

BUILDING & MANAGEMENT

E-JOURNAL. ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

January
April
2020



GESTION EN EDIFICACION

B&M

BUILDING & MANAGEMENT

BUILDING & MANAGEMENT
JANUARY - APRIL 2020
ISSN 2530-8157



BUILDING & MANAGEMENT

VOLUME 4 ISSUE 1

BUILDING & MANAGEMENT

SCIENTIFIC e-JOURNAL

VOLUME 4 ISSUE 1

JANUARY - APRIL 2020



Escuela Técnica Superior de Edificación
Universidad Politécnica de Madrid

ISSN: 2530-8157

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN. ETSEM

Avenida de Juan de Herrera, 6, 28040 Madrid
Phone: 913367611
www.edificacion.upm.es
e-mail: bm.edificacion@upm.es

DIGITAL EDITION

www.polired.upm.es

FRONT AND BACK COVERS IMAGES

Office building
Calle Carlos y Guillermo Fernández Shaw 1. 28007 Madrid

Property development
Vía Célere

BUILDING & MANAGEMENT is an open access scientific e-journal published every four months that accepts original, high quality and not published manuscripts. The journal scope covers all the phases of the building: project, construction, in-use, maintenance and end-of-life, and comprises a wide range of activities associated with the management of building processes where various agents in the sectors of architecture, engineering and construction participate.

GESTIÓN EN EDIFICACIÓN es una publicación científica cuatrimestral en la que se incluyen trabajos originales, de alta calidad, que no hayan sido publicados en otras revistas. Su ámbito abarca todas las fases de proyecto, ejecución, operación, mantenimiento y fin de vida del edificio y comprende un amplio abanico de actividades asociadas a la gestión de los procesos del edificio en las que participan diversos agentes de los sectores de la arquitectura, la ingeniería y la construcción.

The criteria and opinions expressed in this publication are the sole responsibility of the authors. Copyright and intellectual property rights of published documents belong to their authors, who are responsible of the published material copyright.

Los criterios y opiniones expuestos son responsabilidad exclusiva de los autores. Los derechos de autor y la propiedad intelectual del material publicado pertenecen, así mismo, a sus autores, quienes son responsables de los permisos sobre derechos del material publicado.

EDITOR - IN - CHIEF / DIRECCIÓN DE REDACCIÓN

Imaculada Martínez Pérez Universidad Politécnica de Madrid

MANAGING EDITOR / SECRETARÍA DE REDACCIÓN

Sonsoles González Rodrigo Universidad Politécnica de Madrid

ASSOCIATE EDITORS / COMITÉ EDITORIAL

Patricia Aguilera Benito Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Francisco de Borja Chávarri Caro Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Gregorio García López de la Osa Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Julián García Muñoz Universidad Politécnica de Madrid, Spain
María de las Nieves González García Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Carolina Piña Ramírez Universidad Politécnica de Madrid, Spain
María Isabel Prieto Barrio Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Mercedes Valiente López Universidad Politécnica de Madrid, Spain

EDITORIAL ADVISORY BOARD / COMITÉ CIENTÍFICO

Antonio Baño Nieva Universidad de Alcalá, Spain
Roberto Barrios Corpa Intemac, Spain
Xavier Brioso Universidad Católica Pontificia de Perú, Lima, Perú
Daniela Brizuela Valenzuela Universidad Central de Chile, Santiago, Chile
Álvaro Cerezo Ibarrondo Escuela Vasca EVETU del IVAP, Bizkaia, Spain
Alfonso Cobo Escamilla Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Miguel de Diego Elvira IDOM, Spain
Luis de Pereda Fernández Eneres / Instituto Europeo de Innovación, Spain
Emmanuel Dufresnes Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Strasbourg/ Ministère de la Culture et de la Communication, France
Jesús Esteban Gabriel Grupo SGS, Madrid, Spain
Ignacio Fernández Solla ARUP, Spain
José Antonio Ferrer Tevar CIEMAT, Spain
George Govaere Vicarioli Universidad Costa Rica, Costa Rica
Helena Granados Menéndez Consejo Arquitectos/ Comisión Europea
Louis Gunnigan Dublin Institute of Technology, Ireland
Sara Gutiérrez González Universidad de Burgos, Spain
Héctor Hernández López Universidad Central de Chile, Santiago, Chile
Marta Kosior-Kazberuk Bialystok University of Technology, Poland
Sandra Llorente Monleón Conspace. Vía Célere, Spain
Oscar López Zaldivar Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Fernando Machado Martín UNE. Asociación Española de Normalización, Spain
Fernando Martín Consuegra Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja
M^a Dolores Martínez Aires Universidad de Granada, Spain
Francisco J. Martínez Montesinos Universidad Católica de Murcia, Spain
Juan Manuel Medina Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
M^a del Pilar Mercader Moyano Universidad de Sevilla, Spain
Trevor Mole Property Tectonics/Salford University, Manchester, UK
Fernando Moral Andrés Universidad Nebrija, Madrid, Spain
M^a Isabel Pérez Millán Universidad Católica de Murcia, Spain
Rudy Piedra Mena Universidad Costa Rica, Costa Rica
Carlos J. Pampliega Project Management Institute Madrid, Spain
Mara Rodríguez Hermida Instituto Tecnológico de Galicia / BREAM, Spain
Ángel Rodríguez Saiz Universidad de Burgos, Spain
María Segarra Cañamares Universidad de Castilla la Mancha, Spain
Begoña Serrano Lanzarote Instituto Valenciano de Edificación/ Universidad Politécnica de Valencia, Spain
Acerta, Madrid, Spain

Patricia del Solar Serrano Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Ricardo Tondero Caballero Universidad de Castilla la Mancha, Spain
Nelia Valverde Gascueña Universidad Politécnica de Madrid, Spain
Amparo Verdú Vázquez

SUMMARY

EDITORIAL: THE IMPLEMENTATION OF BIM IN SPAIN

LA IMPLANTACIÓN DE BIM EN ESPAÑA

Javier Zangróniz Hernán

4

ARTICLES

INFLUENCE OF THE CRACKING MOMENT OF TWO REINFORCED CONCRETE BEAMS OBTAINED THROUGH FIBER OPTIC SENSORS IN THE DETERMINATION OF THEIR INSTANT DEFLECTIONS

INFLUENCIA DEL MOMENTO DE FISURACIÓN DE DOS VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO OBTENIDO MEDIANTE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA EN LA DETERMINACIÓN DE SUS FLECHAS INSTANTÁNEAS

Julián García Díaz

7

DEVELOPMENT OF CONCRETE PAVEMENTS OF SHORT SLABS WITH FIBER INCORPORATED

DESARROLLO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN DE LOSAS CORTAS CON FIBRA INCORPORADA

Kelly Condori Rivera

21

STATE OF THE ART IN BEHAVIOR TO CONCRETE FATIGUE

ESTADO DEL ARTE EN EL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE HORMIGONES

Pedro José Zevallos Turriaga & Adriana Jiménez Pérez

30

THE USE OF WOOD AS SMART BUILDING MATERIAL

EL USO DE LA MADERA COMO SMART BUILDING MATERIAL

Karen Stephanie Cansiong Guerra & José Escobar Avilés

36

MONITORING AND DIAGNOSIS OF HISTORICAL MASONRY BUILDINGS AND FUTURE PERSPECTIVE

MONITOREO Y DIAGNÓSTICO DE EDIFICIOS HISTÓRICOS DE MAMPOSTERÍA Y PERSPECTIVA FUTURA

Adolfo Preciado & Fabiola Colmenero

44

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

53

DIGITAL EDITION

A digital version of this issue is available to readers, accessible and downloadable at <http://polired.upm.es/index.php/bm/issue/archive> of the journal.

Existe a disposición de los lectores una versión digital del presente número, accesible y descargable en: <http://polired.upm.es/index.php/bm/issue/archive> of the journal.

EDITORIAL

BUILDING & MANAGEMENT
JANUARY - APRIL 2020

<http://dx.doi.org/10.20868/bma.2020.1.4661>

JAVIER ZANGRÓNIZ HERNÁN

BUILDING & MANAGEMENT

LA IMPLANTACIÓN DE BIM EN ESPAÑA

BIM, cuyo acrónimo en inglés es Building Information Modeling, es una metodología colaborativa que nos permite construir los edificios de forma virtual; su objetivo es centralizar toda la información del proyecto en un modelo de información digital creado por todos sus agentes.

Durante la última década, la metodología BIM se ha implantado de forma progresiva en diferentes países, siendo para algunos de ellos el objetivo prioritario de sus Administraciones Públicas, como bien recomienda la Directiva Europea de Contratación Pública 2014/24/UE.

En España, el Ministerio de Fomento creó en 2015 la Comisión Nacional es.BIM cuyo cometido es poner en funcionamiento la metodología BIM en el sector público y en las licitaciones públicas. De igual manera y con objetivos similares, se creó la asociación BuildingSMART Spanish Chapter, asociación sin ánimo de lucro y cuyo principal objetivo es fomentar la eficacia en el sector de la construcción a través del uso de estándares abiertos de interoperabilidad sobre BIM para alcanzar nuevos niveles en reducción de costes, tiempos de ejecución y aumento de la calidad. También existen en diferentes puntos de la península grupos de usuarios BIM como guBIMad (Grupo de Usuarios BIM de Madrid) y están dirigidos a todos aquellos interesados en conocer y profundizar sus conocimientos en BIM.

Es obvio que esta metodología ha marcado un antes y un después en el día a día de los profesionales de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción, quienes no solo ahorran tiempo en los procesos de creación y modificación de sus proyectos, sino que también ven que se agiliza la

THE IMPLEMENTATION OF BIM IN SPAIN

BIM, an abbreviation of Building Information Modeling, is a collaborative methodology that allows to manage buildings on a virtual basis. It aims to centralize all the project information in a digital information model created by all of its agents.

During the last ten years, BIM methodology has progressively been implemented in different countries, and in some of them has become the priority of its governments, as it comes recommended in the European Directive 2014/24 /EU on Public Procurement.

In the year 2015, the Spanish Ministry of Development created the National Commission es.BIM which is engaged in the implementation of BIM methodology throughout the public sector and public procurement. Within the same trend and with similar targets, it was created the BuildingSMART Spanish Chapter Association, a not-for-profit organization committed to promoting efficiency in the construction field using open interoperability standards of BIM to reach new levels in cost reduction, execution times and increasing the quality. There are also other BIM users groups in different parts of Spain such as guBIMad (BIM User Group in Madrid) and they are meant everyone interested in achieving more information and deepening their knowledge about BIM.

It is clear that this methodology has marked a turning point in the day-to-day conduct of builders, architects and engineers, who not only save time while creating and modifying their projects, but also streamlines the interaction between partners at the highest level because of the possibility of sharing speci-

interacción con sus colaboradores al más alto nivel por el hecho de poder compartir los contenidos específicos de cada especialidad en el mismo modelo BIM. Con esta metodología, se mejora enormemente la trazabilidad de los proyectos y la coordinación de las distintas disciplinas.

Mientras que el programa de CAD o metodología tradicional utiliza solo geometría en 2D o 3D sin diferenciar los elementos, la metodología BIM utiliza bibliotecas de objetos inteligentes y paramétricos, interpreta la interacción lógica entre los diferentes tipos de objetos y almacena la información referente a dichos objetos.

Un modelo BIM está compuesto por categorías y elementos constructivos cuya propiedad fundamental es el hecho de ser paramétricos, esto es, sus dimensiones y características pueden ser controladas mediante parámetros. Un parámetro geométrico controla la forma del objeto (el largo, ancho, etc.), un parámetro de material controla su aspecto gráfico (textura y fotorrealismo) y así un largo etcétera. De igual manera, son elementos relacionales, es decir, algunos componentes pueden tener relaciones o comportamientos especiales, según sus funciones; por ejemplo: una abertura que se encuentra en un muro y genera automáticamente el vano; o un muro que puede extenderse y cortarse con la forma de una cubierta inclinada; o una escalera que puede generar automáticamente la cantidad o alto de huellas en función de la altura de los niveles que conecta, etc.

La metodología BIM permite construir uno o varios modelos virtuales de un mismo edificio que nos servirán como guía para el diseño durante las diferentes fases de construcción, y nos aportarán análisis más fiables con un control mayor que lo que nos aportaban los procesos manuales. Una vez completados, estos modelos generados por ordenador se caracterizan por su geometría precisa y por proveernos los datos necesarios para llevar a cabo la edificación, fabricación y todas las actividades que intervienen en la construcción del edificio.

A diferencia de la metodología tradicional, donde el conjunto de archivos que componen el proyecto son los que lo definen, dicho de otra manera, los planos son el inicio, en BIM se desarrolla un modelo analítico del que se extrae la documentación que define el proyecto, es decir, los planos son el resultado, o uno de los resultados dependiendo de los objetivos y de los usos BIM que hemos definido previamente. Por tanto, si cambia el modelo, la documentación se modifica conforme al nuevo modelo, evitando así los errores más comunes de coordinación de planos generados por el método tradicional.

BIM supone también la evolución de los sistemas de diseño tradicionales basados en el plano, ya que incorpora información geométrica (elementos 3D); añade datos sobre el desarrollo en el tiempo (factor 4D) que permite comprender y controlar las dinámicas de la ejecución del proyecto, efectuar análisis completos y realizar rápidas y eficientes simulaciones de las fases de construcción; agrega información sobre costes (elemento 5D) que abarca todo lo relacionado con el control de costes y estimación de los gastos del proyecto; gracias a este factor tendremos un mayor control sobre las certificaciones de obra. BIM también integra información ambiental (elemento 6D) en consonancia con principios tan importantes como la construcción sostenible y el ahorro energético; y por último, el control logístico y operacional (factores 7D), lo referente al uso y mantenimiento prolongando de la vida útil del proyecto.

fic data of each field in the same BIM project. Through this methodology, the traceability of the projects and the coordination of different disciplines are greatly improved.

Although CAD software and traditional methodologies are based only in 2D and 3D geometry data and do not distinguish between items, BIM methodology is based in intelligent and parametric libraries of components, understands the logical interaction between different categories of items and stores the information related to those items.

Categories and constructive elements are part of BIM model and their main feature is the fact of being parametric, it means that their dimensions and specifications can be managed by parameters. A geometric parameter rules the shape of the object (length, width, etc.), a material parameter manages its graphic appearance (texture and photorealism) and so on. On the same way, they are relational elements, in other words, some components may have special relationships or behaviours depending on their roles, for instance, a window in wall automatically generates the opening; or a wall that can be extended and cut with the shape of an inclined roof; or a staircase that can automatically generate the amount or the height of the steps depending on the height of the levels it connects, etc.

BIM methodology enable us to virtually develop one or more models of the same building that they will be used as guide during the different construction phases; in addition, BIM methodology provide us more reliable analyses with higher command over the processes than the models provided by manual processes. Once they are done, these computer generated models are very precise on its geometry and provide us the data we need to accomplish the development, manufacturing and all the activities involved in the construction of the building.

Unlike the traditional methodology, where the project-making files define the project itself, or in other words, the blueprints are the beginning of the project, BIM methodology develops an analytical model that works as base to extract the documentation that defines the project, in other words, the blueprints are the outcome or one of the results depending on the goals and the uses that we have previously defined. Therefore, if the model changes, the documentation is changed according to the new model, thus avoiding the most common errors of blueprints coordination that happens using the traditional method.

BIM also involves the evolution of traditional design systems based on blueprints, since it incorporates geometric data (3D information); BIM methodology adds timetable data for carrying out the project in time (4D factor) that allows to understand and control the dynamics of the execution of the project and completely analyzes and performs efficient and fast simulations of the construction phases; BIM methodology adds cost data (5D information) that covers everything related to cost control and estimates the cost of the project; thanks to this element, we will have greater control over the work certificates. BIM also integrates environmental information (6D element) in line with such important principles of sustainable construction and energy saving; and finally, the logistic and

Estamos siendo testigos en los últimos meses en España de la novedosa implantación por parte de algunos Ayuntamientos, como es el caso de Rivas-Vaciamadrid, del programa Cype Urban mediante el cual se hace la revisión urbanística a través del modelo BIM, lo que agiliza en gran medida la concesión de licencias.

Es preciso destacar que, el hecho de que el proyecto esté modelado en BIM no es garantía de la viabilidad ni de la calidad del proyecto, ya que depende en gran medida de la maduración del proyecto BIM y obviamente de la profesionalidad del proyectista; si bien se puede afirmar que una de las múltiples y más valiosas ventajas del uso de esta metodología es la rapidez y calidad con la que puede ser auditado y corregido.

A día de hoy y en el momento en el que escribo estas líneas, prácticamente todos los profesionales del sector son conocedores del éxito de la implantación de esta metodología y conscientes de que BIM ha llegado para quedarse, a pesar de que haya compañías que se resistan a su uso. Según las últimas encuestas del CSCAE, el grado de implantación de BIM entre los arquitectos alcanza el 40% y el nivel de satisfacción de sus usuarios es alto. La reticencia al cambio es debida al alto coste de la inversión inicial, tanto en formación de los componentes de la plantilla como en hardware y software. Aunque en un inicio, la inversión realizada en implementar BIM sea elevada, los frutos se irán recogiendo a medida que se vayan realizando proyectos siempre y cuando se ponga el foco en la calidad, la automatización de procesos y en la entrega de valor añadido. Esto requiere de la existencia de un Plan de Implantación en la empresa que desarrolla el servicio, así como una filosofía de trabajo basada en la mejora continua, y es que desde que una compañía decide implementar BIM hasta que consigue un nivel de maduración BIM en el que empieza a obtener resultados de productividad y rentabiliza la inversión, rondan unos plazos aproximados de doce a dieciocho meses dependiendo de las dimensiones de la organización.

Es preciso señalar que la falta de un Plan de Implantación y los principios comentados en el párrafo anterior está produciendo un falso intento de implantación en algunas compañías, ya que siguen trabajando de la manera tradicional durante todo el proceso y una vez terminada la documentación del mismo, encargan el modelado BIM a una empresa externa o a algún miembro de la compañía, suponiendo una incongruencia en la esencia misma del uso BIM, y que difícilmente podrán realizar una implantación interna a corto plazo, además de suponerles un sobrecoste.

Y por todo lo anterior, y la perspectiva de un sector en el que la escasez de mano de obra cualificada es la tónica general, hace que sea necesario trabajar en entornos cada vez más controlados en los que el uso de BIM, Last Planner System, IPD e industrialización serán las claves para avanzar hacia modelos de edificación de ciudades sostenibles y de calidad.

operational control (7D elements) that concerns the use and maintenance of the project to extend its lifespan.

During the last months, we are seeing in Spain that some municipalities, such as Rivas-Vaciamadrid Municipality, are carrying out the novel introduction of Cype Urban Program for the revision of urban development laws through the BIM model to speed up licensing process.

It should be noted the fact that a project being modelled by BIM is not a guarantee of its viability or quality, since it largely depends on the maturing of the BIM project and obviously on the designer professionalism; even though we may asset that one of the multiple and most valuable advantages of using this methodology is the speed and quality that can take its auditions and corrections.

As of today's date, and while I am writing these lines, almost all the professionals in the sector are aware of the success of BIM implementation and the fact BIM methodology is here to stay, even though some companies are reluctant to your use it. The level of BIM implementation among architects reaches the 40% and the level of satisfaction among its users is high, according to the latest CSCAE surveys. The reluctance to change is due to the high cost of the initial investment, both in training the staff and in hardware and software. Although the investment in implementing BIM is high initially, we will gather the fruits as projects are carried out and as long, we are focused on quality, process automation and meeting an added value. In the light of the foregoing, creating an Implementation Plan in the company is a must, as well as it is to operate with a work philosophy based on continuous improvement. Since the company takes the decision to implement BIM until it reaches a level of BIM maturation that starts to obtain results in productivity and returns the investment, it takes around twelve to eighteen months depending on the dimensions of the organization.

It should be noted that for some companies the lack of an implementation plan and the principles mentioned above cause a sham attempt of implementation of BIM, as they continue to work throughout the process in the traditional way and when the blueprints of the project are finished, BIM modelling is performed by an external company or by someone in the organization, this involves an incongruity in the very essence of BIM use and they will hardly be able to reach an internal implantation in the short term, in addition that it is an extra cost.

In the light of the above, and the perspective of a sector in which the shortage of skilled labour force is the general trend, it is necessary to work in increasingly controlled environments in which the use of BIM, Last Planner System, IPD and industrialization will be the keys to move forward to create building models of sustainable and quality cities.

Influence of the cracking moment of two reinforced concrete beams obtained through fiber optic sensors in the determination of their instant deflections

Influencia del momento de fisuración de dos vigas de hormigón armado obtenido mediante sensores de fibra óptica en la determinación de sus flechas instantáneas

JULIÁN GARCÍA DÍAZ

Building engineer, School of Building Engineering Universidad Politécnica de Madrid, 28040, Madrid, Spain. julian.garcia@ciccp.es

This article investigates the measurement of the real instantaneous deflection using a displacement transducer, and with fiber optic sensors embedded and welded to the corrugated rebars in order to determine the real cracking moment of the concrete. Two reinforced concrete beams simply resting on the support with point loading in the center of the span have been tested, at which point the maximum deflection is reached. Both the sensors and the displacement transducer have been placed in the center of the span. Different loading steps have been applied to the beams, using a loading cylinder, and the measurement of the load applied has been determined using a loading cell. During the loading process of the beams, the real moment at which they cracked has been determined, and which determines the change from the gross inertia to the cracked inertia in the study of the deflections. Two expressions have been deduced that modify the formula of the instantaneous deflection and demonstrate that they are valid to determine in a much more precise way the instantaneous deflections on simply resting on the support concrete beams. Future lines of research will concentrate on studying the instantaneous deflections of more complex beams, and thus obtain expressions that more closely approximate their actual behaviour.

Fiber optic sensors embedded in concrete, Displacement transducer, cracking, deflection, Fiber Bragg Grating, Monitoring.

Este artículo investiga la medida de la flecha instantánea real mediante un transductor de desplazamiento, y con sensores de fibra óptica embebidos y soldados a las barras de acero corrugado con el objeto de determinar el momento de fisuración real del hormigón. Se han ensayado dos vigas de hormigón armado simplemente apoyadas con carga puntual en el centro del vano, punto en el que se alcanza la máxima flecha. Tanto los sensores como el transductor de desplazamiento se han colocado en el centro del vano. Se han sometido a las vigas a diferentes escalones de carga, mediante un cilindro de carga, y las medidas de las cargas aplicadas se han recogido mediante una célula de carga. Durante el proceso de carga de las vigas se ha determinado el momento real en el que fisuran, y que determina el cambio de la inercia bruta a la inercia fisurada en el estudio de las flechas. Se han deducido dos expresiones que modifican la fórmula de la flecha instantánea, y que demuestran que son válidas para determinar de una manera mucho más precisa las flechas instantáneas de vigas de hormigón simplemente apoyadas. Futuras líneas de investigación se centrarán en estudiar las flechas instantáneas de vigas más complejas, y obtener así expresiones que acerquen de una manera más precisa su comportamiento real.

Sensores de fibra óptica embebidos en hormigón, Transductor de desplazamiento, fisuración, flecha, Red de Bragg, Monitorización.

1. INTRODUCCIÓN

Las flechas en las estructuras de hormigón son las principales causantes de patologías en la edificación. Una flecha excesiva puede causar fisuras en tabiquerías, grietas o roturas en pavimentos, en fachadas.

Así pues, el control de las flechas es un elemento fundamental

en el buen funcionamiento del edificio.

Con la colocación de sensores de fibra óptica embebidos en hormigón y soldados a las barras de acero corrugado, podemos determinar de una manera precisa el momento en el que se produce la primera fisura en el elemento estructural en estudio. Este procedimiento de determinación de la primera fisura ha sido estudiado por [1]. En dicho estudio se determina

la aparición de la primera fisura mediante un salto significativo en la deformación del acero en el momento de producirse esta.

Una vez determinado el momento de fisuración real del elemento estructural, se puede determinar de una manera más precisa la flecha de este, ya que la inercia fisurada comienza a tenerse en cuenta en el instante de producirse la fisura, con lo que la evaluación de la flecha se determina de una manera mucho más real. En el estudio de la flecha realizado por este autor en [2] se analizan las dos vigas de hormigón armado incluidas en este estudio. La novedad que recoge este artículo es por un lado la utilización del momento de fisuración real obtenido en el estudio realizado en [1], con una metodología diferente a la realizada en [2], y cuyo valor se acerca más a la realidad del comportamiento de las dos estructuras estudiadas, y la obtención del factor w en la Etapa I con un valor constante de 2.

Se han estudiado dos vigas de hormigón armado de diferentes secciones y armados. Tal y como hemos comentado, el momento en que se produce la fisuración del hormigón tiene un protagonismo decisivo en la evaluación de la flecha de los elementos estructurales.

Se ha investigado mucho acerca de la fisuración de elementos estructurales de hormigón [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21],

[22], [23], [24]. Estos métodos detectan las fisuras en elementos estructurales por diferentes métodos, la diferencia con el método estudiado por el autor de este artículo es que además de detectar la primera fisura en el elemento estructural, se conoce la deformación real del acero que compone la estructura.

Los sensores de fibra óptica también han sido muy empleados para estudiar deformaciones[25], [26], [27], [28], [29] y flechas [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], objeto de este artículo.

La novedad que se introduce en este artículo es poder realizar la medida de la flecha real de dos vigas de hormigón armado conociendo el instante preciso en el que fisura el hormigón, y como a partir de ese momento las flechas reales medidas por el transductor de desplazamiento coinciden con las obtenidas por el cálculo tradicional de resistencia de materiales con las vigas fisuradas, demostrando que se trata de un sistema eficaz para la medida real de las flechas en vigas de hormigón.

2. MATERIALES Y MÉTODO

Se han construido dos vigas de hormigón armado a las que se les han embebido sensores de fibra óptica de deformación y temperatura, con los armados y secciones que se muestran en las Figuras 1 a 2.

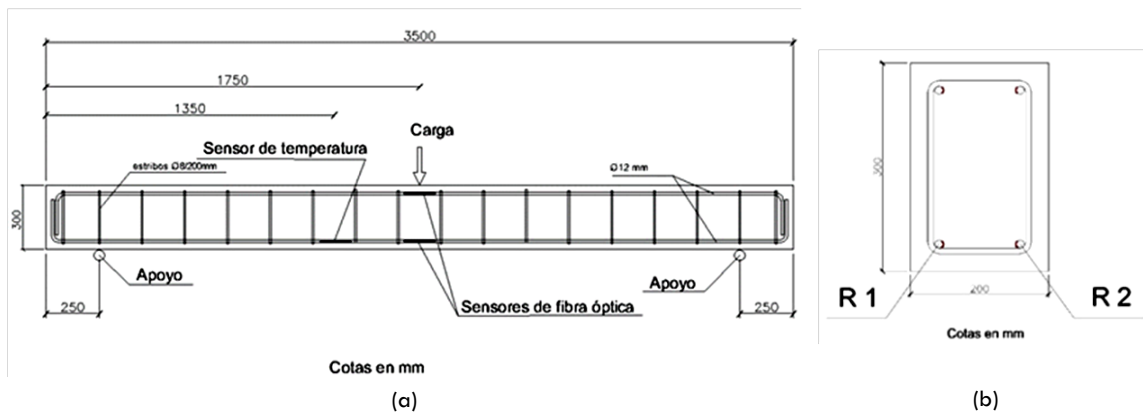


Fig. 1. (a) Armado de viga de 200x300 mm y posición de los sensores de deformación y temperatura y (b) Sección de la viga de 200x300 mm.

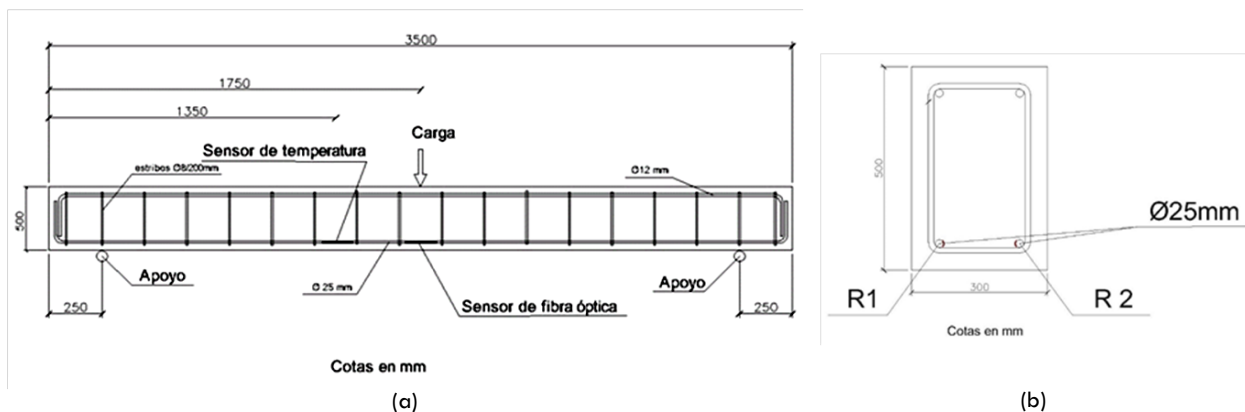


Fig. 2. (a) Armado de viga de 300x500 mm y posición de los sensores de deformación y temperatura (b) Sección de la viga de 300x500 mm.

Los sensores de deformación que se han utilizado son soldables tipo FS62WSS (Fig. 3) de la marca comercial HBM.



Fig.3. Sensor de deformación soldable tipo FS62WSS.

Los sensores de temperatura utilizados son del tipo FS63 (Fig. 4), también de HBM.



Fig. 4. Sensor de temperatura tipo FS63.

Para monitorizar las vigas de hormigón se han fabricado arrays compuestos por dos sensores de deformación tipo FS62WSS, y un sensor de temperatura, tipo FS63. Los sensores están unidos entre si formando una cadena con fibra óptica. En los extremos de la cadena se han colocado unos terminales para poder conectar al interrogador.

El interrogador utilizado es el FS22, de la marca comercial HBM. Está diseñado para interrogar a los sensores basados en la Red de Bragg (FBG). Utiliza la tecnología de barrido continuo por láser, e incluye una referencia de longitud de onda rastreada que proporciona una calibración continua y garantiza la precisión del sistema a largo plazo. La combinación de alto rango dinámico y alta potencia de salida proporciona una alta resolución incluso para cables de fibra largos y/o conexiones con pérdida (Fig. 5).

Las cargas sucesivas se van a aplicar mediante una prensa hidráulica que presionará a una célula de carga tipo RTN de 10 Tn, de torsión anular, cuyas características se describen en la tabla 1.

VIGA DE 200x300 mm				
Carga Nominal (Tn)	Clase de precisión	Cuerpo de medición	Protección	Tipo cable
10	0.05	Acero Inoxidable	IP68 (EN60529)	4 hilos apantallado

Tabla 1. Características de la célula de carga RTN de 10 Tn.

Y para la viga de 300x500 mm una célula de carga tipo RTN de 100 Tn. de carga máxima de torsión anular, cuyas características se describen en la tabla 2.

VIGA DE 300x500 mm				
Carga Nominal (Tn)	Clase de precisión	Cuerpo de medición	Protección	Tipo cable
100	0.05	Acero Inoxidable	IP68 (EN60529)	4 hilos apantallado

Tabla 2: Características de la célula de carga RTN de 100 Tn.



Fig. 5. Interrogador FS22 de 8 canales.

El interrogador se conecta a un ordenador, provisto de un software específico para la recogida de datos de temperatura y deformación que envían los sensores de fibra óptica en tiempo real. Este software ofrece los datos de deformación en $\mu\text{m/m}$ y los de temperatura en $^{\circ}\text{C}$.

La flecha que adquieren los elementos estructurales se va a medir mediante un transductor de desplazamiento potenciométrico lineal de 20 mm, precisión 0,1% (Fig. 6).



Fig. 6. Transductor de desplazamiento.

El transductor de desplazamiento es compatible con el amplificador MX1615B. Se unirá a un sistema de adquisición de datos Quantum X MX1615 de HBM (Fig. 7).



Fig. 7. Sistema de adquisición de datos Quantum X MX1615.

Ambas células de carga (Fig. 8) de la marca comercial HBM con Declaración de Conformidad de la Unión Europea No. 238/ 2017-07 conectadas a un sistema de adquisición de datos Quantum X MX1615, 16 canales.



Fig. 8. Célula de carga RTN de HBM.

Una vez analizados los instrumentos a emplear para realizar la investigación, en la (Fig. 9) se muestra el dispositivo ya montado.

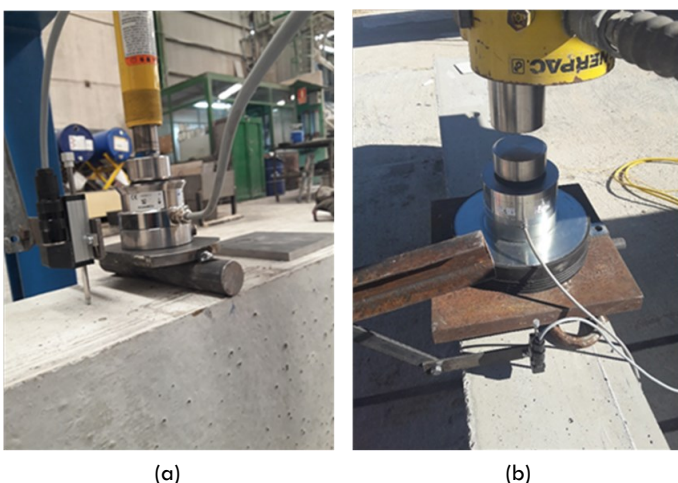


Fig. 9. Célula de carga y transductor de desplazamiento montado en vigas de 200x300 mm (a) y 300x500 mm.(b).

Los terminales de fibra óptica se conectan al interrogador, mientras que las células de carga y transductores de desplazamiento al sistema de adquisición de datos Quantum X MX1615. El interrogador y el sistema de adquisición de datos se conectan a un ordenador que posee el software Catman Easy para interpretar las lecturas de todos los componentes (Fig. 10).

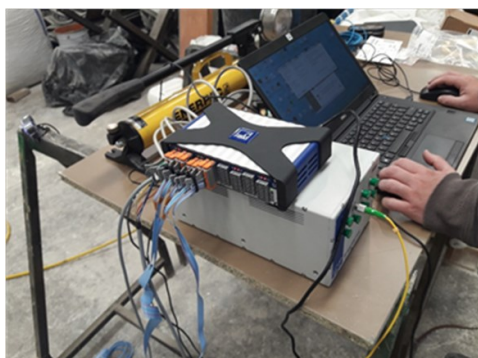


Fig. 10. Conexiones a interrogador, sistema de adquisición de datos, y ordenador.

Una vez realizadas las conexiones, se comienza a realizar el experimento.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fórmula de la flecha instantánea para una viga simplemente apoyada viene dada por la expresión (Fórmula 1):

$$f = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (1)$$

La inercia equivalente viene dada por la Fórmula 2.

$$I_e = \left(\frac{M_f}{M_a} \right)^3 \cdot I_b + \left[1 - \left(\frac{M_f}{M_a} \right)^3 \right] \cdot I_f \leq I_b \quad (2)$$

Donde M_f es el momento nominal de fisuración de la sección, que viene dado por la Fórmula 3.

$$M_f = f_{ctm} \cdot W_b \quad (3)$$

W_b es el módulo resistente de la sección bruta, que debe ser calculado antes de fisurar, según el libro del profesor Calavera, con la expresión para secciones rectangulares (Fórmula 4).

$$W_b = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (4)$$

M_a es el momento flector máximo aplicado, para la combinación característica, a la sección hasta el momento en que se evalúe la flecha.

Distinguiremos dos estados en las vigas ensayadas, el Estado I, previo a la fisuración, y el Estado II, de pieza fisurada.

Tal y como se ha demostrado en el estudio de las deformaciones de las vigas, la fisuración comienza mucho antes de lo que marca, según los cálculos teóricos, el momento de fisuración.

Además, y citando de nuevo al profesor Calavera "Entre labios de fisura, el acero desarrolla él solo todo el esfuerzo de tracción, pero, entre fisuras, se produce el anclaje de la armadura en el hormigón y se transfiere a esta parte de la fuerza de tracción del acero. Si la tracción del hormigón iguala a su resistencia a tracción, se forma una nueva fisura".

El valor E_I es mínimo en las fisuras, pero entre fisuras se produce un incremento de este valor, de lo que se deduce que, siendo constante el valor de E , la variación en los cálculos la proporciona el momento de inercia de la sección.

Las vigas que se han estudiado siguen el esquema que se muestra en la Figura 11, donde se muestra las dimensiones, punto de aplicación de las cargas y posición de los sensores de fibra óptica.

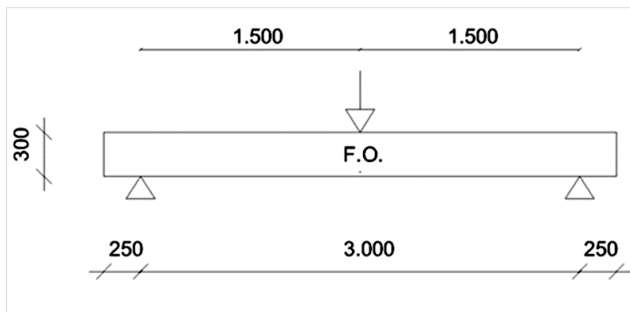


Fig. 11. Esquema de vigas en estudio y posición de sensores de fibra óptica. Cotas en mm.

3.1. VIGA DE 200X300 MM

La medida de las flechas en la viga se ha realizado con el transductor de desplazamiento que se muestra en la Figura 12. Se ha sometido a la viga a diferentes escalones de carga y se han ido anotando los valores de las flechas obtenidas por la medida del transductor de desplazamiento.



Fig. 12. Transductor de desplazamiento, célula de carga y cilindro de carga.

Recordemos los datos de laboratorio del hormigón utilizado (Tabla 3):

HORMIGÓN VIGA DE 200x300 mm	
Resistencia a flexotracción	5.4 MPa
Resistencia a compresión	54.6 MPa
Módulo de Elasticidad	33400 MPa

Tabla 3: Resultados de laboratorio del hormigón empleado en la viga de 200x300 mm.

Se calcula el momento de fisuración teórico aplicando la Fórmula 1, obteniendo el siguiente resultado:

$$M_f = 16.2 \text{ mkN}$$

Inercia bruta de la sección (Fórmula 5).

$$I_b = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4)$$

Luego:

$$I_b = 45.000 \text{ cm}^4 \quad (5)$$

La flecha instantánea en la Etapa I, en la que la viga no ha fisurado, para las distintas cargas aplicadas, será (Tabla 4).

Carga (kN)	Momento (mkN)	Transductor de desplazamiento (mm)	Flecha instantánea (mm)
0.56	0.42	0.05	0.02
2.49	1.87	0.19	0.09
3.85	2.89	0.30	0.14
5.08	3.81	0.41	0.19
6.88	5.16	0.54	0.26
8.07	6.05	0.68	0.30
9.05	6.79	0.93	0.40
13.59	10.19	2.10	1.38
14.15	10.61	2.20	1.53
15.34	11.51	2.57	1.88
17.69	13.27	3.00	2.58
19.09	14.32	3.28	3.01
20.01	15.01	3.66	3.29

Tabla 4: Relación entre cargas aplicadas y flechas instantáneas reales y de cálculo.

En la Figura 13 observamos el comportamiento real de la viga frente a los cálculos teóricos con la viga antes de fisurar según los cálculos realizados con la resistencia a tracción teórica del hormigón.

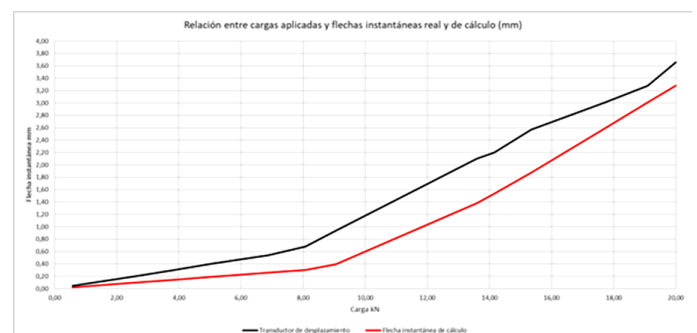


Fig. 13. Flecha instantánea real y de cálculo en la Etapa I.

Una vez que se alcanza el momento de fisuración del hormigón, la inercia de la viga cambia.

Para calcular la inercia fisurada de la viga, necesitamos previamente conocer la profundidad de la fibra neutra de la sección (F.N.) (Fig. 14).

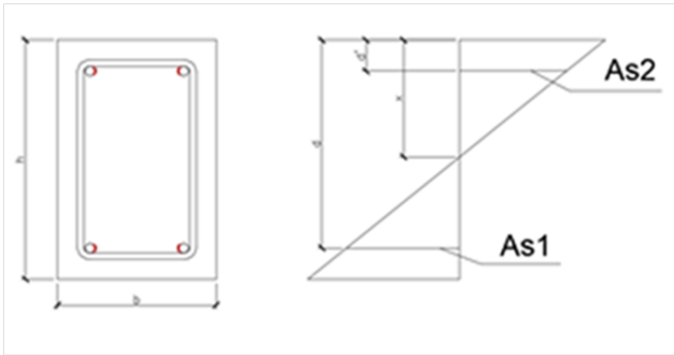


Fig. 14. Esquema de la sección. Zona de tracción y compresión y profundidad de la fibra neutra.

La expresión de la profundidad de la fibra neutra viene dada por la Fórmula 6.

$$x_{fis} = n \cdot \rho_2 \cdot \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \cdot \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{\rho_1 \cdot d'}{\rho_2 \cdot d}\right)}{n \cdot \rho_1 \cdot \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^2}}\right] \quad (6)$$

Aplicando esta expresión, obtenemos la profundidad de la F.N. cuyo valor es de 52.60 mm.

Una vez conocida la profundidad de la fibra neutra, obtenemos la inercia fisurada mediante la expresión (Fórmula 7).

$$I_{fis} = n \cdot A_{s2} \cdot (d - x_{fis}) \cdot \left(d - \frac{x_{fis}}{3}\right) + n \cdot A_{s1} \cdot (x_{fis} - d') \cdot \left(\frac{x_{fis}}{3} - d'\right) \quad (7)$$

El valor de la inercia fisurada es de 73.651.197.11 mm⁴.

Con este dato, evaluamos la flecha con la viga fisurada (Tabla 5).

CARGA (kN)	MOMENTO (mkN)	TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO (mm)	FLECHA INSTANTÁNEA FISURADA (mm)
22.71	17.03	4.30	5.19
25.42	19.06	5.25	5.81
26.64	19.98	5.63	6.09
29.11	21.83	6.65	6.66
30.45	22.84	6.96	6.96
33.80	25.35	8.58	7.73
35.57	26.67	9.00	8.13
37.75	28.31	11.14	8.63

Tabla 5: Relación entre cargas aplicadas y flechas instantáneas reales y de cálculo con la viga fisurada.

En la Figura 15 se muestra el comportamiento real obtenido por el transductor de desplazamiento frente al cálculo teórico de las flechas con la inercia fisurada.

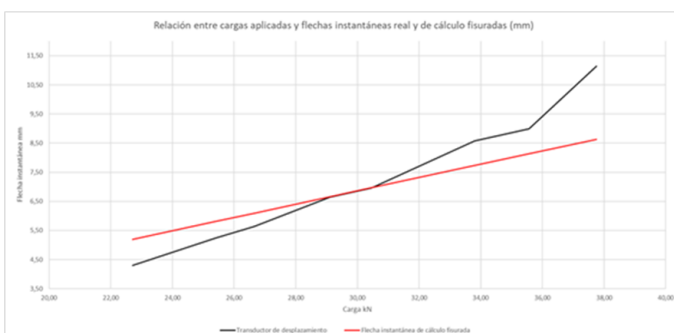


Fig. 15. Flecha instantánea real y de cálculo en la Etapa II.

Tanto la gráfica de la flecha en la Etapa I y en la Etapa II no muestran una convergencia clara entre los valores teóricos y los reales obtenidos por el transductor de desplazamiento.

Para el caso de la Etapa II, vamos a utilizar el concepto de inercia equivalente formulado por Branson (Fórmula 2), con el que observaremos una mayor convergencia en los resultados.

$$I_e = \left(\frac{M_f}{M_a}\right)^3 \cdot I_b + \left[1 - \left(\frac{M_f}{M_a}\right)^3\right] \cdot I_f \leq I_b \quad (2)$$

La fórmula de Branson determina la inercia equivalente de la sección, que es una inercia intermedia entre la bruta y la fisurada. La verdadera ley de inercias de la viga es la representada en la Figura 16.

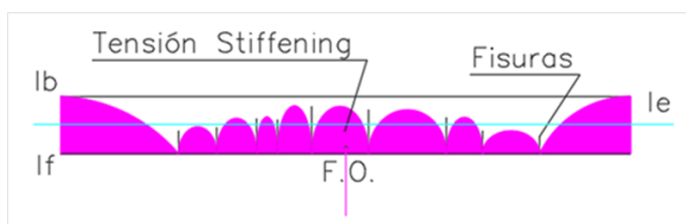


Fig. 16. Ley de Inercias de la viga fisurada.

Donde vemos que la Inercia Equivalente, es un valor promedio entre la Inercia Bruta (Ib) y la fisurada (If).

Entre fisuras, tal y como enuncia el Profesor Calavera, el hormigón trabaja, y colabora con el acero en la deformación. La tensión existente entre fisuras del hormigón es la llamada Tensión Stiffening.

Además, se ha observado que, en el instante de producirse la fisura en la viga, el factor w cambia del Estado I al Estado II no de manera inmediata. Así, consideraremos el primer estado de carga con la viga fisurada con el factor w_I, para pasar

en el siguiente a w_{II} . El factor w_{II} considera la relación de armado de la viga en compresiones y tracciones, según la Fórmula 8.

$$w_{II} = 1 + \left(0.1 * \frac{A_{s1}}{A_{s2}} \right) \tag{8}$$

La expresión de la flecha instantánea es (Fórmula 9).

$$f = w_{II} * \frac{P * L^3}{48 * E * I_{eq}} \tag{9}$$

Utilizaremos el valor del momento de fisuración real del hormigón, $M_{fis} = 6.38$ mkN, con el que determinaremos los valores reales de cálculo de la flecha de la viga en estudio (Tabla 6).

CARGA (kN)	MOMENTO (mkN)	TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO (mm)	FLECHA INSTANTÁNEA CON FACTOR w_{II} (mm)
9.05	6.79	0.93	0.79
13.59	10.19	2.10	1.52
14.15	10.61	2.20	1.69
15.34	11.51	2.57	2.06
17.69	13.27	3.00	2.84
19.09	14.32	3.28	3.31
20.01	15.01	3.66	3.61
22.71	17.03	4.30	4.50
25.42	19.06	5.25	5.36
26.64	19.98	5.63	5.74
29.11	21.83	6.65	6.49
30.45	22.84	6.96	6.89
33.80	25.35	8.58	7.86
35.57	26.67	9.00	8.36
37.75	28.31	11.14	8.97

Tabla 6: Flecha real y teórica en función de las cargas aplicadas utilizando la inercia equivalente, el factor w_{II} y el momento de fisuración real del hormigón.

La Figura 17 muestra la relación entre la carga aplicada y la flecha obtenida mediante el transductor de desplazamiento y el valor teórico con el momento de fisuración real del hormigón, utilizando la inercia equivalente.

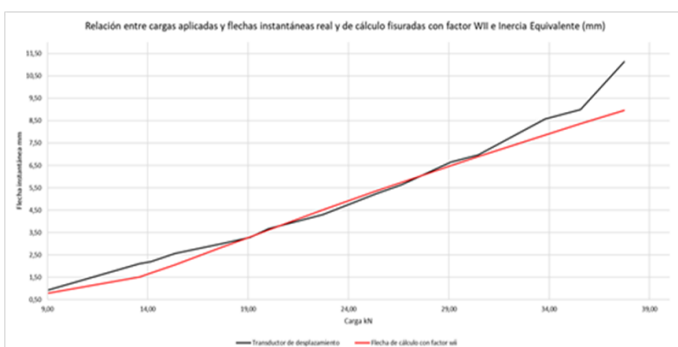


Fig. 17. Relación entre cargas aplicadas y flecha teórica con inercia equivalente y momento de fisuración real del hormigón, comparada con flecha real obtenida con el transductor de desplazamiento.

Para completar el estudio de la flecha, ya que el momento de fisuración real es de 6.38 mkN, la relación entre cargas aplicadas y flecha instantánea real y de cálculo en la Etapa I es (Tabla 7):

CARGA (kN)	MOMENTO (mkN)	TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO (mm)	FLECHA INSTANTÁNEA (mm)
0.56	0.42	0.05	0.02
2.49	1.87	0.19	0.09
3.85	2.89	0.30	0.14
5.08	3.81	0.41	0.19
6.88	5.16	0.54	0.26
8.07	6.05	0.68	0.30

Tabla 7: Relación entre cargas aplicadas y flecha instantánea real y de cálculo en la Etapa I con el momento de fisuración real.

En la Figura 18 observamos las curvas de flechas obtenidas con el transductor de desplazamiento, y la teórica en la Etapa I.

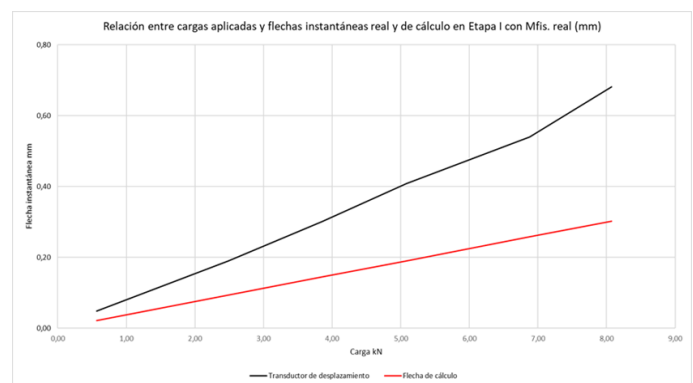


Fig. 18. Relación entre cargas aplicadas y flecha instantánea real y de cálculo en Etapa I con M_{fis} real.

Observando este gráfico deducimos que, en la realidad, la viga adquiere más flecha de la que indican los cálculos teóricos.

Es evidente que existen factores reológicos, no tenidos en cuenta, que hacen que las estructuras se deformen en el proceso de fraguado y adquisición de resistencia, pero en los cálculos teóricos estos factores no se valoran.

Cuando la viga no ha fisurado, en la Etapa I, el factor w descrito anteriormente, por las experiencias realizadas, tiene un valor de 2.

Así pues, para una viga simplemente apoyada, con una carga puntual en el centro del vano, la expresión de la flecha instantánea en la Etapa I queda como sigue (Fórmula 10).

$$f = w_I * \frac{P * L^3}{48 * E * I} \tag{10}$$

Si aplicamos este factor a la flecha instantánea de cálculo, veamos qué ocurre (Tabla 8):

CARGA (kN)	MOMENTO (mkN)	TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO (mm)	FLECHA INSTANTÁNEA (mm)
0.56	0.42	0.05	0.04
2.49	1.87	0.19	0.19
3.85	2.89	0.30	0.29
5.08	3.81	0.41	0.38
6.88	5.16	0.54	0.51
8.07	6.05	0.68	0.60

Tabla 8: Relación entre cargas aplicadas y flechas instantáneas real y de cálculo en Etapa I aplicando el factor corrector w.

Las curvas ahora convergen mucho mejor (Fig. 19). Este mismo caso se va a estudiar en la viga de 300x500 mm, para comprobar que es un factor adecuado para el estudio de las flechas instantáneas tanto en la Etapa I como en la Etapa II.

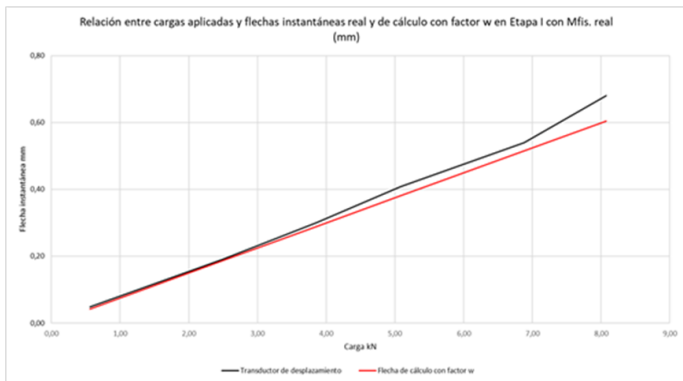


Fig. 19. Relación entre cargas aplicadas y flecha instantánea real y de cálculo con factor w en la Etapa I con Mfis. real.

Una vez realizadas las correcciones al estudio de la flecha instantánea vistas anteriormente, la Tabla 9 muestra la Etapa I y Etapa II en su conjunto.

CARGA (kN)	MOMENTO (mkN)	TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO	FLECHA INSTANTÁNEA (mm)
0.56	0.42	0.05	0.04
2.49	1.87	0.19	0.19
3.85	2.89	0.30	0.29
5.08	3.81	0.41	0.38
6.88	5.16	0.54	0.51
8.07	6.05	0.68	0.60
9.05	6.79	0.93	0.79
13.59	10.19	2.10	1.52
14.15	10.61	2.20	1.69
15.34	11.51	2.57	2.06
17.69	13.27	3.00	2.84
19.09	14.32	3.28	3.31
20.01	15.01	3.66	3.61
22.71	17.03	4.30	4.50
25.42	19.06	5.25	5.36
26.64	19.98	5.63	5.74
29.11	21.83	6.65	6.49
30.45	22.84	6.96	6.89
33.80	25.35	8.58	7.86
35.57	26.67	9.00	8.36
37.75	28.31	11.14	8.97

Tabla 9: Relación de cargas aplicadas y flecha instantánea de cálculo en Etapas I y II, y flecha instantánea obtenida con el transductor de desplazamiento.

En la Figura 20 se muestra la curva de la flecha teórica y la obtenida mediante el transductor de desplazamiento, aplicando el factor w en la Etapa I, y la inercia equivalente en la Etapa II.

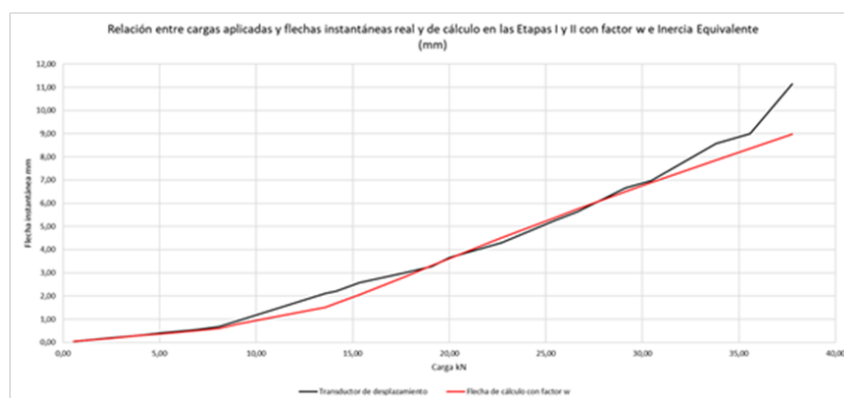


Fig. 20. Gráfico de la flecha instantánea de la viga de 200x300 mm en todo el proceso de carga.

3.1. VIGA DE 300 X 500 MM

Se ha analizado la flecha instantánea de una viga de 200x300 mm en el apartado anterior. En base a este estudio,

vamos a comprobar qué sucede con una viga de 300x500 mm, con armaduras diferentes en tracción y compresión, para, de este modo, corroborar que los resultados obtenidos se cumplen también en este caso.

La medida de las flechas en la viga se ha realizado con el transductor de desplazamiento que se muestra en la Figura 23. Se ha sometido a la viga a diferentes escalones de carga y se han ido anotando los valores de las flechas obtenidas por la medida del transductor de desplazamiento.



Fig. 21. Transductor de desplazamiento, célula de carga y cilindro de carga.

Se ha realizado una inspección visual de las fisuras (Fig. 24), y se han ido anotando las cargas aplicadas en cada fisura.



Fig. 22. Inspección visual de las fisuras.

En dicha inspección visual se ha podido determinar la carga para la que se ha producido la primera fisura, cuyo valor es de 58 kN (Fig. 25).

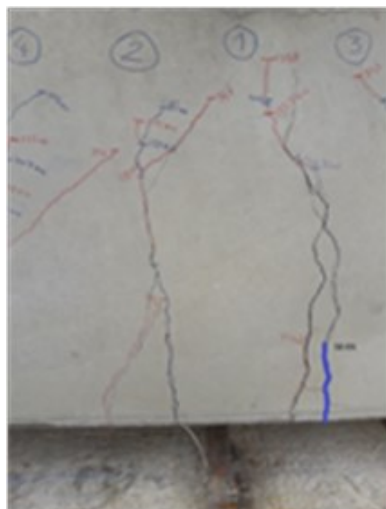


Fig. 23. Aparición de la primera fisura para una carga de 58 kN en inspección.

Tal y como se comentó en el apartado de deformación, existe un salto significativo en la deformación de las barras R1 y R2 para una carga de 54 kN, frente a los 58 kN observados en la inspección visual. Dado que el dato de la fibra óptica es evidentemente más preciso que el de la inspección visual, tomamos como carga para la que la viga fisura 54 kN.

Los datos obtenidos por el laboratorio que ha roto las probetas tomadas el día en que se hormigonó la viga, y rotas el día que se realizó el ensayo, son (Tabla 10):

HORMIGÓN VIGA DE 300x500 mm	
Resistencia a flexotracción	8.9 MPa
Resistencia a compresión	58.8 MPa
Módulo de Elasticidad	33053 MPa

Tabla 10: Resultados de laboratorio del hormigón empleado en la viga de 300x500 mm.

Se calcula el momento de fisuración teórico aplicando la Fórmula 1, obteniendo el siguiente resultado:

$$M_f = 111.25 \text{ mkN}$$

Inercia bruta de la sección (Fórmula 5).

$$I_b = \frac{b \cdot h^3}{12} \tag{5}$$

Luego:

$$I_b = 312.500 \text{ cm}^4$$

La flecha instantánea en la Etapa I, en la que la viga no ha fisurado, para las distintas cargas aplicadas, será (Tabla 11).

CARGA (kN)	MOMENTO (mkN)	TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO (mm)	FLECHA INSTANTÁNEA (mm)
5.20	3.90	0.04	0.03
10.41	7.81	0.08	0.06
15.24	11.43	0.18	0.08
20.26	15.20	0.25	0.11
25.11	18.83	0.28	0.14
30.02	22.52	0.31	0.16
35.01	26.26	0.37	0.19
40.32	30.24	0.42	0.22
43.42	32.57	0.50	0.24
54.00	40.50	0.68	0.29
60.54	45.41	0.80	0.33
70.00	52.50	0.98	0.38
80.37	60.28	1.16	0.44
90.00	67.50	1.62	0.49
101.20	75.90	1.83	0.55
110.30	82.73	2.21	0.60
120.80	90.60	2.55	0.66
131.30	98.48	2.90	0.72
142.10	106.58	3.55	0.77

Tabla 11: Relación entre cargas aplicadas y flechas instantáneas reales y de cálculo en Etapa I con los datos del método de Resistencia de Materiales.

La Figura 24 muestra la relación entre la flecha instantánea obtenida con el transductor de desplazamiento, y la obtenida por cálculo a través de los datos del cálculo de resistencia de materiales.

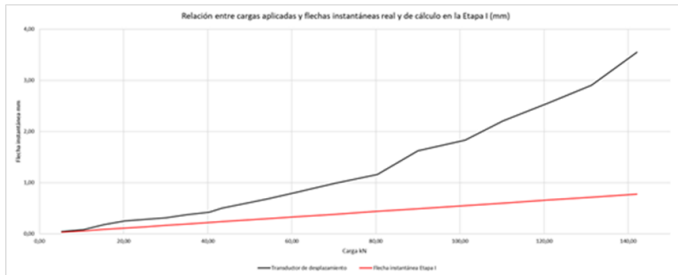


Fig. 24. Flecha instantánea real y de cálculo en Etapa I.

Del mismo modo que hicimos en la viga de 200x300 mm, calculamos la profundidad de la F.N. y la Inercia Fisurada de la sección.

La profundidad de la fibra neutra tiene un valor de 116.14 mm, y el valor de la Inercia Fisurada 891.278.445.85 mm⁴.

Estudiamos ahora la Etapa II, en que la viga está fisurada (Tabla 12):

CARGA (kN)	MOMENTO (mkN)	TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO (mm)	FLECHA INSTANTÁNEA FISURADA (mm)
150.00	112.50	3.72	2.86
170.50	127.88	4.05	3.26
182.10	136.58	4.43	3.48
201.20	150.90	4.94	3.84
210.00	157.50	5.34	4.01
230.60	172.95	5.72	4.40
252.20	189.15	6.39	4.82
275.20	206.40	7.06	5.25

Tabla 12: Relación entre cargas aplicadas y flecha instantánea real y de cálculo en Etapa II.

En la Figura 25 se muestra el comportamiento real obtenido por el transductor de desplazamiento frente al cálculo teórico de las flechas con la inercia fisurada.

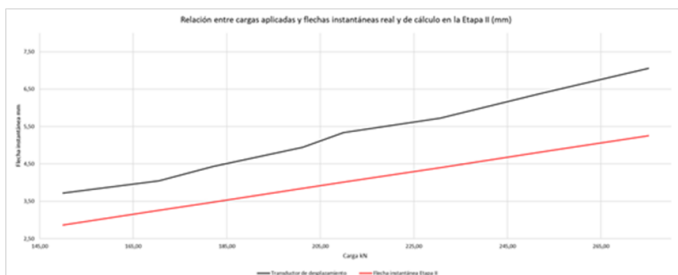


Fig. 25. Relación entre cargas aplicadas y flecha instantánea real y de cálculo en Etapa II.

Igual que ocurrió con la viga de 200x300 mm, la gráfica de la flecha en la Etapa I y en la Etapa II no muestran una convergencia clara entre los valores teóricos y los reales obtenidos por el transductor de desplazamiento.

Utilizaremos para el caso de la Etapa II el concepto de inercia equivalente formulado por Branson, con el que observaremos una mayor convergencia en los resultados. Además, aplicaremos el factor w_{II} enunciado anteriormente, cuya expresión es (Fórmula 8).

$$w_{II} = 1 + \left(0.1 * \frac{A_{s1}}{A_{s2}} \right) \quad (8)$$

Utilizaremos el valor del momento de fisuración real del hormigón, obtenida por los sensores en el apartado de deformación $M_{fis} = 40.50$ mkN, con el que determinaremos los valores reales de cálculo de la flecha de la viga en estudio (Tabla 13).

CARGA (kN)	MOMENTO (mkN)	TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO (mm)	FLECHA INSTANTÁNEA CON FACTOR w_{II} (mm)
54.00	40.50	0.68	0.59
60.54	45.41	0.80	0.70
70.00	52.50	0.98	0.77
80.37	60.28	1.16	1.11
90.00	67.50	1.62	1.45
101.20	75.90	1.83	1.86
110.30	82.73	2.21	2.19
120.80	90.60	2.55	2.57
131.30	98.48	2.90	2.94
142.10	106.58	3.55	3.31
150.00	112.50	3.72	3.57
170.50	127.88	4.05	4.24
182.10	136.58	4.43	4.60
201.20	150.90	4.94	5.19
210.00	157.50	5.34	5.45
230.60	172.95	5.72	6.06
252.20	189.15	6.39	6.69
275.20	206.40	7.06	7.36

Tabla 13: Relación entre carga aplicada y flechas instantáneas real y de cálculo con momento de fisuración real, factor w_{II} e inercia equivalente.

Con la utilización de la inercia equivalente, el factor w_{II} y el momento de fisuración real obtenido con los sensores de fibra óptica embebidos observamos como las curvas de deformación real y de cálculo convergen en mayor medida (Fig. 26).

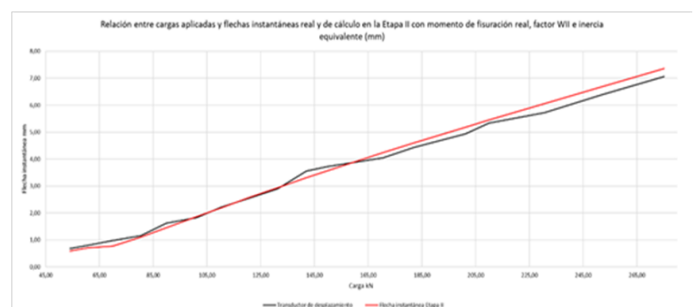


Fig. 26. Relación entre carga aplicada y flecha instantánea real y de cálculo con momento de fisuración real e inercia equivalente en Etapa II.

Con el dato del momento de fisuración real del hormigón, veamos cómo queda la Etapa I (Tabla 14).

CARGA (kN)	MOMENTO (mkN)	TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO (mm)	FLECHA INSTANTÁNEA (mm)
5.20	3.90	0.04	0.03
10.41	7.81	0.08	0.06
15.24	11.43	0.18	0.08
20.26	15.20	0.25	0.11
25.11	18.83	0.28	0.14
30.02	22.52	0.31	0.16
35.01	26.26	0.37	0.19
40.32	30.24	0.42	0.22
43.42	32.57	0.50	0.24

Tabla 14: Relación entre carga aplicada y flechas instantáneas real y de cálculo con momento de fisuración real en Etapa I.

En la Figura 27 se observa en detalle lo mismo que ocurrió en la viga de 200x300 mm, las curvas de flecha instantánea real y de cálculo distan bastante de converger, por lo que aplicaremos el factor w descrito en el apartado anterior.

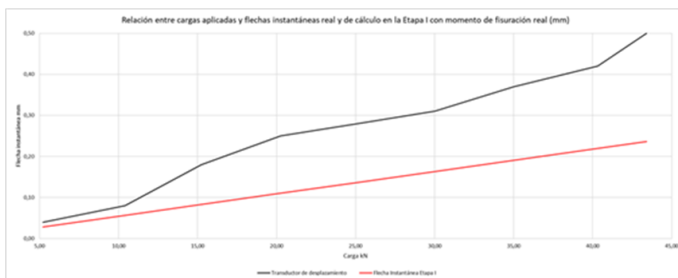


Fig. 27. Relación entre carga aplicada y flechas instantáneas real y de cálculo en Etapa I con momento de fisuración real.

El factor w_1 en vigas simplemente apoyadas con carga puntual en el centro del vano para la Etapa I tiene un valor de 2. Veamos qué ocurre cuando lo aplicamos a la viga en estudio (Tabla 15).

CARGA (kN)	MOMENTO (mkN)	TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO (mm)	FLECHA INSTANTÁNEA (mm)
5.20	3.90	0.04	0.06
10.41	7.81	0.08	0.11
15.24	11.43	0.18	0.17
20.26	15.20	0.25	0.22
25.11	18.83	0.28	0.27
30.02	22.52	0.31	0.33
35.01	26.26	0.37	0.38
40.32	30.24	0.42	0.44
43.42	32.57	0.50	0.47

Tabla 15: Relación entre cargas aplicadas y flecha instantánea real y de cálculo en Etapa I con factor w.

A la vista de los resultados obtenidos, tanto en la viga de 200x300 mm, como en la de 300x500 mm, podemos determinar que, en la Etapa I, en la que la viga no ha fisurado, teniendo en cuenta el momento de fisuración real del hormigón obtenido mediante los sensores de fibra óptica, la flecha instantánea se multiplica por un factor w que para la Etapa I tiene un valor de 2 (Fig. 28).



Fig. 28. Flecha instantánea real y de cálculo en Etapa I con factor w.

Una vez realizado el estudio completo de la flecha instantánea de la viga, los valores finales en las dos etapas son (Tabla 16):

CARGA (kN)	MOMENTO (mkN)	TRANSDUCTOR DE DESPLAZAMIENTO (mm)	FLECHA INSTANTÁNEA (mm)
5.20	3.90	0.04	0.06
10.41	7.81	0.08	0.11
15.24	11.43	0.18	0.17
20.26	15.20	0.25	0.22
25.11	18.83	0.28	0.27
30.02	22.52	0.31	0.33
35.01	26.26	0.37	0.38
40.32	30.24	0.42	0.44
43.42	32.57	0.50	0.47
54.00	40.50	0.68	0.59
60.54	45.41	0.80	0.70
70.00	52.50	0.98	0.77
80.37	60.28	1.16	1.11
90.00	67.50	1.62	1.45
101.20	75.90	1.83	1.86
110.30	82.73	2.21	2.19
120.80	90.60	2.55	2.57
131.30	98.48	2.90	2.94
142.10	106.58	3.55	3.31
150.00	112.50	3.72	3.57
170.50	127.88	4.05	4.24
182.10	136.58	4.43	4.60
201.20	150.90	4.94	5.19
210.00	157.50	5.34	5.45
230.60	172.95	5.72	6.06
252.20	189.15	6.39	6.69
275.20	206.40	7.06	7.36

Tabla 16: Relación entre carga aplicada y flechas instantáneas corregidas.

La Figura 29 muestra la convergencia entre las flechas instantáneas real medida con el transductor de desplazamiento, y de cálculo realizadas las correcciones anteriormente explicadas.

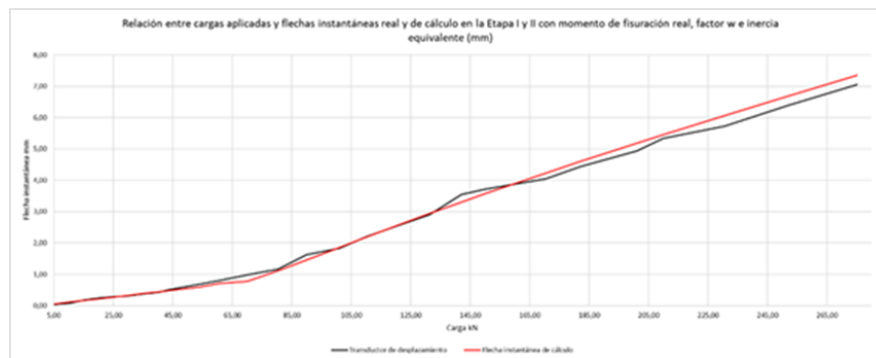


Fig. 29. Relación entre cargas aplicadas y flecha instantánea de cálculo corregida.

El método de corrección de las dos vigas en estudio por aplicación por un lado de la fórmula de Branson para la obtención de la inercia equivalente de las secciones, el conocimiento del momento de fisuración real del hormigón obtenido mediante los sensores de fibra óptica embebidos, y el factor w de corrección de las flechas instantáneas, demuestra que la metodología empleada para la determinación de la flecha instantánea de una viga de hormigón simplemente apoyada con carga puntual en el centro del vano es adecuada.

4. CONCLUSIONES

Se han estudiado las flechas instantáneas de dos vigas de hormigón armado. Lo primero que podemos concluir a la vista de los resultados obtenidos es que la expresión de la flecha instantánea en vigas de hormigón simplemente apoyadas con carga puntual en el centro del vano ofrece unos valores diferentes a los observados mediante el transductor de desplazamiento, y que nos da el valor real de la flecha.

Existen dos etapas en el estudio de un elemento estructural, según enuncia el profesor Calavera, la Etapa I, en la que la viga no ha fisurado, y la Etapa II, en la que la viga está fisurada.

Durante el estudio de la Etapa I, se ha observado que la flecha instantánea obtenida con el transductor de desplazamiento es dos veces superior a la obtenida mediante la fórmula de resistencia de materiales tradicional. Se ha creado un factor w_1 para esta etapa I, cuyo valor es 2. Aplicándolo, se observa como las flechas reales y de cálculo convergen de una manera muy satisfactoria.

En el estudio de la Etapa II, en la que la viga está fisurada, se ha calculado la inercia fisurada de la viga, en función de la profundidad de la fibra neutra con la viga fisurada. Mediante este dato, se ha utilizado la fórmula de Branson, que ofrece una inercia equivalente, que es una media ponderada entre la inercia bruta y fisurada de la sección.

Es determinante el conocimiento del momento de fisuración real del hormigón, ya que las vigas fisuran mucho antes de lo que dicen las fórmulas de resistencia de materiales y los datos

de laboratorio que han ensayado las probetas a flexotracción.

Una vez conocido el momento de fisuración real del hormigón y las inercias equivalentes, se observa como las flechas instantáneas real y de cálculo convergen mejor, aunque no con la precisión deseada.

En este caso, se ha deducido una expresión, el factor w_{II} , evaluado en función de los armados de las vigas, que aplicado dan como resultado una precisión absoluta entre las flechas teórica y real.

Estos procedimientos han sido probados en las dos vigas estudiadas, para comprobar que el método deducido es válido en vigas de cualquier sección y armado, probando que son válidos para la obtención de las flechas instantáneas en vigas de hormigón simplemente apoyadas con carga puntual en el centro del vano.

5. REFERENCIAS

- [1] J. García Díaz, N. Navarro Cano, and E. Rúa Álvarez, "Determination of the Real Cracking Moment of Two Reinforced Concrete Beams Through the Use of Embedded Fiber Optic Sensors," *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 3, 2020, doi: 10.3390/s20030937.
- [2] J. García Díaz, N. Navarro Cano, and E. Rúa Álvarez, "Análisis de resultados de deformaciones y flechas en dos vigas de hormigón armado monitorizadas con sensores de fibra óptica embebidos = Analysis of deformation and deflection results in two reinforced concrete beams monitored with embedded fibre optic se," *An. Edif. Vol. 5, Núm. 3 Septiembre - Diciembre 2019DO - 10.20868/ade.2019.4367*, Dec. 2019.
- [3] E. Hover, S. Psomas, and C. Eddie, "Estimating crack widths in steel fibre-

- reinforced concrete," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, vol. 170, no. 3, pp. 141–152, 2017, doi: 10.1680/jcoma.15.00019.
- [4] T. Jiao, Z. Zhou, and H. Xiao, "Investigation into coaxial cable Fabry–Perot interferometers for strain measurement and crack detection in RC structures," *Measurement*, vol. 147, p. 106873, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106873>.
- [5] K. (Wenhai) Li and M. Gaudet, "High Spatial Resolution Crack Monitoring in Concrete Structures Using a Distributed Fiber Optic Sensor," *J. Nucl. Eng. Radiat. Sci.*, vol. 6, no. 1, Nov. 2019, doi: 10.1115/1.4045124.
- [6] Y. Yao, S. Li, Z. Li, S. Li, and Z. Li, "Structural Cracks Detection Based on Distributed Weak FBG," in *26th International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2018, p. TuE95, doi: 10.1364/OFS.2018.TuE95.
- [7] J. Yan *et al.*, "Concrete Crack Detection and Monitoring Using a Capacitive Dense Sensor Array," *Sensors*, vol. 19, no. 8, p. 1843, 2019, doi: 10.3390/s19081843.
- [8] D. Yang, J. Wang, D. Li, and K. S. C. Kuang, "Fatigue crack monitoring using plastic optical fibre sensor," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 5, pp. 1168–1175, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.029>.
- [9] D. Luo *et al.*, "Concrete beam crack detection using tapered polymer optical fiber sensors," *Measurement*, vol. 88, pp. 96–103, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.03.028>.
- [10] M. Maheshwari, V. G. M. Annamdas, J. H. L. Pang, A. Asundi, and S. C. Tjin, "Crack monitoring using multiple smart materials; fiber-optic sensors & piezo sensors," *Int. J. Smart Nano Mater.*, vol. 8, no. 1, pp. 41–55, Jan. 2017, doi: 10.1080/19475411.2017.1298220.
- [11] J. Mao, F. Xu, Q. Gao, S. Liu, W. Jin, and Y. Xu, "A Monitoring Method Based on FBG for Concrete Corrosion Cracking," *Sensors*, vol. 16, no. 7, p. 1093, Jul. 2016, doi: 10.3390/s16071093.
- [12] J. Ouyang, X. Chen, Z. Huangfu, C. Lu, D. Huang, and Y. Li, "Application of distributed temperature sensing for cracking control of mass concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 197, pp. 778–791, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.221>.
- [13] Q. Zhang, Y. Wang, Y. Sun, L. Gao, and Y. Yue, "Hilbert–Huang Transform based method for monitoring the crack of concrete arch by using FBG sensors," *Optik (Stuttg.)*, vol. 127, no. 6, pp. 3417–3422, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.12.087>.
- [14] L. Wang, X. Xin, J. Song, H. Wang, and Y. Sai, "Finite element analysis-based study of fiber Bragg grating sensor for cracks detection in reinforced concrete," *Opt. Eng.*, vol. 57, no. 2, pp. 1–6, Feb. 2018, doi: 10.1117/1.OE.57.2.027103.
- [15] L. Wang, J. Song, Y. Sai, and H. Wang, "Crack Width Analysis of Reinforced Concrete Using FBG Sensor," *IEEE Photonics J.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1109/JPHOT.2019.2891267.
- [16] T. Jiang, Y. Hong, J. Zheng, L. Wang, and H. Gu, "Crack Detection of FRP-Reinforced Concrete Beam Using Embedded Piezoceramic Smart Aggregates," *Sensors*, vol. 19, no. 9, p. 1979, 2019, doi: 10.3390/s19091979.
- [17] C. Wu, K. Sun, Y. Xu, S. Zhang, X. Huang, and S. Zeng, "Concrete crack detection method based on optical fiber sensing network and microbending principle," *Saf. Sci.*, vol. 117, pp. 299–304, 2019, doi: 10.1016/J.SSCI.2019.04.020.
- [18] J. Chakraborty, A. Katunin, P. Klikowicz, and M. Salamak, "Early Crack Detection of Reinforced Concrete Structure Using Embedded Sensors," *Sensors*, vol. 19, no. 18, p. 3879, 2019, doi: 10.3390/s19183879.
- [19] C. V. Dung and L. D. Anh, "Autonomous concrete crack detection using deep fully convolutional neural network," *Autom. Constr.*, vol. 99, pp. 52–58, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.AUTCON.2018.11.028.
- [20] M. Gkantou, M. Muradov, G. S. Kamaris, K. Hashim, W. Atherton, and P. Kot, "Novel electromagnetic sensors embedded in reinforced concrete beams for crack detection," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 23, p. 5175, Nov. 2019, doi: 10.3390/s19235175.
- [21] B. Goszczyńska, G. Świt, W. Trąmpczyński, A. Krampikowska, J. Tworzewska, and P. Tworzewski, "Experimental validation of concrete crack identification and location with acoustic emission method," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 23–28, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2012.03.004>.
- [22] M. M. M. Islam and J.-M. Kim, "Vision-Based Autonomous Crack Detection of Concrete Structures Using a Fully Convolutional Encoder–Decoder Network," *Sensors*, vol. 19, no. 19, p. 4251, 2019, doi: 10.3390/s19194251.
- [23] K. S. C. Kuang, Akmaluddin, W. J. Cantwell, and C. Thomas, "Crack detection and vertical deflection monitoring in concrete beams using plastic optical fibre sensors," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 2, pp. 205–216, Feb. 2003, doi: 10.1088/0957-0233/14/2/308.
- [24] K. Ohno, "Crack classification in concrete based on acoustic emission," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 12, pp. 2339–2346, 2010, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.05.004.
- [25] A. Wosniok *et al.*, "Static load monitoring of a concrete bridge using a high-precision distributed fiber optic sensor system," in *SMAR 2019 - Proceedings*, 2019, pp. 1–8.
- [26] Z. Chen, D. Zheng, J. Shen, J. Qiu, and Y. Liu, "Research on distributed optical-fiber monitoring of biaxial-bending structural deformations," *Measurement*, vol. 140, pp. 462–471, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2019.04.031.
- [27] M. M. M. and G. M. F., "Fiber Optic Sensors and Digital Image Correlation for Measuring Deformations in Reinforced Concrete Beams," *J. Bridg. Eng.*, vol. 23, no. 3, p. 4017144, Mar. 2018, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001189.
- [28] T. Bao, J. Li, X. Zhu, and C. Gu, "Analysis of strain transfer between surface-bonded plastic optical fibers and concrete," *Opt. Eng.*, vol. 58, no. 2, pp. 1–8, Feb. 2019, doi: 10.1117/1.OE.58.2.027107.
- [29] F. Gao, H. Zhou, H. Liang, S. Weng, and H. Zhu, "Structural deformation monitoring and numerical simulation of a supertall building during construction stage," *Eng. Struct.*, vol. 209, p. 110033, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110033>.
- [30] D. Xu, J. Yin, and H. Liu, "A new measurement approach for deflection monitoring of large-scale bored piles using distributed fiber sensing technology," *Measurement*, vol. 117, pp. 444–454, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.12.032>.
- [31] W. Hong, K. Lv, B. Li, Y. Jiang, X. Hu, and Q. Qu, "Deflection determination of concrete structures considering nonlinearity based on long-gauge strain sensors," *Smart Mater. Struct.*, vol. 26, no. 10, p. 105023, Oct. 2017, doi: 10.1088/1361-665X/aa87d7.
- [32] J. S. Bajić, M. Z. Marković, A. Joža, D. D. Vasić, and T. Ninkov, "Design calibration and characterization of a robust low-cost fiber-optic 2D deflection sensor,"

Sensors Actuators A Phys., vol. 267, pp. 278–286, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.10.014>.

[33] H. Jayaseelan, B. W. Russell, and A. C. Webb, “Early Age Deflections in Newly Rehabilitated Steel Girder Bridges Made Composite with Concrete Slabs,” *Struct. Eng. Int.*, vol. 29, no. 4, pp. 575–585, Oct. 2019, doi: [10.1080/10168664.2019.1605326](https://doi.org/10.1080/10168664.2019.1605326).

[34] C. Zhang, Y. Ge, Z. Hu, K. Zhou, G. Ren, and X. Wang, “Research on deflection monitoring for long span cantilever bridge based on optical fiber sensing,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 53, p. 102035, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.102035>.

[35] Y. Tian, J. Zhang, Q. Xia, and P. Li, “Flexibility identification and deflection prediction of a three-span concrete box girder bridge using impacting test data,” *Eng. Struct.*, vol. 146, pp. 158–169, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.039>.

[36] H. Lahamy, D. D. Lichti, J. Steward, M. El-Badry, and M. Moravvej, “Measurement of Deflection in Concrete Beams During Fatigue Loading Test Using the Microsoft Kinect 2.0,” *J. Appl. Geod.*, vol. 10, no. 1, pp. 71–77, 2016, doi: <https://doi.org/10.1515/jag-2015-0023>.

WHAT DO YOU THINK?

To discuss this paper, please submit up to 500 words to the editor at bm.edificacion@upm.es. Your contribution will be forwarded to the author(s) for a reply and, if considered appropriate by the editorial panel, will be published as a discussion in a future issue of the journal.

Development of concrete pavements of short slabs with fiber incorporated

Desarrollo de pavimentos de hormigón de losas cortas con fibra incorporada

KELLY CONDORI RIVERA

Máster en Planificación y Gestión de Infraestructuras, Universidad Politécnica de Madrid. k_condori@outlook.es

The paper describes the development and construction for concrete pavements of short slabs with fiber incorporated in roads at international level, from its origins as a reinforcement layer and the new slab design methodology with optimized geometry as an innovation for the construction of new pavements. Its technical-economic advantages, durability and performance make it competitive against asphalt pavements. It also includes, the latest studies on their performance and suggestions that could improve the application of the methodology. The advantages of the pavements of short slabs with fiber incorporated make it an innovative type of pavement for roads, being able to generate savings during its construction, low maintenance requirements and a longer useful life to the infrastructure.

Concrete pavements; FRC; Short slabs; Reinforced concrete; Optimized joints.

El documento describe el desarrollo de la construcción de pavimentos de concreto de losas cortas con fibra incorporada en carreteras a nivel internacional, desde sus orígenes como una capa de refuerzo a la nueva metodología de diseño de losas con geometría optimizada, como una innovación para la construcción de nuevos pavimentos. Sus ventajas técnico-económicas, durabilidad y rendimiento lo hacen competitivo frente a los pavimentos de asfalto. También incluye los últimos estudios sobre su desempeño y sugerencias que podrían mejorar la aplicación de la metodología. Las ventajas de los pavimentos de losas cortas con fibra incorporada lo convierten en un tipo innovador de pavimento para carreteras, ya que pueden generar ahorros durante su construcción, bajos requisitos de mantenimiento y una vida útil más larga para la infraestructura.

Pavimentos de hormigón; Losas cortas; Hormigón reforzado; Juntas optimizadas; Hormigón reforzado con fibras.

1. INTRODUCCIÓN

Las longitudes estándares de las losas de pavimentos de hormigón oscilan entre 3.5m a 6m [1], el empleo de losas de dimensiones menores a las estándar en pavimentos, se ha aplicado desde el año 1901, como parte de la rehabilitación de pavimentos existentes, hacia la mitad de 1980 se construyeron varias superficies de hormigón adheridas (whitetopping) y no adheridas sobre pavimentos asfálticos y de hormigón, dicha tecnología fue madurando hacia una práctica estándar de rehabilitación. Investigaciones sobre revestimientos ultra delgados de hormigón para pavimentos asfálticos (UTW) demostraron que los tamaños de losas más pequeños de entre 1.8m x 1.8m o 1.2m x 1.2m mejoraban la performance del hormigón como propuesta para la rehabilitación [2]. La guía para capas de refuerzo con hormigón, clasificó a las losas cortas como refuerzo no adherido para pavimentos existentes [3].

Los pavimentos de hormigón de losas cortas con fibra incorporada surgen como innovación del tradicional

pavimento de hormigón liso articulado (JPCPs). La metodología de diseño de pavimentos con geometría optimizada ha permitido el desarrollo de este tipo de pavimentos contribuyendo a su aplicación como pavimentos nuevos construidos sobre bases granulares bien compactados ($CBR \geq 50\%$). Sus principales características son las dimensiones cortas de sus losas que reducen las tensiones de flexión y curvatura, y la ausencia de sello en sus juntas.

La metodología de diseño de los Pavimentos de losa corta con fibra incorporada o pavimento delgado de hormigón (TCP), optimiza el tamaño las losas considerando que no más de un set de ruedas caiga sobre una determinada losa, logrando de esta forma reducir la tensión de tracción sobre la superficie, utiliza un método de diseño mecánico –empírico. La reducción de la longitud de losa permite la reducción de su espesor debido a la diferente configuración de transferencia de carga y la reducción del efecto de alabeo [1, 4].

Ensayos a gran escala realizados en la Universidad de Illinois, demostraron que losas de 9 centímetros de espesor colocadas

en superficies de base granular, sometidas a la acción de cargas aceleradas, pueden soportar una cantidad de hasta 75.000 ejes equivalentes antes de agrietarse, asimismo se demostró que la aplicación de fibra permite que las losas soporten hasta 20 veces más tráfico, brindando mayor vida útil de servicio al pavimento una vez agrietado.

Los pavimentos de hormigón de losa corta son muy susceptibles a sufrir fisuración a edad temprana o durante su puesta en servicio, debido a su gran superficie expuesta a las cargas de tránsito, la acción climática y la reducción del espesor de hormigón. El uso de fibras controla la apertura de grietas, manteniendo la performance de los pavimentos de hormigón de losa corta.

El uso de pavimentos de losas cortas con fibra incorporada, reduce costos de construcción y mantenimiento, generando mayor viabilidad económica al proyecto, debido a que no requiere de refuerzo estructural adicional a las fibras, el proceso constructivo se realiza en menor tiempo, asimismo sus características ofrecen mayor resistencia a la fisuración, durabilidad y mayor reflectancia de la superficie en comparación a los pavimentos asfálticos.

Investigaciones recientes que han analizado la condición funcional de los pavimentos construidos bajo la metodología de losa corta con fibras a través de mediciones del índice de rugosidad internacional (IRI) con el perfilómetro láser walking profiler, demuestran la estabilidad proporcionada por los pavimentos de losas cortas frente al alabeo producto de la variación de temperatura horaria.

La tecnología de pavimentos de losa corta con fibras se ha

aplicado en varios tramos de carreteras en países como Chile, Guatemala y Perú. La experiencia durante su puesta en marcha y su desempeño indica que los pavimentos de losa corta con fibras son una alternativa viable para la construcción de pavimentos en caminos y carreteras a nivel internacional, además sus características de resistencia a derrames de diésel y materiales agresivos lo hacen considerablemente adecuado para pavimentos cercanos a zonas industriales.

2. METODOLOGÍA

En la actualidad la metodología más empleada para la construcción de pavimentos nuevos de losa corta con fibra incorporada es la de pavimento de geometría optimizada o pavimento de hormigón delgado (TCP), desarrollada por la empresa TCPavements® en Chile bajo patente mundial PCT N°EP2006 / 064732.

Lo patentado son las losas cortas para pavimentos nuevos de hormigón, que pueden ser construidos sobre bases granulares tratadas con cemento, asfalto o sobre terrenos naturales que tengan un buen grado de compactación.

La optimización del dimensionamiento de las losas se realiza teniendo en cuenta que exista siempre como máximo un set de ruedas por losa, para de esa forma disminuir la tensión por flexión.

En los pavimentos según la localización de las cargas se producen mayores esfuerzos de tensión como se observa en la figura 1, si la sección fuese cortada, la nueva longitud de losa logra prevenir que las cargas actúen simultáneamente en la

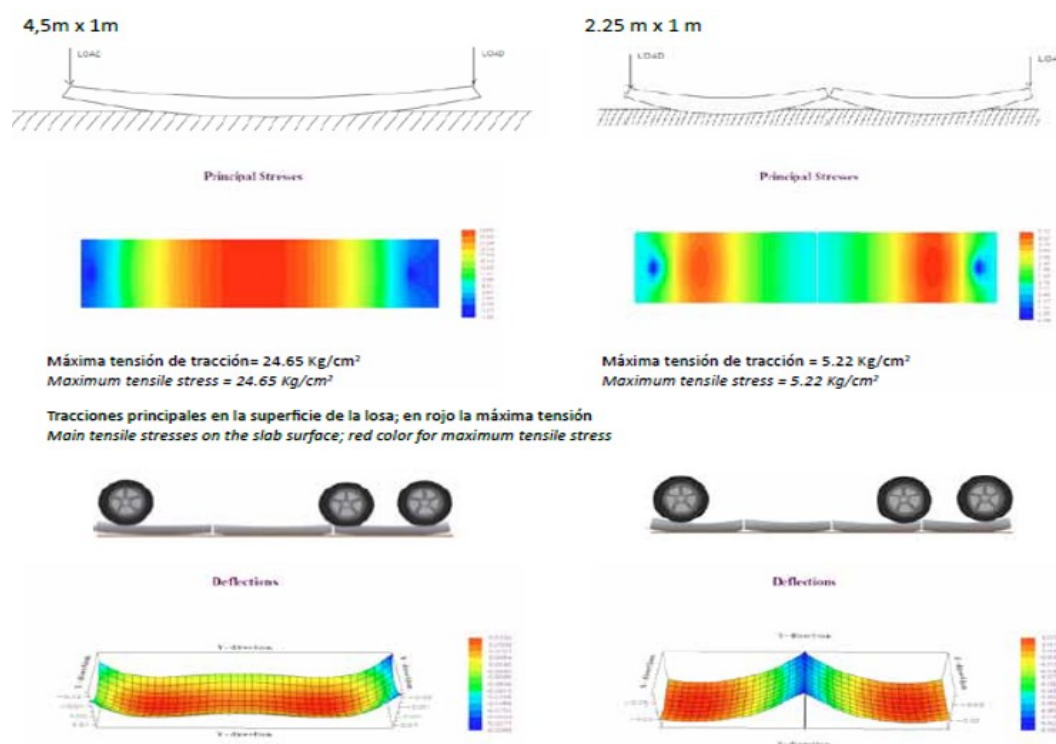


Fig. 1. Comparación entre esfuerzos tensión de tracción considerando 4.5m y 2.25m de longitud de losa. Fuente: [1].

misma sección de losa, de esa forma los esfuerzos de tensión son reducidos de forma significativa.

La Figura 1 muestra las tensiones y deflexiones calculadas en base a una losa de hormigón de 20 cm de espesor, cargada con 1500 kg, bajo una temperatura diferencial de -15°C.

Para evitar que dos cargas actúen simultáneamente la metodología del pavimento de hormigón delgado (TCP) permite dimensionar las losas en función a cada rueda, o set de ruedas. La geometría de la losa se diseña en función al tipo de camión que tenga la carga axial más crítica para carreteras. Las posiciones de cargas consideradas, se evalúan de tal forma, que ningún par de set de ruedas caiga sobre una misma losa.

El método de diseño mecánico- empírico empleado en esta metodología está basado en las ecuaciones de daño por fatiga del proyecto NCHRP 1-37ª (ME-PDG, AASHTO, EEUU) y en simulaciones realizadas con el programa de elementos finitos ISLAB 2000.

2.1. ECUACIONES DE DISEÑO

Las ecuaciones básicas de diseño de la tecnología son las siguientes:

2.1.1 NÚMERO DE PASADAS ADMISIBLES

$$\text{Log}(N_{ijkl}) = 2 * \left(\frac{C_2 * \sigma_{ijkl}}{\text{MOR} * C_1 * C_2} \right)^{-1.22} \quad (1)$$

Donde:

N_{ijkl} = Número de pasadas admisibles para posición del eje k, condición de alabeo i y condiciones de carga j, superior o inferior (I).

σ_{ijkl} = Tensión principal máxima calculada en ISLAB 2000 para posición del eje k, condición de alabeo i, condiciones de carga j, superior o inferior (I).

MOR = Resistencia a la flexo tracción media a los 90 días

C1 = Factor de calibración por geometría y espesor de la losa

C2 = Factor de calibración por uso de fibras estructurales en el hormigón

C3 = Factor por perímetro de carga.

2.1.2 DAÑO POR FATIGA EN UN PUNTO DETERMINADO

$$FD_k = \sum_i \frac{n_{ijk}}{N_{ijk}} \quad (2)$$

Donde:

FD_k = Daño por fatiga para una posición particular en el eje k.

n_{ijk} = Número de pasadas reales para la tensión local (I),

condiciones i, j, k.

N_{ijk} = Número de pasadas permitidas tensión local (I), condiciones i, j, k.

i = condición de alabeo.

j = condición de carga.

k = posición eje.

2.1.3 PORCENTAJE DE LOSAS AGRIETADAS PARA UN 50% DE CONFIABILIDAD

$$\%Crack_{kl} = \frac{1}{1 + FD_{kl}^{-1.98}} \quad (3)$$

Donde:

$\%Crack_{kl}$ = Porcentaje de losas agrietadas con falla ocasionada por posición del eje k.

FD_{kl} = Daño por fatiga en posición eje k, superior e inferior.

2.1.4 CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE LOSAS AGRIETADAS TOTALES.

$$\%Tcracks_i = \text{MAX}(\%Cracks_{kl}) \quad (4)$$

2.1.5 CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE LOSAS AGRIETADAS TOTALES

$$\%TTcracks_{50} = \%Tcracks_i + \%Tcrackss - \%Tcracksi * \%Tcrackss \quad (5)$$

Donde:

$\%TTcracks_{50}$ = Porcentaje de losas agrietadas totales, 50% confiabilidad.

$\%Tcracksi$ = Porcentaje de losas agrietadas de la superficie.

$\%Tcrackss$ = Porcentaje de losas agrietadas del área interna.

2.1.6 CÁLCULO DE CONFIABILIDAD

$$Se = (5,3116 * TTcracks_{50}^{0.3903}) + 2,99 \quad (6)$$

Donde:

Z_r = Coeficiente estadístico, asociado al nivel de confianza (1 - R) en una curva de distribución normal.

$TTcracks_{50}$ = Porcentaje de losas agrietadas total, 50% de confiabilidad

$TTcracks_m$ = Porcentaje de losas agrietadas totales con m% de confiabilidad

S_e = Desviación normal del error combinado.

El método utiliza la propiedad de resistencia residual que le aporta la fibra al hormigón según la norma ASTM C1609-11, así como también recomienda el uso de fibras sintéticas.

La característica de los pavimentos de hormigón de losa corta, consiste en que el agregado de la base sirva como capa de drenaje con el fin de minimizar el efecto de bombeo, el agregado debe contener menos del 6% de finos que pasen por la malla #200, lo que permite que ante cualquier fenómeno de erosión producto de la presencia de agua, el volumen de la base, no se reduzca y mantenga su capacidad portante.

El pavimento de hormigón de losas cortas requiere de un mayor número de juntas, la metodología indica que no requieren ser selladas, por dicha razón el aserrado de losas se debe realizar en el menor tiempo posible con una hoja de sierra de corte fino y las juntas deben tener un ancho menor a 2.5mm. [1].

La figura 2, muestra la sección construida sin fibras (49-55) y con fibras de refuerzo (56-62) para un espesor de losa de 9 cm sobre una base granular de 15 cm. conformada por arcillas marrones con limo, cuyas características y contenido de humedad fueron de 1 962 kg/m³ y 10.7% respectivamente.

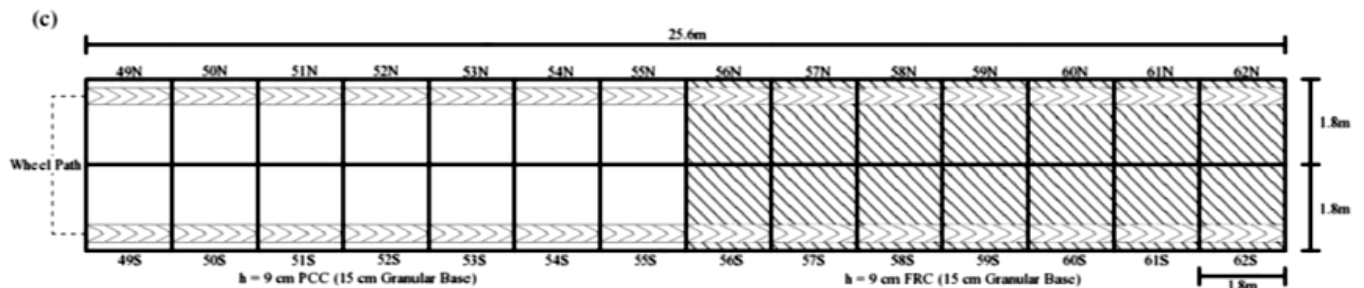


Fig. 2. Sección de ensayo de Pavimento delgado de 9 cm sobre base granular con y sin fibras de refuerzo. Fuente: [4].

En la Figura 3 se observa la sección de las losas, se colocó geotextil no tejido entre la base granular y la subrasante, las losas se construyeron sin barras de transferencia de carga y con juntas sin sello.

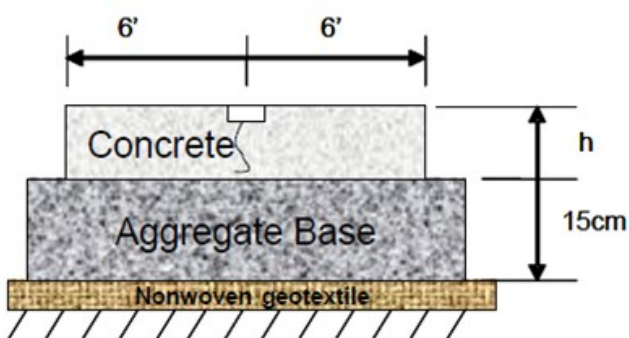


Fig. 3. Sección con espesor variable (h) sobre base granular, separado del terreno natural con geotextil. Fuente: Cervantes & Roesler [7].

El pavimento de hormigón fue diseñado para esfuerzos mínimos de flexión de 6.7 Mpa a los 90 días, la relación agua cemento fue de 0.42, el tamaño máximo de agregado fue de 25 mm. El diseño de mezcla se muestra en la Tabla 1, se adicionó superplastificantes para promover una adecuada mezcla con las fibras sintéticas. El contenido de fibras sintéticas fue de 3.6 kg/m³, que fue calculado en base a la medición del esfuerzo residual de la ASTM C1609-07 [6] y el esfuerzo de flexión del hormigón.

2.2. CALIBRACIÓN DE LA METODOLOGÍA A TRAVÉS DE ENSAYOS A GRAN ESCALA

Para calibrar el diseño de pavimentos de losas cortas o pavimentos de hormigón delgado (TCP) se realizaron pruebas a gran escala por el Departamento de Transporte Avanzado de la Universidad de Illinois y el Laboratorio de Investigación e Ingeniería (ATREL) en Rantoul, Illinois [7], en las que se construyeron 03 secciones de 40 metros de longitud con el fin de evaluar los efectos de espesor, modos de falla y la resistencia a la fatiga de los pavimentos construidos bajo este sistema [5], solo una de estas secciones incorporaba fibras como refuerzo del pavimento.

Material	Cantidad	Ud
Agregado grueso	1128	kg/m ³
Agregado fino	720	kg/m ³
Cemento	250	kg/m ³
Cenizas volantes (Tipo C)	83	kg/m ³
Agua	140	kg/m ³
Fibras STRUX 90/40	3.56	kg/m ³
Superfluidificante Daracem 19 (solo si es necesario)	1006	ml/m ³
Aire incorporado	5 to 8	%

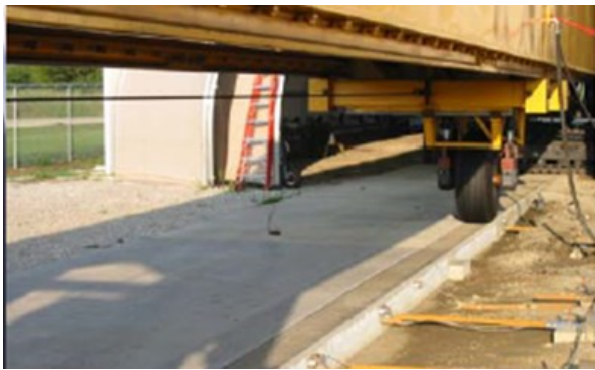
Tabla 1. Diseño de mezcla de pavimento de hormigón.

Para determinar la fatiga y eficiencia de transferencia de carga de las juntas en el pavimento de hormigón de losas cortas, se realizó el ensayo de aceleración de pavimentos (APT), cuyo objetivo era el de sobrecargar la sección de prueba hasta producir la falla de la losa en el menor tiempo posible, para luego equiparar los resultados con los niveles de carga estándar y repeticiones esperadas en pavimentos en servicio.

Fue utilizado el equipo ATLAS como equipo de medición, programado de forma unidireccional, la carga que transmite este equipo es de 36 287 kg al pavimento a través de un ariete hidráulico unido a un carro de ruedas.



(a)



(b)

Fig. 4. (a) y (b) Dispositivo de montaje de carga de transporte acelerado (ATLAS). Fuente: [7].

2.3. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos durante los ensayos realizados se observan en la Tabla 2.

Ejes Equivalentes Acumulados (ESALs)	Grietas en pavimento sin fibra (esquina)	Grietas en pavimento con fibra (esquina)
75,363	0%	0%
192,863	57%	14%
233,923	57%	28%
234,592	100%	

Tabla 2. Resultados de los ensayos.

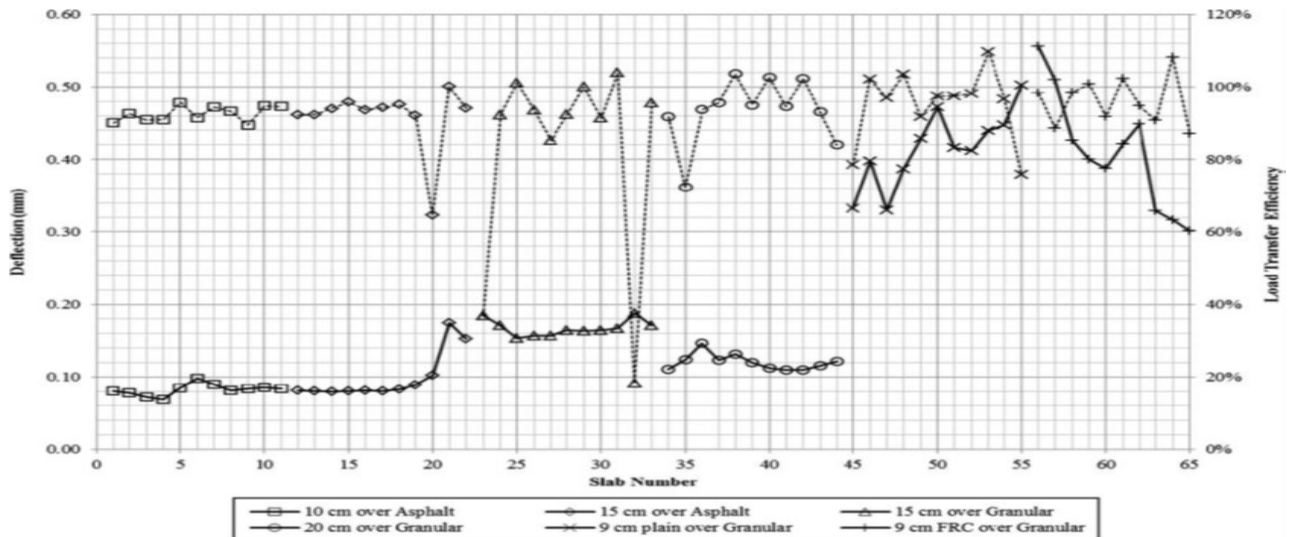


Fig. 6. Deflexiones normalizadas con carga de 40kN en el centro de la losa (línea continua) y eficiencia de transferencia de carga (línea discontinua). Fuente: [4].

Tras la culminación del ensayo, la figura 5 muestra el agrietamiento producto de una carga de tránsito de 234,592 ejes equivalentes, la mayoría de grietas se produjeron en las esquinas de las losas.

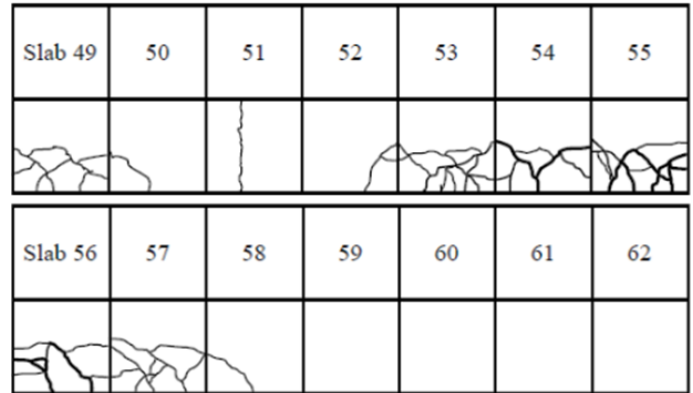


Fig. 5. Sección Sur, agrietamiento final después de 234,000.0 ESALs, losas 49—55 de hormigón liso y 56-62 losas de hormigón reforzado con fibras de 9 cm de espesor. Fuente: [4].

Roesler, Cervantes, & Amirkhanian concluyeron que losas de 9 cm. de espesor colocadas en superficies de base granular, sometidas a la acción de cargas aceleradas, pueden soportar una cantidad de hasta 75.000 ejes equivalentes antes de agrietarse, asimismo se demostró que la aplicación de fibra permite que las losas soporten hasta 20 veces más tráfico, brindando mayor vida útil de servicio al pavimento una vez agrietado.

3. EFECTIVIDAD DE LAS JUNTAS EN PAVIMENTOS DE LOSA CORTA

Los agrietamientos en losas cortas con fibra incorporada se deben a los siguientes factores principales:

- ◆ La flexo tracción producida por las acción de las cargas.
- ◆ El alabeo producto de la acción climática.
- ◆ La retracción producto de las variaciones climáticas.

Por tal razón, las juntas son un importante sistema de control del agrietamiento. Las losas a ambos lados de la junta deben trabajar lo más conjuntamente posible para transferir las cargas, eso evita tensiones excesivas en las losas, deflexiones, escalonamientos y asientos diferenciales.

Luego de un mes de la construcción de las losas a gran escala, se midió la deflexión con el deflectómetro de impacto en los tramos de prueba construidos, se comprobó que las deflexiones son menores en las losas con espesores más gruesos (15 - 20 cm) y en las que fueron construidas sobre base tratada con asfalto. Debido a la geometría corta de las losas solo el 52% de juntas presentaban agrietamientos al final del primer mes, así como también se observa que en las juntas de las losas cortas de 9cm (45 y 55) la eficiencia de transferencia de carga (LTE) es mayor al 80%. [4]

Los datos obtenidos del ensayo APT sugieren que las juntas de los pavimentos de losas cortas pueden tener un buen comportamiento sin barras de refuerzo para bajos a medios volúmenes de tráfico. [4]

Salsilli (2015) por su parte reconoce la necesidad de concretar estudios de eficiencia de transferencia de carga (LTE) en juntas de pavimentos de losas cortas, en este tipo de pavimentos la transferencia de carga es influenciada principalmente por la trabazón de los agregados [8].

Se realizaron ensayos en secciones de losas cortas construidas en el Laboratorio Nacional de Carreteras (NHL) de Chile para comprobar la eficiencia de transferencia de carga en pavimento de losas cortas, cuyas características fueron: secciones de losas de 1.8 m, espesor 14 cm, tamaño máximo de agregado 38 mm, base granular (CBR 40%) ensayadas bajo la acción de esfuerzos de tensión de 5MPa. Las deflexiones fueron medidas con deflectómetro (FWD), y las grietas inducidas con fisurómetro y microscopio, posteriormente con la medida de las deflexiones, se realizó el cálculo de la eficiencia de transferencia de carga (LTE).



Fig. 7. Medición del ancho de grieta con microscopio. Fuente: [8].

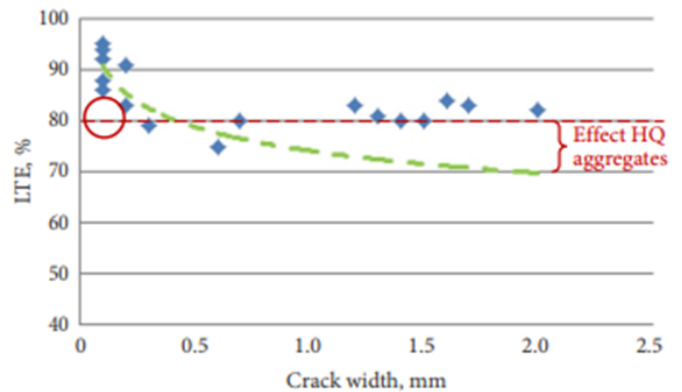


Fig. 8. Resultados de LTE-Ancho de grieta obtenidos de la medición en campo y Efecto de la alta calidad de agregados en la LTE Fuente: [8].

Tras los resultados obtenidos, Pradena & Houben (2018) recomiendan incorporar como input la relación de transferencia de carga y el ancho de grieta por trabazón de agregados al método de diseño mecánico-empírico de pavimentos de losas cortas. Asimismo, concluyen que debido a los pequeños anchos de grieta obtenidos en las juntas, los pavimentos de losas cortas pueden proporcionar una adecuada transferencia de cargas ($\geq 70\%$). La alta calidad de los agregados tiene un papel fundamental en la limitación a nuevas reducciones de LTE cuando el ancho de la grieta aumenta.

4. ESTABILIDAD DEL IRI EN PAVIMENTOS DE LOSA CORTA CON FIBRA INCORPORADA

Debido al alabeo que se produce en las losas producto de la variación climática, muchos investigadores han evaluado los efectos en la comodidad de conducción en relación que produce la curvatura que se genera en el pavimento.

El parámetro utilizado para la medición de la regularidad y comodidad de conducción es el IRI. Si las curvaturas que se generan son muy grandes podrían afectar a la medición del IRI, haciendo que los valores medidos difieran en relación a la hora del día en que fueron medidos.

Los cambios de IRI durante el día afectan a los usuarios de la carretera y producen cambios y confusiones a las agencias encargadas de las mediciones representativas de la rugosidad de la superficie que pueden generar confusiones al tomar decisiones en relación a los trabajos de mantenimiento que requiere la vía.

Mediante el uso del perfilómetro walking profiler, se realizaron mediciones del IRI cada 10m en pavimentos de Chile en diferentes tiempos del día entre la 1:00 pm a 7:00 am y de 4:00 am a 1:00 pm. El diferencial de temperatura durante las mediciones en las losas fue de 30 °C.

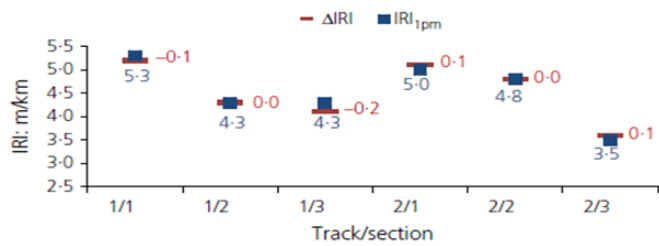


Fig. 9. Medición del IRI en pavimentos de losas cortas con fibras de la Ruta 60-CH, $\Delta IRI_{7am-1pm}$ con fibras. Fuente: [9].

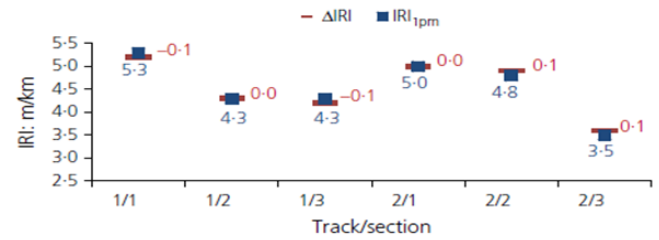


Fig. 10. Medición del IRI en pavimentos de losas cortas con fibras de la Ruta 60-CH, $\Delta IRI_{4am-1pm}$ con fibras. Fuente: [9].

Según los resultados obtenidos, el IRI en pavimentos de losas cortas con fibra incorporada, se mantiene durante todo el día, y su medición en cualquier horario es el IRI representativo. Esta estabilidad provista por las losas cortas probablemente se debe a la reducción de la longitud de la losa que restringe los cambios de curvatura de la losa y al efectivo trabazón de agregados que reduce del ancho de grieta debajo de las juntas [9].

5. APLICACIÓN DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN DE LOSA CORTA

Más de 3, 00, 000.00 m² han sido pavimentados usando la metodología de pavimento de losas cortas en Chile, Perú y Guatemala [1]. La metodología fue aplicada en carreteras, caminos, calles, exteriores de centros de distribución y aparcamientos. Los pavimentos de losa corta con fibra incorporada fueron construidos sobre bases granulares o pavimentos muy deteriorados.

A continuación se muestran algunos ejemplos de vías que fueron pavimentadas bajo la metodología de losa corta con fibra incorporada.

5.1. CAMINOS DE ALTO VOLUMEN DE TRÁNSITO

5.1.1. RUTA CH 60 CAMINO LA PÓLVORA

Como reposición del Pavimento de la Ruta 60-CH, Sector Camino La Pólvora, de 16,420 km de longitud, se consideró la construcción de pavimento de hormigón de losas cortas con fibra incorporada de 23cm de espesor, colocado sobre pavimento asfáltico existente previo un fresado de 1 a 5 cm de espesor de dicho pavimento.

Este tramo posee un alto volumen de tráfico pesado debido a que da acceso directo al Puerto de Valparaíso. El diseño se realizó para una vida útil de 20 años, considerando 189, 000,000 ejes equivalentes. El resultado concluyó en losas de 1.75 m de largo y 1.75 m de ancho con sobre ancho de 20 cm y espesor de 22 cm de hormigón de resistencia. Fecha de construcción año 2016.



Fig. 11. Ruta CH 60 Camino La Pólvora. Fuente: <http://www.tcpavements.cl>.

5.2. CAMINOS DE ALTA MONTAÑA

5.2.1. RUTA N°60. CORDILLERA DE LOS ANDES

En la ruta N°60 que conecta los andes de Chile con Mendoza (Argentina), se observa el estado de la sección (500 m) de pavimento de hormigón de losa corta con fibra incorporada, que fue diseñado para un tráfico de 20, 000,000 ejes equivalentes sobre una base con menos del 5% de agregados finos, se aprecia su buen estado luego de 2 años de servicio. Este tramo se encuentra a alturas cercanas a los 3500 msnm.



Fig. 12. Fotografía de Pavimento de losa corta de 15 cm de espesor con fibra incorporada. Ruta N°60 que conecta los Andes de Chile con Mendoza, Argentina. Fuente: [1].

5.2.2 RUTA 11CH, CHUNGARÁ, CHILE

El proyecto posee la particularidad de que la penetración de la helada es cercana a 1 m de profundidad en el suelo. Por ese motivo, el diseño considera un espesor de pavimento de 19 cm de HRF y una base considerablemente más delgada que la alternativa en asfalto.

5.3. CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO

5.3.1 MAHUIDANCHE MISIÓN INGLESA, CHILE

Proyecto ejecutado el año 2012, en la región de Araucanía, como primer pavimento de losa corta ultra delgada (U-TCP) de 9cm de espesor, colocado directamente sobre material granular de 40cm de espesor. La Figura N°13 muestra su estado a los 2 años de servicio.



Fig. 13. Aplicación de la tecnología de Pavimento de Hormigón de losa corta con Fibras. Espesor 8cm, colocado directamente sobre el terreno natural nivelado. Fuente: <http://vialidadytransporte.com>.

5.3.2 RUTA G-84 (CHILE)

En la Ruta G-84 Chile se aplicó el pavimento de losa corta con fibra incorporada con espesor de 10cm, que fue colocado directamente sobre el camino existente que se encontraba compactado por el tráfico que había circulado históricamente.



(a)



(b)

Fig. 14. (a) Estado inicial de la carretera y (b) estado final de la carretera.

6. CONCLUSIONES

Las distintas metodologías de refuerzo para pavimentos existentes, se desarrollaron como capas para la rehabilitación de pavimentos existentes en malas condiciones, hasta ahora solo los pavimentos de losas cortas o pavimentos de hormigón delgado (TCP) pasaron de ser ejecutados como capas de refuerzo, a ser construidos como pavimentos nuevos, colocados directamente sobre bases granulares compactadas con $CBR \geq 50$.

La nueva metodología de construcción de pavimentos de losas cortas con fibra incorporada reduce los costos de construcción debido a su reducido espesor. Además se comprobó que la disminución de la geometría de la losa reduce los efectos de alabeo producto de las condiciones climáticas y la transferencia de carga a través de sus juntas es mayor en comparación con los pavimentos articulados convencionales (JPCPs).

En caso de ser deteriorados son fácil y económicamente fresados y reemplazados por una nueva superficie de hormigón. Este tipo de pavimentos tienen las siguientes ventajas: mayor reflectancia, seguridad ante incendios, reducen el impacto ambiental tras su construcción y poseen una mayor longevidad estructural.

Los pavimentos de losa corta con fibra incorporada mantienen la calidad de rodadura por muchos más años. Tienen para una vida de diseño equivalente, un costo por ciclo de vida más bajo que los pavimentos de asfalto. El beneficio-costado comparado con un pavimento asfáltico es mayor y sus características lo hacen aplicable a vías a nivel internacional.

7. REFERENCIAS

[1] J. P. Covarrubias, "Design of concrete pavement with optimized slab geometry", *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 27(3), pp. 181-197, September 2012.

- [2] J. Vandenbosshe, and A. Fagerness, "Performance, analysis and repair of ultrathin and thin whitetopping at Minnesota Road Research Facility", *Transportation Research Record*, vol. 1809, pp. 191-198, 2002.
- [3] D. Harrington, and G. Fick, "Guide to concrete overlays (third edition)", Iowa National Concrete Pavement Technology Center, pp. 1-145, 2014.
- [4] J. R. Roesler, V. G. Cervantes, and A. N. Amirkhanian, "Accelerated performance testing of concrete pavement with short slabs", *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 13(6), pp. 494-507, 2012.
- [5] J. P. Covarrubias, "Procedimiento para la producción de losas de hormigón para la pavimentación de calles urbanas, carreteras o autopistas", *Patente Mundial PCT N°EP2006/064732*, 2012.
- [6] ASTM C1609 / C1609M-12, *Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)*, ASTM.
- [7] V. Cervantes, J. R. Roesler, "Performance of concrete pavements with optimized slab geometry", University of Illinois, Illinois, Estados Unidos, *Research Report ICT-09-053*, 2009.
- [8] M. Pradena, and L. Houben, "Load transfer-crack width relation of non-dowelled jointed plain concrete short slabs", *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 10(1), pp. 40-45, 2018.
- [9] M. Pradena, and L. Houben, "Ride quality stability of jointed plain-concrete road pavements with short slabs", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, vol. 171(3), pp. 166-173, 2018.

WHAT DO YOU THINK?

To discuss this paper, please submit up to 500 words to the editor at bm.edificacion@upm.es. Your contribution will be forwarded to the author(s) for a reply and, if considered appropriate by the editorial panel, will be published as a discussion in a future issue of the journal.

State of the art in behavior to concrete fatigue

Estado del arte en el comportamiento a la fatiga de hormigones

PEDRO JOSÉ ZEVALLOS TURRIAGA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid.
p.zevallos@alumnos.upm.es

ADRIANA JIMÉNEZ PÉREZ

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid.
a.jimenezp@alumnos.upm.es

Although, most researchers and scholars agree on the properties of steel fibers reinforced concrete, as a composite material in comparison to various structural reinforcements, there are different perspectives regarding the behavior of this material subjected to cyclic loads that lead to fatigue. This paper reviews the state of art on the results and findings of several investigators regarding the aforementioned topic. The main objective is to discuss experimental results and models propose by several investigators since the last decade of the XX century until nowadays. Moreover, what the authors of this paper have considered the most important methodologies to perform laboratory tests and various experimental models in order to describe the fatigue response of SFRC. Lastly, recently developed lines of studies are proposed and discussed how are these related to lately developed applications for infrastructure projects.

SFRC, Fatiga, Steel-fiber reinforced concrete, Dynamic loading.

Aunque la mayoría de investigadores coinciden en las buenas propiedades del hormigón armado con fibras de acero, como material compuesto en comparación con diversas armaduras estructurales, existen diferentes perspectivas en cuanto al comportamiento de este material sometido a cargas cíclicas que conducen a la fatiga. Este artículo revisa el estado del arte sobre los resultados y hallazgos de varios investigadores en relación con el tema mencionado. El objetivo principal es discutir los resultados y modelos experimentales propuestos por varios investigadores desde la última década del siglo XX hasta la actualidad. Por otra parte, se analizan las metodologías que los autores de este trabajo han considerado como las más importantes para realizar pruebas de laboratorio y diversos modelos experimentales con el fin de describir la respuesta a la fatiga del SFRC. Por último, se proponen líneas de estudios desarrolladas recientemente y se discute cómo se relacionan con las aplicaciones desarrolladas recientemente para proyectos de infraestructura.

SFRC, Fatiga, Hormigón armado reforzado con fibras, Cargas dinámicas.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC1) es un material compuesto, de base cementicia y reforzado con fibras o filamentos de acero. La adición de fibras de acero al hormigón, aportan características ampliamente investigadas desde mediados del siglo pasado y que hoy en día forman parte del estado del conocimiento. Entre ellas se destacan un incremento en la tenacidad, mejora sustancial en la ductilidad, control y reducción de las fisuras, mejora en la capacidad del hormigón a resistir impacto y abrasión, entre otras. [1]

Las primeras investigaciones establecen que el incremento de una de las propiedades más importantes del hormigón: resistencia a flexión es gracias al acero, pero en este caso la incorporación de las fibras de acero en la matriz del hormigón mejora propiedades adicionales, desde la resistencia al agrietamiento, impacto y al desgaste; este aporte ha permitido el incremento del uso de este material compuesto en todo tipo de estructuras sujetas a condiciones críticas de cargas, muchas de ellas cíclicas.

Por esta razón, devino necesario el análisis del comportamiento del hormigón bajo cargas cíclicas de fatiga.

Zanuy et al [2], describen a este proceso como microfisuración bajo tensiones de tracción originadas como resultado de la heterogeneidad de la microestructura del hormigón, la falla por fatiga encuentra lugar bajo la repetición de cargas.

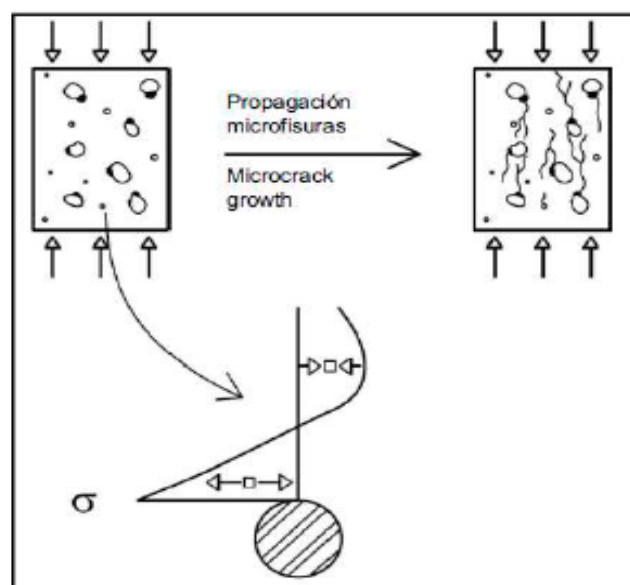


Fig. 1. Microfisuración en el hormigón y sus tensiones transversales [2].

Dicha microfisuración descrita en dos fases por Zanuy, C., Albajar, L., & De la Fuente, P [2], como: “La primera fase se corresponde con la formación de microfisuras en el interfaz árido – pasta y se caracteriza por un deterioro importante de las propiedades del hormigón. Ocupa aproximadamente el 10-15% de la vida a fatiga. La segunda fase describe la propagación estable de las microfisuras y se caracteriza por

una velocidad de crecimiento de la deformación y reducción del módulo constantes. La segunda fase se extiende hasta el 80-90% de la vida a fatiga”

El crecimiento de las microfisuras internas están principalmente asociadas con el incremento de las cargas y de la intensidad del ciclo de carga, se clasifican como se observa en la tabla a continuación:

Ciclos bajos de Fatiga			Ciclos altos de Fatiga				Ciclos super elevados de Fatiga		
1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹
Estructuras sujetas a terremotos			Pavimentos de aeropuertos y puentes		Carreteras y ferrovías de puentes, pavimentos de carreteras		Estructuras de tráfico masivo rápido		Estructuras marítimas

Tabla 1. Clasificación de estructuras sometidas a cargas cíclicas. [3] (traducción por los autores)

La primera clasificación refiere a un menor incremento de carga a niveles de esfuerzos altos, mientras que los ciclos altos de fatiga se caracterizan por un sin número de incrementos de carga en un bajo nivel de esfuerzo a los que pueden estar sujetos diferentes pavimentos de hormigón rígido específicamente. [4] Si bien este tipo de análisis ha surgido de un proceso experimental ensayado en probetas (cilindros, viguetas y cubos) sus investigaciones han determinado proporcionalidades de fibras en el hormigón, dimensiones y comportamientos en cuanto a la disposición de las mismas empleados en diseños futuros de hormigones con fibras.

2. PRIMERAS INVESTIGACIONES

De las primeras probetas ensayadas años 80 y 90, se determinan una serie de características básicas de las fibras necesarias de conocer antes de efectuar su aplicación en diferentes matrices de hormigón, por lo que se establecen dos ecuaciones principales que establecen dos características esenciales del material compuesto hormigón-fibra; Chang et al [1] afirma en sus investigaciones que el Área de superficie/contacto de una fibra viene dado por Eq. (1):

$$Af = 2 \frac{\pi d^2}{4} + \pi dL \quad (1)$$

Donde d es el diámetro de la fibra y L su longitud. [1]

Mientras que el número de fibras por cada m³ de hormigón viene dado por la ecuación Eq. (2):

$$N = \frac{p/100}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right) * L} \quad (2)$$

De los primeros análisis y ensayos en probetas se ha obtenido un estándar de longitud de fibras desde los 36, 48 y 60mm de longitud para hormigones con áridos de hasta 19mm de tamaño y cementos Portland tipo I. [4] Años después y a partir de múltiples investigaciones realizadas al respecto de esta tecnología de refuerzo, se realizaron análisis de comportamientos más exactos, resultados exitosos determinaron longitudes y nuevas formas de fibras de acero, así como algunas de sus propiedades mecánicas que se ilustran en la tabla a continuación:

Características	Tipos de fibras		
	H	N	C
Forma	gancho	anclaje-uña	rizado
Geometría de la sección transversal	redonda	redonda	redonda
Longitud (L) (mm)	60	54	60
Diámetro (d) (mm)	0.8	1	1
Ratio de esbeltez (L/d)	75	54	60
Peso por fibra (g)	0.23	0.350	0.372
Cantidad fibras por kg	4340	2854	2688
Esfuerzos de tensión (Mpa)	1045	-	-

Tabla 2. Características de los principales tipos de fibras [5] (traducción por los autores)

Desde fibras rectilíneas o perfiladas, rectas, onduladas, de sección circular, rectangular o irregular; dicha forma característica incide en la adherencia con el hormigón aumentando o disminuyendo su resistencia a la tensión como se muestra en la tabla superior.

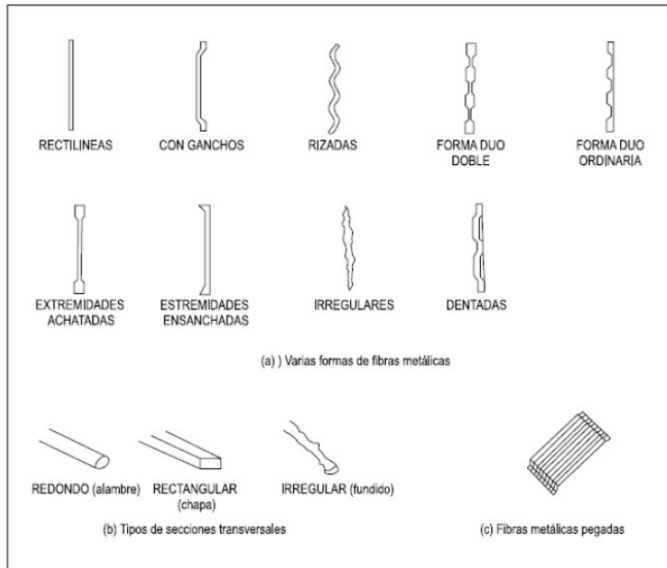


Fig. 2. Sección y Formas de fibras de acero [6].

La variedad de formas y tamaño de estas fibras ha permitido emplearlas para diferentes usos, desde hormigones de alta resistencias, hormigones ligeros, hormigón proyectado y en prefabricados; destacando su aplicabilidad y propiedades mecánicas que le aporta a la matriz del hormigón siendo estas la combinación ideal para solicitaciones especiales de hormigón.

Si bien, los investigadores concuerdan en muchas de las propiedades del material compuesto, como las mencionadas anteriormente; existen diferentes perspectivas en cuanto al comportamiento de dicho material sometido a cargas cíclicas que lleven a la fatiga. El hormigón reforzado con fibras de acero, además de sus beneficios técnicos, es en la actualidad el sistema de refuerzo más utilizado en ciertas aplicaciones, por la rapidez de ejecución y la optimización de recursos que esto supone para el proyecto. Por estas razones, el estudio y modelación del comportamiento a fatiga, deviene muy importante en estructuras reforzadas con SFRC y expuestas a cargas cíclicas a lo largo de su vida útil, como son; carreteras, ferrovías, puertos, puentes, aeropuertos, autopistas y pisos industriales. [7]

3. DIFERENTES APROXIMACIONES AL ESTUDIO DE FATIGA

Durante los últimos años del siglo XX y principios del siglo XXI, se desarrollan múltiples investigaciones con la finalidad de encontrar modelos que puedan describir con mayor precisión el comportamiento a fatiga, así es como múltiples autores [8]

[9] desarrollan investigaciones con diferentes tipos de fibras y contenidos. Chang y otros [1], proponen formulas prácticas en base a curvas S-N*² donde sugieren que a medida que se incrementa el contenido de fibra, también se incrementa la resistencia a la flexión. Adicionalmente, a medida que se incrementa el contenido de fibra y se incrementa la proporción entre el largo de la fibra y el diámetro de la misma (relación de aspecto), se puede observar mayor resistencia del elemento sometido a cargas de cíclicas.

En publicaciones más recientes, Chandrashekar et al [10] aportan datos significativos para mejorar la aproximación a describir el comportamiento a fatiga de hormigones reforzados con fibra de acero. En base a los resultados obtenidos de someter a cargas cíclicas probetas hasta fallar por fatiga, los autores proponen diagramas S-N con sus correspondientes curvas de regresión y correlación estadística que varía entre 0.884 y 0.925. Basados en estas pruebas, llegan a la conclusión que se puede establecer una correlación estadística significativa y más aún, proponen ecuaciones que describen la relación entre el ciclo de fatiga y el nivel de esfuerzo a los que esta sometido una probeta. Se compararon probetas con diferentes cuantías de fibra, en función de esta característica, Chandrashekar et al [10] aseguran que a medida que se incrementa la cantidad de fibra o cuantía de fibra en el hormigón, mejora también las propiedades mecánicas de elemento. Los estudios mencionados, están orientados a pavimentos rígidos de carreteras y vías donde se pueden esperar cargas cíclicas a tan críticas como sea el tráfico previsto. En función de esto, los autores de la investigación concluyen que a partir de la mejora de las propiedades por la inclusión de fibras de acero; se pueden reducir los espesores de pavimentos en al menos 8% comparado con hormigones convencionales. En este sentido, una de las aplicaciones con mayor potencial en cuanto a reducción de costos, tiempo de ejecución y menor impacto ambiental; es justamente el refuerzo de pavimentos rígidos en vías y carreteras. Una de las conclusiones más importantes de esta investigación es que los ciclos de carga son determinantes en cuanto al comportamiento del material se refiere.

Un modelo de simulación de comportamiento a fatiga de SFRC, para altos ciclos de repetición de carga, has sido propuesto por Tang et al [11]. Los autores parten primero de un modelo matemático de simulación de comportamiento a fatiga basado en leyes constitutivas del material compuesto, que luego llevan al campo experimental, obteniendo resultados similares; tanto teóricos como experimentales. De este estudio, podemos encontrar conclusiones que aportan significativamente al conocimiento del material compuesto. La primera conclusión a la que llegan, Tang et al [11] es que, la curva de la envolvente para la relación de deformación por tensión de tracción uniaxial, se formula de acuerdo con la

*2 Curvas S-N (o curvas de Wohler): donde S es amplitud del esfuerzo y N el número de ciclos de esfuerzo para llegar a la fractura. Estos gráficos son una representación de deterioro progresivo del material.

cantidad de fibras (dosificación) y la forma de las fibras utilizadas; más aún, concluyen que la envolvente para SFRC difiere mucho de la del hormigón de similares características, pero sin refuerzo. Por otro lado, complementan la conclusión de su trabajo argumentando que, a partir de la verificación experimental, para elevados ciclos de carga, el daño por fatiga se puede predecir la misma formulación que se utiliza para un concreto sin refuerzo; sin importar cuanto difieran las curvas envolventes anteriormente mencionadas.

Estudios posteriores, amplían la investigación en diferentes tipos de cargas cíclicas y la velocidad de fisuración de elementos de hormigón reforzados con fibra de acero. Zhang et al [12], describen como puede variar la carga última que soporta un elemento que está sometido a ciclos bajos de carga comparado con elevados ciclos de carga, conclusión que puede ser aplicable para estructuras que se prevé sufran temblores durante su vida útil, característica de interés especialmente en zonas sísmicas. Para este estudio, los autores optaron por aplicar seis velocidades de carga diferentes, desde 10-3 mm/s a 103 mm/s. Las conclusiones en base a los resultados que obtuvieron se pueden sintetizar en que la carga pico o carga última que puede resistir un SFRC, es sensible a la velocidad de carga y descarga. Por tanto, el efecto en la carga máxima es menor para un ciclo bajo de carga, mientras que es significativamente mucho mayor el efecto en la carga máxima si sometemos el elemento a un ciclo alto de carga. Otro resultado importante es que en para una situación o sistema de carga prácticamente estática (3.33×10^{-3} mm/s) la velocidad de fisuración permanece casi

constante por el efecto de las fibras de acero y su propiedad de inhibir la propagación de fisuras y el efecto de puente que se desarrolla entre agregados. [12]

Similarmente, Germano et al [13] investigan el efecto de las variaciones de los ciclos de carga en el comportamiento de hormigones reforzados con fibras de acero. Los autores usan probetas con 0.5% y 1% en volumen de dosificación de fibra. En este caso, se mantuvo constante la amplitud del ciclo, mientras se variaba el nivel de carga. Las conclusiones a las que llegaron los autores son variadas y en definitiva distintas de las que proponen autores previamente analizados. La primera conclusión es que una cuantía de 0.5% en volumen de fibra, muestra mejor desempeño que una cuantía de 1%. Los autores argumentan que posiblemente la razón de este resultado es que al existir un mayor número de fibras implica también una mayor discontinuidad en el plano de fractura. Por otro lado, concluyen que los hormigones reforzados con fibras de acero parecen responder efectivamente cuando están sometidos a cargas de ciclo bajo (típicamente relacionados con actividad sísmica) donde generalmente se tienen menos ciclos con niveles superiores de esfuerzos. Adicionalmente concluyen que los SFRC muestran como característica fundamental alta disipación de energía para todos los niveles de carga considerados en el estudio, comparados con hormigones simples. Finalmente, concluyen que sus resultados obtenidos les permiten obtener satisfactoriamente curvas S-N para predecir el desempeño a flexión para cargas cíclicas. A continuación, un esquema del experimento realizado por Germano et al, donde constan los parámetros estudiados.

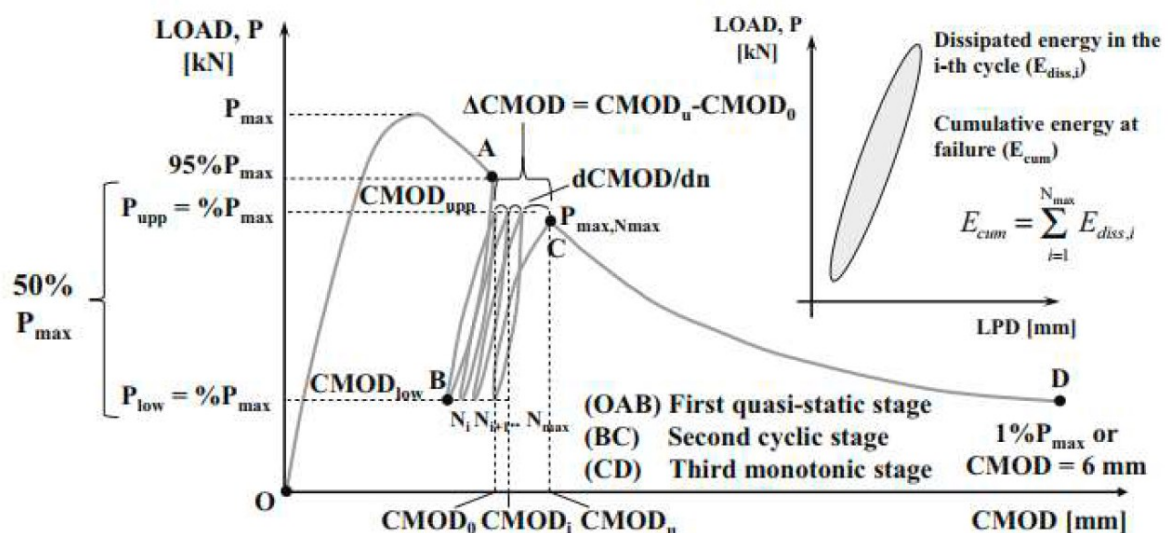


Fig. 3. Esquema de parámetros estudiados para cargas a fatiga [13].

Se han propuesto varios modelos experimentales, si bien similares, pero no generalizables al respecto del comportamiento a fatiga de los SFRC. Es común encontrar diferentes conclusiones para estudios similares. Tarifa et al [14], explican la alta dispersión en los resultados y modelos

experimentales; por la heterogeneidad del material, pero principalmente, a causa de la aleatoria excentricidad de la carga durante la aplicación de cargas cíclicas. Los autores desarrollan una metodología de ensayo con un dispositivo esférico que les permite uniformidad en la aplicación de

carga. Los resultados de sus ensayos demuestran que si bien los valores medios de excentricidad reportados por los ensayos con el dispositivo y sin el dispositivo, no varían significativamente; por otro lado, la desviación estándar es de un orden de magnitud menor en las pruebas realizadas con el dispositivo propuesto. Mas aún, el uso del dispositivo mostró un incremento de 3 y hasta 6 veces el valor promedio de vida del espécimen antes de fallar por fatiga, al mismo tiempo que se redujo significativamente la desviación estándar del número de ciclos para llegar a la falla por fatiga. Por estas razones, aseguran que una indeseada o incontrolada excentricidad en la aplicación de la carga acorta la vida del material compuesto sometido a cargas cíclicas e incrementa la dispersión en los resultados.

Otro grupo de investigadores, Ríos et al [15], aseguran que pueden predecir con un nivel de exactitud alto, el parámetro de fatiga, en base a un modelo probabilístico de dos pasos que a su vez está constituido por investigaciones previas de otros autores, integrando sus respectivos resultados. Esta perspectiva es muy diferente a la expuesta en párrafos anteriores puesto que los autores no realizan sus propios muestreos; por el contrario, desarrollan un modelo matemático de dos pasos para estimar el desempeño a fatiga, a partir de un universo de resultados de múltiples autores. El modelo se basa en el método de máxima verosimilitud, siendo este comúnmente utilizado para estimar parámetros en base a otras observaciones anteriores. Estas estimaciones son realmente una maximización de la probabilidad de ocurrencia y, por tanto, este modelo es posible aplicarlo si se tiene un número de mediciones suficientemente alto para obtener una distribución estadística inicial.

$$PF(N; \sigma_{max}, f, R) = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{\sigma_{max} \left(\frac{\sigma_0}{2f\Delta\sigma} \right)^a - \sigma_{min0}}{\lambda} N^{\alpha(1-R)} \right]^k \right\} \quad (3)$$

La ecuación 3 [15], representa el modelo estadístico desarrollado por Ríos et al, donde los parámetros 4 parámetros (λ , k , a , α) se obtienen de datos experimentales comparables, esto es para una frecuencia de carga determinada. Los autores concluyen que con el modelo propuesto pueden predecir los parámetros de fatiga tanto para un hormigón sin refuerzo como para un SFRC. Cada uno de los 4 factores o variables del modelo (λ , k , a , α) recogen correspondientemente las características del aporte mecánico de las fibras (λ), la dispersión de los resultados de fatiga por flexión (k), mientras que los factores restantes (a , α) dependen en el tipo de material y la frecuencia de carga respectivamente.

4. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Adicionalmente a la línea de investigación principal, descrita anteriormente, existen otras líneas de investigación de

especial interés que en su mayoría nacen de la necesidad de la industria por nuevas soluciones. Una de estas líneas es la que desarrollan Kaur et al [16], donde analizan la variación del comportamiento a fatiga de hormigones reforzados con fibra de acero, cuando se integra en la mezcla de hormigón otros materiales como puede ser por ejemplo sílica, caliza, entre otros. Para realizar estos estudios, se aplican los modelos y procedimientos de ensayo de especímenes que han sido utilizados por muchos de los investigadores discutidos anteriormente. Kaur et al [16], utilizan la distribución de Weibull y curvas S-N para desarrollar su investigación. La conclusión principal es que se puede alargar la vida de elementos sometidos a cargas cíclicas por efecto de añadir a la formulación del SFRC fracciones pequeñas de cenizas volantes, metacaolín, humo de sílice y polvo de piedra caliza. Adicionalmente, los autores concluyen que estos SFRC de composición especial, se podrían aplicar eficazmente a infraestructuras como son autopistas, carreteras, pistas de aeropuertos y pavimentos en general.

Otras líneas de investigación de especial interés práctico son los hormigones autocompactantes reforzados con fibra de acero y como éstos se comportan a fatiga. Poveda et al [18], analizan el efecto e influencia de la cantidad de fibra y las propiedades mecánicas en el desempeño a fatiga de SFRC autocompactantes. Los resultados de este estudio son consistentes en cuanto a las mejoras en las propiedades mecánicas como en la investigación desarrollada Murali et al [19]. Estos últimos, argumentan que su investigación al respecto de este tema, tiene especial interés y está motivada por las nuevas aplicaciones de SFRC, típicamente relacionadas con hormigones en pavimentos de carreteras, plataformas marítimas sumergidas en aguas profundas y puentes; donde predominan las cargas de fatiga por flexión. Dado el crecimiento de las aplicaciones de hormigón reforzado con fibras de acero, es necesario desarrollar un modelo unificado para predecir el comportamiento a fatiga del mismo. Es de especial interés dado que la confiabilidad estructural comúnmente depende del estado en el que se encuentran los materiales durante su vida útil.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo acelerado de aplicaciones de SFRC para las nuevas infraestructuras, ha dejado abierta la pregunta y consecuente incertidumbre sobre el comportamiento que estas van a tener durante su vida útil o de servicio; puntualmente, aquellos elementos que estarán sometidos a cargas severas y cíclicas, tanto de origen mecánico como natural. En cuanto al desempeño de hormigones reforzados con fibra de acero, parece haber una relación directa entre la dosificación, características geométricas de la fibra y anclaje; con respecto al desempeño ante cargas cíclicas (ya sean estas de ciclo alto o bajo de carga).

Todos los autores concuerdan que en las pruebas realizadas

con SFRC, se evidencia una reducción significativa de fisuras y apertura de las mismas, por tanto, garantizando una mayor integridad física del elemento durante su vida útil. Esta relación permite hoy en día, si bien no cuantificar con precisión, tener la certeza de mejorar el desempeño de hormigones convencionales al incluir fibras de acero en su matriz. Otra característica fundamental que concluyen los investigadores es la capacidad significativamente mejorada de un SFRC de absorber y disipar energía comparada con otros sistemas de refuerzos y hormigones convencionales.

Si bien se evidencia un avance durante los últimos años en cuanto a la caracterización de las propiedades fundamentales de SFRC con respecto a los esfuerzos que producen fatiga, no hay un modelo o formulación ampliamente reconocido y generalizable que defina dicho comportamiento. Posiblemente, la manera de ensayar que más se utiliza en la actualidad, no sea la más apropiada dada la alta dispersión que, en términos generales, presentan los resultados de las investigaciones. Es importante lograr desarrollar un sistema común de ensayos que permita efectivamente comparar los resultados de varios investigadores, al mismo tiempo que retomar investigaciones realizadas previamente y continuar su desarrollo. Por otro lado, hay mucho camino aún por recorrer en cuanto al diseño del modelo estadístico-matemático que sea de aplicación general y que permita aproximar valores de diseño con precisión. En este sentido, es sumamente importante ampliar la cantidad y profundidad de las investigaciones de hormigones reforzados con fibras de acero a fatiga, ya que ésta es una característica o parámetro fundamental de diseño del material compuesto; en especial tomando en cuenta las aplicaciones en las que se utiliza en la actualidad, donde las cargas cíclicas son determinantes para la estructura. Finalmente, los campos nuevos de investigación que se han mencionado en el documento son solamente una selección de los que se han considerado más representativos, sin embargo, la conclusión a la que hemos llegado es que el campo de investigación tiene un enorme potencial de desarrollo. El mercado ofrece nuevos retos y oportunidades para nuevas aplicaciones e innovación con la tecnológica SFRC; en definitiva, lo que en su momento motivó el desarrollo de esta tecnología, hoy parece tan solo una de muchas aplicaciones y el potencial sigue siendo por ahora incalculable.

6. REFERENCIAS

- [1] Chang, D. H., & Chai, W. K. (1995). Flexural fracture and fatigue behavior of steel fiber-reinforced concrete structures. *Nuclear Engineering and Design*, 156(1–2), 201–207.
- [2] Zanuy, C., Albajar, L., & De la Fuente, P. (2011). El proceso de fatiga del hormigón y su influencia estructural. *Materiales de Construcción*, 61(303), 385–399.
- [3] Lee, M. K., & Barr, B. I. G. (2004). An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 299–305.
- [4] Heeralal, M., Kumar, R., & Rao, Y. V. (2009). Flexural fatigue characteristics of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete (SFRRAC). *Facta Universitatis - Series: Architecture and Civil Engineering*, 7(1), 19–33. <https://doi.org/10.2298/FUACE0901019H>
- [5] Mailhot, T., Bissonnette, B., Saucier, F., & Pigeon, M. (2001). Flexural fatigue behavior of steel fibre reinforced concrete before and after cracking. *Materials and Structures*, 34(6), 351–359.
- [6] Irías, A. (2013). Refuerzo de elementos estructurales con hormigones con fibra o solo fibras.
- [7] Germano, F., & Plizzari, G. A. (2012, September). Fatigue behavior of SFRC under bending. In *Proceedings of the Eighth RILEM Intl. Symp. on Fibre Reinforced Concrete: challenges and opportunities*, (BEFIB 2012) (pp. 19-21).
- [8] Soroushian, P., & Bayasi, Z. (1991). Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete. *Materials Journal*, 88(2), 129-134.
- [9] Lok, T. S., & Pei, J. S. (1998). Flexural behavior of steel fiber reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2), 86-97.
- [10] Chandrashekar, A., Ravi Shankar, A. U., & Girish, M. G. (2010). Fatigue behaviour of steel fibre reinforced concrete (sfrc) with fly ash. *Highway Research Journal*, 3(1), 1-28.
- [11] Tang, X., An, X., & Maekawa, K. (2014). Behavioral simulation model for sfrc and application to flexural fatigue in tension. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(10), 352-362.
- [12] Zhang, X., Ruiz, G., & Elazim, A. M. A. (2015). Loading rate effect on crack velocities in steel fiberreinforced concrete. *International Journal of Impact Engineering*, 76, 60-66.
- [13] Germano, F., Tiberti, G., & Plizzari, G. (2016). Post-peak fatigue performance of steel fiber reinforced concrete under flexure. *Materials and Structures*, 49(10), 4229-4245.
- [14] Tarifa, M., Ruiz, G., Poveda, E., Zhang, X., Vicente, M. A., & González, D. C. (2018). Effect of uncertainty on load position in the fatigue life of steel-fiber reinforced concrete under compression. *Materials and Structures*, 51(1), 31.
- [15] Ríos, J. D., Cifuentes, H., Yu, R. C., & Ruiz, G. (2017). Probabilistic flexural fatigue in plain and fiber-reinforced concrete. *Materials*, 10(7), 767.
- [16] Kaur, G., Singh, S. P., & Kaushik, S. K. (2015). Mean and design fatigue lives of SFRC containing cement-based materials. *Magazine of Concrete Research*, 68(7), 325-338.
- [17] Poveda, E., Ruiz, G., Cifuentes, H., Rena, C. Y., & Zhang, X. (2017). Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting SFRC. *International Journal of Fatigue*, 101, 9-17.
- [18] Murali, G., Celestina, J. A. S., Subhashini, N., & Vigneshwari, M. (2017, July). Analysis of Flexural Fatigue Strength of Self Compacting Fibre Reinforced Concrete Beams. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 80, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.

WHAT DO YOU THINK?

To discuss this paper, please submit up to 500 words to the editor at bm.edificacion@upm.es. Your contribution will be forwarded to the author(s) for a reply and, if considered appropriate by the editorial panel, will be published as a discussion in a future issue of the journal.

The use of wood as Smart Building Material

El uso de la madera como Smart Building Material

KAREN STEPHANIE CANSIONG GUERRA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid
karenstephanie.cansiong.guerra@alumnos.upm.es

JOSÉ ESCOBAR AVILÉS

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid
jose.escobar.aviles@alumnos.upm.es

One of the materials that plays a paper fundamental in the sector of construction in the wood, because to structure it has excellent properties mechanical that include high strength, good durability, high specific gravity and high moisture content. In the search for new sustainable materials with the environment, there is a need to look for new alternatives and intelligent construction systems, for which smart building materials are used and wood is one of them. The aim is to discover the new intelligent characteristics of wood and its use in construction. In addition to analyzing the progress in his research.

Wood, Sustainable, Construction, intelligent material

Uno de los materiales que juega un papel fundamental en el sector de la construcción es la madera, pues a nivel estructural tiene excelentes propiedades mecánicas que incluyen sus altos valores de resistencia, durabilidad, peso específico y contenido de humedad. En la búsqueda de nuevos materiales que colaboren con el medio ambiente, existe la necesidad de buscar alternativas y sistemas constructivos con materiales inteligentes y la madera es uno de ellos. El objetivo de este trabajo es descubrir las nuevas características innovadoras de la madera y su uso en el sector de la construcción, además de, analizar los avances en su investigación.

Madera, Sostenibilidad, Construcción, Materiale ininteligente

1. INTRODUCCIÓN

El Mercado de la Construcción continuamente está en búsqueda de versatilidad en materiales y en nuevas tecnologías que permitan aprovechar los recursos ya existentes. Bajo esta necesidad y con los continuos cambios climáticos surge la demanda de emplear materiales sostenibles, dentro de los cuales tenemos a la madera [1]. El desarrollo de nuevos sistemas de construcción que incorporan materiales con una capacidad de respuesta mecánica integrada es una rama de investigación parcialmente nueva. Dentro de esta rama están los materiales inteligentes [2]. En la reunión plenaria de Cesis (2004), Los científicos de materiales pronosticaron un papel preponderante de este material artificial en el futuro [2]. Actualmente, el termino de material inteligente está siendo empleado ampliamente, siendo así la madera uno de estos materiales. Este estado de arte enfatiza el empleo de la madera con esta nueva característica, dentro de las cuales tenemos: el efecto de memoria de forma, la higroscopicidad, la transparencia y el empleo de materiales monocromáticos en la madera termostrespuesta [2], [3], [4], [5].

El efecto de memoria de forma presente en la madera fue detectado en muestras de madera a principios de los años setenta, donde se pudo observar que este material después de ser forzado a cambiar su forma podía recuperar su forma

inicial después de que se hayan recuperado las condiciones físicas originales [2].

La higroscopia, como la característica de la madera de absorber o perder humedad con el medio ambiente es conocida desde tiempos muy lejanos. Posiblemente hace 20 años se empezó a sacarle partido a esta característica con aplicaciones en la construcción debido a la necesidad de reducir las emisiones de carbono y de consumo de energía en los edificios. Aunque la infinidad de consideraciones de diseño sostenible indica una mayor investigación sobre enfoques de diseño, materiales y metodologías que permitan conseguir mejoras del rendimiento del edificio junto con los estándares de estética, económicos y de capacidad de construcción [3].

La madera transparente fue originalmente descubierta a principios de los años 1990 con el fin de facilitar la estructura celular y los estudios morfológicos de las especies de madera. Li et al. (1990) midió las propiedades físicas y descubrió la posibilidad de usar esta madera en el campo de la ingeniería. Combina el rendimiento mecánico con las funciones ópticas, Puede ser empleada en edificios inteligentes y la óptica estructural y fotónica. Presenta baja densidad aproximadamente 1.2 g cm⁻³, un 80% de transmisión óptica y más del 70% de neblina, buen rendimiento mecánico y posibilidad de modificaciones multifuncionales. Entre los retos que presenta está la mejora del rendimiento, la producción ampliada y el uso en aplicaciones avanzadas [4].

La madera termorrespuesta reversible inteligente con rendimiento hidrófugo se obtuvo depositando recubrimientos termorrespuesta modificados sobre superficies de madera. Recientemente nació el interés de desarrollar materiales inteligentes sensible a los estímulos, llegando a convertirse los materiales termocrómicos reversibles uno de los materiales más avanzados en materiales inteligentes debido a su rápida respuesta a la temperatura. La madera reutilizada ortodrómica reversible se desarrolló al descubrir sustratos de madera con películas transparentes. Su principal ventaja es que puede cambiar su color repetidamente con el cambio de temperatura sin destruir la textura natural de la madera; aunque la hidrofiliidad de la madera puede limitar su aplicación [5].

Hoy en día existe un amplio interés en la madera especialmente porque se encuentra presente a partir de recursos renovables, presenta una huella ecológica y energética baja, costos bajos y buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, la tendencia de la madera a presentar cambios dimensionales inducidos por la humedad es considerada una deficiencia [3]. Se sigue fomentando la investigación y la posibilidad de materiales de construcción inteligentes habilitados por la sensibilidad a la humedad de la madera [3].

1.1. MADERA CON EFECTO DE MEMORIA DE FORMA

El efecto de memoria de forma permite que después de haber sido forzada a cambiar su forma, la madera puede restaurar su forma inicial luego que se recupere sus condiciones físicas originales [2].

El concepto de memoria de forma se viene investigando desde inicios de los años ochenta. Takemura (1973), empleaba un término semejante para indicarlo como un fenómeno puramente temporal y reológico. En la actualidad este proceso refleja la capacidad de la madera para reaccionar y restaurar el estado físico inicial determinado por su contenido de humedad y temperatura [2].

Este fenómeno se basa en la reconstrucción temporal de la nanoestructura de la madera bajo una aplicación de carga controlada al aumentar la rigidez de la madera en los procesos de secado o de enfriamiento y desaparece con la humectación o el calentamiento [2].

Dentro de este efecto podemos distinguir dos tipos:

- ◆ Memoria de Tensión
- ◆ Memoria de Estrés [2].

1.1.1. EFECTO DE MEMORIA DE TENSIÓN

La memoria de tensión depende de la deformación inicial de tal manera que, si la madera ha sido comprimida y tensada sucesivamente, está memorizará el tipo de carga que haya

sufrido [2].

Gorbacheva (2000) realizó experimentos en la madera aplicándole una carga y sometiéndola a flexión y compresión, del que obtuvo como resultado que durante el calentamiento el tamaño de la madera descargada aumenta primero y luego disminuye. Este comportamiento fue realizado a diferentes rangos de temperatura. En la siguiente imagen se puede apreciar de mejor manera el resultado del experimento [2].

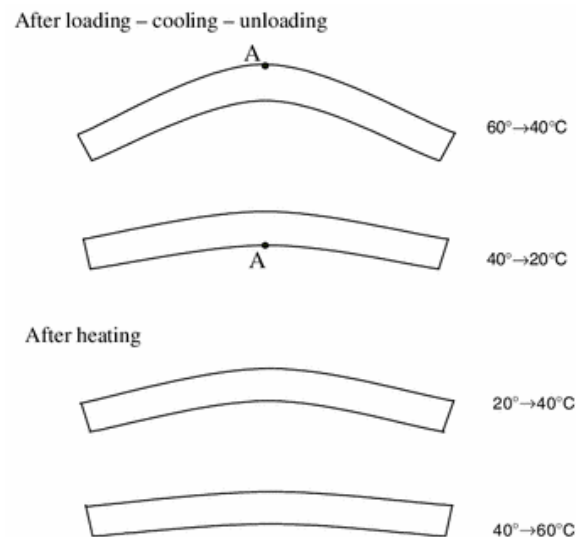


Fig. 1. Efecto de memoria de deformación de la madera. En "Wood as a natural Smart material", por Ugoley, BN 2014, Wood Science and Technology, Vol. 3, p. 553-56. Derechos de autor [2014] por Springer Nature. Reimpresión autorizada.

1.1.2. EFECTO DE MEMORIA DE ESTRÉS

El efecto de memoria de estrés fue descubierto en colaboración con EB Schedrina a finales de los años setenta (Ugoley et al., 1980) y se presenta durante la humectación o calentamiento de la madera inicialmente secada o enfriada bajo carga [2].

Es apropiado tener en consideración este fenómeno cuando la temperatura cambia, ya que la madera recuerda dicha temperatura al estar cargada. Además, permite predecir el comportamiento de la madera y el efecto de memoria de deformación [2].

En las siguientes imágenes se muestra un experimento en chapas de cenizas para comprender mejor este efecto. En este experimento, se procedió a doblar una muestra de calentamiento plano (se aplicó una carga) y luego se enfrió manteniendo dicha carga y después se descargó y se calentó nuevamente. Durante el proceso de enfriamiento, la forma de la muestra no cambia y el calentamiento hace que poco a poco vaya restaurando sus condiciones iniciales hasta recuperar su forma inicial [1].

1.2. HIGROSCOPICIDAD DE LA MADERA

La higroscopicidad es la capacidad de intercambiar humedad

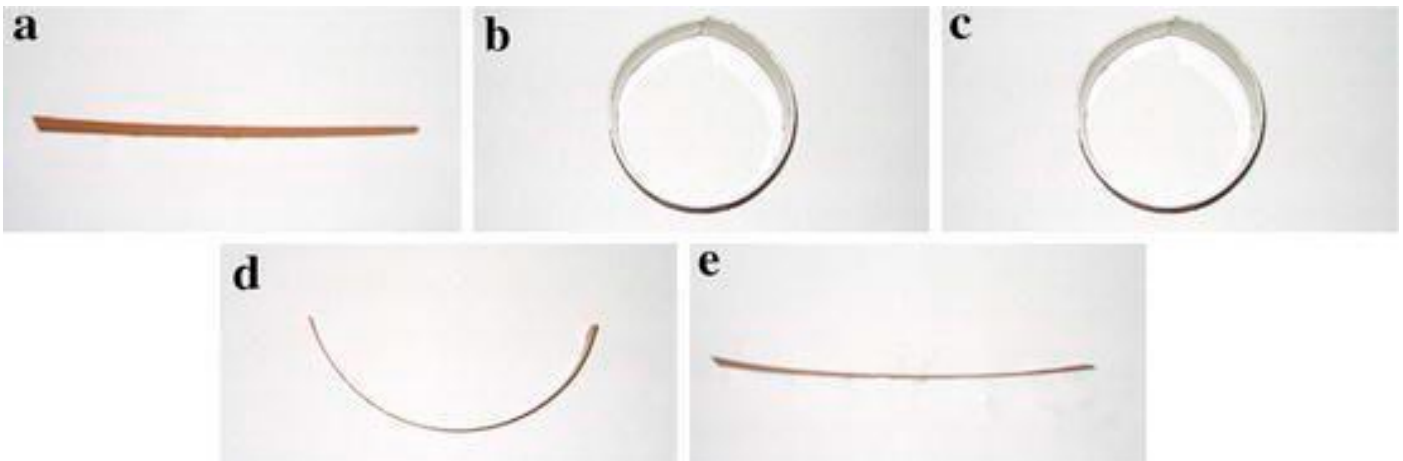


Fig. 2. Cambio de forma de chapa de ceniza y efecto de memoria de tensión a. Estado original (Madera calentada); b. Bajo Carga; c. Después del enfriamiento; d. Después de la descarga (Memoria de Forma); e. Después del calentamiento. En "Wood as a natural Smart material", por Ugoley, BN, 2014, Wood Science and Technology, Vol. 3, p. 553-56. Derechos de autor [2014] por Springer Nature. Reimpresión autorizada.

con el entorno circundante mediante procesos de absorción y desorción. Es una característica de los materiales con estructuras porosas, entre los cuales se encuentra la madera [3]. El comportamiento higroscópico de la madera es de gran importancia para un correcto aprovechamiento del recurso en la fabricación de distintas industrias, ya sean para uso en interiores o exteriores, por lo que es importante determinar el efecto de las condiciones climáticas sobre el cambio de humedad y de forma de la madera. Este comportamiento está en función de la determinación del hinchamiento y contracción máxima de la madera y de la anisotropía [6]

La madera está expuesta a un rango de humedades relativas del aire entre un 30 a un 85% que equivale a un 7 a 18% de contenido de humedad de equilibrio [6].

Se distingue por los cambios dimensionales relativamente grandes que surgen de las variaciones en su contenido de humedad y una combinación de otras propiedades que incluyen bajo peso y flexibilidad [3].

En muchas especies de madera, la higroscopicidad del duramen (parte interior de la madera) es más pequeña que la de albura debido a la presencia de extractos tóxicos depositados durante su formación [3].

Las investigaciones actuales apuntan a un empleo de materiales higromórficos como sensores o en aplicaciones a gran escala como en cubiertas de edificios y techos de espacios semi – interiores; sin embargo, continúan los retos y oportunidades de integración de edificios y de posibles aplicaciones funcionales y estéticas dentro de los edificios [3].

Las consideraciones para futuras aplicaciones son el conocimiento existente y la investigación en curso sobre las propiedades de los materiales como el comportamiento sensible [3].

Existe un amplio campo de posibles aplicaciones en el campo de la construcción, entre las que se analiza como parte de la envolvente del edificio porque sirve como una barrera entre

el espacio condicionado interno y externo no condicionado. A pesar de que algunas funciones de la envolvente del edificio pueden ser realizadas por sistemas estáticos independientes de las condiciones ambientales transitorias y de la ocupación del mismo, la incorporación de este material puede permitir una interfaz sensible al clima y pasivamente dinámica [3].



Fig. 3. Modulo de revestimiento con una serie de paneles higromorfos cuadrados de 150 x 150 mm superpuestos en estado abierto y cerrado (1a y 1b) y Prototipo de un paraguas sensible con la superficie de la cubierta que comprende paneles triangulares con 7 tipos diferentes de capas activas en estado abierto y cerrado, respectivamente (2a y 2b). En "Hygromorphic materials for sustainable responsive architecture, por Holstov.,Artem., Bridgens, Ben., Farmer, Graham 2015. Construction and Building Materials, Vol. 98, p. 570-582. Derechos de autor [2015] por Elsevier. Reimpresión autorizada.

La madera higroscópica puede proporcionar un control pasivo sobre el movimiento del aire a través de la cambiante porosidad de la piel del edificio. Ayuda a mantener el confort térmico en climas áridos a través de una ventilación natural mejorada en climas secos y cálidos o a través del empleo de sistemas en lo que la respuesta de los materiales se origina por condensación y evaporación. Puede aplicarse para detectar la humedad y controlar el intercambio de aire seco y humedad entre el ambiente externo e interno [3].

No son fotosensibles y pueden proyectarse para controlar la

iluminación y evitar el aumento de la ganancia solar [3].

La sensibilidad natural de la madera a la humedad brinda un diseño de sistema de construcción de baja tecnología y costo, mejora el confort físico y psicológico al variar la transmisión de luz y calor y el movimiento de aire mediante un tejido de construcción naturalmente dinámico. Entre sus inconvenientes se presenta la intensidad tecnológica de los edificios modernos, así como la eficiencia de los recursos que actualmente forma parte del debate sobre la sostenibilidad [3].

1.3. MADERA TRANSPARENTE

El rendimiento mecánico de la madera proviene del componente de celulosa. La madera originalmente no es transparente, por lo que ha sido un desafío extraordinario para la ciencia de los materiales lograr una madera transparente [4].

La madera transparente se descubrió a principios de la década de 1990 y obtuvo por primera vez con una estructura conservada para los estudios morfológicos correspondientes. Se puede emplear en edificios inteligentes y óptica estructural y fotónica. Entre los múltiples retos de este material se encuentra el rendimiento óptico y mecánico mejorado y las nuevas aplicaciones de funcionalización [4].

Se fundamenta en la interacción luz – madera ya que al viajar la luz a través del aire e interactuar con un objeto sólido, se propaga la luz en la dirección hacia adelante para la retracción y /o absorción o a su vez reflejarse hacia atrás en la interfaz aire / sólido [4].

Entre las propiedades ópticas de un material transparente se encuentra la transmitancia óptica total y la neblina óptica con una pequeña reflexión del 10% con espesor en la dirección longitudinal en la superficie exterior. La transmitancia óptica total es la relación de la intensidad de la luz transmitida a la intensidad de luz incidente y la neblina óptica es la proporción de luz transmitida difusa a la luz total transmitida. Entre estas dos propiedades pueden influir el índice de refracción, el grosor, la rugosidad de la superficie, la distribución del tamaño de los poros y la porosidad [4].

Cuando la luz interactúa con la madera genera una combinación de refracción, absorción, reflexión y transmisión. La dispersión de la luz tiene lugar en todas las interfaces entre la pared celular y el aire, pero dentro de la pared celular se puede conducir de una mejor manera esta dispersión debido a un desajuste del índice de refracción de los principales componentes químicos de la celulosa, hemicelulosa y lignina. La lignina representa el 80 a 95% de la absorción de luz. Esto depende de la longitud de la onda de la luz y la naturaleza de la madera como, por ejemplo: la densidad, las direcciones de la madera y las composiciones químicas. Las absorciones de luz de las entidades químicas deben reducirse o eliminarse para lograr que la madera sea transparente [4].

La densidad de la interfaz es mayor cuando la luz se propaga en la dirección transversal de la madera en comparación con la propagación a lo largo de la dirección longitudinal. La madera cuando la luz se propaga en el plano transversal presenta una mayor transmitancia y menor turbidez que cuando la luz se propaga en el plano transversal; esto debido a que tiene una menor densidad de interfaces de polímero /celulosa producto de la forma de cilindro hueco de las células de madera [4].

Las propiedades mecánicas de la madera transparente dependen en gran medida de las especies de madera y la anisotropía de la estructura de la madera como por ejemplo la madera transparente a base de álamo, haya y balsa impregnadas con el mismo polímero muestran grandes diferencias. Las propiedades de tracción mejoran al aumentar la fracción de volumen de celulosa y son anisotrópicas [4].

Para la fabricación y rendimiento de la madera transparente las propiedades de los polímeros son importantes, así como la viscosidad, refracción, compatibilidad con la pared celular y la contracción durante la polimerización [4].

Una ventaja de este tipo de madera es que la resistencia a la fractura es más alta que la de los materiales frágiles, por lo que no se rompe de manera desfavorable [4].

Un mayor contenido de celulosa es deseable en la madera transparente, pero para ello se requiere comprimir la estructura de la madera, por lo que aún no se ha descubierto si es factible para estructuras gruesas [4].

Los paneles de construcción de madera transparente tienen menor conductividad térmica, mejor resistencia al impacto y mayor densidad. Según estudios, un techo de madera transparente podría proporcionar una iluminación más uniforme y compacta durante el día [4].

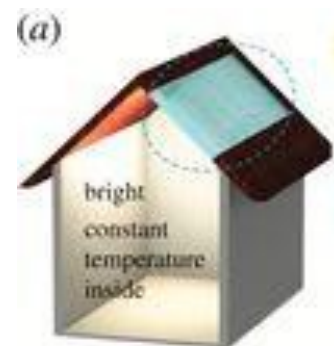


Fig. 4. Boceto de una casa con techo transparente. . En "Transparent wood for functional and structural applications por Li, Yuanyuan., Fu, Qiliang., Yang, Xuan., Berglund, Lars 2018. Philosophical.

Esta madera no muestra una ganancia óptica intrínseca por sí misma, por lo que la adición de medios ópticos activos puede llevar a una amplia gama de aplicaciones [4]

Existen aún algunos desafíos por cumplir como es la mejora de las propiedades ópticas y mecánicas y ampliar los métodos

de producción ya que los procesos de deslignificación llevan mucho tiempo y debilitan la estructura de la madera, no siempre son ecológicos y la manipulación y fabricación de sustratos grandes se vuelve todo un reto. Para realizar la visión de las aplicaciones de nanotecnología de la madera a gran escala, la ciencia de los materiales a nanoescala debe desarrollarse para ser implementados a escala industrial [4].

1.4. MADERA TERMORRESPUESTA CON MATERIALES TERMOCRÓMICOS

La madera inteligente termorrespuesta fue desarrollada colocando materiales termocrómicos sobre superficies de madera. Este efecto consiste en que los compuestos de madera fabricados pueden cambiar de color de manera variable a diferentes temperaturas [5].

Según estudios realizados, los materiales termocrómicos se instalaron con éxito sobre superficies de madera. A medida que aumentan las concentraciones de materiales termocrómicos cambia el color de la madera [5].

Los materiales termocrómicos cambiantes se utilizan en muchos campos de aplicación, entre ellos están como sensores de temperatura, regulador térmico y en recubrimientos inteligentes. Por sus características de conmutación, el color de los materiales de madera termocrómicos con termocromismo reversible antidrómico puede cambiar frecuentemente de tal manera que se colorean a temperatura ambiente y se vuelven incoloros con un aumento de temperatura [5].

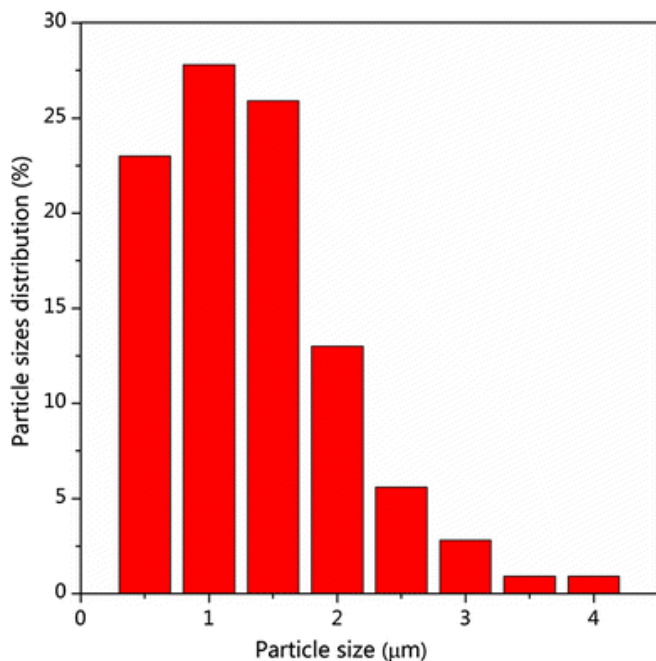


Fig. 5. Distribución del tamaño de partículas de materiales termocrómicos. En Fabrication of Smart Wood with reversible thermoresponsive performance por Yingying, Li., Bin, Hui., Guoliang, Li., Jian, Li 2017. Journal of Materials Science, Vol. 52, p. 7688-7697. Derechos de autor [2017] por Springer Nature. Reimpresión autorizada.

Al ser la madera un material poroso se puede suministrar en distintos lugares los materiales termocrómicos. El porcentaje

de estos materiales puede ser desde 0, 1.5, 2.0, 2.5, 3, 3.5 y 4%. Este tamaño de materiales fue analizado por el Nano Measurer, del que se obtuvo que de acuerdo al diagrama de inmersiones de partículas el tamaño de 0.5 a 1.5 µm tiene una mayor distribución de las partículas [5]

Se colocan en las superficies de madera utilizando un método de recubrimiento por caída y se colocan a temperatura ambiente durante 24 horas para que se sequen naturalmente. Puede cambiar los colores entre el color de la madera original y un color oscuro según la temperatura; es decir que se colorea cuando la temperatura aumenta y vuelve a su color natural cuando se enfría a temperatura ambiente. Las superficies de madera inteligente termorrespuesta se obtienen con un espesor de 12 µm [5].

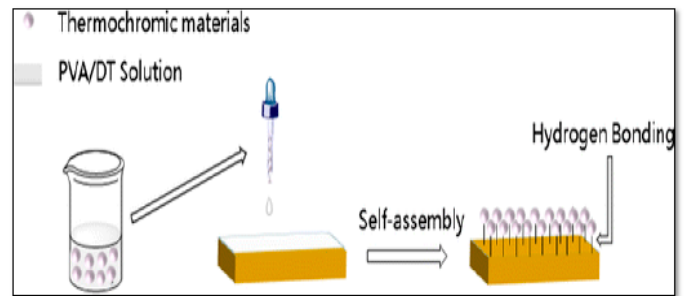


Fig. 6. Estrategia experimental para la fabricación de madera inteligente termorrespuesta. En Fabrication of Smart Wood with reversible thermoresponsive performance por Yingying, Li., Bin, Hui., Guoliang, Li., Jian, Li 2017. Journal of Materials Science, Vol. 52, p. 7688-7697. Derechos de autor [2017] por Springer Nature. Reimpresión autorizada.

La colocación de los materiales termocrómicos le brindan a la madera una superficie homogénea y lisa, aunque una de las principales limitaciones es que la textura de la madera sufre una gran pérdida [5].

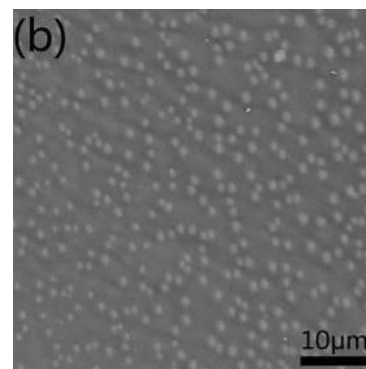


Fig. 7. Superficie de madera de respuesta térmica inteligente. En Fabrication of Smart Wood with reversible thermoresponsive performance por Yingying, Li., Bin, Hui., Guoliang, Li., Jian, Li 2017. Journal of Materials Science, Vol. 52, p. 7688-7697. Derechos de autor [2017] por Springer Nature. Reimpresión autorizada.

2. RESULTADOS

La madera es un biopolímero natural y renovable con excelentes propiedades como el aislamiento térmico y acústico,

ajuste de la humedad y temperatura y una alta proporción de resistencia al peso; lo que contribuye a que sea empleado en edificios, decoraciones, entre otros usos [7].

Al poseer una pared celular porosa le brinda a la madera una superficie capaz de fusionar con otros tipos de materiales avanzados. [7].

En los últimos años los investigadores han realizado muchos experimentos que incorporan compuestos orgánicos e inorgánicos, los mismos que se mezclan con la madera para explotar la misma con funciones inteligentes [7].

La incorporación de la madera higroscópica cumple un papel importante dentro de los materiales y sistemas inteligentes de baja tecnología con funciones variables en la industria de la construcción. En el pasado, la higroscopicidad de la madera no se había aprovechado hasta los últimos años en los que se descubrió sus beneficios. Se descubrió que la madera atrae o retiene las moléculas de su entorno circundante consiguiendo que aumente de volumen a medidas que las moléculas de agua estén suspendidas entre las fibras de celulosa. Debido a su bajo impacto ambiental y su capacidad de cambiar el volumen mientras está sujeto a estrés, es un buen candidato para transformar los sistemas de construcción [3].

Holstov et al. utilizó el principio higromórfico que se basa en la capacidad del material para cambiar sus dimensiones en respuesta a la variación en la humedad, reducir ganancia de calor solar y el deslumbramiento en los edificios y regular la luz del día a través del control pasivo de la apertura y el cierre de las pantallas de fachada. Se realizó un prototipo de una fachada higromórfica que se programaba para abrirse en condiciones de clima húmedo en el cielo nublado para dejar pasar más la luz del día y cerrar en condiciones secas bajo un cielo despejado. En este caso la propiedad higroscópica de la madera se empleó para desarrollar un recubrimiento arquitectónico que responde a los cambios en rango de humedad [8].

En el caso de la madera transparente, está se obtiene cortando madera de haya en forma de disco, la cual previamente debe ser enjuagada con agua; después de esto es llevado a un horno de caja para la deshidratación a 120° C durante 24 horas. Luego de este periodo de tiempo las muestras deshidratadas se transfieren a una solución que contiene el 5% de cloruro de sodio en peso en solución de acetato dejando reposar a 95°C durante 12 horas. Todo este proceso blanquea la madera y elimina la lignina presente en las paredes celulares. Después de esto, las piezas de madera se lavaron con agua desionizada y más tarde en etanol y acetona. Esta muestra lavada se conoce como madera deslignificada debido a que la muestra va cambiando de color marrón a blanco. Posterior a esto, se almacena en etanol, humedeciéndolo con poli metacrilato de metilo (PMMA) por infiltración al vacío durante una hora con tres repeticiones. Finalmente, se empareda entre portaobjetos de vidrio

envueltos en aluminio para el tratamiento térmico realizado en un horno de caja a 85°C durante 12 horas y se obtiene la madera tratada térmicamente o también conocida como madera transparente [9].

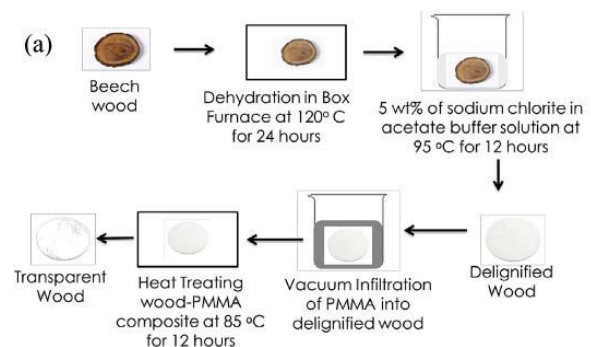


Figure 8. Proceso de fabricación de madera transparente. En "Transparent wood for functional and structural applications por Li, Yuanyuan., Fu, Qiliang., Yang, Xuan., Berglund, Lars 2018. Philosophical Transactions of the Royal Society A- Mathematical Physical and Engineering Sciences, Vol. p. 376, 2112. Derechos de autor [2018] por Royal Society. Reimpresión autorizada.

Gracias a la madera transparente se puede reducir el consumo de electricidad en los edificios. La eliminación de la lignina de la madera y la absorción de polímeros inofensivos consiguen que el índice de refracción del medio ambiente coincida con el índice de refracción de la pared celular. La morfología de la superficie de la madera transparente se ha estudiado mediante microscopía electrónica de barrido. Las mediciones ópticas demostraron una transmitancia óptica máxima del 70% y una turbidez máxima del 49% para muestras de madera de 0.1 mm y 0.7 mm de espesor. A través de las pruebas mecánicas se ha descubierto que tiene una mayor resistencia a la tracción y dureza. Es un probable candidato para materiales de construcción que transmiten luz y ventanas de células solares transparentes [9]

Dentro de las líneas de investigación de madera con materiales termocrómicos los investigadores están tratando de resolver el problema de pérdida de textura a través de una composición de estos materiales con alcohol polivinílico (PVA) y dextrina (DT). El PVA es un polímero tolerante con el medio ambiente, tiene una buena solubilidad en agua y una excelente propiedad de formación de películas y la DT ayuda a mejorar la dureza de las películas. Las adhesiones de estos materiales a los sustratos de madera se midieron a través de la prueba de corte transversal (ISO 2409) [7].

Para las pruebas de color, Jiangsu Jun Instrument Technology Co., Ltd. tomó muestras que fueron colocadas en una cámara de acondicionamiento, se calibraron los sensores de temperatura con una precisión de 0.1 °C y se controló a intervalos de 200 s y se aumentó en un intervalo de 1°C. Los cambios de color están relacionados con el número creciente de cromóforos. Cuando las concentraciones de materiales termocrómicos aumentaron de 0 a 4%, el índice de claridad en las muestras tomadas disminuyó de -0.2 a -17.2 indicando

que el color de la superficie se vuelve más oscura; en cambio a un mayor valor aumentó notablemente de 0.6 a 36.2 indicando una sombra más profunda de color rojo siendo el color principal de la muestra el rojo [7].

En la figura 8 se muestra el proceso de cambio de color de una muestra con concentraciones de material termocrómico de

3 a 5%. A temperatura ambiente la madera resistente al calor mantiene su color natural, con un aumento de temperatura de 25°C a 40°C mostró un excelente proceso termocrómico y después de enfriarse a temperatura ambiente alrededor de los 25°C la madera vuelve a su color natural, lo que significa que tiene un buen comportamiento ortodrómico reversible [7].

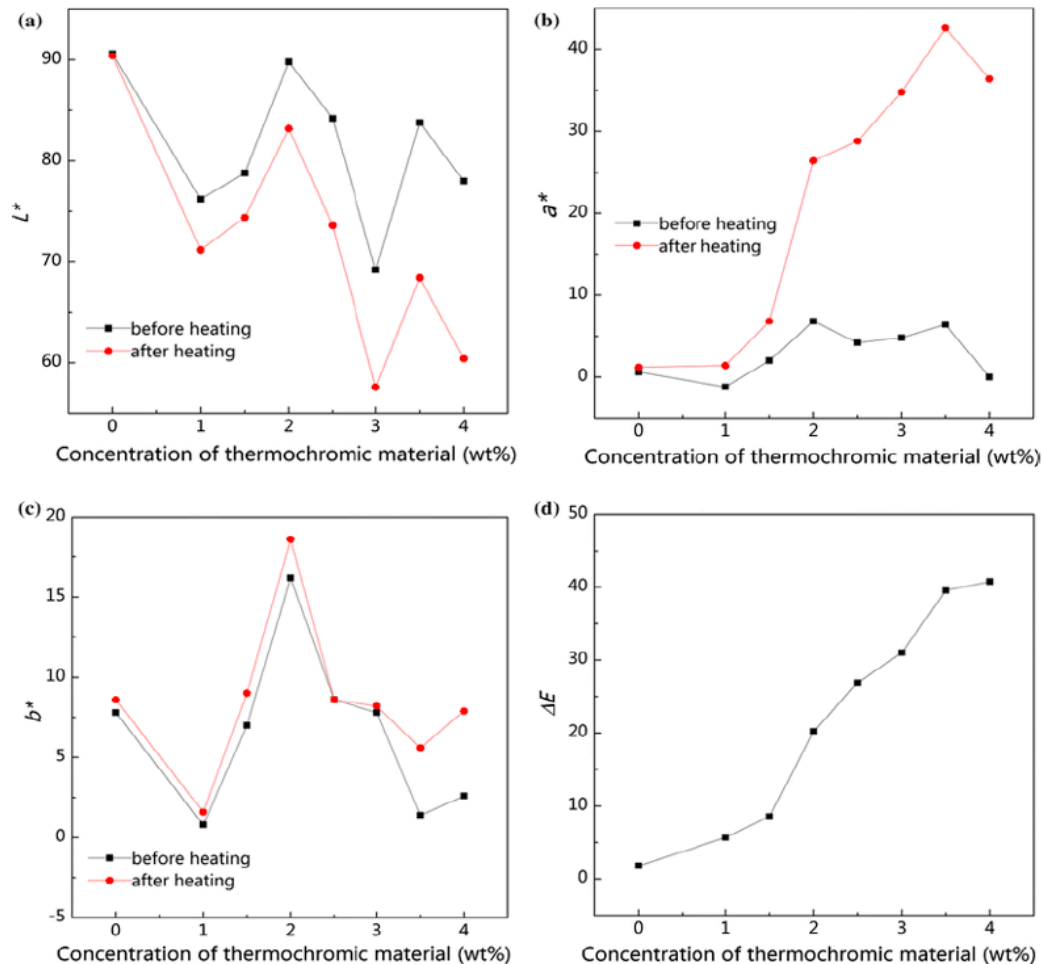


Fig. 9. Cambios en los parámetros de color de la superficie de muestra antes y después del calentamiento. . En Fabrication of Smart Wood with reversible thermoresponsive performance por Yingying, Li., Bin, Hui., Guoliang, Li., Jian, Li 2017. Journal of Materials Science, Vol. 52, p. 7688-7697. Derechos de autor [2017] por Springer Nature. Reimpresión autorizada.

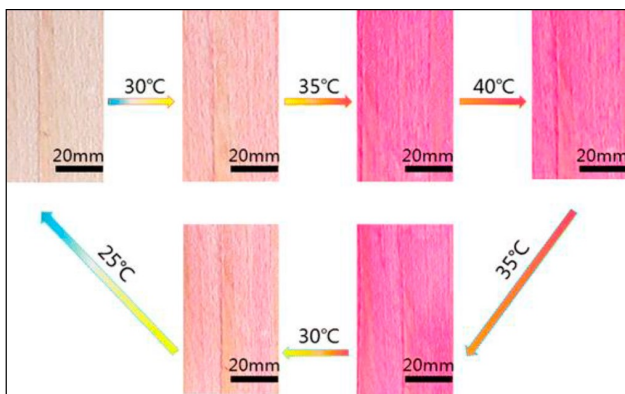


Fig. 10. Procesos de cambio de color de la madera termorresponsa. En Fabrication of Smart Wood with reversible thermoresponsive performance por Yingying, Li., Bin, Hui., Guoliang, Li., Jian, Li 2017. Journal of Materials Science, Vol. 52, p. 7688-7697. Derechos de autor [2017] por Springer Nature. Reimpresión autorizada.

La madera termorresponsa podría aplicarse como indicadores de temperatura lo que podría aumentar el camino para las aplicaciones inteligentes de los materiales de la madera [7].

Entre otros resultados de investigaciones tenemos:

- ◆ Merk et al. desarrolló un material híbrido magnéticos de madera y nanocompuesto utilizando un enfoque de fabricación in situ
- ◆ Ly et al. desarrolló una madera conductora empleada como supercapacitador de estado sólido mecánicamente flexible empleando el método de inmersión y polimerización
- ◆ Hu et al. desarrolló materiales de madera

termocromáticos para el almacenamiento de energía mediante el recubrimiento de microcápsulas compuestas de una capa de melanina – formaldehído y un núcleo de cristal violeta lactona sobre la superficie de la madera

- ♦ La madera fotorrespuesta como resultado de recubrir una superficie de madera con trióxido de tungsteno, convirtiéndolo en un nuevo tipo de material inteligente. Su color puede cambiar tras la irradiación con luz ultravioleta

3. CONCLUSIONES

Creemos haber aportado evidencias suficientes para demostrar que la madera es un biopolímero natural y renovable que contribuye a que sea empleado en una amplia gama de aplicaciones.

Con el auge de materiales sostenibles se han realizado múltiples investigaciones para encontrar nuevos materiales o descubrir nuevas propiedades en materiales existentes que aporten nuevas soluciones ingenieriles, como es en este caso la madera. La madera con memoria de forma tiene buen comportamiento y es de gran importancia en los edificios.

Los resultados permitieron conocer que la incorporación de la madera higroscópica cumple un papel importante dentro de los materiales y sistemas inteligentes de baja tecnología, además, debido a su bajo impacto ambiental y su capacidad de cambiar el volumen mientras está sujeto a estrés, es un buen candidato para transformar los sistemas de construcción.

La madera transparente permite reducir el consumo de electricidad en los edificios y posee una mayor resistencia a la tracción y dureza.

La madera termocromática podría aplicarse como indicadores de temperatura, el cual es beneficioso ya que amplía el camino para las aplicaciones inteligentes de la madera; aunque aún se continúa las líneas de investigación respecto a este material.

A pesar de que se han descubierto nuevas propiedades y se ha ampliado el uso de la madera convirtiéndose en un material de construcción inteligente aún se tienen que realizar investigaciones para reducir o eliminar aquellos factores que afectan la estructura de la madera y se puedan también emplear a grandes escalas.

4. REFERENCIAS

- [1] Rhee, P. (2018). Beyond Green: Environmental Building Technologies for Social and Economic Equity. *Architectural Design*, 88, 94-101.
- [2] Ugoley, BN. (2014). Wood as a natural Smart material. *Wood Science and Technology*, 3, 553-568.
- [3] Holstov.,Artem., Bridgens, Ben., Farmer, Graham. (2015). Hygromorphic

material for sustainable responsive architecture. *Construction and Building Materials*, 98, 570- 582.

- [4] Li, Yuanyuan., Fu, Qiliang., Yang, Xuan., Berglund, Lars. (2018). Transparent wood for functional and structural applications. *Philosophical Transactions of the Royal Society A- Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 376, 2112.

- [5] Yingying, Li., Bin, Hui., Guoliang, Li., Jian, Li. (2017). Fabrication of Smart Wood with reversible thermoresponsive performance. *Journal of Materials Science*, 52, 7688-7697.

- [6] Fuentes Talavera, F.J, Silva Guzmán, J.A, Lomelí Ramírez, M.G, Ritcher, H.G, Sanjuán Dueñas, R. (2007). Comportamiento higroscópico de la madera de persea americana var. Guatemalensis mil (has). *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 8, 49 -56.

- [7] P, Bektha., P, Niemz.(2005). Effect of high temperatura on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce Wood. *Wood research and Technology*, 57, Issue 5.

- [8] Abdelmohsen, Sherif., Adriaenssens, Sigrid., El-Dabaa, Rana., Gabriele, Stefano., Olivieri, Luigui., Teresi, Luciano. (2019) *Computer – Aided Design*, 106, 43 – 53.

- [9] Sree, Haritha., Hickerson, Nathan., Saini, Shrikant., Tiwari, Ashutosh. (2017). Fabrication and characterization of transparent Wood for next generation smart Building applications. *Vacuum*, 146, 649 -654.

WHAT DO YOU THINK?

To discuss this paper, please submit up to 500 words to the editor at bm.edificacion@upm.es. Your contribution will be forwarded to the author(s) for a reply and, if considered appropriate by the editorial panel, will be published as a discussion in a future issue of the journal.

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

Building & Management is an open access scientific e-journal promoted by the School of Building Engineering (ETSEM) of the Universidad Politécnica de Madrid (UPM) and published every four months, three times a year, March, July and November. It aims at the dissemination of high quality original works related to the management of processes associated to buildings, in any phase of their development, where various agents in the sectors of Architecture, Engineering and Construction participate.

1. JOURNAL AIMS AND SCOPE

Topics of interest include all the theoretical, methodological and/or practical advances, in building management --one or several processes-- within any life phase of the building. These could be developed at the academic or professional level.

This magazine is addressed to all the interveners of the building sector. For its better diffusion title, abstract, highlights and keywords of the articles will be published in English and Spanish, and the body is allowed in both languages. English is preferred.

The content will consist primarily of original research manuscripts. However B&M is also open to the publication, always within the scope of the magazine, of: review articles, technical reports, best practices, conference papers, fast-track communications, letters to the editor, states of the art and book reviews. Academic-scientific content must prevail in all occasions.

2. BLINDED PEER-REVIEW PROCESS

The Editorial Board of the magazine, after verification that the article complies with the rules on style and content indicated in the guidelines for authors, sent the text, as double-blind model, to two anonymous external expert reviewers within the specific field, for its evaluation, or to a third if necessary.

Authors will be informed about the initial acceptance or rejection within a month. The evaluation will focus in the interest of the article, its contribution to knowledge of the subject treated, the contributed novelty, the established relationships, critical judgment, developed content, structure, use of bibliographic and references that are handled properly, wording, etc. Indicating recommendations for its possible improvement.

Based on the recommendations of the reviewers, the Editorial Board will inform authors the reasoned result of reports by email, at the address they have used to send the article. The revision process lasts approximately three or four months, without any cost for authors. The Editorial Board will communicate the result to the principal author of the review (published unchanged, with minor corrections publication, publication with important fixes, not suitable for publication).

Building & Management es una publicación de gestión en Edificación de la Escuela Técnica Superior de Edificación (ETSEM) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Se trata de una revista digital científica abierta con periodicidad cuatrimestral (marzo, julio, noviembre), que tiene como primer objetivo la divulgación de trabajos originales sobre gestión de los procesos vinculados a la edificación, desarrollados por los sectores de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción en cualquiera de las fases del ciclo de vida del edificio.

1. TEMÁTICA Y ALCANCE DE LA REVISTA

Los temas de interés incluyen todos los avances teóricos, metodológicos y/o empíricos, a nivel académico o profesional, en la gestión de uno o varios procesos dentro de cualquiera de las fases de vida del edificio.

Esta revista va dirigida a todos los agentes del sector de la edificación. Para su mayor difusión el título, resumen, titulares y las palabras clave de los artículos se publican en inglés y en español y el cuerpo del artículo se admite en ambos idiomas dando preferencia al inglés.

El contenido estará formado fundamentalmente por artículos científico-técnicos originales, no obstante, de igual forma y siempre dentro del ámbito de alcance de la revista, B&M también está abierta a la publicación de: artículos de revisión, informes técnicos, buenas prácticas, comunicaciones en congresos, comunicaciones cortas, cartas al editor, estados del arte y reseñas de libros. En todos los casos deberá primar el contenido científico académico, ajustándose al formato de este tipo de publicaciones.

2. REVISIÓN POR PARES DOBLE CIEGO

Los trabajos presentados serán sometidos a una revisión inicial por parte del comité editorial. Los autores de los manuscritos enviados serán informados de la aceptación inicial para su revisión o del rechazo de su artículo en el plazo de un mes de la recepción del mismo.

Si sus contenidos son adecuados serán enviados para una revisión por pares realizada por expertos independientes y de reconocido prestigio, y por un tercero en caso necesario, ajustándose a los protocolos de publicaciones científicas seriadas. Los evaluadores serán seleccionados por el Comité de Redacción en función de su trayectoria investigadora.

Las revisiones por pares se realizarán por un test de doble ciego gestionado online. La valoración incidirá sobre el interés del artículo, su contribución al conocimiento del tema tratado, las novedades aportadas, las correctas relaciones establecidas, el juicio crítico desarrollado, la estructura del contenido, los referentes bibliográficos manejados, su correcta redacción, etc., indicando recomendaciones, si las hubiera, para su posible mejora.

If the manuscript has been accepted with modifications, authors should resubmit a new version of the article, following demands and suggestions of the external evaluators. If desired, the authors can also provide a letter, by email, to the Editorial Board in which they indicate the content of modifications of the article.

If desired, the authors can also provide a letter, by email, to the Editorial Board in which they indicate the content of modifications of the article.

Articles with significant corrections may be sent back to blind peer review to verify the validity of changes made by the author.

Considering the degree of compliance with changes requested, the Board shall decide whether or not the publication of the article. This decision shall be communicated to the author by the Editorial Board and in case of publication the manuscript will be dated as accepted.

3. SUBMITTING A MANUSCRIPT

3.1. FORMAT

Building & Management is an open access publication. Articles will be published online in PDF format, and will be available for free to readers immediately after publication online, without any restriction, at the following electronic address: http://polired.upm.es/index.php/building_management/

The Universidad Politécnica de Madrid reserves the right to distribute the complete numbers as an electronic book for its sale, either in PDF format, ePub or in any other electronic possible format, now or in the future, and / or paper format in print on demand. These alternative formats will have identical content and will be subject to the same copyright as the individual articles in the digital edition, and will be considered equivalent for all purposes.

3.2. SUBMITTING PROCESS

All manuscripts will preferably be written in English or Spanish. Submitted manuscripts will undergo a reviewing process, starting with a linguistic review. Manuscripts with a poor quality in this regard will be returned without evaluation. The submission of a manuscript implies that all co-authors have approved and accepted the content of the submitted text, tables, graphic material and any other complementary material supplied. The corresponding author will be responsible for all the co-authors to correct information about the manuscript. All submissions must be accompanied by a signed letter stating the originality and unpublished nature of the content of the manuscript, and their assurance that it has not been simultaneously sent to another publication for its evaluation. The letter can be downloaded at <https://drive.upm.es/index.php/s/FeqbSU7DSswCIOI>

El consejo editorial decidirá si el manuscrito es aceptado o rechazado basándose en los informes y recomendaciones de los evaluadores externos. El proceso de evaluación tiene normalmente una duración aproximada de entre tres y cuatro meses y no tiene ningún coste para los autores. Todos los informes de evaluación se enviarán a los autores, manteniendo el anonimato (publicación sin cambios; publicación con correcciones menores; publicación con correcciones importantes; no aconsejable para su publicación). En el caso de la aceptación del artículo, los autores deberán considerar los comentarios realizados por los evaluadores y volver a enviar el trabajo con los cambios oportunos. El proceso de revisión se repite, manteniendo el anonimato. En caso que la segunda revisión de los evaluadores sea de nuevo favorable, será probable que el artículo se acepte para su publicación definitiva. Cuando ésta se produzca, al trabajo se le asignará una fecha de aceptación.

3. ENVÍO DE MANUSCRITOS

3.1. FORMATO

Building & Management es una publicación en línea de libre acceso. Los artículos serán publicados en línea en formato PDF, y estarán disponibles de forma gratuita para los lectores inmediatamente después de su publicación en línea, sin ninguna restricción en la siguiente dirección electrónica: http://polired.upm.es/index.php/building_management/

La Universidad Politécnica de Madrid se reserva el derecho de distribuir para su venta los números completos como libro electrónico, ya sea en formato PDF, ePub o en cualquier otro formato electrónico posible en el presente o en el futuro, y/o en formato papel en impresión bajo demanda. Estos formatos alternativos tendrán un contenido idéntico y estarán sujetos a los mismos derechos de autor que los artículos individuales en la edición digital, y serán considerados equivalentes a todos los efectos.

3.2. ENVÍO DE MANUSCRITOS PARA SU EVALUACIÓN Y APROBACIÓN

Los manuscritos estarán redactados preferentemente en Inglés o Español. Los manuscritos enviados serán revisados en primer lugar desde el punto de vista lingüístico. Los manuscritos con un nivel de calidad deficiente en este aspecto serán devueltos sin ser evaluados. El envío de un manuscrito implica que todos los coautores han aprobado y aceptado el contenido del texto remitido, las tablas, el material gráfico y cualquier otro material complementario suministrado. El autor designado como persona de contacto será responsable de que todos los coautores dispongan de información correcta sobre el manuscrito enviado. Todos los envíos deberán ir acompañados de una carta firmada indicando el carácter original e inédito del contenido del manuscrito, y que el mismo no ha sido enviado simultáneamente a otra publicación para su valoración. La carta se puede descargar en <https://drive.upm.es/index.php/s/FeqbSU7DSswCIOI>

3.3. MANUSCRIPT

To help authors to prepare the manuscripts a standard template can be downloaded at http://polired.upm.es/public/journals/22/Author_template_B M.docx

3.4. MANUSCRIPT DELIVER AND ACCEPTANCE

All proposed contents will be related to the objectives of the journal and will have to adhere to the rules contained in the following sections. Manuscripts will be sent to the following email address: bm.edificacion@upm.es. Papers will be written in Spanish or English. Manuscripts should be between 6000 and 8000 words in length, including abstract, key words, highlights, references, etc. Each table or figure will be considered equivalent to 200 words. And before we can accept a manuscript, B&M requires Open Researcher and Contributor ID (ORCID) information for every author on the paper.

3.5. MANUSCRIPT ADMISSION

All manuscripts received will be evaluated through a double-blind system. Suggestions will be sent to the authors to make the necessary modifications. Only original manuscripts that have not previously been published in other journals will be accepted.

3.6. TITLE

The title should be concise, informative, meaningful to the whole readership of the journal and will be written in English and Spanish. The name and surname of the author(s) and the company, university or research center, as well as the e-mail address, will be indicated below.

3.7. ABSTRACT

The articles will include a summary in English and Spanish (between 200 and 300 words) that clearly state the objectives, the approach and conclusions of the research.

3.8. KEYWORDS AND HIGHLIGHTS

Between 4 and 6 keywords in Spanish and English will be included, as well as 3 to 5 headlines (phrases that define the most important issues of the article, with no more than 85 characters each, spaces included).

3.9. PRODUCTION AND SUBMISSION

Writing clear, concise sentences. Proposals will be sent to the e-mail address bm.edificacion@upm.es in electronic format. The text will be sent in a file in .doc format, including the images in the desired place. Articles will be accepted in English and Spanish. When the text is written in English, Sending either the title or the abstract in Spanish will not be necessary.

3.3. PREPARACIÓN DEL MANUSCRITO

Para ayudar a los autores en la preparación de sus manuscritos existe una plantilla que se puede http://polired.upm.es/public/journals/22/Author_template_B M.docx

3.4. ENVÍO Y ACEPTACIÓN

Los trabajos para publicar estarán relacionados con los objetivos de la revista y tendrán que ceñirse a las normas contenidas en los siguientes apartados, debiendo enviar los trabajos a la dirección de correo electrónico bm.edificacion@upm.es. Los trabajos se redactarán en español o en inglés, con una extensión entre 6000 y 8000 palabras, incluyendo resumen, palabras clave, titulares, referencias, etc., así como tablas y figuras con una equivalencia de 200 palabras por cada una. Todos los autores deben aportar su identificador digital ORCID.

3.5. ADMISIÓN DE ORIGINALES

Todos los originales recibidos serán evaluados mediante el sistema de doble ciego cuyas sugerencias se enviarán a los autores para que realicen las modificaciones pertinentes. Sólo se aceptarán trabajos originales que no hayan sido publicados anteriormente en otras revistas.

3.6. TÍTULO

El título de los trabajos será conciso e informativo y expresará su contenido, en inglés y en español. Seguidamente se indicará nombre y apellido del autor o autores, organismo o centro de trabajo y dirección de correo electrónico.

3.7. RESUMEN

Los artículos deberán ir acompañados de un resumen en inglés y en español (entre 200 y 300 palabras) que con toda claridad señale los objetivos, el planteamiento y conclusiones del trabajo.

3.8. PALABRAS CLAVE Y TITULARES

Se incluirán entre 4 y 6 palabras clave en inglés y en español, así como 3 a 5 titulares (frases que definen lo más importante del trabajo, con no más de 85 caracteres incluyendo espacios cada una).

3.9. REDACCIÓN DEL TEXTO Y PRESENTACIÓN

La redacción será clara y concisa. Los trabajos se enviarán a la dirección de correo electrónico bm.edificacion@upm.es en formato electrónico. El texto se enviará en un archivo en formato Word, incluidas las imágenes en el lugar deseado. Los trabajos se admitirán en inglés y en español. Cuando el texto esté redactado en inglés, no será necesario mandar ni el título ni el resumen en español.

3.10. REFERENCES

References must be limited to those indispensable that are directly related to the article's content. Citations in the text and references will meet the IEEE standard format. There should be no less than 25 references and at least 30% of them from the last 4 years.

The DOI (Digital Object Identifier) should be incorporated into every reference for which it is available.

♦ Books

[1] A. Rezi and M. Allam, "Techniques in array processing by means of transformations," in *Control and Dynamic Systems*, Vol. 69, *Multidimensional Systems*, C. T. Leondes, Ed. San Diego: Academic Press, <http://dx.doi.org/>, 1995, pp. 133-180.

♦ Journal articles

[2] G. Liu, K. Y. Lee, and H. F. Jordan, "TDM and TWDM de Bruijn networks and sufflenets for optical communications," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 46, pp. 695-701, <http://dx.doi.org/>, June 1997.

♦ Technical report

[3] K. E. Elliot and C. M. Greene, "A local adaptive protocol", Argonne National Laboratory, Argonne, France, Tech. Rep. 916-1010-BB, <http://dx.doi.org/>, 1997

♦ Master End Project or PhD thesis

[4] J.-C. Wu. "Rate-distortion analysis and digital transmission of nonstationary images". Ph.D. dissertation, Rutgers, the State University of New Jersey, Piscataway, NJ, USA, <http://dx.doi.org/>, 1998.

♦ Internet

[5] J. Jones. (1991, May 10). *Networks* (2nd ed.) [Online]. Available: <http://www.atm.com>. Last date reviewed.

3.11. TABLES, FIGURES AND GRAPHICS

The number of tables and figures should be limited by sending only those that are really useful, clear and representative. They will be numbered correlatively according to the quotation in the text and each one will have its caption. They will be placed in the right place of the text.

Tables and figures should be designed in Word or Excel, so that they are visible when conforming to the format of 8.8 cm (width of 2 columns) presenting a good contrast so that they do not lose quality with the reduction. If necessary, once the article has been accepted, the journal may ask the corresponding author separately for tables and figures with better resolution. Sources must be included, when necessary, for tables, figures.

The resolution of pictures should not be less than 300 dpi (dots per inch). If the size of the final file is too large (more than 10 MB), then the manuscript should contain the figures with minimized resolution, and the original figures must be

3.10. REFERENCIAS

Las referencias deberán reducirse a las indispensables que tengan relación directa con el trabajo enviado. Las citas en el texto y las referencias consignadas seguirán el formato IEEE. Se propone un número de citas no inferior a 25, con el 30% de las mismas publicadas en los últimos cuatro años.

Siempre que la publicación citada disponga de DOI, será necesaria su incorporación en la referencia bibliográfica.

♦ Libros

[1] A. Rezi and M. Allam, "Techniques in array processing by means of transformations," in *Control and Dynamic Systems*, Vol. 69, *Multidimensional Systems*, C. T. Leondes, Ed. San Diego: Academic Press, <http://dx.doi.org/>, 1995, pp. 133-180.

♦ Artículos de revistas científicas

[2] G. Liu, K. Y. Lee, and H. F. Jordan, "TDM and TWDM de Bruijn networks and sufflenets for optical communications," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 46, pp. 695-701, <http://dx.doi.org/>, June 1997.

♦ Informes técnicos

[3] K. E. Elliot and C. M. Greene, "A local adaptive protocol", Argonne National Laboratory, Argonne, France, Tech. Rep. 916-1010-BB, <http://dx.doi.org/>, 1997

♦ Trabajo fin de máster o tesis doctoral

[4] J.-C. Wu. "Rate-distortion analysis and digital transmission of nonstationary images". Ph.D. dissertation, Rutgers, the State University of New Jersey, Piscataway, NJ, USA, <http://dx.doi.org/>, 1998.

♦ Internet

[5] J. Jones. (1991, May 10). *Networks* (2nd ed.) [Online]. Available: <http://www.atm.com>. Last date reviewed.

3.11. TABLAS, FIGURAS Y GRÁFICOS

El número de tablas y figuras deberá limitarse en lo posible enviando solo las que sean realmente útiles, claras y representativas. Estarán numeradas correlativamente según la cita en el texto y cada una tendrá su pie explicativo. Se colocarán en el lugar adecuado del texto.

Las tablas y figuras deben ser diseñadas en Word o Excel, de forma que sean visibles al ajustarse al formato de 8,8 cm (ancho de 2 columnas) presentando un buen contraste de forma que no pierdan calidad con la reducción. En caso de ser necesario, una vez aceptado el artículo, la revista podrá volver a solicitar tablas y figuras por separado y con mejor resolución. En las tablas, figuras e imágenes que no sean del autor se deberán citar las fuentes.

La resolución de las imágenes no será inferior a 300 puntos por pulgada. Si el tamaño del archivo final es demasiado grande (superando los 10 MB), si el artículo es aceptado, se enviará el manuscrito conteniendo en su posición las figuras

provided in separate files, if the article is accepted.

3.12. FORMULAS AND EQUATIONS

Formulas should be inserted and not embedded as an image in the Word document at all. They will be numbered in parentheses in correlative order, following the text citation order, done using the same notation.

3.13. LAYOUT

Authors will receive a layout PDF proof that should be reviewed within a maximum period of three days. Modifications of the original text will not be accepted during the proofreading.

3.14. CHECKLIST BEFORE SUBMITTING

As part of the submission process, authors are required to indicate that their submission complies with all of the following elements, and to accept that submissions that do not comply with these guidelines may be returned to the author.

1. The submission has not been previously published nor been reviewed simultaneously by another journal (Or an explanation has been provided in "Comments to the editor").
2. The file sent is in Word format.
3. The template available on the journal's website has been used and the rules set out have been followed.
4. The authorship declaration is being signed by the author and all the coauthors and attached with the manuscript file in the submitting e-mail to the Editor to bm.edificacion@upm.es
5. The text meets the bibliographic and style requirements indicated in the template available on the journal's website.
6. Description of the last check that must be made before sending the article, in order to avoid the most common errors:
 - ◆ There is a list of the names of all the authors using superscript numeric identifiers to link an author with an address and institution where necessary.
 - ◆ It can be find the institution followed by the full postal addresses (including e-mail) of every author.
 - ◆ Title, abstract, highlights and Keywords are included in English and Spanish.
 - ◆ The main text has 6000 to 8000 words, including abstract, keywords, etc., and also figures and graphics with an equivalence of 200 words for each.
 - ◆ The abstract has 200 to 300 words.
 - ◆ It has 4 to 6 Keywords and It has been selected 3-5 highlights with the main information of the manuscript, each

con una resolución inferior y se aportarán las figuras con máxima resolución en archivos independientes.

3.12. FÓRMULAS Y/O EXPRESIONES MATEMÁTICAS

Deberán insertarse en el propio documento Word y en ningún caso incrustado como imagen. Se numerarán entre paréntesis por orden correlativo, siguiendo el orden de la citación en el texto, que utilizará las misma nomenclatura.

3.13. PRUEBAS

Se enviará a los autores la prueba de maquetación en PDF que deberá ser revisada en un plazo máximo de tres días. En la corrección de pruebas no se admitirán modificaciones del texto original.

3.14. LISTA DE COMPROBACIÓN DE PREPARACIÓN DE ENVÍOS

Como parte del proceso de envío, se les requiere a los autores que indiquen que su envío cumpla con todos los siguientes elementos, y que acepten que envíos que no cumplan con estas indicaciones pueden ser devueltos al autor.

1. El envío no ha sido publicado previamente ni está dentro del proceso de revisión de otra revista (o se ha proporcionado una explicación en "Comentarios al editor").
2. El fichero enviado está en formato Word.
3. Para la redacción del manuscrito se ha utilizado la plantilla disponible en la web de la revista y se han seguido las normas expuestas.
4. Se junta, junto al artículo, el formulario de declaración de autoría disponible en la página web de la revista debidamente relleno y firmado a la dirección de email bm.edificacion@upm.es
5. El texto cumple con los requisitos bibliográficos y de estilo indicados en las Normas para autoras/es, que se pueden encontrar en Acerca de la revista.
6. Descripción de la última comprobación que debe realizarse antes de enviar el artículo, con el fin de evitar los errores más comunes:
 - ◆ Aparecen los autores con nombres y apellidos o declaración de autor institucional, utilizando el identificador numérico para cada autor.
 - ◆ Aparece la entidad a la que está adscrito el autor o los autores y sus datos de contacto (incluido e-mail).
 - ◆ Se ha expresado el título, el resumen, las palabras claves y los titulares, en español y en inglés.
 - ◆ El número de palabras es de entre 6000 y 8000 palabras, incluyendo resumen, palabras clave, etc., así como tablas y figuras con una equivalencia de 200 palabras por cada una.
 - ◆ La extensión del resumen se adecua a las normas de

- ◆ Tables, diagrams and figures are entered in a borderless text box, including inside the figure caption in the lower part the table foot and are placed and cited in the text in consecutive numerical order
- ◆ The list of references are made according to the reference requirements of the Journal, and at least the 30% of them are dated in the last four years.
- ◆ Authors' short biography with 50 to 75 words is included.
- ◆ The author has the permission to use the material with rights of another author, even if it is in the Web.

Any inquiry regarding the submission of the article can be resolved in the first instance on the website of the magazine. For other inquiries, the magazine contact email is available: bm.edificacion@upm.es

4. COPYRIGHT

The originals of Building & Management magazine are property of the Universidad Politécnica de Madrid, being necessary to cite the origin of any partial or total reproduction.

All the original articles published in Building & Management are subject to discussion and comments from our readers. Opinions should be sent to the journal's email address, within a period of three months, starting from the date of publication.

Authors retain the copyright of the papers and ensure B&M the right to have a Creative Commons license, Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0), that allow others to share the article within an author recognition and non commercial use.

Authors can also establish independently additional agreements for the not exclusive distribution of the article published versión in the e-journal (as, for example, to place it in an institutional repository or to publish it in a book).

Unless otherwise indicated, all contents of the electronic edition of Building & Management are distributed under a Creative Commons license and distribution.

5. PRIVACY STATEMENT

The personal data provided to in this journal will be used exclusively for the purposes stated by Building & Management and will not be available for any other purpose or another person.



- ◆ El número de palabras clave son entre 4 y 6, y los highlights entre 3 y 5 con 85 caracteres incluidos espacios.
- ◆ Todas las tablas y figuras están insertadas en cuadros de texto, con su correspondiente leyenda, en la parte inferior de las mismas.
- ◆ Todas las referencias citadas en el texto, están referenciadas al final del artículo y viceversa. Y se nombran en orden de aparición.
- ◆ Todas las referencias están en el formato adecuado y el 30% de las mismas están fechadas en los últimos 4 años.
- ◆ Incluye el perfil académico y profesional del autor/es (entre 50 y 75 palabras)
- ◆ El autor dispone del permiso para usar el material con derechos de otro autor, incluso si está en la Web.

Cualquier consulta relativa a la presentación del artículo, puede resolverse en primera instancia en la página web de la revista. Para otras consultas, se dispone del correo de contacto de la revista: bm.edificacion@upm.es

4. NOTA DE COPYRIGHT

Los originales de la revista Building & Management, son propiedad de la Universidad Politécnica de Madrid, siendo necesario citar la procedencia de cualquier reproducción parcial o total.

Todos los artículos originales que se publican en Building & Management quedan sometidos a discusión y al comentario de nuestros lectores. Las opiniones deben enviarse a la dirección de correo electrónico de la revista, dentro del plazo de tres meses, contados a partir de la fecha de su publicación.

Los autores conservan los derechos de autor y garantizan a la revista el derecho de una licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0), que permite a otros compartir el trabajo con un reconocimiento de la autoría y uso no comercial.

Los autores pueden establecer por separado acuerdos adicionales para la distribución no exclusiva de la versión de la obra publicada en la revista (por ejemplo, situarlo en un repositorio institucional o publicarlo en un libro).

Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica Building & Management se distribuyen bajo una licencia de uso y distribución Creative Commons.

5. DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los nombres y direcciones de correo-e introducidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines declarados por esta revista y no estarán disponibles para ningún otro propósito u otra persona.

TOPICS COVERED BY B&M

Case studies
 Due diligence
 Licence management
 Risk assessment management
 Documentation procurement
 Communication and information management: ICT, Big data, Construction 4.0
 Management of bill of quantities, estimation, analysis and costs control
 Project monitoring
 Deadline management
 Economic, financial, equipment and human and material resources management
 Technical planning management
 Management of strategic planning
 Design management
 Management and control of changes and coordination of activities
 Management of production planning and programming
 Contracts and construction management
 Advanced techniques of construction management
 Process management in building, control and process improvement techniques
 Management of occupational risk prevention and health & safety
 Regulatory management and quality control
 Environmental management
 Management of waste and polluted soils
 Water management
 Materials management
 Energy management
 Other resources management
 Building heritage management
 Management of conservation, maintenance and exploitation
 Facilities management
 Building Management systems
 Sensoring, monitoring and control
 Audit of management systems
 Energy Audit
 Assessment of environmental impact plans, programs and projects
 Energy and environmental certification
 Implementation of environmental management systems
 Management of hygrothermal comfort
 Management of acoustic comfort
 Indoor air quality management
 Accessibility Management
 Diagnosis and methodology
 Intervention criteria
 Reuse
 Territory management
 Urban planning
 Management of environmental resources
 Air quality
 Training for management
 Research in construction
 Integrated project management
 Real estate assessments
 Judicial appraisal
 Management of social matters

LÍNEAS DE PUBLICACIÓN DE B&M

Casos de estudio
 Due diligence
 Gestión de las licencias
 Gestión del análisis de riesgos
 Gestión de la documentación
 Gestión de la comunicación y de la información: TIC, Big data, Construcción 4.0
 Gestión de las mediciones, estimación, análisis y control de los costes
 Monitorización de proyectos
 Gestión de plazos
 Gestión económica, financiera, de equipos y de los recursos humanos y materiales
 Gestión de la planificación técnica
 Gestión de la planificación estratégica
 Gestión del diseño
 Gestión y control de cambios y coordinación de las actividades
 Gestión de la planificación de la producción y programación
 Gestión de la contratación y de las obras
 Técnicas avanzadas de gestión de la construcción
 Gestión del proceso en edificación, técnicas de control y mejora de procesos
 Gestión de la prevención de riesgos laborales y seguridad e higiene
 Gestión de normativa y control de la calidad
 Gestión medioambiental
 Gestión de residuos y de suelos contaminados
 Gestión del agua
 Gestión de los materiales
 Gestión de la energía
 Gestión de otros recursos
 Gestión del patrimonio edificado
 Gestión de la conservación, el mantenimiento y explotación
 Gestión de las instalaciones
 Los sistemas de gestión en el edificio
 Sensorización, monitorización y control
 Auditoría de sistemas de gestión
 Auditoría energética
 Evaluación del impacto ambiental de planes, programas y proyectos
 Certificación energética y medioambiental
 Implantación de sistemas de gestión ambiental
 Gestión del confort higrotérmico
 Gestión del confort acústico
 Gestión de la calidad del aire interior
 Gestión de la accesibilidad
 Diagnóstico y metodología
 Criterios de intervención
 Reutilización
 Gestión del territorio
 Planificación urbanística
 Gestión de recursos del entorno
 Calidad del aire
 Formación para la gestión
 Investigación en edificación
 La gestión integrada de proyectos
 Valoraciones inmobiliarias
 Pericia judicial
 Gestión de los aspectos sociales

