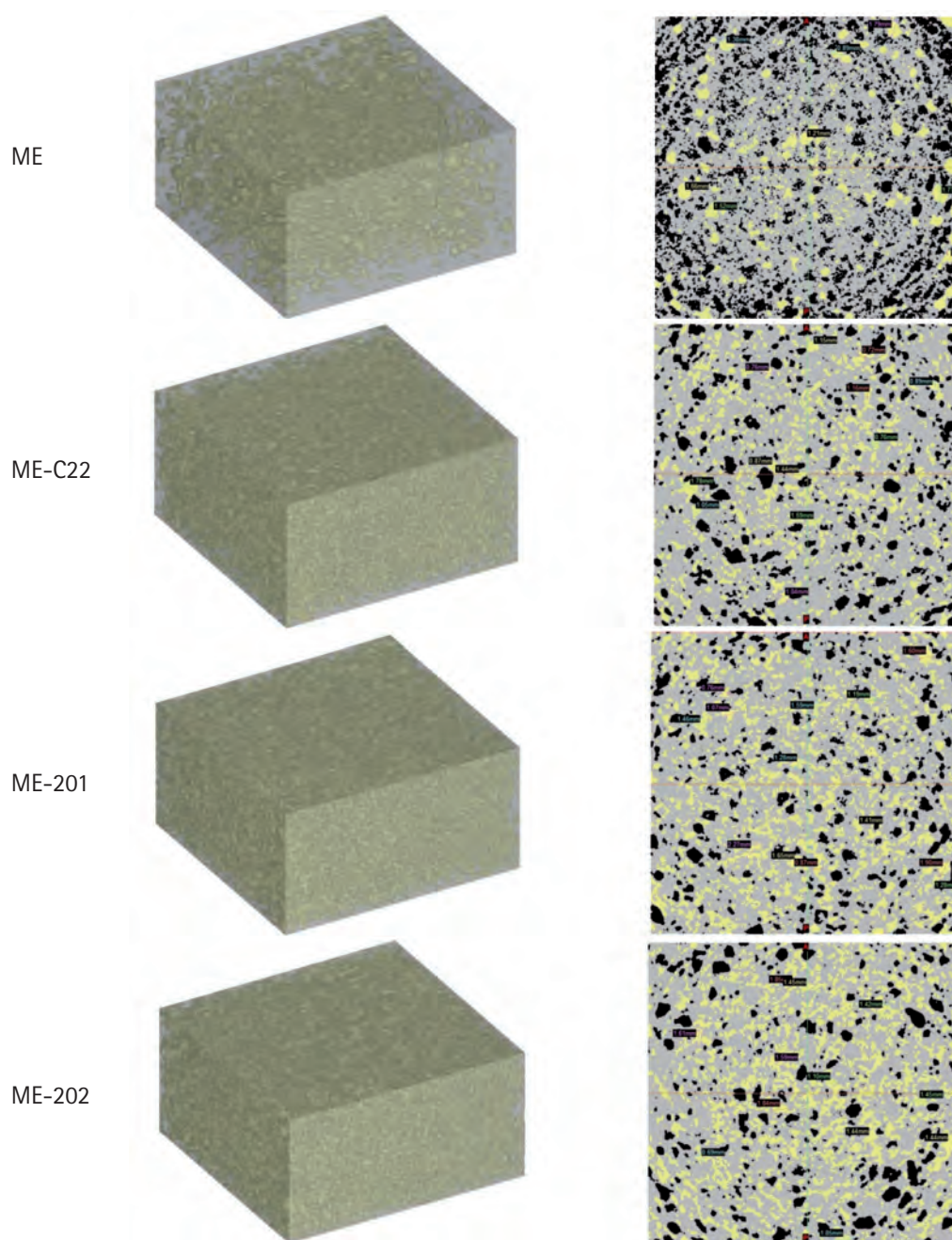


Fig. 5: TAC Izq.: Reconstrucción tridimensional de los poros. Dcha.: Sección axial de los morteros

A partir del estudio realizado en la PIM se observa que la cantidad de poros de mayor tamaño aumenta en los morteros dosificados con aditivos. Como la técnica del TAC permite visualizar poros de gran tamaño, éstos se pueden detectar con mayor nitidez en los morteros dosificados con aditivos, obteniendo los porcentajes que se muestran en la Tabla 3.

5. DISCUSIÓN

La utilización de aditivos en las mezclas produce un cambio significativo en los parámetros de absorción de agua en el interior de los morteros [22].

Los resultados obtenidos en el ensayo de Absorción de Agua por Capilaridad muestran una mejora de los coeficientes y una menor altura de penetración del agua a través de la red capilar de los morteros ME-C22, ME-201 y ME-202, respecto del mortero ME, dosificado sin aditivos. Este comportamiento es muy positivo,

ya que los morteros aditivados objeto de estudio absorben menos cantidad de agua cuando están expuestos a la humedad, por lo que, en principio, son más durables en el tiempo.

De igual forma, los valores de los Coeficientes μ disminuyen en los tres casos de los morteros aditivados, lo que indica que son muy transpirables, permitiendo el flujo del vapor a través de su masa.

No obstante, si se observa la distribución de poros en la masa en el ensayo de PIM, los morteros ME-C22, ME-201 y ME-202 incrementan su porosidad respecto del mortero de referencia ME sin aditivos, circunstancia que, en principio, parece contradictoria con los resultados obtenidos en los ensayos de Absorción de Agua por Capilaridad y Permeabilidad al Vapor de Agua, por lo que esta situación requiere un análisis previo.

Como se puede observar en la Fig.4, el mortero dosificado con áridos siderúrgicos sin aditivos ME, tiene un porcentaje de poros de aire de $\varnothing > 10000$ nm del 8%, siendo el resto de poros de red capilar, del 92%. Los capilares grandes suponen el 83% de los poros intersticiales, circunstancia que determina un buen comportamiento a la absorción de agua, cuando está en contacto con la humedad. Por ello, su clasificación, de acuerdo con la norma EN-998-1, es de W2, apto para exteriores.

Cuando se añaden los aditivos, el rango de poros se modifica sustancialmente, siendo los de $\varnothing > 10000$ nm los que registran un mayor aumento, en detrimento de la red capilar intersticial.

En efecto, la porosidad en los morteros aditivados se corresponde con un volumen grande de poros de aire, abiertos y cerrados, con $\varnothing > 10000$ nm, que alcanza el valor máximo del 42,2% (Fig.4) en los morteros fabricados con el aireante-plastificante PM-202, siendo del 25,5% y del 29,7% en los ME-C22 y ME-201. Consecuentemente, la red capilar, formada por los intersticios de $\varnothing < 10000$ nm, se reduce considerablemente respecto al mortero ME, sin aditivos. Esto implica que los morteros con baja red capilar, absorban menor cantidad de agua, lo que se confirma con resultados obtenidos en el ensayo de Absorción de Agua por Capilaridad (Tabla 2), tanto en lo referido al coeficiente como a la altura alcanzada por el agua en las probetas seccionadas. Como se puede comprobar, este comportamiento es lineal, conforme se incrementa la masa de aire en los morteros.

Incluso, si el agua alcanzase los poros de aire ($\emptyset > 10000$ nm), una vez superada la barrera de poros capilares intersticiales superficiales, el esfuerzo para que el agua ascienda por el interior del material sería mayor, ya que, de acuerdo con la Ley de Jurin, la altura que alcanza el líquido en el interior del capilar es inversamente proporcional al radio del capilar, por lo que en los poros más anchos succionará menos que en los poros más estrechos. Como consecuencia, el agua asciende menos o encuentra dificultades para hacerlo en los morteros con un porcentaje de poros de mayor diámetro elevado, como es el caso del ME-202, que apenas alcanza los 4 mm.

En la Fig.5, que muestra secciones axiales de los morteros obtenidas en el ensayo del TAC, se observa que los poros muestran una interconexión entre sí, por lo que el flujo de vapor de agua a través de la masa del material está garantizado, tal y como muestran los resultados del ensayo de Permeabilidad al Vapor de Agua.

6. CONCLUSIONES

Los morteros dosificados con escoria negra EAF y blanca LF, y aditivos retenedores de agua y plastificantes aireantes disponen de una red de poros que facilita el tránsito del vapor de agua a través del material, evitando así las condensaciones internas. De igual forma, muestran un buen comportamiento a la absorción de agua, especialmente cuando se incrementan los poros de mayor tamaño.

Todos los morteros podrían clasificarse como W2, de acuerdo con la Norma EN 998-1, por lo que son aptos para su aplicación en paramentos al exterior, siendo menos absorbentes cuanto mayor es el porcentaje de poros de aire ($\emptyset > 10000$ nm.).

De igual forma, los morteros son suficiente permeables al vapor de agua, con valores de μ cada vez menores, o lo que es lo mismo, con baja resistencia a la transmisión del vapor de agua, conforme se incrementa el volumen de poros de aire y se reduce el volumen de poros intersticiales de la red capilar, con diámetros críticos elevados.

Por lo tanto, los morteros fabricados conjuntamente con escoria EAF y escoria blanca LF, mezclados con aditivo retenedor de agua Cimsil-22, retenedor de agua y plastificante PM-201 y PM-202 son adecuados para su uso en albañilería, bien como revestimiento o como mortero para el sentado de fábricas.

Como conclusión final se puede afirmar que los morteros dosificados con escorias EAFS y LFS necesitan aditivos para retener el agua de dosificación y posibilitar su correcto fraguado y endurecimiento. Aunque la incorporación de aditivos incrementa la porosidad de las mezclas, los morteros diseñados cumplen con los requerimientos de la Normativa Europea, son más impermeables al agua, pero más permeables al vapor de agua, por lo que su uso en construcción es viable.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Papayianni, I., & Anastasiou, E. (2010). Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products. *Construction and Building Materials*, vol. 24(8), 1412-1417. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.016>
- [2] San-José, J. T., Vegas, I., Arribas, I., & Marcos, I. (2014). The performance of steel-making slag concretes in the hardened state. *Materials & Design*, 60(0), 612-619. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.030>
- [3] Manso, J. M., D. Hernández, M. M. Losáñez and J. J. González (2011) "Design and elaboration of concrete mixtures using steelmaking slags." *ACI Materials Journal* vol 108(6), p.673-681.
- [4] Pellegrino, C., & Gaddo, V. (2009). Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate. *Cement & Concrete Composites*,

- 31(9), 663-671. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.006>
- [5] Rodríguez, A., Manso, J. M., Aragon, A., & Gonzalez, J. J. (2009). Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag. *Resources Conservation and Recycling*, 53(11), 645-651. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.04.015>
- [6] Anastasiou, E. K., Liapis, A., & Papayianni, I. (2015). Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials. *Resources Conservation and Recycling*, 101, 1-8. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.009>
- [7] Aperador, W., Bautista, J., Vera, E. (2011). Mössbauer and xrd analysis of corrosion products of carbonated alkali-activated slag reinforced concretes. *DYNA*, 78 (170), pp. 198-203. <http://dyna.unalmed.edu.co/ediciones/170/articulos/a23v78n170/a23v78n170.pdf>
- [8] Polanco, J. A., J. M. Manso, J. Setién and J. J. González (2011). "Strength and durability of concrete made with electric steelmaking slag." *ACI Materials Journal* vol 108(2): p.196-203.
- [9] Manso, J. M., Rodríguez, A., Aragón, A., & Gonzalez, J. J. (2011). The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3508-3519. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.044>
- [10] Arribas, I., Vegas, I., San-José, J. T., & Manso, J. M. (2014). Durability studies on steelmaking slag concretes. *Materials & Design*, 63, 168-176. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.002>
- [11] Santamaría-Vicario, I., Rodríguez, A., Gutiérrez-Gonzalez, S., & Calderón, V. (2015). Design of masonry mortars fabricated concurrently with different steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*, vol 95, p. 197-206. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.164>
- [12] Basheer, L., Kropp, J., & Cleland, D. J. (2001). Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. *Construction and Building Materials*, 15(2-3), 93-103. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00058-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00058-1)
- [13] Hadj-sadok, A., Kenai, S., Courard, L., & Darimont, A. (2011). Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1018-1025. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.077>
- [14] Santamaría-Vicario, I., Rodríguez, A., Junco, C., Gutiérrez-González, S., & Calderón, V. (2016). Durability behavior of steelmaking slag masonry mortars. *Materials & Design*, 97, 307-315. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.080>
- [15] Vázquez Ramonich, E. and M. Barra (2001). "Reactivity and expansion of electric arc furnace slag in their application in construction." *Materiales de Construcción* vol 51(263-64): p.137-148.
- [16] Frías, M., San-José, J. T., & Vegas, I. (2010). Steel slag aggregate in concrete: the effect of ageing on potentially expansive compounds. *Materiales de Construcción*, vol. 60(297), p.33-46. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2019.45007>
- [17] EN 1015-3 Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). (2000).
- [18] EN 998-1 Specification for mortar for masonry. Part 1: Rendering and plastering mortar. (2003).
- [19] EN 998-2 Specification for mortar for masonry. Part 2: Masonry mortar. (2004).
- [20] EN 1015-18 Methods of test for mortar for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. (2003).
- [21] EN 1015-19 Methods of test for mortar for masonry. Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars. (1999).
- [22] Garbalińska, H., & Wygocka, A. (2014). Microstructure modification of cement mortars: Effect on capillarity and frost-resistance. *Construction and Building Materials*, 51, 258-266. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.091>

Sistema de monitorización de temperatura y humedad en la edificación. Aplicación a una vivienda de Madrid



Temperature and relative humidity monitoring system in buildings. A study case of a flat in madrid



Luisa García-Fuentevilla, Alejandro Payán-de-Tejada-Alonso, Carlos Morón-Fernández

Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. Edificación. Dpto. Tecnología de la Edificación. Avda Juan Herrera, 6 - 28040 Madrid

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8203> | Recibido: 04/11/2016 • Evaluado: 07/11/2016 • Aceptado: 17/01/2017

ABSTRACT

- Presently, one of the most important objectives of building sector is to provide housing users comfort. So, to monitor comfort parameters plays an important and essential role. However, monitoring process can be laborious and too much expensive. Because of this, in this work an easy and cheap temperature and relative humidity monitoring system has been developed. It is based on Arduino platform. This system has been used in an inner house in Madrid, and the data obtained from it has been compared to data from a commercial thermohygrometer, which is more expensive than the based-on-Arduino system. This way, this system reliability has been checked. Furthermore, both temperature and relative humidity data are within the normative comfort values.
- **Keywords:** Thermal comfort; Arduino; Temperature; Humidity; Monitoring.

RESUMEN

Uno de los principales objetivos actuales del sector residencial es proveer de confort al usuario de las distintas viviendas. Por ello, la monitorización de los parámetros de confort de una vivienda juega un papel importante e imprescindible. Sin embargo, el proceso de monitorización puede ser laborioso y suponer un alto coste. Por ese motivo, en este trabajo se ha desarrollado un sistema de monitorización sencillo y de bajo coste basado en la plataforma Arduino para medir los valores de humedad relativa y temperatura. Dicho sistema se ha utilizado en una vivienda céntrica de Madrid, y los datos obtenidos se han comparado con los obtenidos mediante un termohigrómetro comercial, económicamente más costoso. De esta forma se ha comprobado la fiabilidad de nuestro sistema, además de mostrar éste unos valores tanto de temperatura como de humedad que están dentro de los valores de confort reflejados en la normativa actual.

Palabras clave: Bienestar térmico; Arduino; Temperatura; Humedad; Monitorización.

1. INTRODUCCIÓN

El bienestar térmico es, tal y como cita la norma UNE-EN ISO 7730:2006 [1], "aquella condición en la que existe satisfacción respecto del ambiente térmico". En esta misma norma se marcan

la temperatura y la humedad relativa como dos variables influyentes. Además, se ha demostrado que tanto la temperatura como la humedad relativa ambiental juegan un papel importante en muchos de los aspectos de la edificación actual. Prueba de ello es la preocupación actual por la reducción del consumo energético de los edificios y el intento de optimización de sistemas de climatización, ya sean de refrigeración o calefacción [2-6]. Para que estos sistemas funcionen correctamente, o con el fin de comprobar su eficacia, es necesario realizar una monitorización en tiempo real de temperatura y humedad relativa haciendo que estos procesos en el edificio sean lo más eficientes posible.

Dada la importancia de la temperatura y humedad en la edificación actual, en este trabajo se ha desarrollado un sistema de monitorización de bajo coste de estas magnitudes. El coste de este sistema de monitorización es una variable influyente en la decisión de su incorporación al sector residencial. Actualmente, las soluciones comerciales disponibles de monitorización termohigrométrica necesitan de inversiones importantes para su utilización desde el punto de vista del usuario particular. Con sistemas de bajo coste se pretende facilitar la integración de estos sistemas, lo que conlleva una optimización de los recursos energéticos al poseer el usuario información continua sobre su vivienda y poder tomar mejores decisiones energéticas.

El presente trabajo los hemos estructurado en diferentes secciones. La primera de ellas, "Temperatura y humedad", analiza la importancia de dichos parámetros en la edificación. La sección siguiente, "Dispositivo experimental", describe las características del sistema de monitorización de temperatura y humedad de bajo coste desarrollado para este trabajo, así como las características de un sistema de monitorización tradicional de temperatura y humedad. Ambos procesos de monitorización y el lugar y espacio de tiempo común elegido para llevar a cabo dichas monitorizaciones son también descritos en esta sección. En la sección "Resultados y discusión" se comparan y discuten los resultados de temperatura y humedad obtenidos con ambos sistemas de monitorización, apoyando esta discusión con datos numéricos. Finalmente, en la sección "Conclusiones" se destaca la fiabilidad del sistema de bajo coste desarrollado en este trabajo.

2. TEMPERATURA Y HUMEDAD

El confort en el ámbito de la edificación consta de un conjunto de factores que afectan a la calidad del ambiente térmico, acústico, luminoso y la calidad del aire. Sin embargo, la sensación de

bienestar no solo depende de la calidad del ambiente descrito sino, también, de los hábitos, estrés, condición social, nivel cultural e, incluso, de criterios subjetivos debidos a diferencias de sensibilidad entre los individuos [7].

El confort está íntimamente relacionado con el bienestar físico y la comodidad de las personas con las condiciones ambientales como la temperatura, la humedad y el movimiento del aire. Algunos estudios [8-9] establecen un nivel de confort óptimo para las personas cuando la temperatura oscila entre 21 °C y 26 °C, y la humedad relativa está entre el 30 % y el 70 %. Naturalmente estos valores dependen de algunos factores, y en concreto esos datos son válidos para personas vestidas con ropa ligera, a la sombra y relativamente inactivas. Así, para que la temperatura corporal esté alrededor de 37 °C y asegurar el confort térmico, el cuerpo humano debe liberar el exceso de calor mediante radiación, convección, conducción y evaporación, logrando así una temperatura constante en el cuerpo. Se han hecho investigaciones recientes por la *American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE) [10] que indican que los usuarios de edificaciones ventiladas naturalmente se sienten confortables en un mayor rango de condiciones de temperatura y humedad, que la gente habituada al aire acondicionado.

No obstante, aunque las condiciones de temperatura y humedad óptimas para cada persona son aproximadamente constantes, varían de una persona a otra. En España, normalmente, a la hora de confeccionar un proyecto de obra, se suelen adoptar unas condiciones interiores de 25 °C y humedad relativa alrededor de un 50 %. Estas condiciones de confort expuestas, corresponden exclusivamente a verano. Es un hecho comprobado, que las condiciones óptimas de confort son distintas en invierno. Así encontramos que, en invierno, temperaturas superiores a 21 °C o 22 °C suelen ser molestas para la mayoría de los ocupantes. Nuevamente, la humedad que suele ser correcta, se encuentra alrededor del 50 %. En resumen, las condiciones óptimas en invierno normalmente aceptadas son las de 20 °C en temperatura y 50 % de humedad relativa [11], con unas tolerancias de ± 1 °C a 1,5 °C en la temperatura y de $\pm 10\%$ a 15% sobre la humedad relativa [12].

Algunos trabajos como el de Parthasarathy et al. [13] demuestran que la monitorización de temperatura y humedad es también enormemente útil para otros ámbitos como observar la influencia de las emisiones de formaldehído, provenientes de algunos de los materiales utilizados en la construcción de unidades de alojamiento temporal, comprobando que un incremento en la temperatura o en la humedad incrementaban las emisiones.

Otros usos más técnicos para sistemas de monitorización de temperatura y humedad se exponen en el trabajo de Yong Xia et al [14]. En él se lleva a cabo la monitorización sobre una estructura de hormigón para analizar la causa de que el módulo de elasticidad del hormigón se vea deteriorado por un incremento de la temperatura. También demuestran que en el caso la humedad se repite esta relación, un contenido alto de humedad deteriora el módulo de elasticidad por reducciones en las frecuencias naturales.

3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para la monitorización tradicional se ha utilizado un termohigrómetro comercial modelo OPUS 20 y para la monitorización de bajo coste se ha utilizado un dispositivo basado en Arduino. Arduino es un proyecto del Instituto de Diseño Interactivo de Ivrea en Italia. Se basa en la filosofía DIY (*Do It Yourself*, "Hazlo tú mismo"). Además, tiene como ventaja su código abierto donde tanto el software como el hardware son libres [15].

El lugar elegido para llevar a cabo ambas monitorizaciones ha sido una habitación con función de dormitorio de una vivienda en el distrito centro de Madrid, exterior, con una superficie de 12 m2. Existe una conexión al exterior a través de un balcón cuyas puertas tienen doble acristalamiento con rotura de puente térmico.

Los sistemas de monitorización empleados han sido los siguientes: como sistema de monitorización de bajo coste, el sensor AM2302 de la casa Aosong conectado a la placa Arduino UNO; y como sistema de monitorización tradicional el termohigrómetro OPUS 20 CTO, de la casa Lufft. Las características de ambos sensores están especificadas en la Tabla 1.

El funcionamiento de nuestro sistema de monitorización se ha basado en la plataforma Arduino. Para llevar a cabo la monitorización, se ha utilizado una protoboard para facilitar las conexiones entre el sensor y una placa Arduino Uno (rev3) de la casa Arduino. El dispositivo experimental es el mostrado en la Figura 1. Para proporcionar alimentación a la placa y ésta a su vez al sensor de temperatura y humedad AM2302, se ha conectado ésta a un PC mediante un cable USB. Para programar el funcionamiento de la placa ha sido necesaria la instalación del software Arduino, y para visualizar los datos en tiempo real y almacenarlos se ha utilizado el software CoolTerm [16].

El termohigrómetro OPUS 20 funciona de manera autónoma con un sistema de alimentación en corriente continua. Para obtener los datos registrados por este termohigrómetro, ha sido necesaria su conexión al ordenador mediante un cable USB. Mediante el software SmartGraph3, proporcionado por la casa Lufft, se han almacenado los datos en un formato de archivo apropiado para poder trabajar con ellos.

Parámetro		OPUS 20 CTO	AM2302
Temperatura	Rango de medida	-20°C - 50°C	-40°C - 80°C
	Precisión	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ (0°C-40°C); $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (Resto del rango)	0.5°C
	Resolución	0.1°C	0.1°C
Humedad	Rango de medida	0 - 100% HR	0 - 100% HR
	Precisión	$\pm 2\%$	$\pm 2\%$ - 5%
	Resolución	0.1%	0.1%
Consumo		0.02 W	0.01 W

Tabla 1: Comparación de las características de los sensores utilizados

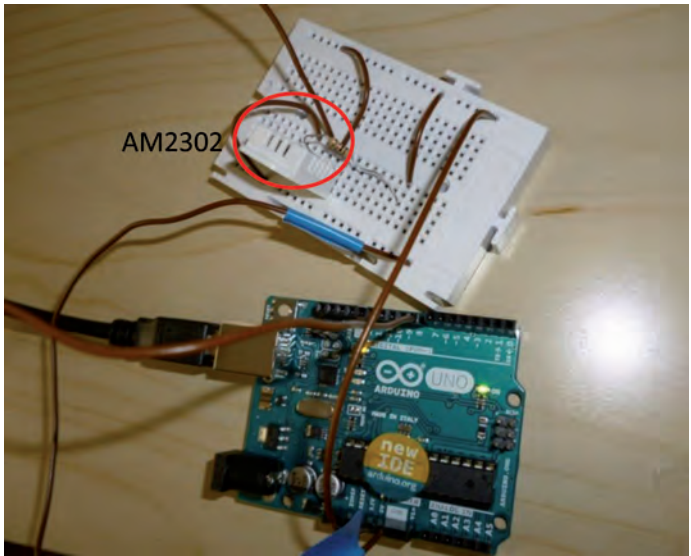


Fig. 1: Dispositivo de monitorización de bajo coste



Fig. 2: Sistemas de monitorización tradicional con el termohigrómetro OPUS20

Se han llevado a cabo monitorizaciones durante un mes de ensayo para confirmar la fiabilidad de este sistema de monitorización. El tiempo de monitorización mostrado en las Figuras 3 y 4 es de 24 horas. De toda la monitorización realizada se ha elegido ese espacio de tiempo porque se ha considerado suficiente para establecer una comparación entre ambos sistemas de monitorización. Todos los periodos ofrecieron resultados similares de comparación por lo que se comenta a continuación el caso más desfavorable, como se verá más adelante.

Este caso se dio durante la monitorización que comenzó el día 4 de marzo a las 20:00 y terminó el día 5 de marzo a las 20:00. En el tiempo que ha durado la monitorización, se ha abierto el balcón en dos ocasiones. La primera, de 12:28 a 12:32. La segunda, a las 19:00 durante un minuto. Por la noche la habitación ha sido usada de dormitorio.

El sistema de monitorización tradicional se ha programado para que recogiera datos de temperatura y humedad cada 2 segundos, y muestre un valor cada 10 min, que resulte de la media de los valores recogidos durante este tiempo. Nuestro sistema de monitorización se ha programado para que recoja datos cada 14 segundos, y se han obtenido una media de grupos de valores cada 10 minutos, a fin de poder comparar de la manera más precisa posible ambos sistemas.

Ambos sistemas de monitorización han sido colocados uno junto al otro (Figura 2) y en el centro de la habitación por ser esta localización una localización válida para medir las condiciones ambientales de una estancia tal y como está recogido en las normas EN ISO 7726 [17] y ASHRAE 55 [10] aunque también queda demostrado por R. Felices [18] y J. Pfafferoth [19] que la situación de los sensores en el perímetro interior del recinto también se considera válido.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de temperatura obtenidos con ambos sistemas, durante el periodo de tiempo más desfavorable (desde las 20:00 del día 04/03/16 hasta las 20:00 del día 05/03/16), se comparan en la Figura 3.

También se muestran a continuación, en la Figura 4, los datos de humedad relativa correspondientes al periodo más desfavorable.

Tanto con el sistema de monitorización tradicional como con el de bajo coste se han detectado los cambios producidos en la temperatura y en la humedad relativa cuando se han abierto las puertas del balcón.

A fin de comparar de la manera más precisa ambos sistemas, en las Figuras 5 y 6 se puede observar los datos recogidos por ambos sistemas de temperatura y humedad relativa respectivamente durante los seis días seguidos, en concreto desde las 20 horas del

29 de abril hasta las 20 horas del 5 de marzo de 2016. Los valores representados son la media horaria calculada a partir de los valores extraídos de ambos sistemas.

Como se puede observar, el trazado en ambas Figuras (5 y 6) es muy similar. Analizando más detenidamente los pares de valores de la monitorización de la temperatura de la estancia, se ha observado que la mayor diferencia entre los valores resultantes de ambos sistemas de monitorización fue de 1,37°C. La mínima

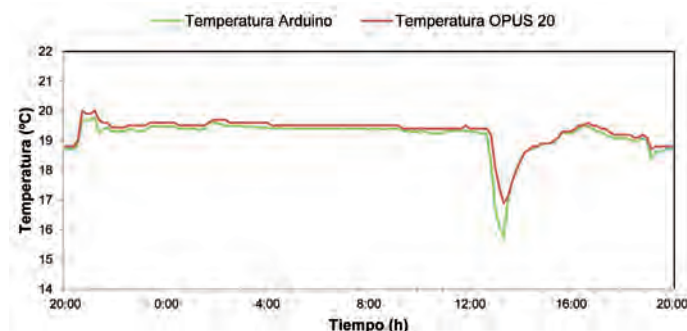


Fig. 3: Comparativa de datos de temperatura en el periodo más desfavorable (04-03-16)

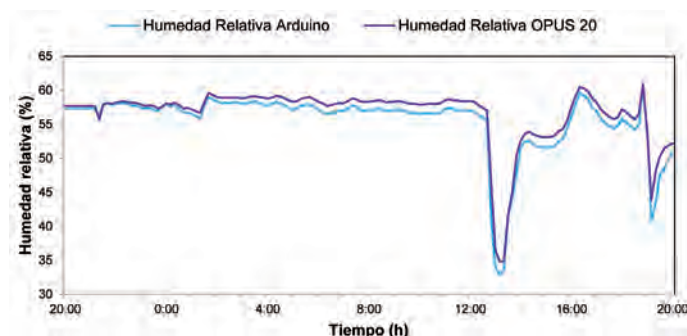


Fig. 4: Comparativa de datos de humedad relativa en el periodo más desfavorable (04-03-16)

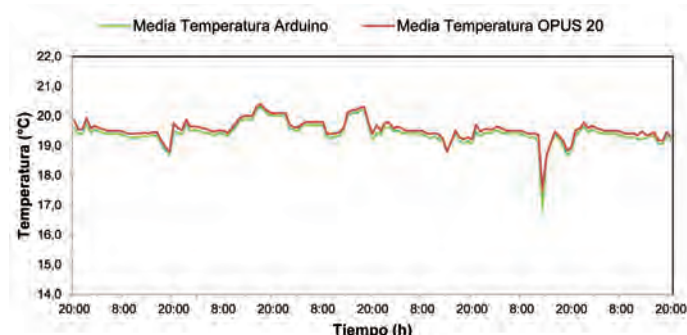


Fig. 5: Comparación de los datos de temperatura obtenidos con ambos sistemas de monitorización durante todo el periodo de monitorización

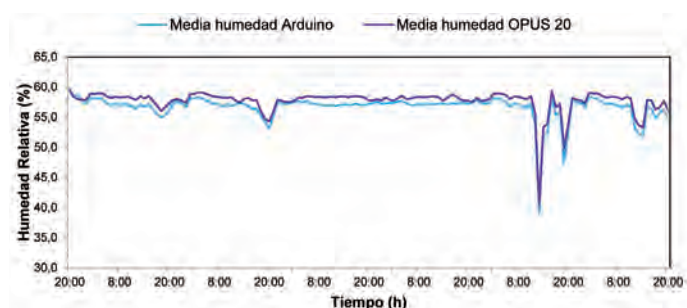


Fig. 6: Comparación de los datos de humedad relativa obtenidos con ambos sistemas de monitorización durante todo el periodo de monitorización

diferencia ha sido de 0. Como medida estadística se ha averiguado la desviación media para las diferencias entre los pares de valores, obtenida mediante la Ecuación (1), resultando ésta ser de 0,08:

$$\frac{1}{n} \sum |x - \bar{x}| \quad (1)$$

donde: n es el número de observaciones, x es la diferencia del par de valores obtenidos por ambos sistemas de monitorización para cada observación y $\bar{x}$ es la media de las diferencias observadas entre dichos pares de valores.

En cuanto a la humedad relativa del aire, la mayor diferencia entre pares de valores de ambos sistemas de monitorización ha sido de 5,36 puntos porcentuales. La mínima diferencia ha sido de 0,004 puntos porcentuales. La desviación media de la diferencia entre los pares de valores (Ecuación (1)) ha sido de 0,44.

Las diferencias observadas entre los valores de ambos sistemas de monitorización han podido ser debidas a que la precisión de los sensores utilizados no es la misma como se puede ver en la Tabla 1. Tanto en temperatura como en humedad relativa, la mayor diferencia se ha dado a las 12:30 del quinto día cuando la estancia estaba siendo ventilada, siendo el sistema de monitorización de coste bajo el que más ha acusado la bajada de los valores en temperatura y humedad relativa.

A la vista de los resultados obtenidos podemos afirmar que estamos dentro de los parámetros establecidos por la norma [12], ya que dicho Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios establece que para el invierno las condiciones óptimas de calidad del aire interior se corresponden con un intervalo de temperatura de 20 °C a 24 °C y un rango de humedad de 40 % a 60 %. Además, se han seguido las directrices marcadas por la norma UNE EN ISO 7730 [1] para las zonas de bienestar situadas en el centro de una habitación, que considera una tolerancia de $\pm 1,5$ °C para la temperatura y de ± 15 % para la humedad.

En la Figura 7 se puede comprobar que la temperatura media obtenida con nuestro dispositivo es de 19.7 °C, con una tolerancia de 0.5°C, y en la Figura 8 la humedad relativa media es de 55 % con una tolerancia del 5 %, lo cual está dentro de los parámetros establecidos por la norma [1].

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema de monitorización de temperatura y humedad de bajo coste que reduce un 90 % el precio con respecto a los comerciales.

Se puede observar del análisis de los resultados que, únicamente se contempla una diferencia un poco más acusada en los cambios bruscos de temperatura entre nuestro sistema y el comercial. Salvo esta circunstancia, las diferencias entre mediciones de ambos sistemas son prácticamente despreciables.

Por ello, se ha demostrado que el sistema implementado, puede ser una solución totalmente fiable para el usuario final de viviendas y utilizarse para la monitorización de temperatura y humedad relativa en éstas. Además, dicha información puede ser muy útil para la realización de estudios energéticos que integren medidas de mejora energéticas en viviendas, previsión de fallos en las instalaciones de climatización del interior de la vivienda o, sencillamente, para proveer al usuario de información real y directa de su confort térmico.

BIBLIOGRAFÍA

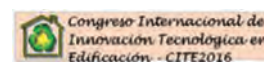
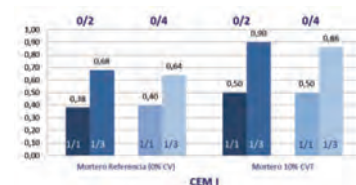
- [1] AENOR. Norma Española UNE-EN-ISO 7730, de octubre de 2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.
- [2] Wang Y, Kuckelkorn J, Zhao FY, Liu D, Kirschbaum A, Zhang JL. "Evaluation on classroom thermal comfort and energy performance of passive school building by optimizing HVAC control systems". Building and Environment. 2015. Vol. 89. p.86-106.
- [3] Morón C, García A, Ferrández D, Hosokawa K. "Acondicionamiento Pasivo de una Vivienda en la Sierra de Madrid = Passive Conditioning of a Building in Sierra of Madrid". Anales de edificación. 2015. Vol. 1-1. p.7-15.
- [4] de Pereda Fernández L. "Modelo de actuación para la mejora de la eficiencia energética en la Rehabilitación Integral de un palacete protegido para oficinas de la Administración en Madrid. Geotermia y estructuras termoactivas". Anales de edificación. 2015. Vol. 1-2. p.1-9.
- [5] Ávila-Delgado J, Robador MD, Barrera JA, Marrero M. "Influencia del acristalamiento sobre los parámetros y la calificación energética de acuerdo con la orientación del edificio y los porcentajes de aberturas de fachada = The influence of glazing over the parameters and energy rating according to the building orientation and the façade openings percentages". Anales de edificación. 2016. Vol. 2-1. p.34-37.
- [6] Sánchez D, Sánchez-Guevara C, Rubio C. "El enfoque adaptativo del confort térmico en Sevilla = The adaptive approach to thermal comfort in Seville". Anales de edificación. 2016. Vol. 2-1. p.38-48.
- [7] www.afec.es/es/plandecalidad/Plan_de_Calidad/parambienestar.PDF (última consulta: 6/12/2016).
- [8] A. 2012, 12. Confort y clima. Revista ARQHYS.com. Obtenido 12, 2016, de <http://www.arqhys.com/construccion/confort-clima.html>.
- [9] Solana Martínez, L.: "La percepción del confort. Análisis de los parámetros de diseño y ambientales mediante Ingeniería Kansei: Aplicación a la biblioteca de Ingeniería del Diseño (UPV)". Trabajo Fin de Grado. Universitat Politècnica de València, Junio 2011. p.1-83.
- [10] ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- [11] <http://www.aireacondicionadoclima.com/2013/01/condiciones-optimas-de-confort.html> (última consulta: 6/12/2016).
- [12] RITE 1751/1998 (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios) en ITE 02.2.1.-Bienestar térmico.
- [13] Parthasarathy S, Maddalena RL, Russell ML, Apte MG. "Effect of Temperature and Humidity on Formaldehyde Emissions in Temporary Housing Units". J. Air Et Waste Manage. Assoc. 2011. Vol. 61. p.689-695.
- [14] Xia Y, Hao H, Zanardo G, Deeks A. "Long term vibration monitoring of an RC slab: Temperature and humidity effect". Engineering Structures. 2006. Vol. 28. p.441-452.
- [15] <http://www.arduino.cc/> (última consulta: 5/3/2016).
- [16] <http://freeware.the-meiers.org> (última consulta: 5/3/2016).
- [17] Norma EN ISO 7726:2001. Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities (ISO 7726:1998).
- [18] Felices Puértolas R, Viñas Arrebola C, Losada González JC. "General methodology applied to monitoring a building to assess its energy performance". III International Congress on Construction and Building Research. Madrid, Spain, December 2015.
- [19] Pfafferoth J, Herkel S, Wambsganß M. "Design, monitoring and evaluation of a low energy office building with passive cooling by night ventilation". Energy and Buildings. 2004. Vol. 35. p.455-465.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por la Universidad Politécnica de Madrid.

Inertización y valorización de cenizas volantes de residuos sólidos urbanos para la fabricación de morteros de cemento

Inerting and valorization of fly ash from solid urban waste for cement mortar production



Óscar López-Zaldívar, Rafael Vicente Lozano-Díez, Amparo Verdú-Vázquez, Tomás Gil-López

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Dpto. Tecnología de la Edificación. Avda. Juan de Herrera, 6 - Madrid 28040.

Tfno: +34 91 336 75 99. oscar.lopezz@upm.es

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8196> | Recibido: 04/11/2016 • Evaluado: 04/11/2016 • Aceptado: 11/01/2017

ABSTRACT

- This article expands upon the results of previous research into inerting fly ash from urban solid waste and its encapsulation in mortar matrices. Given the heterogeneous composition of the MSWIFA, it was decided to replicate the inerting process with NaHCO_3 in order to prove its efficiency. The results are conclusive, reducing the chloride content by close to 99%. Mortars were produced using two different types of cement (CEM-I and CSA) and incorporating treated fly ash using a substitution percentage of 10% in weight of the aggregate used. The physical and mechanical properties have been obtained through workability, dimensional stability, density and mechanical strength tests. The conclusions drawn are that CSA mortars containing inerted fly ash and coarser aggregates (0/4) improve the reference compressive strengths by more than 11% while bending resistance remains unaltered. These types of mortar also have a reduced workability period and better dimensional stability than the reference mortars and those containing fine aggregates (0/2).
- Keywords:** Fly ash; Solid urban waste; Mortars; Sulfoaluminate cement; Immobilization; valorization.

RESUMEN

Este artículo amplía los resultados de una investigación previa sobre la inertización de cenizas volantes de residuos sólidos urbanos y su encapsulación en matrices de morteros de cemento. Dada la heterogeneidad en la composición de las cenizas volantes, se ha reproducido el proceso de inertización con NaHCO_3 . Los resultados son concluyentes y confirman la validez del mecanismo de inertización obteniendo una reducción del contenido en cloruros cercana al 99%. Se han elaborado morteros con dos tipos de cementos (CEM-I y CSA), granulometrías de árido de 0/4 e incorporando las cenizas volantes inertizadas como "filler", asimilando un 10% en peso del árido y añadiéndolo a la mezcla como sustitución de parte del árido. Se han analizado las propiedades físicas y mecánicas de los morteros a través de ensayos de trabajabilidad, estabilidad dimensional, densidad y ensayos de resistencia. Las conclusiones demuestran que los morteros elaborados con CSA y áridos con granulometrías 0/4 mejoran las resistencias mecánicas a compresión en más de un 11% con respecto a los morteros de referencia, superando los resultados de investigaciones previas. Las resistencias a flexión permanecen prácticamente inalteradas. Asimismo,

los morteros de CSA con áridos de granulometría 0/4 y con cenizas volantes inertizadas reducen el periodo de trabajabilidad y tienen una mejor estabilidad dimensional que sus homólogos de granulometría 0/2 y que sus morteros de referencia.

Palabras clave: Cenizas volantes; Residuos Sólidos Urbanos; Morteros, Inmovilización, Valorización, Cementos de Sulfoaluminato de Calcio.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En el proceso de incineración de residuos sólidos urbanos (RSU), un 75% del producto generado son gases de combustión, mientras que el 25% restante es remanente sólido. De esta cantidad, el 21 % son escorias y cenizas de fondo, mientras que el 4% restante correspondería a cenizas volantes (CV) [1] que acompañan a los gases de combustión y se caracterizan por su toxicidad, poco peso y una distribución granulométrica fina (1-1000µm, con más de la mitad por debajo de 65µm) [2].

El creciente interés en la valorización de residuos [3,4], junto a investigaciones que demuestran que la estabilización/solidificación de las CV en morteros de cemento representa una manera segura de inertizar y reutilizar estos materiales peligrosos [5] son la base de la presente investigación. Sin embargo, esos mismos estudios destacan que la resistencia mecánica de los morteros resultantes se ve claramente afectada en comparación a los morteros de referencia. Por este motivo se ha decidido utilizar Cementos de Sulfoaluminato de Calcio (CSA), ya que su combinación con CV presenta tres hipótesis de trabajo muy interesantes:

- La aparición de etringita en las fases tempranas provoca un rápido endurecimiento del producto con elevadas resistencias iniciales superiores a los cementos Portland ordinarios [6].
- Las CV de RSU son ricas en sulfuros y cloruros. Éstos pueden reaccionar con el sulfoaluminato de calcio y generar productos principales en la hidratación, como etringita y sales de Friedel, para formar una matriz conjunta [7].
- La matriz de los productos derivados del CSA muestra excelentes comportamientos en el lixiviado de metales pesados [8].

Este artículo es continuación de una investigación [9] en la cual se estudia el efecto de la incorporación de CV de RSU inertizadas en forma de carbonatos en las propiedades físico/mecánicas de morteros de cemento elaborados con diversas formulaciones (cemento/árido 1/1 y 1/3) y tipos de árido (granulometría fina 0/2).

La novedad de la investigación aquí presentada radica en la utilización de áridos con granulometrías gruesas (0/4) con la intención de analizar su impacto en el comportamiento mecánico de los morteros. Dado el carácter heterogéneo en la composición de las CV de RSU, se ha procedido a replicar el proceso de inertización de las CV según la investigación mencionada, para comprobar la eficacia de la técnica de inertización desarrollada con bicarbonato sódico.

Todo ello se enmarca dentro del objetivo fundamental de la investigación: la eliminación de un residuo tóxico y peligroso formado por CV de RSU, mediante su encapsulación en morteros de cemento, con la intención de mantener o mejorar sus prestaciones físico/mecánicas.

2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

2.1. METODOLOGÍA

Los morteros analizados fueron amasados según la Norma Europea EN 196-1. Se ha considerado estudiar la incidencia del uso de dosificaciones distintas a las establecidas por dicha Norma y su repercusión en los comportamientos físicos y mecánicos de los morteros resultantes. Así, además de los morteros tradicionales de albañilería (relación cemento/árido 1/3), se han confeccionado morteros ricos en cemento (relación cemento/árido 1/1). La incorporación de CV de RSU inertizadas modifica cualitativamente las diversas mezclas, no así cuantitativamente, ya que todas las dosificaciones se obtienen en proporción al peso de los distintos elemento. Según la bibliografía consultada [10,11,12], la incorporación de las CVT se realiza mediante la sustitución de un 10% en peso de parte del árido.

2.1.1. Mortero fresco (UNE-EN196.1)

Para favorecer la comparación entre los morteros se estudió su relación agua/cemento con el fin de mantener la misma trabajabilidad. Se llevó la consistencia de todas las muestras a un valor de escurrimiento de 175 ± 10 mm (EN-1015-3:2000).

Asimismo, se definió el periodo de trabajabilidad en minutos de las muestras (EN-1015-9:2000).

2.1.2. Mortero endurecido

Se ha realizado el estudio de la estabilidad dimensional de las probetas (EN-83831:2010-EX) caracterizado por el análisis de las longitudes y masas iniciales de las probetas de mortero y la variación específica de las mismas, en porcentaje de deformación, a 7, 14 y 28 días. De igual forma, se determinan las densidades medias aparentes en seco de los morteros (EN-1015-10:2000).

Por último, la determinación de la resistencia a flexión y a

compresión del mortero endurecido se ha analizado a 7, 28, 60 y 90 días, según la aplicando de la Norma UNE-EN 1015-11.

2.2. MATERIALES

2.2.1. Cementos

- Cemento Portland, Tipo I 52,5 R (CEM-I)
- Cemento de Sulfoaluminato de Calcio (CSA).

2.2.2. Áridos

Se utiliza una arena sílicea lavada de diámetros 0/2mm y 0/4mm. Ambos diámetros cumplen con la norma UNE-EN-13043:2003/AC:2004 de áridos para morteros con el correspondiente certificado AIDICO de control de producción en fábrica.

2.3. CENIZAS VOLANTES

Las CV de RSU proceden de la planta de tratamiento integral de residuos de Mataró, Barcelona (España), que realiza el proceso de incineración en un horno de parrilla.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. PROCESO DE INERTIZACIÓN Y VALORIZACIÓN DE LAS CV DE RSU

El proceso de inertización comienza con la búsqueda de los posibles reactivos a utilizar. Para ello se ha revisado en la bibliografía los diferentes aniones que reaccionarían con los metales pesados presentes y que generarían un precipitado insoluble [13]. Se estima que el reactivo que mejor estabiliza al ion Cl⁻, es el anión carbonato y se establece la utilización de bicarbonato sódico (NaHCO₃) como un método viable de inertizado. La adición del ion Na⁺ facilitará, además, que en el proceso de lavado de las CV, se elimine una gran cantidad de cloruros en forma de cloruro sódico. La Tabla 1 muestra los resultados del lavado de las cenizas en el que se consigue una drástica reducción del contenido de cloruros en valores cercanos al 99%.

3.2. DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE AGUA DE LOS MORTEROS

Por la importancia que las relaciones agua/cemento tienen en las resistencias finales, se incorpora la Figura 1 de la investigación

Elementos primarios (%)		
	CV	CVT
Cl ⁻ solubles	10,82±1,53	0,12±0,01

Tabla 1: Análisis químico ICP-OES de las CV de RSU y de las cenizas inertizadas (CVT)

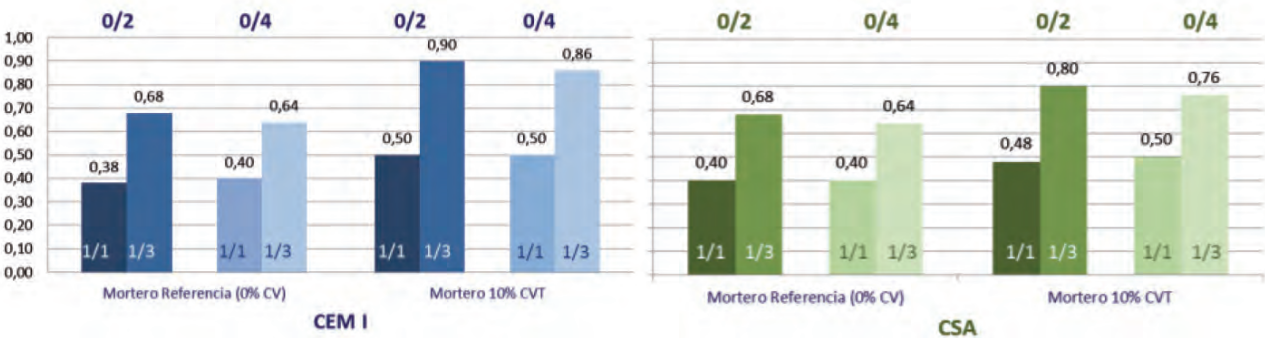


Figura 1: En el eje vertical se presenta la relación óptima agua/cemento para los morteros elaborados con CEM-I y CSA. Consistencia del mortero para un valor de escurrimiento 175 ± 10 mm según EN 1015-3:2000. [9]

inicial [9]. La incorporación de CVT aumenta el agua necesaria para mantener la trabajabilidad de la masa, aunque en menor cantidad para los morteros con áridos 0/4. Este aumento se explica por la incorporación de una mayor cantidad de finos (en forma de partículas de calcita $\text{-CaCO}_3\text{-}$), las cuales originan un aumento de la superficie específica del árido [14]. Esto es un condicionante negativo en los morteros porque una mayor relación agua/cemento, reduce la resistencia a compresión de los mismos [15] y puede suponer un inconveniente en la encapsulación de las CV de RSU al favorecer el lixiviado de metales pesados [16]. Por el contrario, los morteros CSA requieren una menor cantidad de agua, con lo que su comportamiento sería beneficioso de cara a mejorar dichos factores.

3.3. DETERMINACIÓN DEL PERIODO DE TRABAJABILIDAD

La Tabla 2 muestra que los morteros CEM-I con CVT, presentan un incremento en sus tiempos de fraguado. Este efecto retardador de las CVT es probablemente causado por las cantidades de P, Zn y Pb de las CV. Los datos vienen a corroborar investigaciones previas según las que los tiempos de fraguado, se ven incrementados cuando la adición de CV llega a valores de un 15% en peso [17]. Por otra parte, la incorporación de estos finos (en forma de partículas de calcita) generan una mayor superficie aparente en los áridos utilizados. De igual forma, la incorporación de CV es comúnmente asociada a mayores requerimientos de agua de ama-

sado lo cual implica un aumento en los tiempos de curado de los morteros [18]. Por el contrario, la presencia de CVT actúa como un acelerador del fraguado ya que los hidratos producidos se comportan como partículas cristalinas que aceleran la hidratación temprana del cemento y su cristalización [19]. También la existencia de Zn o Pb, dependiendo de la cantidad de yeso presente, puede facilitar los procesos de hidratación y reducir los tiempos de fraguado [20].

3.4. ESTABILIDAD DIMENSIONAL

La Figura 2 normaliza el comportamiento dimensional de los morteros ensayados. Los valores mostrados corresponden al cociente entre las distintas longitudes y masas específicas de los morteros con la incorporación de CVT (calculados como media de los valores para cada edad), y los valores de referencia de los mismos morteros sin adiciones, a esas mismas edades. Así se consigue determinar qué morteros presentan mejores estabilidades dimensionales tanto a deformación, como a pérdida de masa (contracción menor que 1 y expansión mayor que 1). Los mejores resultados en cuanto a deformación a 28 días, se obtienen para los morteros elaborados con CSA (0/2-1/1 y 1/3 y 0/4-1/1). De igual forma, los valores óptimos en estabilidad de masa específica se obtienen para los morteros de CSA en dosificaciones 0/4-1/1. De esta forma, los morteros CSA (0/4-1/1) presentan los mejores valores de estabilidad dimensional de entre todos los analizados.

Cemento	Tamaño del árido (mm)	Dosificación	Trabajabilidad del mortero en minutos	
			R(0%)	CVT(10%)
CEM I	0/2 · 0/4	1/1	193 · 170	205 · 196
		1/3	248 · 250	280 · 320
CSA	0/2 · 0/4	1/1	<15	<15
		1/3	<15	<15

Tabla 2: Periodo de trabajabilidad (en minutos) de los morteros ensayados

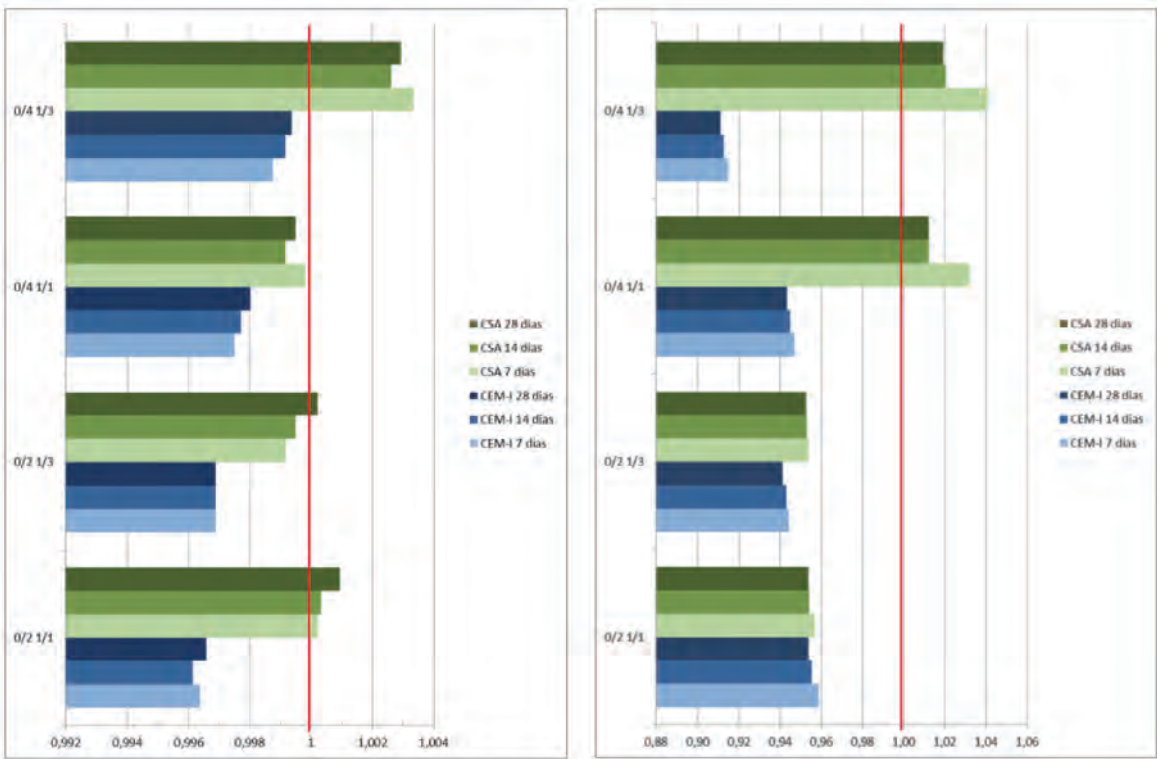


Figura 2: Normalización de resultados de la variación de la longitud específica o deformación (ϵ) [izda] y de la variación de la masa específica (m) [dcha], a 7, 14 y 28 días de cada dosificación ensayada. Los valores mostrados corresponden al cociente entre los distintos valores de los morteros (longitud y masa específica) con la incorporación de CVT, en cada una de las edades, y los valores de referencia de los morteros sin adiciones, a esas mismas edades. [CEM-I (azul). CSA (verde)]

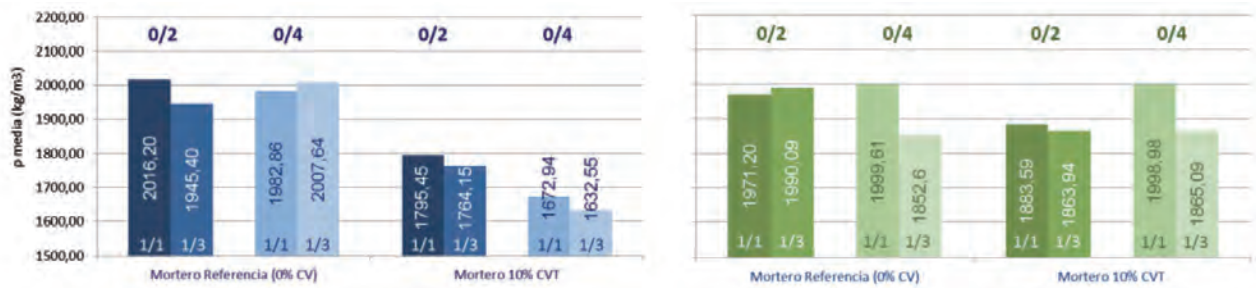


Figura 3: Densidad media aparente en seco, en kg/m3, de los morteros de CEM-I (azul) y CSA (verde)

Son especialmente negativos los resultados de los morteros CEM-I, debido a que el alto contenido en cloruros y sulfatos de las CV de RSU, favorecen la formación de grandes cantidades de etringita y cloroaluminatos, los cuales movilizan gran cantidad de moléculas de agua. La formación temprana de cualquiera de estos hidratos podría explicar las contracciones de morteros que contuvieran CV en fases tempranas. Esa extracción del agua de la pasta de cemento para crear etringita primaria produce retracciones y microfisuración temprana en el cemento hidratado próximo, especialmente si la presencia de CV contribuyen a la formación de los correspondientes productos de hidratación.

3.5. DENSIDAD APARENTE EN SECO DEL MORTERO ENDURECIDO

La Figura 3 muestra los resultados del cálculo de la densidad media aparente en seco de los morteros, siendo todos valores muy homogéneos. La incorporación de CVT a morteros de CEM-I provoca una reducción de la densidad que varía entre un 9,31%, para dosificación 1/3 y tamaño de árido 0/2; hasta un 18,68% para los de la misma dosificación, pero con un árido de mayor diámetro (0/4).

En morteros CEM-I, las densidades disminuyen cuanto mayor es el tamaño del árido y cuanta más cantidad de finos se utilizan en su elaboración. Esto está relacionado con los índices de agua

requerida para el amasado de las mezclas. Los morteros con CVT requieren mayor cantidad de agua, lo cual afecta negativamente a la porosidad de las matrices.

En el caso de los morteros CSA con CVT y áridos de mayor tamaño (0/4), se han conseguido densidades similares a los de los morteros de referencia. El aumento de agua de amasado, no incide directamente en la porosidad del material ya que los resultados no difieren llamativamente si los comparamos con los morteros de referencia. En morteros con dosificación 1/3, la diferencia con el mortero de referencia es de un +0,67%, mientras que en el caso de la dosificación 1/1, esta diferencia es de sólo un -0,03%. La rápida formación de cristales de etringita desarrolla una microestructura de la matriz perfectamente definida [21] lo cual provoca que la inclusión de CVT en los morteros CSA y dosificación 0/4 no afecte a su densidad.

Por el contrario, la disminución del tamaño del árido produce una disminución en la densidad del mortero seco que va desde un 4,44%, para dosificaciones 1/1, a un 6,34% en 1/3. La mayor cantidad de agua de amasado que requieren estos morteros y el efecto relleno que tienen las CV [22] causan una reducción de la densidad en morteros con mayor cantidad de áridos y más finos.

3.6. RESISTENCIAS

La Tabla 3 muestra los resultados de rotura a flexión de los morteros CEM-I. A pesar de ser muy homogéneos, resultan menos desfavorables cuanto mayor cantidad de árido tiene la mezcla (1/3). La mejor dosificación se corresponde con la de los morteros CEM-I-0/2-1/3, en los que la pérdida de resistencia a flexión entre el mortero de referencia y el mismo mortero con CVT, es un 17,06%. Los valores de tensión a flexión con la incorporación de CVT, son los que peores resultados presentan en relación a sus morteros de referencia.

Por otra parte, la incorporación de CVT reduce en aproximadamente una quinta parte, las tensiones de rotura a compresión. Las cantidades de portlandita presentes en las CV de RSU originales no tiene ningún efecto en los morteros analizados, ya que el tratamiento efectuado a través del lavado con bicarbonato sódico (NaHCO₃) produce una transformación de los hidróxidos en carbonatos, especialmente carbonato cálcico (CaCO₃), el cual es inerte. Las pérdidas de resistencia tienen su explicación en que las partículas de CVT son puntos débiles en la matriz del mortero. De igual manera, se ha demostrado [23] que la reactividad entre las mezclas de pastas de cemento y las CV son especialmente débiles. Por otro lado, esta reducción de las propiedades mecánicas es atribuible al alto grado de agua necesaria para su amasado. También es conocido que el contenido de CaCO₃ puede incrementar el contenido en aire de las mezclas lo que, una vez más, puede provocar una reducción de las resistencias a compresión [24].

Los morteros de CSA con CVT y con mayor cantidad de áridos, tienen un mejor comportamiento a flexión que aquellos con dosificaciones más ricas. De igual forma, los morteros CSA-1/3 son los únicos que mejoran los valores de referencia en su comportamiento

Dosificación	%CVT	Tensión de rotura a flexión	Tensión de rotura a compresión
CEM-I-0/2-1/1 R(0%)		10,91	86,46
CEM-I-0/2-1/3	CVT 10%	8,78 (-19,50%)	69,42 (-19,71%)
	R(0%)	8,80	44,35
CEM-I-0/4-1/1	CVT 10%	7,30 (-17,06%)	33,07 (-25,44%)
	R(0%)	10,48	84,83
CEM-I-0/4-1/3	CVT 10%	8,11 (-22,60%)	68,76 (-18,95%)
	R(0%)	8,41	47,11
CSA-0/2-1/1	CVT 10%	6,67(-20,71%)	36,63 (-22,24%)
	R(0%)	9,09	67,70
CSA-0/2-1/3	CVT 10%	5,73 (-36,96%)	64,40 (-4,88%)
	R(0%)	5,05	28,90
CSA-0/4-1/1	CVT 10%	5,10 (+1,15%)	31,21 (+8,01%)
	R(0%)	8,83	67,28
CSA-0/4-1/3	CVT 10%	5,60 (-36,58%)	58,80 (-12,60%)
	R(0%)	5,37	32,84
	CVT 10%	5,29 (-1,37%)	36,74 (+11,89%)

Tabla 3: Valores medios de tensión de rotura a flexión y a compresión a 90 días, en N/mm2. En verde, porcentaje comparativo de ganancia de resistencias. En rojo, porcentaje de pérdida de resistencias

a compresión. La investigación demuestra que, durante el proceso de hidratación, una mayor cantidad de áridos y de mayor diámetro, favorece la porosidad y, por lo tanto, a la carbonatación del mortero, la cual incide de manera positiva a la resistencia mecánica de los mismos. A todo ello hay que añadir que los CSA presentan claros beneficios en comparación con los cementos Portland. En primer lugar, la aparición de etringita en las fases tempranas tiene como consecuencia un rápido endurecimiento del producto, lo cual confiere a los morteros elaborados con este tipo de cementos una elevada resistencia inicial y resistencias finales superiores a los cementos Portland ordinarios [6]. En segundo lugar, la combinación con CV de RSU, ricas en sulfuros y cloruros, provocan su reacción con el sulfoaluminato de calcio presente en el cemento y generan productos principales en la hidratación del cemento como etringita y sales de Friedel, para formar una matriz conjunta que favorece la estabilización/solidificación del residuo en su matriz.

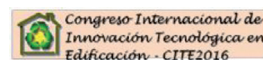
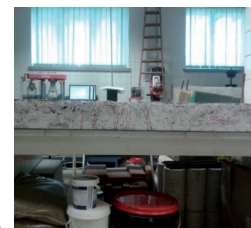
4. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos tras el lavado de las CV de RSU con NaHCO_3 son concluyentes y han servido de ayuda para la comprobación de la validez del mecanismo de inertización desarrollado previamente. El porcentaje de cloruros se reduce en un 98.89%.
- La elaboración de morteros de albañilería con la incorporación de CV inertizadas en forma de carbonatos, en una proporción de sustitución de un 10% en peso de los áridos, es técnicamente posible. Se trata de un método viable para conseguir la estabilización/solidificación de este residuo.
- Los morteros elaborados con cementos CSA con la inclusión de CVT y una dosificación de árido 0/4 muestran periodos de trabajabilidad similares a aquellos realizados con áridos finos (0/2). Por el contrario, éstos son mucho más cortos que los ofrecidos por los morteros de cemento Portland en todas sus dosificaciones.
- Los morteros de CSA con CVT y árido 0/4 en su dosificación presentan los mejores valores de estabilidad dimensional, obteniendo mejores valores que los ofrecidos por los morteros referencia.
- Las densidades de los morteros de CSA y áridos 0/4 no se ven afectadas por la inclusión de CVT, al contrario de lo ocurrido en el resto de morteros ensayados.
- La incorporación de CVT afecta negativamente a los valores medios de tensión de rotura tanto a compresión, como a flexión, de los morteros CEM-I en cualquiera de sus dosificaciones y tipo de árido utilizado.
- Los morteros CSA con CVT, árido 0/4 y dosificaciones árido/cemento 3/1 presentan resistencias a compresión un 11,89% superiores a sus morteros de referencia. Este dato supera a los de investigaciones previas con áridos finos. Estos resultados quedan acreditados en la Patente de Invención con examen previo ES 2470568 B2 [25].
- La utilización de cementos belíticos para la encapsulación de CV de RSU inertizadas es más favorable, desde el punto de vista de las resistencias, que la cementos con base de alita, con el consiguiente beneficio ambiental que conlleva.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sabbas, T., Poletti, A., Pomi, R., Astrup, T., Hjelmar, O. & Mostbauer, P. (2003). Management of municipal solid waste incineration residues. *Waste Management*, 23(1), 61-88.
- [2] Ribeiro, A., Mateus, E., Lima, A.T., García Rubio, A., Vereda Alonso, C. & Gómez Lahoz, C. (2008). Flying ash from solid urban waste incinerators: Treatment and applications. *Ingeniería Química* 40(460), 110-122.
- [3] Hidalgo-Barrio, M., Martín-Marroquin, J., Gómez-Rincón, M., Aguado-Pesquera, A., Antolín-Giraldo, G. (2014). Integral and sustainable system for multi-waste recycling and valorisation - revawaste project. *DYNA*, 89(3), 309-315. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6975>
- [4] Alameda, L.; Calderón, V.; Gadea, J.; Gutiérrez-González, S. Recycling of gypsum plasterboard lightened with polyurethane waste. *Anales de Edificación*, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 33-39, mayo 2015. ISSN 2444-1309. doi: <http://dx.doi.org/10.20868/ade.2015.3037>.
- [5] Mangialardi, T., Panei, L., & Piga, L. (2004). Cement-based immobilisation of municipal incinerator fly ash and reuse of solidified products as a construction material. *Waste Management and the Environment II*, pp. 35-44.
- [6] Péra, J., & Ambroise, J. (2004). New applications of calcium sulfoaluminate cement. *Cement and Concrete Research*, 34(4), 671-676.
- [7] Suryavanshi, A. K., Scantlebury, J. D., & Lyon, S. B. (1996). Mechanism of Friedel's salt formation in cements rich in tri-calcium aluminate. *Cement and Concrete Research*, 26(5), 717-727.
- [8] Peysson, S., Péra, J., & Chabannet, M. (2005). Immobilization of heavy metals by calcium sulfoaluminate cement. *Cement and Concrete Research*, 35(12), 2261-2270.
- [9] López-Zaldívar O, Mayor-Lobo P, Fernández-Martínez F, Hernández-Olivares F. (2015) Improved cement mortars by addition of carbonated fly ash from solid waste incinerators. *Materiales de Construcción* 2015;65(319):e062.
- [10] Rémond S, Pimienta P, Bentz DP. (2002) Effects of the incorporation of Municipal Solid Waste Incineration fly ash in cement pastes and mortars: I. Experimental study. *Cem Concr Res* 2002;32(2):303-311.
- [11] Cinquepalmi MA, Mangialardi T, Panei L, Paolini AE, Piga L. (2008) Reuse of cement-solidified municipal incinerator fly ash in cement mortars: Physico-mechanical and leaching characteristics. *J Hazard Mater* 2008;151(2-3):585-593.
- [12] Lima AT, Ottosen LM, Ribeiro AB. (2012) Assessing fly ash treatment: Remediation and stabilization of heavy metals. *J Environ Manage* 2012;95(SUPPL):S110-S115.
- [13] Chang, J. C. (1990) Solubility product constants. CRC handbook of chemistry and physics. (71st Edition, ed.). Boca Raton, FL.
- [14] Aubert, J. E., Husson, B., & Sarramone, N. (2006). Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement. Part 1: Processing and characterization of MSWI fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 624-631.
- [15] Mangialardi, T., Paolini, A. E., Poletti, A., & Sirini, P. (1999). Optimization of the solidification/stabilization process of MSW fly ash in cementitious matrices. *Journal of Hazardous Materials*, 70(1-2), 53-70.
- [16] Coutand, M., Clastres, P., Cyr, M. (2011) Quantification of uncertainty of experimental measurement in leaching test on cement-based materials. *Journal of Environmental Management*. Volume 92, Issue 10, October 2011, Pages 2494-2503
- [17] Siddique, R. (2010). Utilization of municipal solid waste (MSW) ash in cement and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1037-1047.
- [18] Wesche, K. (1991). Fly ash in concrete: Properties and performance (Technical Committee No. 67). FAB: Use of fly ash in building: Chapman & Hall, London.
- [19] Fan, Y., Yin, S., Wen, Z., & Zhong, J. (1999). Activation of fly ash and its effects on cement properties. *Cement and Concrete Research*, 29(4), 467-472.
- [20] Wei, G., Liu, H. & Zhang, S. (2011). Using of different type cement in solidification/stabilization of MSWI fly ash. *Advanced Materials Research*. Vols. 291-294. Pp 1870-1874.
- [21] Irico, S., Gastaldi, D., Canonico, F., & Magnacca, G. (2013). Investigation of the microstructural evolution of calcium sulfoaluminate cements by thermoporometry. *Cement and Concrete Research*, 53(0), 239-247.
- [22] García-Maté, M., De la Torre, A. G., León-Reina, L., Aranda, M. A. G., & Santacruz, I. (2013). Hydration studies of calcium sulfoaluminate cements blended with fly ash. *Cement and Concrete Research*, 54(0), 12-20.
- [23] Kessler, B., Rollet, M., & Sorrentino, F. (1992). Microstructure of cement pastes as incinerator ash host. *Proceedings of the First International Symposium on Cement Industry Solution to Waste Management*. Calgary. pp. 235-251.
- [24] Goh, C. C., Show, K. Y., & Cheong, H. K. (2003). Municipal solid waste fly ash as a blended cement material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Nov/Dec, 513-523.
- [25] López-Zaldívar, O., Mayor-Lobo, P.L., Fernández-Martínez, F. and Hernández-Olivares, F. (2014). Improvement of calcium sulfoaluminate cement mortar using inerted solid urban waste fly ash in the form of carbonates. *ES 2 470 568 B2*.

Estudio experimental comparativo del comportamiento a flexión de un hormigón ligero estructural frente a un hormigón convencional en función de la cuantía de acero



Experimental compared study of bending behaviour of a lightweight concrete against a regular concrete according to the steel quantity



Fernando Israel Olmedo Zazo, Fidel Carrasco Andrés, Pilar de la Rosa García, Julián García Muñoz

Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid Avda. Juan de Herrera, nº 6 – 28040 Madrid. Tfno: +34 336 201826. fiolmedoz@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8199> | Recibido: 04/11/2016 • Evaluado: 07/11/2016 • Aceptado: 11/01/2017

ABSTRACT

- Conventional thermogravimetric analysis requires small sample volumes to perform the experiments and, in the case of concrete, it is very difficult to take into account the effects of aggregates and moisture migration during tests. In the present work, an experimental methodology inspired in thermogravimetric methods was developed. The methodology proposed permits to assess the behaviour of small concrete samples exposed to a fast unidirectional heating, taking into account the effects of aggregates and moisture.
- **Key Words:** concrete, experimental methodology, materials characterization, fire, physic-chemical transformation.

RESUMEN

En este trabajo se han ensayado a flexión hasta rotura vigas fabricadas con hormigón ligero y con hormigón convencional con dos cuantías muy distintas de armado. Los resultados obtenidos permiten afirmar que las vigas de la misma cuantía poseen un comportamiento muy similar, independientemente del tipo de hormigón utilizado. Además se han comparado los resultados alcanzado experimentalmente con los resultados analíticos obtenidos empleando el Código Modelo (CM-2010) y la Instrucción de Hormigón Estructural Española (EHE)

Palabras Clave: hormigón, hormigón ligero, rigidez, ductilidad normativa, caracterización de materiales, incendio, transformaciones físico-químicas.

1. INTRODUCCIÓN

La distribución o el flujo de tensiones en el interior de un Hormigón Ligero Estructural (HLE) difieren enormemente del flujo en un Hormigón Convencional (HC). En los hormigones ligeros (HL) el mortero es más rígido que el árido grueso, en el hormigón convencional (HC) sucede lo contrario. Debido a esto, en un HC las tensiones de compresión se transmiten preferentemente siguiendo el camino de la grava, mientras que en el HL las tensiones viajan por el mortero que rodea la grava [1].

Las diferencias de comportamiento entre el HLE y el HC se incrementan cuando se utilizan diferentes tipos de árido. Desde la normalización del uso del HLE como material de construcción se han realizado numerosos estudios del comportamiento a flexión

atendiendo a diferentes aspectos teóricos como la adherencia [2], el tamaño y la forma del elemento resistente [3], el tamaño máximo del árido [4], la ductilidad de la sección [5], o la forma en que se aplica la carga en ciclos [6].

También se han hecho estudios para aplicaciones específicas como su empleo en placas colaborantes [7], o en hormigón pretensado [8]. Al margen de los clásicos áridos artificiales de arcilla expandida o naturales de origen volcánico, se han escrito en relación al empleo de otros materiales alternativos como el vidrio expandido [9] o residuos vegetales como las cascara de coco [10], [11], [12], o la corteza de palmera [12], [13].

2. OBJETIVOS

La diferente dosificación del HC y el HLE hace que su comportamiento sea distinto frente a las acciones exteriores. En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos referentes al estudio experimental comparativo del comportamiento a flexión de un HLE frente a un HC, en función de la cuantía del refuerzo.

3. MATERIAL Y TÉCNICAS EMPLEADAS

3.1. MATERIALES

Se han realizado dos amasadas de hormigón, una de HLE y otra de HC. Para cada una de las amasadas se han elaborado 3 probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto, 2 probetas prismáticas de 60 cm de longitud y sección cuadrada de 15x15 cm y 2 vigas de 1,20 m de longitud y sección de 10x12 cm (ancho x alto). La primera de las vigas contaba con una armadura compuesta por 2 barras corrugadas Ø 8 mm en la cara inferior, y la segunda, 2 barras corrugadas Ø 12 mm también en la cara inferior. El acero empleado era del tipo B-500S.

En la Tabla 1, se muestran las dosificaciones empleadas. Los valores alcanzados por la resistencia y densidad del HLE permiten definirlos como estructurales por las normas EC 2 [14], ACI 213R-03 [15] y EHE-08 [16].

Las piezas se han denominado siguiendo el esquema $\alpha\beta\chi\delta$ -28- δ . De tal modo que α corresponde al tipo de hormigón (L al HLE y N al HC), β corresponde a la amasada (B la primera amasada y C la segunda), χ a la tipo de ensayo (CB para el ensayo a compresión, F para el ensayo a flexotracción y B para las vigas) y δ al número de

Amasada A (HLE)			Amasada B (HC)		
Cemento	CEM I-52,5 R/SR (VILLALUENGA)	500 Kg	Cemento	CEM II/A-M (P-V) 42,5 R (VILLALUENGA)	290 Kg
Arena	AG-0/6-T-V (árido natural ligero)	70% (V)	Arena	AF-0/4-M-S-L	45% (V)
Grava	AG-6/20-M-S-L	30% (V)	Grava	AG-6/20-M-S-L	55% (V)
Aditivo 1	Superplastificante (PCP)	0,75%	Aditivo 1	Plastificante	0,90%
Aditivo 2	---	---	Aditivo 2	---	---
a/c		0,35	a/c		0,58

Tabla 1: Dosificación de las masas

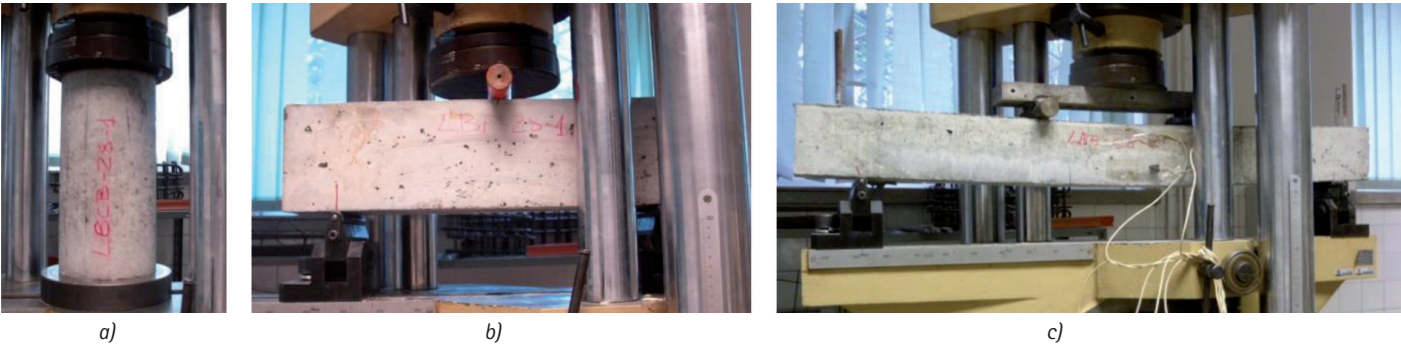


Fig. 1: Ensayos realizados: a) compresión, b) flexotracción, c) flexión de vigas armadas

probeta de cada serie para una misma masada. Todas las probetas se han ensayado a 28 días. Ambas series de probetas, se conservaron en cámara húmeda desde su desmoldeo hasta su rotura.

3.2. ENSAYOS REALIZADO

Cada tipología de probeta se ha utilizado para un tipo de ensayo. Las probetas cilíndricas se han ensayado a compresión; las probetas prismáticas a flexotracción; las vigas armadas a flexión. Las vigas fueron ensayadas simplemente apoyadas con dos cargas

puntuales. La longitud de apoyos es de 1,00m y las cargas puntuales colocadas a tercios de la misma. La máquina de ensayos ofrecía valores de la carga aplicada, así como el desplazamiento vertical. Adicionalmente se monitorizó la deformación longitudinal a la altura de la armadura y en la cara superior de la viga mediante el empleo de galgas extensométricas. Todas las pruebas se han realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid. La prensa utilizada ha sido del tipo universal

Probeta	Densidad (kg/m³)	Compresión		Flexotracción	Flexión vigas armadas	
		σ_{CMax} (MPa)	E (MPa)		N_{Bmax} (KN)	d_{max} (mm)
LBCB-28-1	2.053,65	45,72	28.537	-	-	-
LBCB-28-2	2.048,74	41,37	27.325	-	-	-
LBCB-28-3	2.057,23	47,36	29.049	-	-	-
LBF-28-1	2.081,48	-	-	4,78	-	-
LBF-28-2	2.081,48	-	-	5,52	-	-
LBB-28-1	-	-	-	-	32,38	35,58
LBB-28-2	-	-	-	-	55,35	20,37
NCCB-28-1	2.352,89	32,94	26.343	-	-	-
NCCB-28-2	2.338,37	45,83	27.778	-	-	-
NCCB-28-3	2.369,19	42,73	26.436	-	-	-
NCF-28-1	2.348,15	-	-	5,62	-	-
NCF-28-2	2.362,96	-	-	5,42	-	-
NCF-28-1	-	-	-	-	29,80	31,78
NCF-28-2	-	-	-	-	57,07	15,04

Tabla 2: Resultados obtenidos en los ensayos: compresión, flexotracción, flexión de vigas armadas

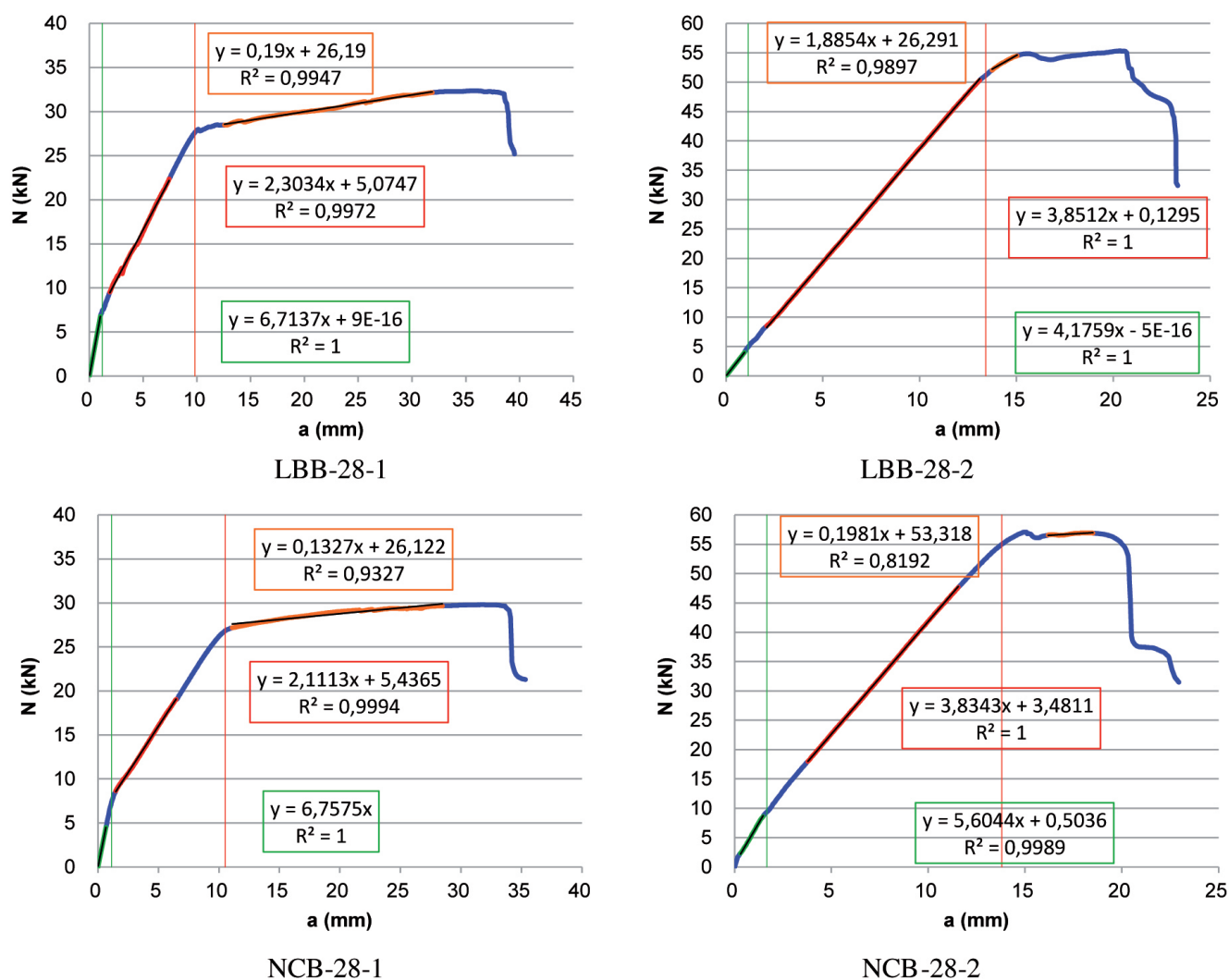


Fig. 2: Gráficas carga desplazamiento

	LBB-28-1			LBB-28-2			NCB-28-1			NCB-28-2		
	Fis	Pla	U	Fis	Pla	U	Fis	Pla	U	Fis	Pla	U
N (KN)	7,42	27,64	32,56	4,92	51,18	55,35	7,37	26,83	29,80	9,37	54,97	57,07
M (KNm)	1,20	4,61	5,43	0,82	8,53	9,23	1,23	4,47	4,97	1,56	9,16	9,51
δ (mm)	1,20	9,81	35,58	1,14	13,42	20,37	1,13	10,52	31,78	1,66	13,80	15,04
E (J)	8,17	162,08	999,16	4,64	352,24	743,77	5,84	172,24	853,19	8,78	410,02	676,39
N/N _{max}	22,80%	84,90%	100%	8,89%	92,46%	100%	24,72%	90,04%	100%	16,42%	96,32%	100%
δ/d_{max}	3,37%	27,57%	100%	5,60%	65,87%	100%	3,56%	33,10%	100%	11,02%	91,74%	100%
E/E _{max}	0,82%	16,22%	100%	0,62%	47,36%	100%	0,68%	20,19%	100%	1,30%	60,62%	100%

Tabla 3: Valores característicos en los puntos de inflexión de las gráficas carga - deformación

IBERTEST MIB60-AM con monitorización de carga y deformación equipada con software WINTTEST 32. Los ensayos se han realizado por control de desplazamiento a una velocidad de 2,00 mm/min. En la Figura 1 se muestran fotografías de los diferentes ensayos realizados.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos de los diferentes ensayos realizados. Para el ensayo a compresión, se muestra

la tensión de rotura ($s_{c,max}$) y el módulo de elasticidad (E). Para el ensayo a flexotracción se muestra la tensión de rotura ($s_{f,max}$). Para las vigas armadas, se muestra la carga de rotura (N_{max}) y el desplazamiento ($d_{b,max}$). Se muestran los resultados para cada amasada. Para todas las probetas, se muestra la densidad del hormigón.

En la Figura 2 se muestran las gráficas carga - desplazamiento de todas las vigas ensayadas. En cada una de las gráficas se muestran las rectas de regresión de los diferentes tramos de la gráfica. En color verde se muestra la recta de regresión antes de la fisuración de la viga. En color rojo entre la fisuración y las plastificación.

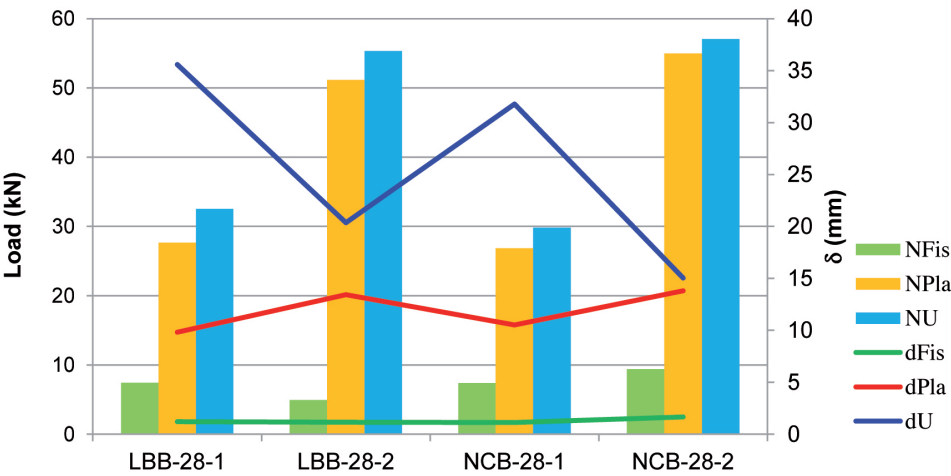


Fig. 3: Cargas y desplazamientos alcanzados por cada tipo de viga

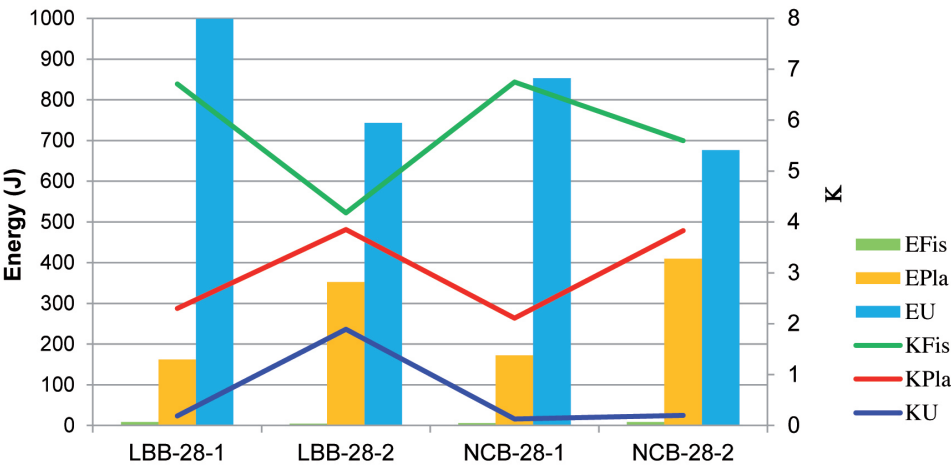


Fig. 4: Energía absorbida y rigidez del tramo alcanzados por cada tipo de viga

Por último, en color naranja se muestra una vez plastificada la viga.

En la Tabla 3 se muestran los valores característicos alcanzados en la gráfica carga-desplazamiento de las vigas ensayadas a flexión para los instantes de fisuración (Fis), plastificación (Pla) y carga máxima (U). Para cada uno de los puntos característicos, y agrupados por vigas, se ofrecen los valores absolutos de carga (N), el momento (M), el desplazamiento (δ) y la energía absorbida (E). Posteriormente se recogen los valores relativos de carga (N/N_{max}), desplazamiento (δ/d_{max}), y energía absorbida (E/E_{max}).

En la Figura 3 se muestran los valores alcanzados por todos los tipos de vigas en términos de cargas (kN) y desplazamientos (mm) para los instantes de fisuración, plastificación y carga máxima.

incrementarse, esta vez en menor cuantía. En el caso concreto de la viga de hormigón convencional, la carga máxima de la viga se produce en el nuevo incremento de la carga.

Las diferentes normativas predicen todos los valores de las características del hormigón a partir de la resistencia a compresión. Para el cálculo del Momento de fisuración (M_{fis}) se precisa la tensión a tracción. Para el cálculo de la flecha es necesario conocer el módulo de elasticidad (E). En la Tabla 4 se muestra los valores indicados por diferentes normativas.

El momento de fisuración se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$M_{fis} = f_{ct,m} \cdot W$$

(1)

	$f_{ct,m}$ (MPa)	E (MPa)
CM-2010 [17]	$f_{ct,m} = 0,30f_{ck}^{2/3}$ para $f_{ck} < 50\text{MPa}$ $f_{ct,m} = 2,12 \ln(1 + 0,1(f_{ck} + \Delta f))$ para $f_{ck} > 50\text{MPa}$	$E = \rho^{1,5} \cdot 0,043\sqrt{f_{cu}}$
EHE [16]	$f_{ct,m} = 0,30f_{ck}^{2/3}$ para $f_{ck} < 50\text{MPa}$ $f_{ct,m} = 0,58f_{ck}^{1/2}$ para $f_{ck} > 50\text{MPa}$	$E = \left(\frac{\rho}{2200}\right)^2 8500^3\sqrt{f_{cm}}$

Tabla 4: Valores de la resistencia a tracción (f_{ct,m}) y del módulo de elasticidad (E) según CM y EHE

	LBB-28-1	LBB-28-2	NCB-28-1	NCB-28-2
b (mm)	104,50	104,40	103,95	102,20
h (mm)	119,95	119,35	118,30	119,55
F _c (kN)	561,77	558,42	416,06	413,38
A _s (cm²)	1,01	2,26	1,01	2,26
F _y (kN)	54,29	122,15	54,29	122,15
Cuantía	0,097	0,219	0,130	0,295

Tabla 5: Dimensiones reales de las vigas ensayadas

	LB	NC
f _{cm,ens}	44,82	33,83
f _{ctm,ens}	5,15	5,52
E _{ens}	28304	26852
f _{ctm,CM}	3,97	3,54
E _{CM}	28178	29965
f _{ctm,EHE}	3,97	3,54
E _{EHE}	31194	37897

Tabla 6: Valores característicos de los hormigones

	LBB-28-1			LBB-28-2			NCB-28-1			NCB-28-2		
	Fis	Pla	U	Fis	Pla	U	Fis	Pla	U	Fis	Pla	U
M _{ens}	1,43	4,18	4,89	1,59	9,15	9,81	1,50	4,11	4,70	1,70	7,15	9,27
d _{ens}	1,97	18,78	-	2,06	25,56	-	2,26	19,21	-	2,34	20,19	-
M _{CM}	1,06	4,18	4,89	1,17	9,15	9,81	0,84	4,10	4,70	0,95	7,19	9,27
δ _{CM}	1,45	19,95	-	1,52	25,69	-	1,15	20,44	-	1,18	19,82	-
M _{EHE}	1,05	4,18	4,89	1,15	9,13	9,81	0,83	4,10	4,70	0,91	7,27	9,27
δ _{EHE}	1,31	19,46	-	1,37	24,82	-	0,90	19,34	-	0,92	18,64	-

Tabla 7: Valores calculados de M y δ, a partir de los valores de diferente normativa

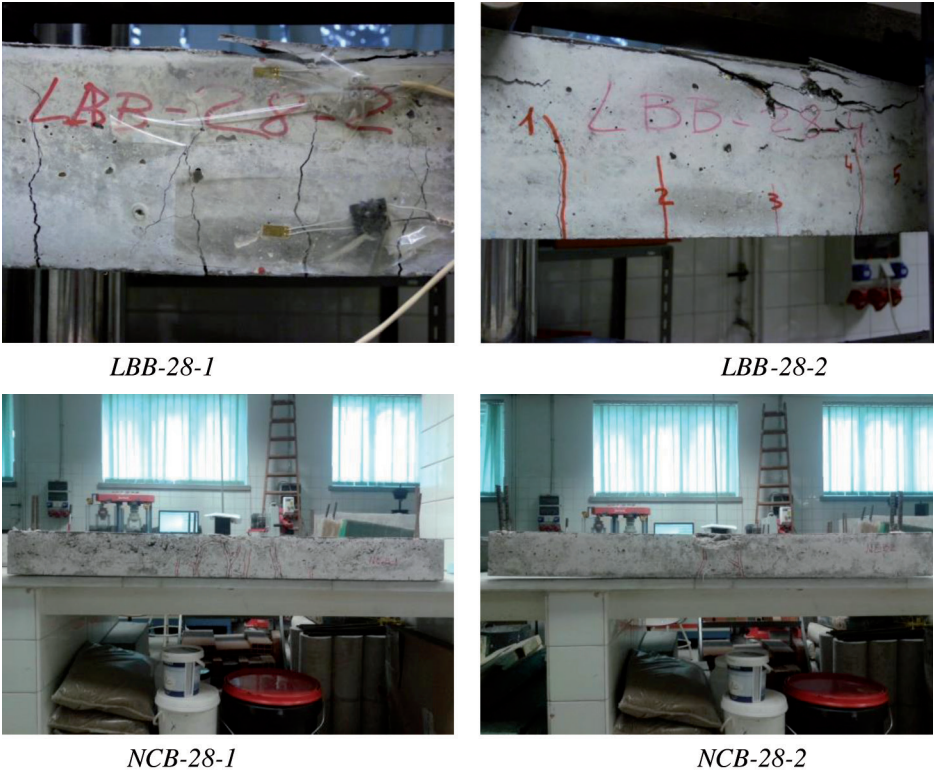


Fig. 5: Forma de rotura de las vigas

La flecha en el punto central de una viga simplemente apoyada con dos cargas iguales colocadas en los tercios de la luz se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\delta_{max} = - \frac{23 F L^3}{648 E I}$$

(2)

En ambos casos, tanto el módulo resistente (W) como el momento de inercia (I) han de ser considerados de la sección homogenizada. Esto es, considerando la contribución de la armadura. Una vez alcanzado el momento de fisuración, ha de considerarse la inercia equivalente (Ie).

Para la realización de los cálculos, se han tomados las dimensiones reales de las vigas, y no las medidas nominales. En la Tabla 5, se muestran las dimensiones de las vigas, la capacidad mecánica del hormigón, del acero y la cuantía mecánica. Los valores característicos del hormigón utilizados para el cálculo conforme a la normativa son, conforme a los indicados en la Tabla 4, los indicados en la Tabla 6.

En la Tabla 7 se obtienen los resultados obtenidos calculados a partir de los valores que se obtendrían aplicando los valores indicados por diferentes normativas.

A la vista de los resultados puede afirmarse que existe, en general, discrepancia entre los valores obtenidos de los ensayos, y los valores calculados, por cualquiera de los métodos propuestos. Los valores de los momentos alcanzados difieren en general menos que los correspondientes a los desplazamientos. Para el HLE, los valores obtenidos por cálculo a partir de los parámetros resistentes del hormigón, presentan en general una mayor disparidad con los valores reales de las vigas, que los obtenidos a través de los cálculos a partir de los valores sugeridos por las diferentes normativas. Por el contrario para HC, los valores obtenidos a partir de los valores resistentes obtenidos a partir de

las probetas, presentan valores más ajustados al valor obtenido en los ensayos.

Los valores de flecha para los distintos puntos estudiados, son en general menores en el ensayo real, que en los cálculos analíticos. Los valores de los momentos para los cuales se obtienen los puntos de inflexión de la curva carga-desplazamiento, no presentan un patrón homogéneo, siendo en ocasiones mayores y en ocasiones menores que los valores calculados. Para los valores de momento, existe cierta correspondencia entre los valores calculados conforme al CM y a la EHE, pero en general alejados de los obtenidos en los ensayos.

En las vigas con menor cuantía, la armadura llega a su límite elástico y rompe a causa del agotamiento del acero. Por contra, en las vigas con mayor cuantía de acero, la armadura no llega a su límite elástico, y la rotura se produce por aplastamiento del hormigón. En la Figura 5 se muestran las formas de rotura de cada tipología de viga.

En las vigas de menor cuantía, el acero presenta una gran deformación antes de la rotura. El hormigón en sus proximidades presenta una fisuración muy marcada, en contraposición con la zona de compresión, donde el hormigón apenas presenta daños. Por el contrario, en las vigas de alta cuantía, la zona próxima a la armadura tiene una fisuración mucho menos marcada que contrasta con la zona de compresión con el hormigón agotado.

La energía absorbida por las vigas, presenta un comportamiento muy similar para las vigas de igual cuantía, pese a las diferencias en el hormigón empleado. Lo mismo ocurre para las rigideces, con valores muy similares entre sí para cada tramo de la misma cuantía (Figura 4)

6. CONCLUSIONES

Tanto los valores de las cargas de rotura como de las deformaciones asociadas a esas cargas son muy similares para las vigas de igual cuantía, pese a contar las rigideces y las energías absorbidas con hormigones de características muy diferentes. La cuantía de acero es más determinante en el comportamiento que el tipo de hormigón.

Las vigas con escasa cuantía presentan grandes deformaciones desde el punto de plastificación hasta la rotura. El desplazamiento en ese punto se sitúa en el entorno del 30% de la deformación en la rotura.

Las vigas con alta cuantía tienen un escaso desplazamiento una vez alcanzada la plastificación. El desplazamiento es de las vigas en este punto está en el entorno de 70% del desplazamiento para la carga máxima.

Las gráficas de las vigas de menor cuantía, son más similares entre sí que las gráficas de las vigas de mayor cuantía.

Los valores calculados conforme a las diferentes normativas estudiadas son muy iguales entre sí, pero notablemente diferentes de los valores obtenidos en los ensayos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la empresa Lafarge Holcim necesario para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Leonhardt F. (1986). "Estructuras de Hormigón Armado". Tomo II "Casos especiales del dimensionamiento de estructuras de hormigón armado". Librería El Ateneo editorial. Buenos Aires.

[2] Kaffetzakis M.I., Papanicolaou C.G. (2016) "Bond behavior of reinforcement in Lightweight Aggregate Self-Compacting Concrete" *Construction and Building Materials* 113. Pag. 641-652

[3] Jae-Il Sim, Keun-Hyeok Yang, Heung-Yeoul Kim, Byong-Jeong Choi (2013) "Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete" *Construction and Building Materials* 38. Pag. 854-864.

[4] Karamloo M., Mazloom M., Payganeh G., (2016) "Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete" *Construction and Building Materials* 123. Pag. 508-515

[5] Charif A. Jamal Shannag M., Dghaither S. (2014) "Ductility of reinforced lightweight concrete beams and columns" *Latin American Journal of Solids and Structures* 11. Pag. 1251-1274

[6] Caratelli A., Meda A., Rinaldi Z. (2016) "Monotonic and cyclic behaviour of lightweight concrete beams with and without steel fiber reinforcement" *Construction and Building Materials* 122. Pag. 23-35

[7] Yu-Cheng Kan, L-H. Chen, Tson Yen (2013) "Mechanical behavior of lightweight concrete steel deck" *Construction and Building Materials* 42. Pag. 78-86

[8] Vázquez-Herrero C., Martínez-Lage I., Vázquez-Vázquez H., Martínez-Abella F. (2013) "Comparative study of the flexural behavior of lightweight and normal weight prestressed concrete beams" *Engineering Structures* 56. Pag. 1868-1879

[9] Khatib J., Jefimiuk A., Khatib S. (2015) "Flexural behaviour of reinforced concrete beams containing expanded glass as lightweight aggregates" *Slovak Journal of Civil Engineering*, No. 4, Pag. 1-7

[10] Jayapriethika A., Sekar S.K. "Stress-strain characteristics and flexural behaviour of reinforced Eco-friendly coconut shell concrete" *Construction and Building Materials* 117. Pag. 244-250

[11] Gunasekaran K., Annadurai R., Kumar P.S. (2013) "Study on reinforced lightweight coconut shell concrete beam behavior under flexure" *Materials and Design* 46. Pag. 157-167

[12] Olanipekun E.A., Olusola K.O., Ata O. (2006) "A comparative study of concrete properties using coconut shell and palm kernel shell as coarse aggregates" *Building and Environment* 41. Pag. 297-301

[13] Alengaram U.J., Baig Abdullah Al Muhit, Mohd Zamin bin Jumaat. (2013) "Utilization of oil palm kernel shell as lightweight aggregate in concrete - A review", *Construction and Building Materials* 38. Pag. 161-172

[14] AENOR (2010). Eurocódigo 2: Proyectos de Estructuras de hormigón. Asociación española de Normalización y Certificación. Madrid

[15] ACI (2003). ACI 213R-03 Guide for structural lightweight-aggregate concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

[16] Ministerio de Fomento (2008). Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08.1ª Edición. Madrid.

[17] Comité Euro-International du beton (1991) CEB-FIB- Model Code 1990. *Bulletins d'Information* 203-205.

- Los artículos deberán ser originales e inéditos y no deben de haber sido enviados simultaneamente a otros medios de comunicación.
- Tendrán siempre preferencia los que versen sobre temas relacionados con el objetivo, cobertura temática y/o lectores a los que se dirige la revista.
- Todos los trabajos serán redactados en castellano o inglés y deberán cumplir los siguientes requisitos:
 - Título en castellano e inglés de 150 caracteres máximo
 - Un breve resumen (Abstract), de unas 300 palabras, en castellano e inglés.
 - Entre tres y cinco palabras clave (Key words) en castellano e inglés, que permitan identificar la temática del artículo
 - No deberían de tener más de aproximadamente 5.500 palabras, o 17 páginas formato A4 en fuente Arial 10 con interlineado simple (Consultar con DYNA extensiones superiores).
 - Bibliografía relacionada o referencias según normas DYNA en www.revistadyna.com
- Con el objeto de facilitar la "revisión entre pares", el autor deberá asignar el código DYNA de 6 dígitos correspondiente a la temática del artículo, seleccionándolo de entre los códigos disponibles en la dirección de Internet: www.revistadyna.com
- Los originales se remitirán mediante nuestra página web (envío artículos), en formatos .DOC (msword), .RTF, o .TXT. Se recomienda una calidad mínima de 300ppp para las fotografías que se adjunten con el artículo. Se harán constar: título del artículo, nombre del autor, título académico, empresa o institución a la que pertenece, dirección electrónica, dirección postal y teléfono.
- Se someterán al Consejo de Redacción cuantos artículos se reciban, realizándose la "revisión entre pares" por los expertos del Consejo o los que éste decida. El resultado de la evaluación será comunicado directamente a los autores. En caso de discrepancia, el editor someterá el trabajo a un revisor externo a la revista cuya decisión será trasladada nuevamente al autor.
- Los autores aceptan la corrección de textos y la revisión de estilo para mantener criterios de uniformidad de la revista.
- La revista se reserva el derecho de no acusar recibo de los trabajos que no se ajusten a estas normas.
- Para mayor detalle sobre estas normas, por favor visite nuestra web <http://www.revistadyna.com> (en el apartado de "autores y evaluadores").
- Paper will be original and unpublished and it must not be concurrently submitted for publication elsewhere.
- Preference will be given to articles on the main subject areas of the Journal.
- Papers should be written in Spanish or English and should fulfil the following requirements:
 - Title in both English and Spanish with a maximum length of 150 characters.
 - Brief Summary or Abstract, about 300 words, in Spanish and English.
 - Between three and five keywords in English and Spanish, that identify the paper theme.
 - Written text should not exceed 5.500 words, or 17 A4 format pages in 10 size arial font single-spaced (For longer lengths consult with DYNA)
 - Bibliographical references according to DYNA norms at www.revistadyna.com
- To facilitate the "peer review" process, the author will assign the six digits DYNA code corresponding to the paper thematic, selecting it between the codes available at the Internet address: www.revistadyna.com
- Papers should be sent by our web page (envío artículos), in .DOC (MSWord), .RTF, or .TXT format. It is recommended a minimum quality of 3000 ppp for the pictures enclosed in the article. These papers will include: Article title, author name, academic title, company or institution, email, correspondence address and telephone.
- All papers must pass the Editorial Board (EB) evaluation process. The "peer review" will be made by the Editorial experts or those that the EB decides. The evaluation result will be directly communicated to the author. In case of discrepancy, the publisher will refer the work to an external reviewer whose decision will again be transferred to the author.
- The authors accept the text correction and the style revision to maintain uniformity criteria for the magazine.
- The journal reserves the right not to accept articles which do not comply with said instructions.
- To find more details about these instructions, please visit our web page <http://www.revistadyna.com> (authors and referees section).

DYNA

Ingeniería e Industria

PROMOCIÓN: Suscripción a DYNA por 29,85 €/año

Reciba la revista dyna impresa en su domicilio por solo 29,85 €/año

La revista DYNA ha llegado a un acuerdo de colaboración con algunos Colegios de Ingenieros Industriales para ofrecer a sus colegiados la revista impresa con un 35% de descuento.

Promoción válida para los Ingenieros Industriales colegiados en: Araba, Bizkaia y Galicia.

Si está interesado, envíe un email a dyna@revistadyna.com mencionando que se acoge a la promoción e indicando su nº de colegiado y el nombre de su Colegio de Ingenieros Industriales.



LOS PLANOS DEL DÍA SIGUIENTE «HOY MISMO»



Realice trabajos a todo color, gestione las necesidades de producción y complete sus proyectos en el mismo día con nuestra impresora de inyección de tinta y una sola pasada ultrarrápida.

Océ ColorWave 910

Impulse la productividad y los beneficios con velocidades superiores a 1000 m² por hora, un flujo de trabajo completamente integrado de principio a fin y un servicio de asistencia incomparable. impresión a todo color ultrarrápida y fiable para proyectos CAD/GIS y carteles promocionales en tiradas cortas a un precio altamente competitivo.

Para ver la impresora en acción y comprobar su alta productividad, póngase en contacto con nosotros en nuestra página web www.canon.es o en el cbs_marketing@canon.es

Canon