

# Diseño de un sistema constructivo modular bajo criterios pasivos a partir de un material compuesto por fibras de madera aglomeradas con cemento



## Design of a modular low-energy building system from a composite material based on wood fibers agglomerated with cement



Carlos-Hugo Álvarez-Pérez, Jose-Florentino Álvarez-Antolín, Sergio Suárez-Fernández, Juan Asensio-Lozano

UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Dpto. de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Edificio Departamental Este. Calle Wifredo Ricart, s/n - 33204 Gijón. Tfno: +34 985 181949

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8133> | Recibido: 23/08/2016 • Evaluado: 29/08/2016 • Aceptado: 21/11/2016

### ABSTRACT

• This paper will present the results obtained from the characterization of a 400 kg/m<sup>3</sup> density composite material formed by wood fibers agglomerated with cement, for its use as a structural element on a constructive modular system. To realize the mechanical characterization, several bending and compression tests were performed on the three spatial directions due to the fibers' orientation. The design and characterization of the junctions between modules were studied with tensile tests performed on 10 cm diameter steel rods inserted to the composite material not deeper than 30 cm and with different adhesives. The union between the fibers and cement was studied through the analysis of composite-material samples under an X-Ray Scanning Electron Microscope. The compressive strength rounds the 0,3 MPa, depending on the direction on which the load is applied, and the bending strength the 0,47 MPa. These results allow the material to be used as a structural element in housings with no more than 2 floors. The joints arranged with quick-setting and silicon carbide mortar show a tensile strength of 100 kp. The thermal conductivity has a value of 0,128W/mK in an environmental humidity of 60%. The cement used as agglomerate appears to be forming little isolated lumps that allow the material to have an elevated porosity and as a consequence, a high thermal isolation capacity. Based on this study, a complementary analysis on the constructive system was also carried out in order to make it possible to fit it into the Passivhaus demands.

• **Keywords:** Composite Material, Wood Fibers, Thermal Conductivity, Passivhaus Standard, Hygrothermal Characterization, Structural Characterization, Modular Building System, Scanning Electron Microscopy.

### RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la caracterización de un material compuesto, constituido por fibras de madera aglomeradas con cemento y una densidad de 400 Kg/m<sup>3</sup>, para su empleo como elemento portante en un sistema constructivo modular diseñado bajo criterios pasivos. Para la caracterización estructural se realizaron ensayos de flexión y de compresión en las 3 direcciones del espacio debido a la orientación de las fibras. Para el diseño y caracterización de las posibles fijaciones entre módulos se realizaron ensayos de tracción sobre varillas de acero de 10 mm de diámetro insertadas en el material a una profundidad de 30 cm. Se analizaron varias interfaces de unión entre el conjunto "varilla-adhesivo" y el material. Para estudiar la unión entre las fibras y la distribución del aglomerante se analizaron muestras

en el microscopio electrónico de barrido con energía dispersa de Rayos X. La resistencia a compresión, según la dirección de carga en servicio, ronda los 0,3 MPa, y la resistencia a flexión alcanza los 0,47 MPa. Estos valores únicamente capacitan a este material para su uso portante en viviendas de 1 o 2 plantas máximo. Las fijaciones con mortero de fraguado rápido y naturaleza silico-carbonática resistirían unos 100 kp. La conductividad térmica con un 60% de humedad alcanzó los 0.128 W/mK. El cemento, que actúa como aglomerante, aparece formando pequeños "grumos", separados entre sí para favorecer una elevada porosidad en el material, y por tanto, un elevado nivel de aislamiento térmico. Como complemento, se propone una mejora en el sistema constructivo modular con el objetivo de dar cumplimiento a las exigencias del estándar Passivhaus.

**Palabras clave:** Material Compuesto, Fibras de Madera, Conductividad Térmica, Estándar Passivhaus, Caracterización Higro-térmica, Caracterización Estructural, Sistema Constructivo Modular, Microscopía Electrónica de Barrido.

### 1. INTRODUCCIÓN

Es un objetivo generalizado en el sector de la construcción el desarrollo de sistemas de construcción modulares, que presenten un elevado nivel de aislamiento térmico, que incluyan materiales autóctonos respetuosos con el medio ambiente, y que resulten económicos. Compartiendo estos objetivos, en este trabajo se pretende caracterizar un material compuesto constituido por fibras de madera, aglomeradas con cemento, con el propósito último de diseñar un sistema constructivo modular constituido únicamente por este material. Para ello, este material debería combinar propiedades "portantes" y propiedades "funcionales" tales como el aislamiento térmico.

Los materiales compuestos constituidos por fibras o virutas de madera aglomeradas con cemento vienen siendo utilizados en la construcción desde hace muchos años. Se han utilizado por sus propiedades fonoabsorbentes, resistencia a la humedad y resistencia al fuego. Recientemente vienen empleándose con notable éxito en Suecia formando parte de la envolvente térmica del edificio, aunque sin requerimientos "portantes" [1]. Sin embargo, son mínimas las experiencias que incluyen este material como único elemento "portante". Esto permitiría desarrollar un cerramiento constructivo modular realizado íntegramente en este material y sin puentes térmicos. Algunos desarrollos van encaminados al diseño de sistemas constructivos económicos en zonas poco fa-

vorecidas aprovechando astillas de madera autóctonas [2], fibras vegetales [3], o fibras de maderas tropicales [4]. Existen ejemplos de materiales compuestos similares como es el caso de "pulpas" constituidas por fibras de madera aglomeradas con cemento, que presentan un excesivo porcentaje de cemento para conseguir una elevada dureza y resistencia a flexión [5]. Las propiedades de estos materiales dependen de la distribución porcentual entre cemento y las fibras de madera, además de las características de dichos elementos. Algunos estudios fijan porcentajes óptimos dependiendo del tipo de madera [6]. Para la caracterización de este tipo de materiales es común realizar ensayos de flexión en 3 puntos [7], ensayos de compresión [4], y ensayos de conductividad térmica [8]. Para densidades de 280 kg/m<sup>3</sup>, con fibras de maderas europeas se le podría asignar una resistencia a flexión que rondaría los 27 kPa y una transmitancia térmica de 0.19 W/m<sup>2</sup>K [1].

El objetivo de este trabajo es diseñar un sistema constructivo modular, económico y eficiente térmicamente, a partir de un material compuesto constituido por fibras de madera aglomeradas con cemento y densidad 400 Kg/m<sup>3</sup>, el cual debería actuar como único elemento portante y aislante. Para ello, se realizaron ensayos de flexión y de compresión en las 3 direcciones del espacio, y se estudiaron varias posibilidades de fijación entre módulos mediante ensayos de tracción realizados sobre varillas de acero "embutidas" en el material una profundidad de 30 cm, a través de varias "interfaces" de unión entre la varilla y el material. Para analizar estos sistemas de fijación se tomó como referencia el Documento Básico de Seguridad Estructural y Acciones en la Edificación (DB-SE-AE) del Código Técnico de la Edificación vigente en España (CTE) [9]. A su vez, se determinó la conductividad térmica del material en varias condiciones de humedad. La resistencia a compresión, según la dirección de carga en servicio, ronda los 0,3 MPa, y la resistencia a flexión alcanza los 0.47 MPa. La transmitancia térmica del material con un 60% de humedad relativa se puede aproximar a 0.322 W/m<sup>2</sup>K. Se recomienda que el adhesivo de unión entre la varilla de fijación y el material sea un mortero de fraguado rápido con naturaleza silico-carbonática y densidad aparente de unos 2250 kg/m<sup>3</sup>. Bajo este supuesto el esfuerzo resistente de cada fijación superaría los 100 kp.

Los edificios son unos grandes consumidores de energía, destacando especialmente su demanda térmica. Como consecuencia de ello el peso de las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de este consumo representan un 36% en Europa. Para reducir estas emisiones resulta clave minimizar la demanda térmica [10]. Es por ello, que complementariamente, se presenta una mejora sobre el sistema constructivo con el objetivo de disminuir la transmitancia térmica global hasta valores compatibles con el estándar alemán de construcción "Passivhaus" [11]. Para ello se propone un cerramiento constituido por 30 cm de este material compuesto y una capa interior de 8 cm lana mineral, alcanzándose una conductividad térmica global del cerramiento de 0.06 W/mK. Para asegurar la ausencia de posibles condensaciones y una pérdida energética elevada en los encuentros con el forjado, se analizó la solución constructiva con el software higro-térmico *Flixo Energy*, resultando válidos los "encuentros" diseñados entre cerramiento y forjado para este sistema constructivo. Existen ya en Europa más de 30.000 edificios construidos bajo el estándar de construcción Passivhaus. Desde el año 2007 todos los edificios públicos o rehabilitados en la ciudad de Frankfurt deben ejecutarse bajo este estándar. Desde el 2009, este mismo criterio es fijado en las ciudades alemanas de Friburgo y Hannover. En la ciudad de Bruselas este estándar es de obligado cumplimiento en edificios públicos desde el 2010. A su vez, la Directiva Europea 2010/31/UE introduce el concepto de "Edificios de

Consumo Energético Casi Nulo" y establece el 31 de Diciembre de 2018 para su aplicación en todos los edificios públicos de nueva construcción, y el 2020 para el resto de edificios.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos de flexión y compresión se realizaron sobre una máquina INSTROM 5582, con célula de carga de 100 KN. Las probetas de flexión fueron de sección cuadrada, con lado 100 mm, y con distancia entre apoyos de 250 mm. Las probetas de compresión fueron cubos de 150 mm de lado. La Figura 1 muestra la ejecución de dichos ensayos. La Figura 2 muestra las direcciones de ensayo y la disposición preferente de las fibras de madera en las probetas ensayadas. La dirección Z resulta ser la de carga en servicio del material, y a su vez, coincide con la dirección de relleno del durante la fabricación del material. Cabe destacar que la disposición de las fibras dependía de la dirección de ensayo. Se realizaron 12 ensayos de flexión y 12 de compresión en cada una de las 3 direcciones del espacio.



Fig. 1: (a) Ensayo de flexión; (b) Ensayo de compresión

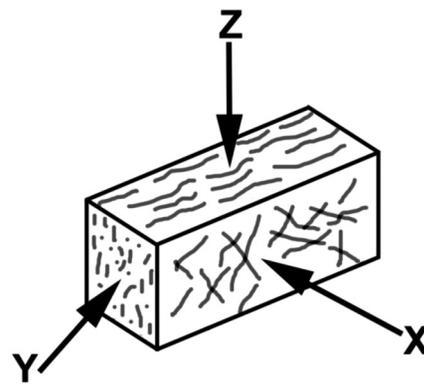


Fig. 2: Disposición preferente de las fibras de madera en las probetas ensayadas. Los ejes X, Y, y Z representan las direcciones en las que se aplicaron los esfuerzos durante los ensayos de flexión y compresión. La dirección Z coincide con la dirección de relleno

Para la obtención de la transmitancia térmica en función de la humedad se ensayó el material en una "caja caliente" calibrada de 1 m<sup>3</sup> completamente aislada en toda su envolvente térmica, según la Norma ASTM C 1363-11, a la que se conectó un generador climático para poder crear un ambiente de ensayo bajo condiciones controladas de temperatura y humedad. Se empleó un marco de 40 cm de ancho para soportar la muestra objeto de ensayo que fue colocada y aislada sobre una de las caras de la caja caliente calibrada. Los objetivos de humedad relativa fueron 25%, 45%, y 75%. Los equipos de medición fueron:

1. Un registrador de datos "Sensirion EK-H3", el cual permite la aplicación de 20 sensores de temperatura y humedad, y la lectura de humedad relativa y temperatura de forma simultánea.

2. Sensores de flujo térmico "Hukseflux HFP01", que permiten la medición de la resistencia térmica y transmitancia térmica según las Normas ISO 9869, ASTM C1046 y ASTM 1155.
3. Unidades de lectura "Hukseflux LI-19" con registrador de datos integrado del sensor HFP01, que permiten transmitir los datos de lectura a un PC a través de un interface USB.

Para poder diseñar la unión de los diferentes módulos del sistema constructivo se realizaron ensayos de tracción sobre varillas de acero de 10 mm de diámetro insertadas en el material una profundidad de 30 cm. Para ello fue necesario realizar un taladro de 12 mm de diámetro y 30 cm de profundidad. Las dimensiones de las probetas del material fueron 500 mm x 390 mm x 400 mm. Se analizaron 4 tipos de adhesivos que fueron aplicados sobre el taladro para formar una "inter-cara" de unión entre las varillas de acero y el material. Se realizaron 3 ensayos por cada adhesivo y por cada ángulo entre varilla y fibra de madera (0° y 90°). Los adhesivos ensayados fueron:

- Adhesivo 1: Basado en poliéster libre de estirenos.
- Adhesivo 2: Basado en resina epoxi.
- Adhesivo 3: Basado en una mezcla de poliéster libre de estirenos y arena de cuarzo.

- Adhesivo 4: Basado en un mortero de fraguado rápido, con naturaleza del árido silico-carbonato, intervalo granulométrico 0-2.5 mm, agua de amasado 4 L/25 kg y densidad aparente de la mezcla 2250 kg/m<sup>3</sup>. El tiempo aproximado de fraguado fue de unos 60-70 minutos.

Para observar la disposición del aglomerante sobre las fibras se obtuvieron micrografías tomadas en un microscopio electrónico de barrido (SEM), y se analizaron la distribución de los principales elementos del cemento (Ca y Si) mediante energía dispersa de Rayos X (EDAX), incluyendo un "mapeado" de su distribución.

Complementariamente, se propuso evaluar el cumplimiento del estándar Passivhaus de un cerramiento constituido por 40 cm de este material compuesto y por una capa interior de 7 cm lana mineral. La Tabla I muestra las características de los principales componentes que constituirían este cerramiento. La Figura 3 muestra la estructura principal de este cerramiento, y el "encuentro" propuesto entre el muro y la cubierta. Para ello se determinó la transmitancia térmica de dicho cerramiento y se evaluó dicho "encuentro" con el software higo-térmico Flixo Energy para asegurar el mantenimiento del nivel de aislamiento y la ausencia de posibles condensaciones.

	Espesor (cm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Mód. Elasticidad (MPa)	Tensión de rotura (MPa)	Cond. Térmica (W/mK)
Mat. Compuesto	30	400	31.13	0.35	0.12
Lana mineral	7	60	-	-	0.03

Tabla I. Componente del sistema de construcción propuesto para cumplir con el estándar Passivhaus

MPa	Tensión de rotura			Módulo de elasticidad		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Flexión	0,015	0,205	0,474	0,853	3,831	17,514
desv. stand.	0,003	0,026	0,070	0,10	1,80	4,48
Compresión	0,135	0,360	0,296	5,078	21,924	31,125
desv. stand.	0,001	0,009	0,004	1,02	3,54	4,07

Tabla II: Tensión de rotura

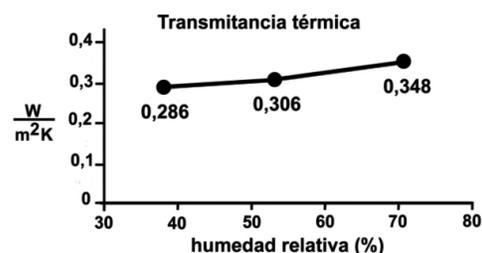


Figura 4: Transmitancia térmica en función de la humedad

### Nomenclatura empleada en el gráfico:

TJ 20: Tejas  
 20: Espesor (mm)

### Elementos que constituyen el sistema constructivo:

- TJ: Tejas
- CA': Cámara de aire ligeramente ventilada
- RM: Rastres de madera
- MW: Manta de fibra de madera
- TC: Tablero contrachapado (multilaminado)
- CA: Cámara de aire sin ventilar
- YL: Placa de yeso laminado (pladur)
- ML: Madera laminada
- EM: Enfoscado de mortero (revestimiento exterior)
- WW: Material compuesto (fibras de madera + cemento)

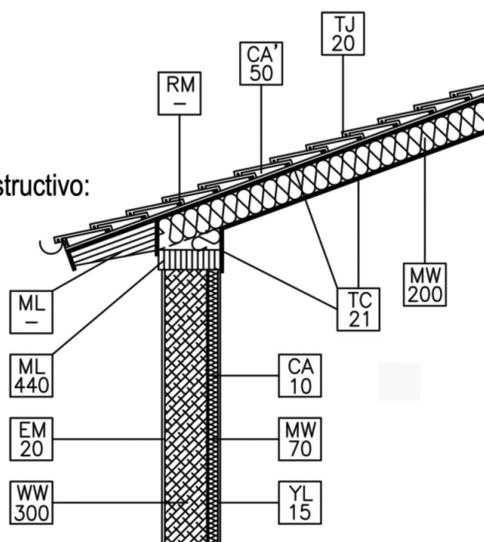


Figura 3: Estructura del sistema constructivo propuesto para cumplir con el estándar Passivhaus. Cada elemento constructivo es identificado con dos letras y un número. El número hace referencia al espesor en mm

### 3. RESULTADOS

La Tabla II muestra los valores promedios obtenidos sobre el material compuesto en los ensayos de flexión y compresión en cada una de las direcciones de aplicación de la carga, incluyendo la desviación típica derivada de la secuencia de ensayos. La rotura de este material se produjo sin deformación plástica. Los valores alcanzados resultan bajos y únicamente capacitan a este material para su uso portante en viviendas de 1 o 2 plantas.

La Figura 4 muestra los resultados de transmitancia térmica obtenidos, en función de la humedad, en el ensayo de caja caliente. Se observa como ésta aumenta con la humedad relativa.

La Tabla IV muestra los esfuerzos de tracción resistentes en el momento de la fractura producida en la "intercara" entre el conjunto varilla-adhesivo-material. El adhesivo 4 es el que mayor resistencia aporta al sistema de fijación, superando los 100 kp/fijación. Si tomamos como referencia de cálculo el Documento Básico de Seguridad Estructural y Acciones en la Edificación (DB-SE-AE) del Código Técnico de la Edificación vigente en España [9], el número de fijaciones por m<sup>2</sup> podrían quedar limitadas a 3 si considerásemos las condiciones climáticas más adversas señaladas en dicho Documento.

Las Figuras 5 a 7 muestran micrografías obtenidas a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM) sobre muestras

Adhesivo	kp (0°)	kp (90°)
Adhesivo 1	96.1	78.4
Adhesivo 2	94.8	120.5
Adhesivo 3	133.2	82
Adhesivo 4	118	138

Tabla IV: Esfuerzo de tracción resistente sobre las fijaciones. Ángulos de 0° y 90° entre la varilla y las fibras de madera

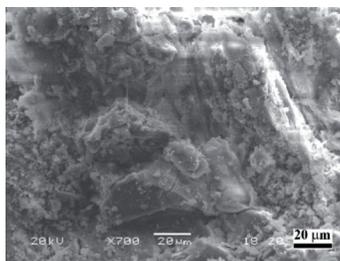


Figura 5: Vista general

Elemento	% en peso
C	12.54
O	50.06
Al	0.93
Si	4.99
Ca	30.36
Fe	1.11

Tabla V: Distribución en peso de los principales elementos químicos localizados

"metalizadas". Se analizó la distribución de los principales elementos químicos mediante energía dispersa de Rayos X (EDAX). La Figura 5 muestra una visión general de una de las muestras, donde se aprecia una de las fibras de madera con pequeños "grumos de cemento" que actúan como aglomerantes de las fibras de madera. La tabla V muestra la distribución en peso de los principales elementos químicos localizados sobre dicha fibra. Los elementos Ca, Si, y Al se asocian al cemento.

La Figura 6 muestra el extremo fracturado de una de las fibras. En este extremo se analiza la distribución del Ca y del Si, lo cual permite localizar la posición del cemento en dicho extremo. El C se asocia a la propia fibra y señala las zonas no aglomeradas por el cemento. En este caso particular, el extremo fracturado parece exento de dicho aglomerante. Parece deducirse que la proporción de cemento es la mínima necesaria para cumplir con la función de aglomerante, y que su distribución es heterogénea entre las fibras,

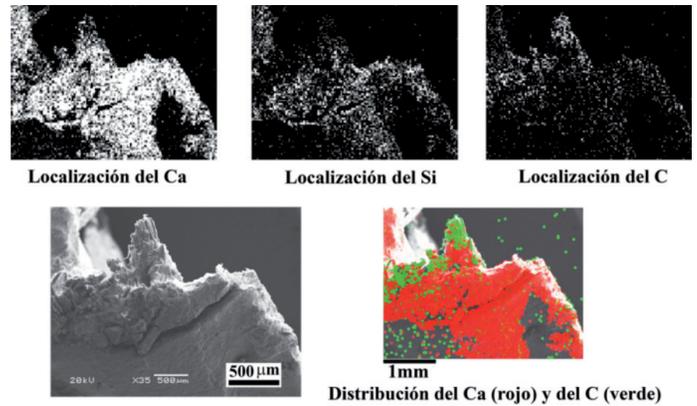


Figura 6: Localización del Ca, como componente representativo del cemento (color rojo)

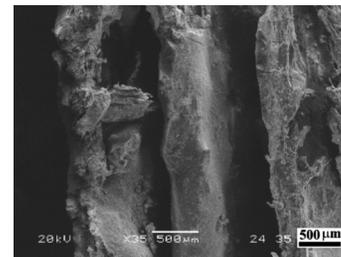


Figura 7: Imagen transversal de las fibras de madera

formando "grumos" de pequeño tamaño (desde unas 100 micras a pocos milímetros) separados entre sí varios mm para permitir que exista una elevada porosidad en el material para favorecer un elevado nivel de aislamiento térmico y una elevada permeabilidad al vapor de agua para reducir los riesgos de condensaciones intersticiales [12]. La Figura 7 muestra unas láminas transversales de fibras de madera, de donde se desprende que su espesor ronda las 300 micras.

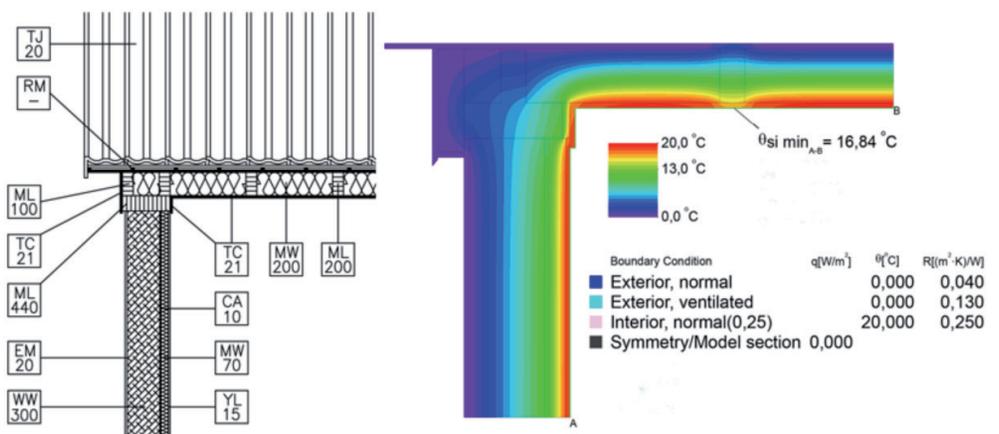


Figura 8: Resultados tras el análisis realizado con el software higró-térmico "Fliso-Energy" sobre el "encuentro" entre el muro del cerramiento y la cubierta inclinada. Misma nomenclatura que en la Figura 4

Complementariamente, se propuso añadir al cerramiento constituido por el material compuesto una capa interior de lana mineral para mejorar el nivel de aislamiento del sistema constructivo y evaluar el cumplimiento del estándar Passivhaus por parte de esta mejora. La Tabla I y la Figura 4 muestran los elementos que constituirían este sistema constructivo. La conductividad térmica global alcanzada es de 0.06 W/mK. La transmitancia térmica global de este sistema es inferior a 0.2 W/m<sup>2</sup>K, lo que supone una reducción de la demanda térmica exigida por el Código Técnico de la Edificación en fachadas superior al 70% para las zonas climáticas C y superior al 65% en las zonas climáticas D [13.] Se evaluaron los "encuentros" entre el muro del cerramiento y el peto de la cubierta inclinada con el software higo-térmico *Flixo Energy* para asegurar el mantenimiento del nivel de aislamiento y la ausencia de puentes térmicos [14] y posibles condensaciones, ya que estos "encuentros" resultan los más débiles desde el punto de vista térmico. La Figura 8 muestra los resultados alcanzados. En unas condiciones de temperatura exterior de 0°C y 20 °C de temperatura interior, la temperatura más baja alcanzada en la superficie interior de la envolvente térmica sería de 16,84 °C, superior a la temperatura de rocío con una humedad relativa media del 60%.

#### 4. CONCLUSIONES

Una vez realizado los ensayos estructurales y funcionales para la caracterización de un material compuesto constituido por fibras de madera aglomeradas con cemento y densidad 400 kg/m<sup>3</sup>, se concluye que:

1. La tensión de rotura a flexión en la dirección de carga en servicio resulta superior a la obtenida a compresión por el efecto resistente de las fibras situadas mayoritariamente en una dirección perpendicular a la carga aplicada
2. La resistencia a compresión, según la dirección de carga en servicio, ronda los 0.3 MPa. La resistencia a flexión según esta misma dirección de carga superaría los 0.45 MPa. Estos valores únicamente capacitan a este material para su uso portante en viviendas de 1 o 2 plantas máximo.
3. La conductividad térmica con un 60% de humedad relativa es de 0.128 W/mK.
4. Para el diseño de un sistema modular de construcción se recomiendan sistemas de fijación, que actuando como adhesivo de unión entre las varillas metálicas y el propio material, estén constituidos por mortero de fraguado rápido y naturaleza silico-carbonática, con una densidad aparente de unos 2250 kg/m<sup>3</sup>. Bajo este supuesto el esfuerzo resistente de cada fijación superaría los 100 kp.
5. La distribución del cemento, que actúa como aglomerante de las fibras de madera, es heterogénea y aparece formando pequeños "grumos" de tamaño diverso entre unas 100 micras y menos de 2 mm, separados entre sí para que exista una elevada porosidad en el material y favorecer un elevado nivel de aislamiento térmico.

El sistema constructivo modular constituido por 30 cm de este material y 7 cm de lana mineral cumpliría los estándares de construcción Passivhaus, asegurando la ausencia de puentes térmicos, y una reducción de la demanda térmica exigida por el Código Técnico de la Edificación en fachadas superior al 70%, para las zonas climáticas C, y superior al 65% en las zonas climáticas D. A su vez, este sistema constructivo modular acorta los plazos de construcción, y por tanto de mano de obra, alquiler de equipos, grúas, etc., por lo que resultaría una solución atractiva y económica para la

construcción de viviendas unifamiliares que aspiren a cumplir con el estándar de fabricación Passivhaus. Complementariamente, los tiempos y costes de construcción podrían reducirse aún más si en el sistema constructivo se prescindiera del refuerzo de 7 cm de lana mineral. En este caso no se cumpliría con el estándar Passivhaus, pero se conseguiría una reducción de la demanda térmica exigida por el Código Técnico de la Edificación en fachadas superior al 40% en las zonas climáticas tipo C y superior al 28 % en las zonas climáticas tipo D, resultando un material y sistema constructivo muy económico, respetuoso con el medio ambiente y eficiente desde el punto de vista térmico.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rückert M. "Traullit large wall elements". En: 11th Int. Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference (Madrid 5-7 de Noviembre de 2008), 2008. P. 163-168
- [2] Ramirez-Coretti A, Eckelman CA, Wolfe RW. "Inorganicbonded composite wood panel systems for lowcost housing: A Central American perspective". *Forest Products Journal*. 1998 .Vol.48-4 p.62-68
- [3] Arsene MA, Okwo A, Bilba K, et al. "Chemically and thermally treated vegetable fibers for reinforcement of cement-based composites". *Materials and Manufacturing Processes*. Vol.22-2 p.214-227. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10426910601063386>)
- [4] Fan M, Ndikontar MK. "Nature and Performance of Tropical Wood Natural Fiber Cementitious Composites". *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2014. Vol.26-7 p.214-227.
- [5] Naundorf W. "Compaction properties of pulps made from wood chips and cement". *Zkg International*. 2005. Vol.58-5 p. 33-38
- [6] Benmansour N, Agoudjil B, Gherabli A, et al. "Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building". *Energy and Buildings*. Vol.81 p. 98-104. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.032>)
- [7] Karam GN, Gibson LJ. "Evaluation of commercial woodcement composites for sandwichpanel facing". *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol.6-1 p.100-116 (DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)08991561\(1994\)6:1\(100\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)08991561(1994)6:1(100)))
- [8] Lakrafi H, Tahiri S, Albizane A, et al. "Experimental study of thermal conductivity of leather and carpentry wastes". *Construction and Building Materials*. Vol.48 p. 566-574. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.048>)
- [9] España. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación Boletín Oficial del Estado, 28 de marzo de 2006, núm. 74, p. 11816 a 11831
- [10] Romero-Amorrortu, A., Barreiro-Sánchez, E., Sanchez-Zabala, V. "Net positive energy buildings". *DYNA*. Vol.85(9) p. 746-759. (DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3842>)
- [11] Álvarez-Antolín JF, Galán-Feito M, Almagro-Medialdea J. "Materiales e Instalación Térmica en vivienda unifamiliar construida en Asturias bajo los requerimientos del estándar Passivhaus". En: 1ª Expo-Convección Mundial en Minería, Energía y Materiales (Gijón 17-19 de Junio de 2015), 2015.
- [12] Rougeron C. *Aislamiento Acústico y Térmico en la Construcción*. Luque-Maldonado R (trad.). Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1977. 233 p. ISBN: 84-7146-097-1
- [13] España. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación Boletín Oficial del Estado, (Documento Básico HE1, Tabla 2.3, página 15), 28 de marzo de 2006, núm. 74, p. 11816 a 11831.
- [14] Muñoz C, Bobadilla A. "Simulación y evaluación de puentes térmicos Soluciones constructivas típicas aprobadas por la Norma Térmica para elementos verticales en estructura de madera y metálicos en la Zona 4 Simulaciones con Therm y Usai y evaluación con Método de Cámara Térmica". *Revista de la Construcción*. 2012. Vol.11-2 p.92-111.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue promovido por la empresa Georenova, S.L, desarrollado por el grupo de investigación "Materials Pro" de la Universidad de Oviedo, y cofinanciado por la Unión Europea, a través de Fondos FEDER, y por la Consejería de Economía y Empleo del Principado de Asturias, a través de su Plan de Ciencia, Tecnología, e Innovación de Asturias. Agradecemos a la empresa GeoRenova y a las entidades públicas mencionadas el apoyo recibido para la ejecución de este trabajo.