

**UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA**  
**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA**



**TESIS DOCTORAL**

**Análisis y evaluación de tableros de partículas de  
residuos vegetales**



**Autora**

**Cristina Cecilia Ferrández García**

**Directores**

**M<sup>a</sup> Teresa Ferrández García**

**Manuel Ferrández-Villena García**

**Julio 2017**





D<sup>ña</sup>. M<sup>a</sup> Teresa Ferrández García, Dra. Arquitecto, Profesora Contratada Doctor del Área de Ingeniería Agroforestal del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández y D. Manuel Ferrández-Villena García, Dr. Ingeniero Industrial, Profesor Titular de Universidad del Área de Ingeniería Agroforestal del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández,

## **INFORMAN**

Que la Tesis Doctoral que lleva por título “*Análisis y evaluación de tableros de partículas de residuos vegetales*”, de la que es autora la Ingeniero Industrial D<sup>ña</sup>. Cristina Cecilia Ferrández García, ha sido realizada íntegramente bajo nuestra dirección y supervisión, en el Departamento de Ingeniería, en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela perteneciente a la Universidad Miguel Hernández, durante el periodo comprendido entre los años 2014 y 2017.

Considerando que se trata de un trabajo original de investigación que reúne los requisitos establecidos en el R.D. 1393/2007, de 29 de octubre (B.O.E. de 30 de octubre de 2007), autorizamos su presentación ante la Secretaría de la Comisión de Doctorado de la Universidad Miguel Hernández.

Y para que conste a los efectos oportunos, expedimos el presente informe en Orihuela, a 24 de Julio de 2017.

Los Directores de la Tesis

Fdo: M<sup>a</sup> Teresa Ferrández García

Fdo: Manuel Ferrández-Villena García





D. José Ramón Díaz Sánchez, Dr. Ingeniero Agrónomo, Catedrático de Universidad y Director del Departamento de Tecnología Agroalimentaria de la Universidad Miguel Hernández,

## **INFORMA**

Que atendiendo al informe presentado por la Dra. M<sup>a</sup> Teresa Ferrández García, Arquitecto, Profesora Contratada Doctor del Área de Ingeniería Agroforestal del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández y el Dr. Manuel Ferrández-Villena García, Ingeniero Industrial, Profesor Titular de Universidad del Área de Ingeniería Agroforestal del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández, la Tesis Doctoral titulada “ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE TABLEROS DE PARTÍCULAS DE RESIDUOS VEGETALES” de la que es autora la Ingeniero Industrial D<sup>ña</sup>. Cristina Cecilia Ferrández García y que ha sido realizada bajo la dirección de los Doctores citados, puede ser presentada para su correspondiente exposición pública.

Y para que conste a los efectos oportunos, firmo el presente informe en Orihuela, a 24 de Julio de 2017.

El Director del Departamento

Fdo: José Ramón Díaz Sánchez



# **Análisis y evaluación de tableros de partículas de residuos vegetales**

Memoria que presenta la Ingeniero Industrial Dña. Cristina Cecilia Ferrández García para optar al grado de Doctor



Los Directores de la Tesis

Fdo: M<sup>a</sup> Teresa Ferrández García

Fdo: Manuel Ferrández-Villena García





**RESUMEN**

El uso de materiales sostenibles y la producción de materiales que consuman una menor cantidad de energía en su fabricación, ha impulsado la realización de investigaciones orientadas a desarrollar materiales aislantes térmicos y acústicos con materiales naturales o reciclados. En la presente tesis, el tallo de arroz, la palmera de abanico (*Washingtonia robusta* H. Wendl), el residuo de caña común (*Arundo donax* L.) y partículas del tronco de palmera canaria (*Phoenix Canariensis*), se utilizaron para la fabricación de tableros de partículas resistentes y aislantes, para su uso en la construcción y la industria del mueble. De los resultados de estos estudios se desprende que son aptos para usos generales; los tableros de tallo de arroz resultaron buenos aislantes térmicos y retardantes del fuego, los tableros de palmera *Washingtonia*, debido a sus propiedades mecánicas, térmicas y acústicas resultaron ser viables como revestimientos y falsos techos en la edificación, los tableros de residuo de caña común resultaron buenos aislantes acústicos y, por último, los paneles de tronco palmera- cemento resultaron buenos aislantes térmicos. Cabe destacar que en la fabricación de los paneles de tallo de arroz no se usó aglutinante (material normalmente tóxico) y se utilizaron bajas temperaturas y presiones de fabricación, lo que implica un gran avance en el estudio de materiales reciclados cuya producción sea sostenible.

**ABSTRACT**

The use of sustainable materials and the production of materials that consume a smaller amount of energy in its manufacture, has promoted the research oriented to develop thermal and acoustic insulation materials with natural or recycled materials. In the present thesis, the rice straw, the washintonia palm leaf (*Washingtonia robusta* H. Wendl), residuos of giant reed (*Arundo donax* L.) and Canarian palm trunk particles (*Phoenix Canariensis*), were used for the manufacture of resistant and insulating particleboards for use in building and furniture industry. The results of these studies showed that it is feasible to use the four types of studied boards for general use; the rice straw particleboards were good thermal insulation and fire retardants, washingtonia palm panels, due to their mechanical, thermal and acoustic properties, proved to be viable as coatings and false ceilings in building. The giant reed residues panels showed resulted to be good acoustic insulator, and finally, the cement- palm trunk's panels resulted good thermal insulators. It should be noted that in the manufacture of the rice straw

particleboards no binder (usually toxic material) was used and low temperatures and pressures were used in its production, which implies a great advance in the study of recycled materials with sustainable production.



## INDICE GENERAL

<b>1 - INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 – ANTECEDENTES .....	1
1.2 – ESTADO DE LA TÉCNICA.....	3
1.2.1 – TABLEROS DE PARTÍCULAS SIN AGLUTINANTES..	3
1.2.2 – TABLEROS AISLANTES DE FIBRAS VEGETALES.....	5
1.2.3 – TABLEROS DE FIBRAS VEGETALES-CEMENTO.....	6
<b>2 - OBJETIVOS</b> .....	9
2.1 – OBJETIVO GENERAL.....	9
2.2 – OBJETIVOS CONCRETOS DE LA TESIS .....	9
<b>3 – MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	11
3.1 – MATERIALES .....	11
3.1.1 – TALLO DE ARROZ.....	11
3.1.2 – RAQUIS DE PALMERA WASHINGTONIA.....	12
3.1.3 – CAÑA COMÚN (ARUNDO DONAX L.).....	14
3.1.4 – TRONCO DE PALMERA CANARIA.....	14
3.2 – MÉTODOS .....	15
3.2.1 – FABRICACIÓN DE TABLEROS DE PARTÍCULAS.....	15
3.2.2 – ENSAYOS EXPERIMENTALES .....	17
3.2.3 – ANÁLISIS DE LOS TABLEROS USANDO MICROSC. ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).....	26
3.2.4 – ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	27
<b>4 - RESULTADOS Y CONCLUSIONES</b> .....	29
4.1 – FIRE-RESISTANCE, PHYSICAL, AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF RICE STRAW BINDERLESS PARTICLEBOARDS.....	29
4.1.1 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	31

4.1.2 – CONCLUSIONES .....	34
4.2 – ACOUSTIC AND THERMAL EVALUATION OF PALM PANELS AS BUILDING MATERIAL.....	35
4.2.1 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	36
4.2.2 – CONCLUSIONES .....	38
4.3 – PROPIEDADES ACÚSTICAS DE PANELES PREFABRICADOS RESIDUOS DE CAÑAS. ....	40
4.3.1 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	41
4.3.2 – CONCLUSIONES .....	43
4.4 – EVALUACIÓN DE PANELES DE TRONCO DE PALMERA-CEMENTO.....	45
4.4.1 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	46
4.4.2 – CONCLUSIONES .....	49
<b>5 – BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>51</b>
<b>ANEXO. PUBLICACIONES .....</b>	<b>65</b>



## **1. INTRODUCCIÓN.**

### **1.1. ANTECEDENTES**

Actualmente, el uso de materiales sostenibles se está convirtiendo en una práctica común para la reducción del ruido y la transmisión de calor, en la edificación y en la ingeniería civil. En el proceso de diseño de los edificios, el concepto de "sostenibilidad" ha fomentado la realización de investigaciones con materiales naturales y reciclados orientadas a desarrollar elementos resistentes y aislantes (térmicos y acústicos).

La madera es un material natural utilizado tradicionalmente como componente estructural y aislante. La madera es el material vegetal más utilizado a escala mundial para la fabricación de pastas papeleras, pastas de disolución, industria mobiliaria, industria de la construcción o como combustible. También otras fibras vegetales (paja, algas, cañas, cáscaras, mazorcas de maíz) se utilizaron en las edificaciones tradicionales como elemento aislante, y, posteriormente, dejaron de usarse para ser sustituidas por materiales tecnificados que consumen gran cantidad de energía en su elaboración (espuma de vidrio, espuma de poliuretano, fibra de vidrio, etc.)

El uso de los tableros de partículas (tableros de madera aglomerada) como material de construcción está en continuo crecimiento para su empleo en particiones, falsos techos, parquetes, tabiques, revestimientos, aislantes, etc. Son básicamente, materiales compuestos, tradicionalmente hechos de virutas de madera y un aglomerante (ya sea adhesivo, resina, cemento o yeso). Durante la última década, sobre todo en países donde los recursos forestales son escasos, se ha producido un deterioro de las propiedades mecánicas de los tableros de partículas que se comercializaban, siendo la razón principal el aumento del uso de materiales reciclados obtenidos a partir de muebles antiguos fabricados con tableros de conglomerado, en lugar de emplear chips de madera natural. El uso de materiales reciclados ha sido favorecido, por un lado, por la carencia y el alto costo de la madera natural y, por otro lado, porque se ha perseguido como un objetivo importante reducir el impacto ambiental de la producción de productos derivados de la madera. Los gobiernos nacionales y la UE han fomentado el reciclaje en todas las etapas. Si bien este hecho comprende un claro efecto positivo en el medio ambiente, en los recursos naturales y en el precio de las materias primas, también tiene inconvenientes en la calidad del panel, ya que se disminuyen las prestaciones mecánicas de los tableros a

pesar del aumento de aglutinantes poliméricos que se requieren en su fabricación. Por ello, la búsqueda de sustitutos a la madera natural como son las plantas no madereras y el empleo de aglutinantes ecológicos para la elaboración de paneles es considerado de gran interés en la actualidad.

Los desechos vegetales son también materiales lignocelulósicos que pueden sustituir a la madera natural, pero es necesario demostrar que sus fibras pueden ser una materia prima adecuada para la fabricación de tableros de partículas. Además, el uso de estos residuos solventaría los problemas medioambientales producidos por su eliminación y minimizaría el empleo de la madera natural y la deforestación.

La fabricación de tableros de partículas a partir de desechos vegetales ha sido objeto de numerosas investigaciones para su aplicación en la construcción y como una medida eficiente para solventar los problemas ambientales que conlleva la gestión de estos residuos, aunque en muchos casos se han obtenido pobres resultados. Es necesario que los tableros con biomasa residual tengan propiedades similares a los tableros de madera aglomerada, de forma que puedan ser un buen sustituto que proporcione una puesta en valor de los residuos como elemento constructivo, además de minimizar los problemas medioambientales que suponen su eliminación, (Zhang et al., 2015).

Se han estudiado una amplia variedad de plantas y residuos agrícolas para la elaboración de tableros: fibras de coco (Papadopoulos et al., 2002), kenaf (Xu et al., 2004, Kalaycioglu y Nemli, 2006; Juliana et al., 2012), paja de trigo (Han et al., 2001; Mo et al., 2003; Sain y Panthapulakkal, 2006), tallos de algodón (Alma et al., 2005, Zhou et al., 2010; Ferrández-García et al., 2013), tallo de arroz (Yang et al., 2003; Halvarsson et al., 2010), tallos de girasol (Guler et al., 2006), tallos de berenjena (Guntekin y Karakus, 2008), cáscara de arroz (Leiva et al., 2007; Ciannamea et al., 2010.), cáscara de cacahuete (Akgül and Tozluoğlu, 2008, Guler et al. 2008), cáscara de avellana (Çöpür et al., 2007), cáscara de almendra (Gürü et al. 2006), cáscaras de semillas de girasol (Cosereanu et al., 2014), tabaco (Ntalos y Grigoriou 2002), palmera datilera (Nemli y Kalaycioglu, 2001; Ghosh y Nayak, 2006; Ashori et al., 2008; Iskanderani, 2008), palmera washingtonia (García-Ortuño et al., 2013), palmera de aceite (Hashim et al., 2010, 2012), podas de vid (Ntalos y Grigoriou 2002; Yeniocak et al., 2014, 2016; Ferrández-García et al., 2015), bagazo de caña de azúcar (Widyorini, et al., 2005; Tabarsa et al., 2011; Ghalehno et al., 2011), bambú (Papadopoulos et al., 2004; Sudin y Swamy 2006), caña común (Ferrández-García et al, 2012) y ramas de banana (Quintana et al., 2009).

Por otra parte, el uso de adhesivos en la fabricación de tableros es esencial para mantener las propiedades físicas y mecánicas adecuadas. El adhesivo empleado mayoritariamente en la industria es la urea formaldehído (UF) debido a su bajo coste y a su buen rendimiento. Sin embargo, la nociva emisión del formaldehído de los tableros, considerado como un gas tóxico, ha animado a los investigadores a experimentar con diferentes recursos naturales para su empleo como adhesivo: lignina (El Mansouri et al., 2007, Mancera et al., 2011), proteína (Li et al., 2009; Ciannamea et al., 2010; Nikvash, et al., 2013) almidón (Wang et al., 2011; Tondi et al., 2012; Ferrández García et al., 2012), taninos (Moubarik et al., 2010; Ping et al., 2011), azúcar (Tondi et al., 2012) y ácido cítrico y azúcar (Umemura et al., 2013, 2015). Pero estos estudios no son concluyentes.

Por otra parte, la creciente preocupación acerca de la toxicidad y el coste de los aglutinantes sintéticos han llevado a los investigadores a enfocar sus estudios en la fabricación de tableros sin aglutinantes (“Binderless”).

## **1.2. ESTADO DE LA TÉCNICA.**

### **1.2.1. TABLEROS DE PARTÍCULAS SIN AGLUTINANTES.**

Varias revisiones sobre los estudios de tableros de partículas sin aglutinantes se han realizado recientemente (Pintiaux et al., 2015, Zhang et al., 2015). En ellos se destaca la severidad de los parámetros que se han utilizado para lograr un buen comportamiento físico y mecánico: pretratamiento de inyección de vapor con temperaturas de prensado y presiones muy altas.

Sin embargo, el alto costo y las propiedades obtenidas relativamente pobres, limitan su aplicación en la industria (Zhang et al., 2015). Por lo tanto, la producción de tableros de fibras sin adhesivos es una prometedora estrategia desde una perspectiva económica y ambiental. Algunas investigaciones han demostrado la viabilidad de la corteza como materia prima para producir tableros de fibras sin adhesivos (Wellons y Krahmer, 1973). Sin embargo, el requisito de una alta temperatura de prensado es uno de los principales obstáculos que limita su aplicación y desarrollo (Gupta et al., 2011).

Recientemente, sin aglomerante se han obtenido tableros de fibras hechas de corteza de refinado de abeto negro. Sin embargo, se necesitaba la fabricación de las fibras de madera y la corteza en una estructura de sándwich para obtener resultados aceptables (Gao et al.

2011). Investigaciones sistemáticas sobre tableros de fibras sin adhesivos podrían remontarse a 1980. Mobarak et al., (1982) elaboraron tableros a partir de un compuesto de bagazo sin aglomerante y discutieron el mecanismo potencial de auto-unión. Más tarde, Shen (1986) propuso y patentó un proceso para la producción de tableros de fibras sin aglomerante, lo que hizo posible su industrialización. Diferentes materias primas, como el coco (Van Dam et al., 2004), la palma de aceite (Baskaran et al., 2012) y el bambú (Shao et al., 2009), han sido estudiados para determinar su viabilidad en la producción de tableros de fibras sin aglomerante. Los pretratamientos químicos y enzimáticos de las materias primas pueden ser nuevas vías hacia la mejora de las propiedades de tableros de fibras sin adhesivos, debido a su capacidad para formar radicales libres en la superficie de las fibras (Felby et al., 1997; Kharazipour et al., 1997, Riquelme-Valdés et al., 2008, Widsten, 2002, Hüttermann et al., 2001, Müller et al., 2009, Kües et al., 2007). Además, han sido propuestos y desarrollados procesos de fabricación por explosión de vapor caliente para generar más sitios reactivos que contribuyan a la auto-unión, que a su vez mejora el rendimiento de los tableros de fibras sin adhesivos para cumplir los estándares industriales establecidos (Quintana et al., 2009; Widyorini et al., 2005).

Sin embargo, las discusiones o los resultados de la producción de tableros de fibras sin adhesivos están limitados actualmente a nivel de laboratorio. Esto es debido a que los valores mecánicos de resistencias exigibles a la producción de los tableros, con la autounión de fibras sin adhesivos, son difíciles de alcanzar. Por lo tanto, averiguar cuál es el mecanismo de auto-unión sería beneficioso para mejorar el rendimiento de los tableros de fibras sin adhesivos y por lo tanto, su industrialización. Se han propuesto varias explicaciones posibles: vínculos de lignina-furfural (Suzuki et al., 1998), reacción de condensación en lignina (Okuda and Sato, 2006) y la auto-polimerización del furfural (Yang and Rånby, 1996). Además, el fenómeno físico de la participación del ablandamiento térmico de la lignina también ha sido sugerido como parcialmente responsable de la auto-unión de los paneles (Bouajila et al., 2005). En realidad, el mecanismo detrás de este proceso varía dependiendo de las materias primas y el proceso de fabricación. Por otra parte, se puede considerar que en la producción de tableros de partículas sin adhesivo existe una colaboración de todas las reacciones mencionadas anteriormente.



### **1.2.2. TABLEROS AISLANTES DE FIBRAS VEGETALES.**

El hecho de que las fibras vegetales puedan ser más económicas, ligeras y respetuosas con el medio ambiente, justifica que se hayan estudiado como una alternativa a las fibras sintéticas en el contexto acústico (Yorozu et al., 1987). También reciclar recursos naturales y el uso de residuos contribuye a una mejora ambiental.

El material vegetal más utilizado como absorbente acústico y térmico es la madera. Algunas fibras vegetales, como las fibras de kenaf o de madera, ya están comercializadas, pero su difusión podría mejorarse aún más, ya que su rendimiento es similar al de los aislantes sintéticos (Asdrubali et al., 2015).

En general los materiales vegetales son porosos, buenos absorbentes del sonido y tienen excelentes propiedades aislantes acústicas a través de una amplia gama de frecuencias. Al mismo tiempo, el aumento del porcentaje de fibras vegetales como materia prima en la elaboración de materiales de construcción, producen una disminución significativa en la densidad del material y en los parámetros térmicos (Belkharchouche and Chaker, 2016). Es de destacar que el mayor desafío en el trabajo con fibras vegetales es la gran variación en sus propiedades aislantes que dependen de sus complejas estructuras y geometrías (Lü et al., 2013).

Como sustitutos de los materiales acústicos sintéticos, se han realizado varias investigaciones con tableros de fibras que han usado tallos de arroz (Yang et al., 2003), fibras de coco (Zulkifli et al., 2009), fibras de bambú (Karlinsari et al., 2012), mazorcas de maíz (Faustino et al., 2012) y residuos agrícolas (Sampathrajan et al., 1991).

Yang et al., (2003) evaluaron paneles acústicos de tallos de arroz con densidades de 0.4 y 0.6 g/m<sup>3</sup>, indicando que eran adecuados como un material aislante acústico para la absorción del sonido en las construcciones de madera. El ensayo mostró una disminución del coeficiente de absorción del sonido para frecuencias medias y un aumento en la absorción del sonido en el rango de frecuencias bajas y altas. No encontraron diferencias por el tamaño de partícula de las fibras de tallo de arroz. Con ensayos de paneles de especies tropicales de crecimiento rápido (Karlinsari et al., 2012) describieron que eran recomendables para acústica arquitectónica en la construcción de edificios en las frecuencias bajas y altas. Faustino et al., (2012) demostraron que un panel de partículas de maíz puede tener un comportamiento acústico interesante para su empleo en la construcción.

Mediante el uso de fibras de palmera datilera en la elaboración de ladrillos por Mekhermeche et al. (2016) demostraron que mejoraban sus propiedades térmicas, de manera que un aumento en el porcentaje de fibra disminuía la conductividad térmica, el calor específico y la capacidad calorífica, y aumentaba la resistencia térmica. El rendimiento térmico de tejas reforzadas con fibras de sisal y eucalipto mostró que su empleo era aceptable como sustituto de las láminas de fibrocemento (Roma et al., 2008). La adición de fibras de palmera sobre yeso puede utilizarse para mejorar el aislamiento térmico de los edificios (Chikhi, 2016). Tao et al., (2016) midieron la adición de fibras vegetales en poliuretano y el efecto sobre sus propiedades aislantes térmicas y acústicas, y concluyeron que al aumentar las proporciones de fibra se mejoraban las propiedades aislantes.

Hay algunos investigadores que basándose en las revisiones realizadas promueven nuevos tratamientos y técnicas para mejorar las propiedades aislantes de los paneles con fibras vegetales (Wu et al., 2016; Zhu et al., 2014).

### **1.2.3. TABLEROS DE FIBRAS VEGETALES-CEMENTO.**

Cada vez se emplean más en la edificación los paneles de madera-cemento para su uso en encofrados, cubiertas, paneles sandwich, revestimientos, tabiques-particiones, casas prefabricadas, falsos techos y solados. Son tableros elaborados con partículas de madera o fibras de celulosa mezcladas con cemento, agua y aditivos químicos. Generalmente se fabrican mediante un proceso húmedo con alta temperatura y presión durante unos minutos para, posteriormente, dejar curar entre 8 y 18 días presionados a una temperatura de 75 a 80°C.

Se han ensayado diferentes fibras vegetales con cementos y morteros de cemento: fibras de sisal, bambú, cáscara de coco y yute natural (Sen and Reddy, 2011), fibras de cáñamo (Sedan et al., 2008), fibras de sisal y banano (Savastano et al., 2009), fibras de raquis de palmera datilera (Kriker et al., 2008) y *Arundo donax* L. (Ferrández-García et al., 2015).

Chandra and Flodin, (1987) concluyeron que en general las fibras vegetales presentan problemas de degradación con el cemento, motivo por el cual hay diferentes propuestas de modificación de las fibras vegetales para evitar este problema: tratamiento alcalino de fibras de yute (Chakraborty et al., 2013), tratamiento con silano de fibras del bagazo de caña de azúcar (Bilba and Arsene, 2008), modificación de las fibras de kenaf mediante

diversos tratamientos químicos (Mahjoub et al., 2014) y tratamientos en tres soluciones alcalinas de fibras de raquis de palmera datilera (Kriker et al., 2008).

En ensayos realizados de compuestos de fibras vegetales con cemento, Savastano et al., (2009) indicaron que sufrieron una severa disminución de la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad en flexión, después de la exposición durante un año a ambientes templados o tropicales, concluyendo que las reducciones podrían atribuirse a la carbonatación de la matriz seguida de lixiviación y microfisuración progresiva. Igualmente Ramakrishna and Sundararajan (2005) concluyeron que la degradación se debía a la carbonatación de las fibras vegetales.

En una revisión sobre las recientes investigaciones del uso de fibras vegetales en materiales compuestos de cemento, Yan et al., (2016) dedujeron que los elementos celulósicos presentan una gran variabilidad en las propiedades mecánicas, debido a que se degradan principalmente por la degradación alcalina y por la mineralización de las fibras. Estos mecanismos producen cambios en la composición química de las fibras que provocan una disminución en su resistencia, una degradación de la matriz polimérica y una degradación en el enlace interfacial de la matriz de fibra/polímero.

En general, en la bibliografía consultada se indica que en los materiales compuestos de cemento reforzado con fibras vegetales se producía una disminución del calor de hidratación (Bilba et al., 2003; Sudin and Swamy, 2006; Fan et al., 2012), atribuyéndolo a distintos componentes de las fibras vegetales. Por lo que Vo and Navard, (2016) indicaron que seleccionar fuentes de biomasa con bajo contenido en estos compuestos, minimizaría estos inconvenientes.

Onuaguluchi and Banthia, (2016) recomendaron en la revisión realizada sobre las fibras naturales reforzando composites de cemento que se mejoraría al principio la hidratación del cemento aumentando la temperatura de curado, añadiendo aceleradores químicos y utilizando materiales que tuviesen un área superficial alta.

Igualmente se ha investigado la adición de almidón al cemento. Dewacker and Mcad (1996) sugirieron que una mezcla de polisacáridos tales como celulosa y almidón eran un buen agente de retención de agua. Estos aditivos son también agentes retardantes del fraguado, mejoran el tiempo de trabajabilidad y modifican la hidratación del cemento. Zhang et al., (2007), realizaron un estudio sobre el mecanismo de dispersión del almidón sulfonado como agente reductor del agua para el cemento. Ferrández-García et al., (2015),

estudiaron placas de cemento con distintas proporciones de almidón, concluyendo que tenían propiedades mecánicas de tableros estructurales.



## **2.- OBJETIVOS.**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL.**

Esta tesis doctoral tiene como objetivo la valorización de residuos vegetales como materia prima fácilmente renovable para la obtención de tableros de partículas resistentes y aislantes para su uso en los sectores de la construcción y del mueble. Con ello se podría ofrecer una alternativa sostenible al uso de la madera en dichos sectores y, al mismo tiempo, dar una salida medioambiental segura a este tipo de residuos. La utilización de residuos vegetales como materia prima para la fabricación de tableros contribuiría al desarrollo sostenible ya que haría posible una notable mejora en la gestión y el control de estos desechos.

Con tal finalidad se han propuesto cuatro estudios en los que se utilizan tipos de residuos vegetales diferentes (tallos de arroz, podas de palmera washingtonia, caña común y tronco de palmera canaria) y dos procesos de elaboración de tableros de partículas (proceso sin aglutinantes y proceso con aglutinante) con temperaturas y presiones más bajas que las empleadas habitualmente en la industria, con el objeto de conseguir un ahorro energético durante su fabricación.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA TESIS.**

#### **Resistencia al fuego y caracterización física y mecánica de los tableros de partículas de paja de arroz sin adhesivos.**

En este primer estudio los objetivos fueron fabricar tableros de partículas de paja de arroz sin aglomerantes utilizando una presión y temperatura de prensado bajas y cuantificar sus propiedades físico-mecánicas y de reacción al fuego. Además, analizar en particular la influencia que tienen las variables de tamaño de partícula y tiempo de prensado con el fin de seleccionar los tableros de partículas que ofrezcan los mejores resultados para estas propiedades.

### **Evaluación acústica y térmica de tableros de partículas de palmera washingtonia como material de construcción.**

En este segundo estudio los objetivos fueron determinar las propiedades acústicas y térmicas de los tableros de partículas hechos con residuos de poda de la palmera washingtonia y evaluar la influencia que tienen en sus propiedades el tamaño de las partículas empleado. Al mismo tiempo analizar las propiedades físicas y mecánicas de estos tableros, con el fin de determinar sus posibles aplicaciones como material de construcción aislante.

### **Propiedades acústicas de paneles prefabricados de residuos de cañas.**

Los objetivos de este tercer estudio fueron determinar las cualidades de las partículas de caña común en la elaboración de tableros aislantes acústicos, evaluar dichos tableros mediante la obtención del coeficiente de absorción y la pérdida de transmisión acústica, así como analizar las propiedades mecánicas de los tableros comprobando la influencia del tamaño de la partícula empleada en el tablero. Con la utilización de cañas se contribuiría al control y reciclaje de estos residuos y a una mejora ambiental.

### **Evaluación de paneles de tronco de palmera-cemento.**

Los objetivos de este cuarto estudio consistieron en evaluar un nuevo composite con biomasa del tronco de la palmera canaria aglomerada con cemento y almidón, determinar las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de estos paneles y averiguar si se produce degradación de las partículas de palmera a lo largo del tiempo. Dado que los tableros se consideran productos de alto valor ambiental y de larga duración, la fabricación de tales tableros podría ayudar a disminuir la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>, contribuyendo así a mejorar el medio ambiente.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS.**

#### **3.1. MATERIALES.**

##### **3.1.1. TALLO DE ARROZ.**

El arroz es uno de los cultivos más importantes del mundo. Según la FAO, la producción de arroz para 2015 era de 750 millones de toneladas. Teniendo en cuenta que la tasa de grano/paja es de uno, después de la cosecha se dispondría en los campos a nivel mundial de un total de 750 millones de toneladas de paja de arroz. Generalmente, los cultivadores de arroz se ocupan de la paja quemándola en las zonas donde se ha recolectado, lo que produce una emisión muy significativa de CO<sub>2</sub> que contribuye negativamente en la contaminación del aire. La creciente conciencia del cambio climático, el agotamiento de los recursos forestales y la contaminación ambiental han impulsado la investigación de residuos agrícolas para producir materiales de construcción, incluyendo los tableros de partículas (Li et al., 2010). Como la paja de arroz es un desecho lignocelulósico renovable, varios investigadores han estudiado la factibilidad de transformar estos residuos en productos útiles tales como los tableros de partículas, los tableros de fibras y los rellenos para compuestos termoplásticos (Zhang and Hu, 2014).

Tradicionalmente, la paja se ha utilizado como material de construcción aislante debido a sus múltiples ventajas: disponibilidad, renovabilidad, baja conductividad térmica y peso ligero. Ha sido empleada en toda Europa para rellenar las paredes, bajo los pisos de madera y sobre los techos de las edificaciones.

En comparación con la madera, la paja tiene varios inconvenientes para ser un verdadero sustituto de la fabricación de tableros de partículas. La paja tiene menos lignina y celulosa, posee más hemicelulosa (Rials and Wolcott, 1997) y mayor contenido de cenizas que la madera, lo que implica que tenga malas propiedades mecánicas y gran absorción de agua cuando se fabrican paneles de partículas siguiendo los parámetros de la industria de tableros de madera. Con el fin de mejorar sus propiedades, las partículas de paja necesitan ser pretratadas y sometidas a mayores condiciones de prensado (Pintiaux et al, 2015). En los primeros intentos de utilizar paja para la fabricación de tableros se demostró que la presencia de una capa externa cerosa tenía un impacto negativo debido a su baja humectabilidad. De esta forma, se determinaba que la unión

con resinas termoestables fuera incompatible y, por lo tanto, esta capa necesitaba ser removida (Sauter, 1996). En un estudio anterior, Ferrández-García et al., (2012) desarrollaron un método para fabricar tableros de partículas por prensado en caliente con baja temperatura y presión, usando tres pasos de prensado. La materia prima estaba compuesta por partículas de caña gigante y se unían con almidones no modificados. El método probado podría ser prometedor para otros materiales agro-lignocelulósicos. Según Park et al., (2009), el tallo de arroz contiene almidón que alcanza a veces más del 20% del peso seco. En consecuencia, los tableros de partículas autoadhesivas de paja de arroz podrían fabricarse mediante prensado en caliente con el método de tres etapas aprovechando el hecho de que la paja de arroz contiene almidón.

Una cuestión importante de los materiales de construcción de base biológica es la poca información de su reacción al fuego. Los materiales de construcción renovables tienen el potencial de reemplazar materiales parcialmente usados comúnmente como el cemento, pero los requisitos importantes deben ser cumplidos. La seguridad contra incendios debe ser atendida de acuerdo con el Reglamento de la UE sobre Productos de Construcción N 305/2011, CPR (COST Action FP1404, 2014). Se han realizado algunos estudios para investigar la reacción al fuego de tableros hechos o que contienen residuos agrícolas tales como cáscara de arroz (Kim, 2009), y kenaf (Lee et al., 2004). Pero no hay información disponible en la literatura sobre la reacción al fuego de los tableros de partículas de paja de arroz sin adhesivos.

### **3.1.2. RAQUIS DE PALMERA WASHINGTONIA.**

La palmera de abanico mejicana, *Washingtonia robusta* H. Wendl, pertenece a la familia *Arecaceae* (anteriormente *Palmaceae*), y es oriunda de la costa occidental de Méjico (Baja California y Sonora). Crece en regiones semiáridas, desérticas formando colonias cerca del agua, a veces en gargantas y cañones. Son palmeras altas (hasta 30 m), unicaules, con hojas palmeadas de hasta dos metros de diámetro. Las hojas viejas cuelgan del tallo y se mantienen como una densa maraña. Su cultivo ornamental es muy popular ya que es muy adaptable, se pueden encontrar tanto en áreas costeras como montañosas, desde los trópicos hasta zonas con temperaturas templadas. Su crecimiento es rápido, sobre todo en suelos permeables y ricos en nutrientes. Las hojas viejas se podan como mínimo una vez al año, generando mucho material de desecho que generalmente es llevado al vertedero.



Distintas palmeras se han estudiado para obtener nuevos materiales de construcción aislantes. Se han evaluado las propiedades acústicas y térmicas de distintas de fibras del tronco de la palmera de aceite (Kerdongmee et al., 2016) y fibras de la palmera datilera para obtener nuevos materiales aislantes (Khidir et al., 2014, Mekhermeche et al., 2016). Kerdongmee et al., (2016), investigaron el coeficiente de absorción acústica del tronco de palma de aceite utilizando paneles de palmera con agujeros ciegos, con múltiples radios y profundidades, así como paneles perforados y ranurados. Las mediciones de la absorción acústica en el intervalo de frecuencias de 300-2.000 Hz indicaron que el coeficiente de absorción acústica de los troncos cortados de forma perpendicular a las fibras era de 0,15 y fue ligeramente mayor (0,10) que el del panel cortado de forma paralela a las fibras. Hubo una mejora significativa aproximada del 25% con los paneles perforados cuyos orificios tenían 5 mm de diámetro y una profundidad de 10 mm, en comparación con los de 5 mm de profundidad. Indicaron que combinando los diámetros de los orificios y las profundidades se mejoraban los coeficientes de absorción acústica hasta un 80%.

Para obtener un buen aislamiento térmico, Khidir et al., (2014), realizaron un estudio para desarrollar nuevos materiales compuestos a base de yeso reforzado con fibras de palmera datilera. Los resultados mostraron que estos materiales se veían afectados principalmente por la adhesión interfacial entre la matriz y las fibras de palmera. Por lo que recomendaban que este nuevo biocompuesto se podría emplear como materia prima para el revestimiento de materiales de yeso.

En las zonas del Sáhara se obtienen calidades en el hormigón muy pobres debido a las altas temperaturas existentes. Por lo que Mekhermeche et al., (2016), fabricaron ladrillos con distintos porcentajes de arena y palmera datilera (0% a 40% y 0% a 3%), y así obtuvieron materiales aislantes mejor adaptados al clima. En su estudio concluyeron que con el aumento del porcentaje de arena y fibra en la arcilla, mejoraban las propiedades térmicas, se obtenía una disminución de la conductividad térmica y un aumento de la resistencia térmica.

El material empleado en este trabajo para obtener un producto aislante, fue el raquis de la palma de la palmera washingtonia. Para este estudio se utilizaron las palmas procedentes de las podas de jardinería de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (Alicante), perteneciente a la Universidad Miguel Hernández de Elche. De las palmas podadas se

eliminaron los foliolos y se dejaron secar los raquis durante 6 meses al aire. Posteriormente se desfibraron mediante una desfibradora de cuchillas y se clasificaron las partículas en función de sus dimensiones, empleando para ello los tamices de una tamizadora vibradora.

### **3.1.3. CAÑA COMÚN (ARUNDO DONAX L.).**

La caña común fue tradicionalmente utilizada en la zona del levante español como material de construcción. La caña es la mayor de las gramíneas de las regiones mediterráneas, siendo una planta salvaje en la que no se ha realizado selección de genotipos ni mejora genética. Es una planta perenne que forma densos cañaverales. Con la industrialización, los materiales vegetales dejaron de emplearse en los edificios, convirtiéndose la caña común en una planta invasora que puede provocar graves problemas. Cuando la caña crece en los márgenes de las corrientes fluviales, al producirse crecidas de agua, es arrancada y transportada, formando grandes masas vegetales que obstruyen los cauces, provocando inundaciones y arrasando a su paso todo tipo de construcciones.

El material empleado para la fabricación de los tableros procedía de la limpieza del cauce del río Segura. Las cañas se dejaron secar durante 6 meses al aire. Posteriormente se desfibraron mediante una desfibradora de cuchillas y se clasificaron las partículas por las dimensiones según atravesaban los tamices de una tamizadora vibradora.

Como aglutinante se dispuso de urea formaldehído (UF) comercial con un contenido en sólidos del 64 a 66%, en un 8% basado en el peso de las partículas de palmera. Como endurecedor se utilizó un 4% de sulfato amónico.

### **3.1.4. TRONCO DE PALMERA CANARIA.**

En España, las palmeras se emplean principalmente como plantas ornamentales en áreas urbanas como en la mayoría de los países mediterráneos donde se cultivan estas plantaciones. Una palmera comúnmente utilizada en la jardinería urbana es la palmera canaria (*Phoenix canariensis* Hort. Ex Chavaud). La palmera canaria pertenece a la especie de la familia Palmae (*Arecaceae*), género *Phoenix*, es endémica de las Islas Canarias (España) y se hibrida de forma natural con *Phoenix dactilífera*, existiendo múltiples cultivares híbridos que dificultan mucho su identificación. La palmera canaria

es más vigorosa que la palmera datilera y su estirpe alcanza 20 m de altura y un diámetro de 30 a 40 cm.

Actualmente hay un grave problema con estas palmeras debido a la plaga del picudo rojo (*Rhynchophorus ferrugineus*). Las palmeras infectadas deben ser trituradas y los residuos llevados a vertederos autorizados. La utilización de estos desechos puede contribuir a la adopción de soluciones sostenibles para el control y erradicación de especímenes contaminados y originar una mejora ambiental.

La biomasa de palmera canaria empleada en este trabajo se obtuvo de palmeras infectadas de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela. Inicialmente los troncos de palmera se cortaron, después se trocearon y se mantuvieron al aire libre para su secado durante 6 meses. Posteriormente se trituraron en una desfibradora de cuchillas para conseguir partículas con un tamaño inferior a 0.25 mm.

Los tableros se elaboraron con cemento portland tipo CEM II/B-LL 32,5N, agua, partículas de tronco de palmera canaria y distintas proporciones de almidón de patata.

## 3.2. MÉTODOS

### 3.2.1. FABRICACIÓN DE TABLEROS DE PARTÍCULAS.

#### **Tableros sin adhesivos:**

El método utilizado para fabricar los tableros de partículas de tallo de arroz fue adaptado de Ferrández-García et al. (2012), con la particularidad de que no se utilizó aglutinante. Se hicieron dieciocho tipos de paneles. Cada panel se preparó con 2000 g de partículas y 200 g de agua destilada. Se realizaron cinco repeticiones para cada tipo de panel.

Los tableros de 600 mm x 400 mm se preformaron manualmente en un molde y luego se prensaron a 2,6 N/mm<sup>2</sup> en una prensa de platos calientes a 110 ° C durante 15, 30 y 60 minutos. Después del prensado, las planchas permanecieron en el molde sin presión mientras se enfriaban durante 1 hora bajo condiciones ambientales. A continuación, dos tercios de los tableros de partículas se pulverizaron en la superficie superior con 120 g/m<sup>2</sup> de agua destilada y, posteriormente, se comprimieron de nuevo bajo las mismas condiciones de prensado.



*Fig. 1. Prensa de platos calientes.*

Finalmente, un tercio de los paneles se sometieron a un tercer ciclo de prensado. La temperatura de prensado se mantuvo baja (110°C) para evitar la quema superficial, dado que algunos tiempos de prensado eran largos. En la figura 1 se observa la prensa de platos calientes.

#### **Tableros con adhesivo urea formaldehído.**

El método empleado en la fabricación de los tableros de partículas de palmera Washingtonia y de los tableros de partículas de caña fue el proceso seco utilizado industrialmente, aunque se empleó menor temperatura y presión en su elaboración. Se fabricaron 3 tipos de tableros con distinto tamaño de partículas, clasificadas según atravesaban un tamiz y eran retenidas por el siguiente (0.25 a 1.00 mm; 1.00 a 2.00 mm y 2.00 a 4.00 mm). Las partículas se mezclaron mediante inyección con un 8% de urea formaldehído en una amasadora volteadora de eje horizontal marca IMAL.

Para elaborar los tableros se formó la manta en un molde de dimensiones 400 mm x 600 mm, como se observa en la figura 2. Posteriormente se sometieron en una prensa de platos calientes a una presión de 2.6 MPa y temperatura de 120° C durante 6 minutos. Los tableros formados tenían unas dimensiones medias de 600 x 400 x 6.5 mm y se dejaron enfriar al aire en posición vertical durante 24 horas.



Fig. 2. Molde para formar la manta.

Se fabricaron 5 tableros de cada tipología y posteriormente se cortaron las probetas con dimensiones adecuadas para cada uno de los ensayos de laboratorio, como indican las normas europeas EN.

### **Tableros de partículas vegetales-cemento.**

Se obtuvieron partículas del tronco de la palmera canaria con un tamaño inferior a 0,25 mm y una humedad relativa del 54%, por lo que se dejaron secar al aire durante 3 meses más hasta alcanzar una humedad relativa del 10%.

El proceso de fabricación consistió en mezclar en seco el cemento y las partículas de palmera canaria con diferentes proporciones de almidón (0%, 5% y 10%), obteniendo 3 clases de paneles. Posteriormente se pulverizó un 10% en peso de agua sobre la masa, removiéndola durante 15 minutos para su homogeneización. La manta se formó en un molde de dimensiones 600 mm x 400 mm y se sometió a presión y calor en una prensa de platos calientes, con una presión de 2.6 MPa, una temperatura de 100°C y durante 2 o 3 horas. Posteriormente, se dejaron los paneles enfriar en posición horizontal hasta su enfriamiento.

### **3.2.2. ENSAYOS EXPERIMENTALES.**

Los ensayos fueron experimentales y se llevaron a cabo en el laboratorio de materiales de construcción del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández.

Los ensayos consistieron en la obtención de la densidad ( $\rho$ ), la determinación del módulo de elasticidad en flexión (MOE) y de la resistencia característica a flexión (MOR), la resistencia a tracción perpendicular (IB), el hinchamiento en espesor después de 2 y 24 horas de inmersión en agua (TS), absorción de agua después de 24 horas de inmersión (WA), ensayo mediante flujo de calor para determinar la conductividad térmica ( $\lambda$ ) y el ensayo de inflamabilidad con fuente de llama única.

### A) Densidad de los tableros.

Para la determinación de la densidad se siguió la norma EN 323 (1993). “Tableros derivados de la madera. Determinación de la densidad”.

Como instrumento de medida se utilizaron un micrómetro con precisión de 0,01mm, un calibre de precisión 0,1 mm y una balanza de 0,01g.

Las probetas se cortaron con dimensiones de 50x50 mm de lado y se mantuvieron con las condiciones del laboratorio a una humedad relativa de  $65 \pm 5\%$  y una temperatura de  $20 \pm 2^\circ \text{C}$ . El espesor  $t$ , se midió en el punto de intersección de las diagonales. Además del espesor  $t$ , se midieron el largo y ancho ( $b_1$  y  $b_2$ ) en mm y se pesaron las probetas, siendo  $m$  el peso en gramos.

La densidad de cada probeta en  $\text{kg/m}^3$ , se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{b_1 \cdot b_2 \cdot t} \times 10^6 \quad (1)$$

donde:

$m$  es el peso en gramos.

$b_1$  es el largo de la probeta en mm.

$b_2$  es el ancho de la probeta en mm.

$t$  es el espesor de la probeta en mm.

### B) Ensayo a flexión.

El ensayo a flexión se realizó de acuerdo con la norma EN 310 (1993). “Tableros derivados de madera. Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión”. El ensayo se realizó aplicando una carga en el centro de la probeta que se encuentra apoyada en dos puntos.

En función del espesor del tablero  $t$ , se fijan las medidas de los apoyos de los rodillos, así como las del vuelo que debe tener el tablero. Es decir:  $L_1 = 20 \cdot t$  y  $L_2 = L_1 + 50$  (medidas en mm).

Teniendo en cuenta que los diámetros de los cilindros de carga están normalizados, las probetas se definen pues en función del espesor con un ancho fijo de 50 mm. El largo se

cortó en función de la dimensión  $L_2$  que define la norma y los apoyos se regulan en base a  $L_1$  y  $L_1/2$ .

La resistencia a flexión (MOR) se expresa en  $\text{N/mm}^2$  y se calcula para cada probeta de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{MOR} = \frac{3 \cdot F_{\text{máx}} \cdot L_1}{2 \cdot b \cdot t^2} \quad (2)$$

donde:

$F_{\text{máx}}$ . es la carga máxima en Newton.

$L_1$  es la distancia entre los ejes de apoyo en mm.

$b$  es la anchura de la probeta en mm.

$t$  es el espesor de la probeta en mm.

El módulo de elasticidad en flexión (MOE) en  $\text{N/mm}^2$ , de acuerdo con la norma EN para el ensayo de flexión de cada probeta, se define como indica la siguiente ecuación:

$$\text{MOE} = \frac{[L_1^3 \cdot (F_2 - F_1)]}{[4 \cdot b \cdot t^3 \cdot (a_2 - a_1)]} \quad (3)$$

Siendo:

$F_1$  aproximadamente un 10% del valor de la carga máxima en Newton que corresponde a una cuantía de  $a_1$  de la deformación en mm.

$F_2$  aproximadamente un 40% del valor de la carga máxima y corresponde a una cuantía de  $a_2$  de la deformación en dicho punto.



Fig. 3. Ensayo a flexión.

En la figura 3 se puede observar el ensayo a flexión de una probeta.

### C) Ensayo de cohesión interna.

Para determinar la resistencia a tracción perpendicular a las caras o cohesión interna (IB) de los tableros se procedió como indica la norma europea EN 319 (1993). El fundamento de dicho ensayo consiste en determinar la carga máxima aplicada en relación con la superficie de la probeta.

Las probetas medían  $50 \pm 1$  mm de lado y sus cantos eran rectos y limpios.

Las probetas y los bloques metálicos se acondicionaron hasta masa constante en una atmósfera de humedad media relativa ( $65 \pm 5$ ) % y una temperatura de ( $20 \pm 2$ )° C. Las probetas se encolaron posteriormente sobre el bloque metálico mediante colas termofusibles y se mantuvieron durante 24 horas en condiciones ambientales controladas antes de ensayarlas. Posteriormente se colocó el conjunto bloque-probeta en los tacos de agarre y se aplicó el esfuerzo de tracción hasta rotura.

La carga se aplicó a velocidad constante durante todo el ensayo de forma que se alcanzó la carga máxima en ( $60 \pm 30$ ) segundos. Los resultados de cada ensayo se obtuvieron con la siguiente fórmula y se expresan en N/mm<sup>2</sup>.

$$IB = \frac{F_{\text{máx.}}}{a \cdot b} \quad (4)$$

donde:

$F_{\text{máx.}}$  es la carga de rotura, en Newton.

a y b son la longitud y el ancho de la probeta en milímetros.

La resistencia a la tracción perpendicular o cohesión interna de cada tablero se toma como la media aritmética del conjunto de los resultados obtenidos sobre todas las probetas muestreadas de ese tablero.

Para realizar los ensayos mecánicos se empleó la máquina de ensayos universal para tableros de madera marca IMAL, como se puede observar en la figura 4.





Fig. 4. Máquina de ensayos universal para madera.

#### D) Ensayo de la hinchazón en espesor.

Para determinar la hinchazón en espesor después de inmersión en agua se aplicó la norma EN 317 (1993). Las probetas son de forma cuadrada de  $(50 \pm 1)$  mm de lado.

El procedimiento operatorio fue el siguiente:

- ✓ Medición del espesor en el centro de la probeta.
- ✓ Inmersión: Se sumergieron las probetas en posición vertical, en agua limpia, en reposo y con un pH de  $7 \pm 1$  y una temperatura de  $(20 \pm 1)^\circ \text{C}$ . La temperatura se mantuvo durante el ensayo. Las probetas se mantuvieron separadas entre sí, así como del fondo y las paredes de la cubeta. Durante el ensayo los cantos superiores de las probetas quedaron sumergidas a  $(25 \pm 5)$  mm. El tiempo de inmersión fue de 2 y 24 horas.
- ✓ Medición del espesor después de inmersión: Una vez finalizado el tiempo de inmersión se sacaron las probetas del baño, se eliminó el exceso de agua y se midió el espesor.

Finalmente se calculó la hinchazón en espesor de cada probeta TS (Thickness swelling), expresada en tanto por ciento sobre su espesor inicial, mediante la fórmula:

$$TS = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \cdot 100 \quad (5)$$

Siendo:

$t_1$  es el espesor de la probeta antes de inmersión, en mm.

$t_2$  es el espesor de la probeta después de inmersión, en mm.

La hinchazón en espesor para un tablero se considera la media aritmética de los resultados de todas las probetas tomadas de cada tablero.

### **E) Ensayo de absorción de agua después de inmersión.**

El cambio en la masa de la muestra, como resultado de los procesos de absorción de agua después de inmersión en agua puede ser utilizado para estudiar el comportamiento difusional del sistema.

La ganancia de masa de agua (WA) después de inmersión al cabo de 2 y 24 horas se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$WA(\%) = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (6)$$

donde

WA ganancia de masa (agua) al cabo de un tiempo t.

m masa de la muestra tras un tiempo 2 y 24 h.

$m_0$  masa inicial de la muestra seca.

El valor de WA de cada tablero se obtiene como la media aritmética del valor obtenido en el ensayo de cada una de las probetas.

### **F) Conductividad y Resistencia térmicas.**

Los materiales aislantes térmicos se caracterizan por una baja conductividad térmica. El procedimiento de ensayo para determinar la conductividad en los materiales de construcción se encuentra recogido fundamentalmente en la norma EN 12667 (2001). Dentro de la norma de ensayo se recogen dos posible métodos: el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Ambos métodos son igualmente válidos, siendo el hecho diferencial entre ellos que el primero es un método absoluto y el segundo un método relativo, es decir, está basado en una calibración previa del equipo realizada con un material cuya conductividad térmica es conocida y está certificada.

El método más implantado actualmente es el método del equipo medidor de flujo de calor debido fundamentalmente a la rapidez con la que se realizan las medidas. Para determinar la conductividad térmica en el estado estacionario del material se empleó la siguiente ecuación:

$$\frac{dQ}{\Delta T} = \frac{\lambda}{e} = \frac{1}{R} \quad (7)$$

donde:

$dQ$  es el flujo de calor, obtenido a partir de las constantes de calibración de los medidores de flujo de calor y de la señal eléctrica que proporcionan (en W/m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  es la diferencia de temperatura establecida entre los dos lados de la muestra (K)

$\lambda$  es la conductividad térmica de la muestra (en W/m·K))

$e$  es el espesor de la muestra (en metros)

$R$  es la resistencia térmica de la muestra (en m<sup>2</sup>·K/W)

Las probetas tienen unas dimensiones de 300 x 300 mm y se empleó una probeta para de cada tablero.

En la figura 5 se observa el equipo de conductividad usado en los ensayos.



Fig. 5. Equipo de conductividad térmica por medio del flujo de aire.

### G) Ensayo de inflamabilidad con fuente de llama única.

Para determinar la inflamabilidad de los tableros de tallo de arroz se realizaron los ensayos empleando la norma EN ISO 11925-2 (2002), mediante aplicación directa de llama pequeña con radiación nula. Las muestras en el ensayo se colocaron en orientación vertical.

Se ensayaron tres muestras de cada tablero de dimensiones 250 mm ( $\pm 1$ ) de longitud por 90 mm ( $\pm 1$ ) de anchura. Se colocaron dos piezas de papel de filtro en la bandeja de aluminio bajo la muestra, como máximo 3 minutos antes del comienzo del ensayo. En la figura 6 se puede observar la aplicación de la llama sobre una probeta en el ensayo de llama única. En dicho ensayo se muestra la ignición de la probeta y la altura de la llama.



*Fig. 6. Ensayo de inflamabilidad de una probeta.*

El tiempo de aplicación de la llama fue de 30 s y la duración total del ensayo para cada probeta de 60 s desde el momento en que se aplicó la llama.

Para cada una de las muestras de ensayo, se registró lo siguiente:

1. Si se produce ignición.
2. Si la parte superior de la llama alcanza los 150 mm sobre el punto de aplicación y el momento que esto ocurre.
3. Si se produce ignición del papel de filtro.
4. Observaciones del comportamiento físico de la muestra durante el ensayo.

Para la realización del ensayo se utilizó el equipo de inflamabilidad mediante aplicación directa de la llama que se observa en la figura 7.



Fig. 7. Equipo de inflamabilidad mediante aplicación directa de llama.

#### H) Determinación del coeficiente de absorción del sonido y la pérdida de transmisión acústica.

El método seguido para determinar el coeficiente de absorción y la pérdida de transmisión acústica de un material bajo incidencia normal, fue el basado en el tubo de impedancia acústica. Este método de ensayo utiliza un tubo de impedancia, dos posiciones de micrófono y un sistema digital de análisis de señal, según la norma EN ISO 10534-2 (2002). Esta técnica necesita un procedimiento previo de corrección del ensayo para minimizar las diferencias en las características de amplitud y de fase entre los dos micrófonos. En la realización de los ensayos se empleó el tubo de impedancia Acupro Spectronics, con una gama de frecuencias entre 50 y 6300 Hz, como se observa en la figura 8.



Fig. 8. Montaje del tubo de impedancia.

Para realizar las medidas, una vez calibrado el sistema, se retiró del porta-muestras la muestra de material absorbente y se volvieron a colocar los micrófonos en la posición inicial en el tubo de impedancia. Se colocó la probeta y con el analizador de espectros se registraron las funciones de transferencia.

Una vez obtenidas las funciones de transferencia se determinaron las propiedades acústicas de los materiales analizados mediante el programa informático Acupro. Este programa es una herramienta informática que realiza los cálculos numéricos de acuerdo a las especificaciones de la norma.

Para la determinación de la pérdida de transmisión acústica, se calibraron los micrófonos y la probeta se insertó en la parte final del tubo de impedancia, pero en este caso no se posiciona el pistón detrás de la muestra y la parte final del tubo quedó abierta.

### **3.2.3. ANÁLISIS DE LOS TABLEROS USANDO MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).**

La técnica consiste, principalmente, en enviar un haz de electrones sobre la muestra y mediante un detector apropiado registrar el resultado de esta interacción. El haz se desplaza sobre la muestra realizando un barrido en las direcciones X e Y de tal modo que la posición en la que se encuentra el haz en cada momento coincide con la aparición de brillo, proporcionalmente a la señal emitida, en un determinado punto de una pantalla.

Las imágenes que se obtienen en el microscopio electrónico de barrido corresponden a electrones secundarios o electrones retrodispersados emitidos tras la interacción con la muestra de un haz incidente de entre 5 y 30 keV. La señal de electrones secundarios se forma en una delgada capa superficial, del orden de 50 a 100 Å. Al ser grande el número de electrones emitido se logra establecer un buen contraste. Por otra parte, al ser electrones de baja energía, menos de 50 keV, pueden ser desviados fácilmente de su trayectoria emergente inicial, y se consigue obtener información de zonas que no están a la vista del detector. Esta particularidad es fundamental para otorgar a esta señal la posibilidad de aportar información “en relieve”. La apariencia de la imagen es la que tendría una muestra que hubiese sido iluminada desde el detector y se estuviese observando desde el cañón de electrones.

### **3.2.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.**

Los datos de cada prueba se analizaron estadísticamente. Se empleó el análisis de la varianza (ANOVA) y el cálculo de pruebas t para probar las diferencias significativas entre factores y niveles ( $\alpha = 0.05$ ). Se realizó una comparación de las medias cuando el ANOVA indicó una diferencia significativa, empleando el test de Duncan.

Para el análisis se dispuso del programa informático SPSS-21.







## **4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.**

### **4.1. FIRE-RESISTANCE, PHYSICAL, AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF RICE STRAW BINDERLESS PARTICLEBOARDS.**

#### **RESISTENCIA AL FUEGO, Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE LOS TABLEROS DE PARTÍCULAS SIN ADHESIVOS DE LA PAJA DE ARROZ.**

El objetivo de este estudio fue fabricar tableros de partículas de paja de arroz sin aglomerantes utilizando una presión y temperatura de prensado bajas y evaluar sus propiedades físico-mecánicas y de reacción al fuego. En particular, la influencia del tamaño de partícula y el tiempo de prensado fueron las variables evaluadas con el fin de seleccionar los tableros de partículas con mejores propiedades.

La paja de arroz fue suministrada por el IVIA (Instituto Valenciano de Investigación Agrícola, España) procedente del Parque Natural de la Albufera (Valencia). La paja fue astillada en un rascador de cuchilla anular de laboratorio. Las partículas se clasificaron a continuación utilizando un agitador de pantalla horizontal. Se utilizaron dos tamaños de partícula: por un lado las partículas que pasaron el tamiz de 1 mm pero se retuvieron en el tamiz de 0,25 mm y, por otro, las partículas que pasaron por el tamiz de 0,25 mm. No se empleó ningún aglutinante en la fabricación de los tableros de partículas.

#### **Fabricación de tableros de partículas sin aglomerante de arroz y paja.**

El método utilizado para fabricar los tableros de partículas fue adaptado de Ferrández-García et al. (2012), con la particularidad de que no se utilizó aglutinante. Se hicieron dieciocho tipos de paneles. Cada panel se preparó con 2000 g de partículas y 200 g de agua destilada. Se realizaron cinco repeticiones para cada tipo de panel.

Los tableros de 600 mm x 400 mm se preformaron manualmente en un molde y luego se prensaron en una prensa de platos calientes a una presión de 2,6 N/mm<sup>2</sup> y temperatura de 110 °C durante un tiempo de 15, 30 y/o 60 min. Después de prensar, las planchas permanecieron en el molde sin ejercer presión dejándolas enfriar durante 1 hora bajo condiciones ambientales. Después de esto, dos tercios de los tableros de partículas se pulverizaron con una cantidad de 120 g/m<sup>2</sup> de agua destilada en la superficie superior y luego volvieron a someterse a presión de nuevo bajo las mismas condiciones de prensado.

Posteriormente, un tercio de los paneles se sometieron nuevamente a un tercer ciclo de prensado bajo las mismas condiciones. La temperatura de prensado se mantuvo baja (110°C) para evitar la quema superficial del panel dado que algunos tiempos de prensado eran largos.

En la tabla 1 se indican las condiciones de elaboración de los 18 tipos de tableros de partículas de tallo de arroz sin adhesivos.

Tabla 1. Condiciones de elaboración de los tableros de partículas de tallo de arroz.

Tipo de Tableros	Tamaño de partícula (mm)	Presión de la Prensa (N/mm <sup>2</sup> )	Temperatura de la prensa (°C)	Tiempo de prensado (min)	Número de Ciclos
1	< 0.25	2.6	110	15	1
2	< 0.25	2.6	110	15+15	2
3	< 0.25	2.6	110	15+15+15	3
4	< 0.25	2.6	110	30	1
5	< 0.25	2.6	110	30+30	2
6	< 0.25	2.6	110	30+30+30	3
7	< 0.25	2.6	110	60	1
8	< 0.25	2.6	110	60+60	2
9	< 0.25	2.6	110	60+60+60	3
10	0.25 to 1	2.6	110	15	1
11	0.25 to 1	2.6	110	15+15	2
12	0.25 to 1	2.6	110	15+15+15	3
13	0.25 to 1	2.6	110	30	1
14	0.25 to 1	2.6	110	30+30	2
15	0.25 to 1	2.6	110	30+30+30	3
16	0.25 to 1	2.6	110	60	1
17	0.25 to 1	2.6	110	60+60	2
18	0.25 to 1	2.6	110	60+60+60	3

#### **4.1.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

##### **Densidad.**

Se fabricaron con éxito paneles de paja de arroz sin aglomerante con densidades comprendidas en el rango 980-1148 kg/m<sup>3</sup>. Se observó que esta propiedad no dependía del tamaño de partícula ni tampoco del tiempo de prensado.

##### **Hinchazón en espesor (TS) y absorción de agua (WA) después de inmersión.**

Los paneles de partículas deben tener un valor máximo de hinchamiento de espesor del 16% durante 24 h de inmersión para carga (grado P4 de acuerdo con EN 312, 2010), pero no hay un valor mínimo de TS establecido en las normas para usos generales y fabricación de muebles en ambiente seco P1 y P2, respectivamente.

El promedio de hinchamiento en espesor de los especímenes durante 2 h de inmersión varió de 11,26 a 59,74%. Durante 24 h de inmersión, los resultados se situaron entre 23,15 y 60,69%. Se observó que esta propiedad dependía del tamaño de partícula, hinchándose menos los tableros hechos con partículas de tamaño fino, y aumentando el hinchamiento con el número de ciclos de prensado. Este fenómeno no ocurrió con las placas fabricadas con el tamaño de partícula más grueso. Los valores obtenidos de TS y WA estaban en sintonía con los de otros tableros de partículas sin aglomerante (Lindström y Westman, 1980, Bouajila et al., 2005). Uno de los principales problemas de los paneles autoadhesivos es su baja resistencia al agua. Esta propiedad se expresa generalmente como la combinación de TS y WA. Pintiaux et al (2015) informaron en su revisión que las placas sin aglomerado tenían dificultades para lograr resistencias al agua lo suficientemente buenas como para cumplir las normas. Es ampliamente conocido que los materiales no leñosos, incluyendo la paja, tienen más hemicelulosa que los materiales leñosos, y por lo tanto son más hidrófilos. Halvarsson et al (2010) informaron un valor de TS y WA de 75% y 90%, respectivamente, con tableros seleccionados de paja de trigo pretratada.

Los resultados de TS y WA obtenidos en algunos de los paneles experimentales del presente estudio fueron buenos, considerando que no se añadieron ceras. Los tableros hechos con el tamaño de partícula más pequeño absorbieron menos agua que las fabricadas con partículas más grandes. Esto podría ser debido a un contenido importante de sílice refinado de la cutícula cuando se astillan los tallos. Generalmente, las partículas

de sílice pasan el tamiz con aberturas de 0,25 mm. Kurokochi y Sato (2015) elaboraron tableros de partículas de paja de arroz sin aglomerante mediante prensado en caliente a 200 °C y 5 Mpa durante 10 min, y obtuvieron tableros con valores similares de TS y WA. Concluyeron que las sustancias de tipo cera de la epidermis de la paja de arroz contribuyeron a la propiedad de resistencia al agua de los tableros.

### **Conductividad térmica**

El valor de conductividad térmica obtenido en los paneles experimentales fue bajo, variando entre un mínimo de 0,076 y un máximo de 0,091 W/m·K. Se observó que sobre estos valores no influyó ni el tamaño de partícula ni el tiempo de prensado. Tales valores son inferiores a los de los paneles de aglomerado de madera. Por lo tanto, los paneles experimentales pueden considerarse como buenos aislantes térmicos. No obstante, para poder ser utilizados como materiales aislantes debería reducirse su densidad.

### **Propiedades mecánicas**

Basándose en las normas europeas (EN 312, 2010), como requisitos mínimos para usos generales en ambiente seco se establece un valor MOR de 11,5 N/mm<sup>2</sup> y un valor IB de 0,24 N/mm<sup>2</sup> (grado P1). Los valores de MOR de 13 N/mm<sup>2</sup>, MOE de 1600 N/mm<sup>2</sup> e IB de 0,35 N/mm<sup>2</sup> constituyen los requisitos mínimos para uso en fabricación de muebles (grado P2). Y para uso como soporte de carga (grado P4), los valores de MOR, MOE e IB son 15 N/mm<sup>2</sup>, 2300 N/mm<sup>2</sup> y 0,35 N/mm<sup>2</sup>, respectivamente.

Los valores de MOR obtenidos en los paneles experimentales oscilaron entre 4,79 y 18,02 N/mm<sup>2</sup>. Los valores de MOE quedaron comprendidos entre 542 y 2696 N/mm<sup>2</sup>. Los resultados de los ensayos IB oscilaron entre 0,02 y 0,30 N/mm<sup>2</sup>. Estas propiedades mecánicas dependían en gran medida del tamaño de partícula y del número de ciclos de prensado. Los mejores resultados para estas tres propiedades fueron alcanzados por los tableros hechos con el tamaño de partícula más pequeño. Las propiedades mecánicas aumentaron al aumentar los tiempos de prensado y el número de ciclos. Las placas con el mejor comportamiento mecánico fueron las placas 8 y 9, ambas se hicieron con el tamaño de partícula pequeño y un tiempo de prensado de 60 minutos, después de someterse a 2 y 3 ciclos de prensado, respectivamente

Los tableros tipo 8 y 9 mostraron un valor de MOR y MOE superior al estándar para carga (grado P4), sin embargo no cumplieron con el requisito mínimo IB de  $0,35 \text{ N/mm}^2$ . Por lo tanto, estos paneles sólo pueden clasificarse como grado P1 para usos generales.

Aunque la densidad de los paneles era alta, la resistencia de unión interna era pobre. Presumiblemente, la temperatura y la presión de la etapa de prensado en caliente no eran suficientes para que el almidón exhibiera su capacidad adhesiva. Ferrández-García et al., (2012) utilizaron las mismas condiciones para unir partículas de caña común con almidón obteniendo valores IB ligeramente mejores. Sin embargo, con mayor temperatura y presión, Kurokochi y Sato, (2015) informaron valores más bajos de IB (que oscilaban entre  $0,01$  y  $0,17 \text{ N/mm}^2$ ) para paneles de paja de arroz sin aglomerante hechos por prensado en caliente con partículas de 1 mm de tamaño.

### **Resultados de las pruebas de reacción al fuego.**

Se utilizaron tres muestras de un tablero de cada tamaño de partícula que había conseguido el mejor comportamiento mecánico (tableros 9 y 18) para llevar a cabo la prueba de reacción al fuego. Los especímenes se acondicionaron antes de la prueba a masa constante a una temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  y una humedad relativa de  $60 \pm 5\%$  HR. Las muestras fueron fijadas verticalmente sobre un bastidor y la llama fue aplicada durante 30 segundos con una inclinación de  $45^\circ$  incidiendo 40 mm por encima del borde inferior de la muestra.

La propagación de la llama,  $F_s$ , es la medida de la altura quemada. El área quemada era superficial. El resultado no dependió del tamaño de partícula. La norma establece que cuando  $F_s < 150$  mm en 60 segundos los paneles se clasifican como B. Si además de eso no ha habido gotas en llamas, como fue el caso de este ensayo, los tableros se clasifican como  $d_0$ . Por lo tanto, a estos tableros de partículas de paja de arroz sin aglomerante les corresponde la clasificación  $Bd_0$ . Para averiguar si los tableros se pueden clasificar como una clase superior deben llevarse a cabo pruebas de inflamabilidad. Los tableros de partículas de madera son de clase  $Dd_0$ , lo que significa que su reacción al fuego es peor que la de los paneles de partículas de paja de arroz. Esto podría explicarse por el alto contenido de sílice en el material de arroz, ya que se sabe que la sílice es un retardante del fuego (Lee et al 2011).

#### **4.1.2. CONCLUSIONES.**

1. Los tableros de partículas de paja de arroz sin aglomerante se fabricaron con éxito mediante prensado en caliente utilizando un proceso de tres etapas a baja temperatura (110°C) y presión (2,6 MPa).
2. Sus propiedades físico-mecánicas dependieron en gran medida de los tamaños de partícula utilizados y de los tiempos de prensado.
3. Los tableros ensayados de los tipos 8 y 9 superaron los requisitos mínimos para usos generales (grado P1 según EN 312: 2010).
4. Estos tableros pueden ser considerados como paneles aislantes térmicos, debido a los bajos valores obtenidos de conductividad térmica. Esta propiedad no dependía del tamaño de partícula ni del tiempo de prensado.
5. El ensayo de reacción al fuego demostró que los tableros de partículas de paja de arroz sin aglomerante pueden considerarse como retardantes del fuego.



## **4.2 ACOUSTIC AND THERMAL EVALUATION OF PALM PANELS AS BUILDING MATERIAL.**

### **EVALUACIÓN ACÚSTICA Y TÉRMICA DE PANELES DE PALMERA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.**

Se estudió la utilización de las fibras de palmera washingtonia para su uso como materia prima en la obtención de materiales de construcción que resulten aislantes acústicos y térmicos. Las hojas viejas de palmera washingtonia suelen podarse como mínimo una vez al año, generando cada palmera una media de 30 kg de raquis de la hoja (RH 8%), según mediciones realizadas en las palmeras utilizadas en este estudio. Estos desechos suelen acabar en un vertedero, pero podrían ser utilizados para otros fines.

El objetivo de este estudio fue determinar las propiedades acústicas y térmicas de los tableros de partículas hechos con residuos de poda de la palmera washingtonia y evaluar la influencia que tiene en las propiedades de estos tableros el tamaño de las partículas empleado. Al mismo tiempo, evaluar las propiedades físicas y mecánicas de estos tableros con el fin de determinar sus posibles aplicaciones como material de construcción aislante.

#### **Elaboración de tableros de partículas de raquis de palmera Washingtonia.**

Se fabricaron 3 tipos de tableros con distinto tamaño de partículas (0.25 a 1.00 mm; 1.00 a 2.00 mm y 2.00 a 4.00 mm) obtenidas a partir del raquis de la palma de palmera washingtonia. El raquis procedía de las podas de las palmeras de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela. Como aglutinante se empleó urea formaldehído (UF) comercial con un contenido en sólidos del 64 al 66%. Se utilizó un 8% de UF basado en el peso de las partículas de palmera y como endurecedor un 4% de sulfato amónico. Para elaborar los tableros se formó con la masa una manta manualmente en un molde de dimensiones 600 x400 mm y, posteriormente, se introdujo en una prensa de platos calientes a una presión de 2.6 MPa y una temperatura de 120° C durante 6 minutos.

Se elaboraron 5 tableros de cada tipología.

#### **4.2.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

##### **Densidad.**

Los valores de densidad obtenidos oscilaron entre 677.1 y 885.75 kg/m<sup>3</sup>, es decir, con la presión y baja temperatura aplicada (120° C) se obtuvieron tableros de media densidad, observándose diferencias significativas entre tableros con diferente tamaño de partícula. En consecuencia la densidad del tablero dependía del tamaño de partícula empleado, obteniendo mayores valores de densidad con partículas de menor tamaño.

##### **Resistencia en flexión y cohesión interna.**

Los valores del módulo de rotura en flexión (MOR) para partículas de 0.25 a 1.00 mm alcanzaron un valor de 16.95 N/mm<sup>2</sup>, disminuyendo el MOR con partículas de mayor tamaño. En consecuencia la resistencia a flexión dependía del tamaño de partícula. El módulo de elasticidad en flexión (MOE) también depende del tamaño de partícula obteniendo valores de 1550.49 a 665.06 N/mm<sup>2</sup>. En cambio los valores de cohesión interna (IB) obtenidos no dependían del tamaño de partícula, alcanzando valores altos desde 0.98 hasta 1.06 N/mm<sup>2</sup>. Se observó que a mayor densidad de los paneles se obtuvieron mejores propiedades mecánicas.

Con baja temperatura (120°C) en la prensa de platos calientes se obtuvieron tableros de tamaño de partícula entre 0.25 y 1.00 mm que podrían emplearse en usos generales ya que alcanzan las propiedades mecánicas establecidas por las normas europeas para tal fin. Estos tableros poseen propiedades mecánicas superiores a las requeridas a los tableros aislantes usados en la construcción.

##### **Propiedades térmicas.**

Los tableros ensayados presentaron buenas propiedades aislantes térmicas puesto que alcanzaron unos valores medios de conductividad térmica de 0.062 W/K·m, resistencia térmica de 0.108 K·m<sup>2</sup>/W y gradiente térmico de 2950 K/m. Tras someterlos al test de Duncan se observó que no existieron diferencias significativas entre los paneles con distinto tipo de tamaño de partícula.

Si se comparan los valores obtenidos de conductividad térmica en los tableros ensayados con los de otros materiales de construcción según normas españolas, resulta que es mucho



menor que la de las maderas de igual densidad y algo mayor que la de los tableros de corcho y de madera de baja densidad. En consecuencia los tableros de partículas de raquis de palmera *Washingtonia* son buenos aislantes térmicos.

### **Propiedades acústicas.**

Tal y como se observa en la gráfica del ensayo con tableros de los tres tamaños de partícula, se obtiene un valor de absorción acústica alto para frecuencias muy bajas (con 50 Hz el coeficiente de absorción es 0.6), mientras que la absorción va disminuyendo para mayores frecuencias hasta alcanzar valores muy bajos. Las gráficas de los diferentes tipos de paneles parecen indicar que no hay diferencias significativas entre unos tipos de tableros y otros.

Los resultados obtenidos se han referido a las frecuencias centrales de bandas de octavas normalizadas, ya que son las más utilizadas en acústica arquitectónica y en la mayoría de trabajos y estudios consultados. Esto facilitó la posterior comparación de los resultados con los valores obtenidos para otros materiales de la misma densidad empleados habitualmente en construcción, y clasificarlos según indica la norma ISO 11654 (1997).

Los coeficientes de absorción acústica tienen un valor medio para frecuencias menores a 400 Hz. Para frecuencias mayores se obtienen valores bajos. Los resultados obtenidos indican que estos tableros son mejores absorbentes del ruido que las maderas y paneles contrachapados comerciales de igual densidad para bajas frecuencias, mientras que para frecuencias medias y altas se alcanzan valores similares. Según la norma ISO, para frecuencias menores de 250 Hz se podrían clasificar como categoría “D”, hasta 400 Hz categoría “E”, y para mayores frecuencias no se considerarían absorbentes acústicos.

Realizado el análisis estadístico se observó que no hay diferencias significativas respecto al tamaño de partícula utilizado. Esto parece ser debido a que los tableros son de densidad similar lo que indica una porosidad similar. En comparación con otros estudios con fibras de tallo de arroz (Yang et al. 2003), se observa igualmente que no influye el tamaño de partícula y que sólo depende de la densidad. En cambio Karlinasari et al. (2012) comprobaron que en paneles de bambú se obtenía mayor coeficiente de absorción acústica con menor tamaño de partícula. Zulkifli et al. (2009) comprobaron en paneles de fibra de coco que si se aumentaba el espesor de los paneles y se perforaban, aumentaba el coeficiente de absorción acústica.

El coeficiente de absorción acústica depende del espesor del panel. Los paneles ensayados tenían un espesor medio de 6.5 mm, por lo que aumentando el espesor mejorarían las propiedades de absorción acústica.

La pérdida de transmisión acústica (TL) es un parámetro expresado en dB que depende de la frecuencia y del espesor e indica en cuanto se atenúa la energía sonora incidente al atravesar un material. Los mayores valores de pérdida de transmisión acústica se obtuvieron a una frecuencia de 450 Hz alcanzando un valor de 50 dB, mientras que el valor de TL va disminuyendo a medida que aumenta la frecuencia hasta llegar a 30 dB. No se observó que hubiese influencia del tamaño de partícula. Estos resultados indicaron que los tableros de raquis de palmera washingtonia de 6.5 mm de espesor tienen buena capacidad de aislamiento acústico.

#### **4.2.2. CONCLUSIONES.**

1. Las propiedades mecánicas de los tableros fabricados con partículas de raquis de palmera Washingtonia dependen del tamaño de partícula. Con partículas de 0.25 a 1 mm se obtienen tableros tipo P1 para usos generales. Con el aumento de la densidad de los paneles se mejoró el módulo de ruptura (MOR) y la unión interna (IB), aunque para todos los casos se obtiene una resistencia a flexión mayor que el necesario en los tableros utilizados para aislamiento.
2. La conductividad térmica de estos tableros tiene un valor medio de 0.062 W/K·m y no depende del tamaño de las partículas. Se observa que este parámetro es mucho menor que el de las maderas de igual densidad y algo mayor que los tableros de corcho y láminas de fibra de madera de baja densidad.
3. Para frecuencias de 125 y 250 Hz estos tableros podrían clasificarse como tableros acústicos de clase D. Por otra parte, sus coeficientes de absorción de sonido fueron mayores para frecuencias inferiores a 400 Hz que los de los materiales a base de maderas comerciales y madera contrachapada. No hay diferencias significativas respecto al tamaño de partícula empleado en los tableros.
4. Los tableros fabricados con partículas de raquis de palmera Washingtonia tienen altos valores de pérdida de transmisión acústica (TL), aun siendo de pequeño espesor, lo que indica que tienen buena capacidad de aislamiento acústico. Las propiedades acústicas mejorarían aumentando el espesor de los tableros.

5. Debido a sus propiedades mecánicas, térmicas y acústicas, estos tableros podrían utilizarse como revestimientos y falsos techos.

6. Potencialmente, los aislantes basados en subproductos del raquis de la palmera washingtonia constituyen una alternativa económicamente viable y sostenible en comparación con los materiales comercializados en la actualidad.



### **4.3. PROPIEDADES ACÚSTICAS DE PANELES PREFABRICADOS DE RESIDUOS DE CAÑAS.**

El objetivo de este estudio fue determinar las cualidades de las partículas de caña común en la elaboración de tableros aislantes acústicos, evaluar dichos tableros mediante la obtención del coeficiente de absorción y la pérdida de transmisión acústica, así como analizar las propiedades mecánicas de los tableros comprobando la influencia del tamaño de partícula empleada en el tablero. Con la utilización de cañas se contribuiría al control y reciclaje de estos residuos y a una mejora ambiental.

El material utilizado fue caña común procedente de la limpieza del cauce del río Segura. Las cañas se dejaron secar durante 6 meses al aire. Posteriormente se desfibraron mediante una desfibradora de cuchillas y se clasificaron las partículas por las dimensiones, según atravesaban los tamices de una tamizadora vibradora.

Como aglutinante se empleó urea formaldehído (UF) comercial con un contenido en sólidos de 64% a 66%, en un 8% basado en el peso de las partículas de caña. Como endurecedor se utilizó un 4% de sulfato amónico.

#### **Proceso de fabricación.**

Se fabricaron 3 tipos de tableros con distinto tamaño de partículas (0.25 a 1 mm; 1 a 2 mm y 2 a 4 mm) obtenidas de las cañas. Las partículas se mezclaron mediante inyección con un 8% de UF en una amasadora volteadora de eje horizontal. Para elaborar los tableros se formó la manta en un molde de dimensiones 400 mm x 600 mm y se sometió en una prensa de platos calientes a una presión de 2.6 MPa y temperatura de 120° C durante 4 minutos. Los tableros formados se dejaron enfriar al aire en posición vertical durante 24 horas. Se elaboraron 8 tableros de cada tipología.

Posteriormente se cortaron las probetas con las dimensiones adecuadas que indican las normas europeas para cada uno de los ensayos de laboratorio.

### **4.3.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

#### **Microscopia electrónica de barrido**

La superficie de la caña común tiene haces vasculares de fibras compactos rodeados por fitolitos de sílice, alineados a lo largo de toda la superficie exterior de la caña, que le dan el aspecto brillante y satinado.

Los paneles con partículas de mayor tamaño tienen mucha porosidad y son tableros que fracturarán más fácilmente cuando las partículas pertenezcan a las capas superiores de la caña, donde se pueden distinguir los fitolitos. Todo parece indicar en la observación de las micrografías que los tableros con mayor tamaño de partículas tendrán menores densidades y peores propiedades mecánicas, ya que tienen una gran superficie de fitolitos que impiden una mejor cohesión de las partículas y con ello, se dificulta la adhesión de la resina UF. En los tableros con partículas de pequeño tamaño se observa que se tiene una menor porosidad salvo en las fibras de los haces vasculares que al ser de mayor dureza no se han comprimido.

#### **Propiedades físicas y mecánicas**

Para proceder a los ensayos de laboratorio, las probetas de los diferentes ensayos se mantuvieron a una atmósfera controlada con una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 65%.

Las densidades de los tableros oscilaron entre 719.6 y 817.8 kg·m<sup>-3</sup>, aumentando unos 50 kg·m<sup>-3</sup> aproximadamente de un tamaño de partícula al tamaño inmediatamente inferior. Con la presión aplicada se obtiene una densidad media, existiendo diferencias significativas entre los tableros con diferente tamaño de partícula, de forma que a mayor tamaño de partícula se obtienen menores densidades.

La resistencia a flexión (MOR) depende del tamaño de partícula. El MOR para partículas de 0.25 a 1 mm alcanza un valor de 17.2 N·mm<sup>-2</sup>, disminuyendo con partículas de mayor tamaño. El módulo de elasticidad en flexión (MOE) también depende del tamaño de partícula obteniendo valores de 1190.7 a 2300.3 N·mm<sup>-2</sup>. Los valores de cohesión interna (IB) no dependen del tamaño de partícula y se obtienen valores altos desde 1.0 hasta 1.2 N·mm<sup>-2</sup>.

Los tableros con partículas de 0.25 a 1 mm pueden tener un uso estructural, ya que alcanzan las propiedades mecánicas mínimas requeridas por las normas europeas (EN 312). Todos los tableros tienen propiedades mecánicas superiores a los tableros aislantes usados en la construcción.

### **Propiedades acústicas.**

Existen diferencias notables entre los tableros fabricados según el tamaño de las partículas.

Con los tres tamaños de partícula se obtiene un valor alto de absorción acústica para frecuencias muy bajas (con 50 Hz el coeficiente de absorción es 0.7), posteriormente va disminuyendo para frecuencias medias hasta valores bajos y nuevamente vuelve a aumentar. Hay diferencias significativas entre unos tipos de tableros y otros, especialmente en las bandas de frecuencias de 1250 a 5000 Hz. Realizado el análisis estadístico se puede concluir que hay diferencias significativas respecto al tamaño de partícula empleado, ya que cuando mayor es el tamaño de partícula, mayores son los coeficientes de absorción acústica. Esto puede ser debido a que los tableros tienen distintas densidades, lo que indica una porosidad diferente también observada en las micrografías. Pero es probable que también influya el tamaño de partícula, pues con la disminución de densidad entre las partículas de 0.25 a 1 mm y de 1 a 2 mm, las diferencias entre los valores de absorción acústica no son tan significativos como con los paneles de partículas 2 a 4 mm, teniendo una diferencia de densidad similar.

Según la norma EN ISO 11654, con valores de coeficiente de absorción acústica desde 0.30 hasta 0.55 serían absorbentes de clase D, con valores de 0.15 hasta 0.25 se clasificarían como absorbente clase E y para valores menores estarían sin clasificar. En general los tableros de caña de partículas de 2 a 4 mm podrían clasificarse como tableros absorbentes acústicos clase D, salvo para la frecuencia de 500 Hz.

Otros estudios con otras fibras vegetales coinciden con este trabajo en la disminución en el coeficiente de absorción del sonido para frecuencia medias y aumento de la absorción de sonido en el rango de frecuencia baja y alta. En cambio hay diversos resultados respecto sobre la influencia del tamaño de la partícula del tablero. Con fibras de tallo de arroz (Yang et al., 2003) observaron que no influye el tamaño de las partículas, e indican que solo depende de la densidad. En este trabajo se han observado mayores valores de

absorción acústica en partículas de mayor tamaño, en cambio Karlinasari et al., (2012) comprobaron que en paneles de bambú se obtenía mayor coeficiente de absorción acústica con menor tamaño de partícula.

Comparando los resultados obtenidos del coeficiente de absorción acústica con otros materiales empleados habitualmente en construcción, se comprobó que los tableros de partículas de 2 a 4 mm son mejores absorbentes del ruido que las maderas y paneles contrachapados comerciales de igual densidad. Los tableros con partículas de 1 a 2 mm son más absorbentes del sonido que los tableros de madera. Con los tableros de partículas de 0.25 a 1 mm se obtienen valores menores a partir de frecuencias de 125 Hz.

El coeficiente de absorción acústica depende del espesor del panel. Los paneles ensayados tenían un espesor medio de 6.7 mm, por lo que aumentando el espesor se mejorarían sus propiedades de absorción del sonido.

Otro indicador importante es la pérdida de transmisión, un parámetro expresado en dB que depende de la frecuencia e indica en cuanto se atenúa la energía sonora incidente al atravesar un material. La energía acústica perdida es mayor en los tableros de partículas de menor tamaño, siendo inferior la energía sonora que la energía incidente hasta 52 dB a una frecuencia de 400 Hz. La media de pérdida de transmisión acústica para los tableros de 0.25 a 1 mm es de 37.5 dB, para los tableros de 1 a 2 mm es de 31.5 dB y para los tableros de 2 a 4 mm es de 15 dB. La pérdida de transmisión acústica depende de la densidad del tablero y del tamaño de partícula. Esto nos indica que los tableros de caña pueden ser buenos aislantes acústicos ya que con partículas de menor tamaño se atenúa más el sonido y con partículas de mayor tamaño se aumenta el coeficiente de absorción acústica.

#### **4.3.2. CONCLUSIONES.**

1. Los tableros obtenidos eran de densidad media y ésta depende del tamaño de partícula, aumentando unos  $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  aproximadamente de un tamaño de partícula al tamaño inmediatamente inferior.
2. Según las propiedades mecánicas obtenidas, los tableros de partículas de 0.25 a 1 mm son tableros estructurales (EN 312, 2010), los de partículas de 1 a 2 mm son tableros de uso general y los de 2 a 4 mm sólo podrían utilizarse como aislantes (EN ISO 11654,

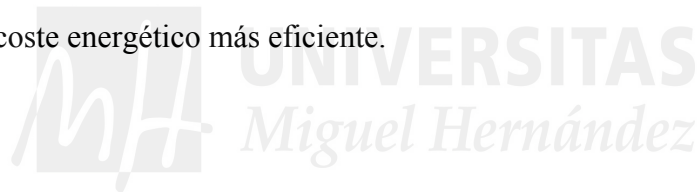
1997). Todos los tableros tenían un módulo de ruptura en flexión mayor que el necesario para los tableros para aislamiento.

3. Los tableros de caña con un tamaño de partícula de 2 a 4 mm son adecuados como material de aislamiento para absorción del sonido. Estos tableros ofrecen mejores valores que la madera en general y que los tableros contrachapados empleados en la construcción. Con partículas de menor tamaño hay mayor pérdida de energía sonora.

4. El tamaño de partícula del tablero es una variable importante ya que influye en todas las propiedades, tanto mecánicas como acústicas.

5. La elaboración de tableros de caña común tiene menor coste energético que los empleados habitualmente. El secado del material se ha realizado al exterior (sin consumo de energía) y la temperatura de la prensa (120°C) es menor que la temperatura utilizada en la fabricación de tableros industriales (180°C).

6. El uso de este residuo para producir tableros de partículas aglomeradas conllevaría un beneficio ambiental, evitaría la contaminación de los ríos y facilitaría la obtención de tableros con un coste energético más eficiente.





#### **4.4. EVALUACIÓN DE PANELES DE TRONCO DE PALMERA-CEMENTO.**

El objetivo de este estudio consistió en evaluar un nuevo composite con biomasa del tronco de la palmera canaria aglomerada con cemento y almidón, determinar las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de estos paneles, y averiguar si se produce degradación de las partículas de palmera a lo largo del tiempo. Dado que los tableros se consideran productos de alto valor ambiental y de larga duración, la fabricación de tales tableros podría ayudar a disminuir la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>, contribuyendo así a mejorar el medio ambiente.

##### **Proceso de fabricación.**

Los materiales empleados fueron cemento portland tipo CEM II/B-LL 32,5N, agua, partículas de tronco de palmera canaria y distintas proporciones de almidón de patata.

Los troncos de palmera canaria inicialmente se cortaron, después se trocearon y se mantuvieron al aire libre para su secado durante 6 meses. Posteriormente se trituraron en una desfibradora de cuchillas para conseguir partículas con un tamaño inferior a 0.25 mm y una humedad relativa del 54%, por lo que se dejaron secar al aire durante 3 meses más hasta una humedad relativa del 10%.

Como plastificante se utilizó almidón de patata de la industria alimentaria con un grado de pureza del 90%. Químicamente el almidón es una mezcla de dos polisacáridos muy similares que son la amilosa y la amilopectina. El almidón de patata contiene típicamente grandes gránulos ovales y gelifica a una temperatura de 58-65°C.

El proceso de fabricación consistió en mezclar en seco el cemento y las partículas de palmera con proporciones diferentes de almidón (0%, 5% y 10%), obteniendo 3 clases de paneles. Posteriormente se pulverizó (en porcentaje en peso en función del peso de las partículas de caña) 10% de agua sobre la masa, removiéndola durante 15 minutos para su homogeneización. La manta se formó en un molde de dimensiones 600 mm x 400 mm y se sometió a presión y calor en una prensa de platos calientes, con una presión de 2.6 MPa, una temperatura de 100°C durante 2 y 3 horas. Posteriormente, se dejaron los paneles enfriar en posición horizontal hasta su enfriamiento. Los tableros tenían unas dimensiones aproximadas de 600 x 400 x 6.7 mm. Una vez fríos, se cortaron las probetas para realizar los ensayos necesarios para la caracterización de las propiedades mecánicas,

físicas y térmicas de cada uno de los 6 tipos de tableros sometidos a estudio. Para cada tipo se elaboraron 10 paneles.

#### **4.4.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

##### **Densidad**

La densidad de los tableros disminuyó al añadir almidón desde  $1083.65 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  en los tableros sin almidón hasta  $1039.26 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  en los tableros con un 10% de almidón. Aunque en el análisis estadístico no se observa que la densidad dependa de la clase de tablero.

##### **Hinchazón en espesor (TS).**

En el ensayo de inmersión en agua de los tableros se observa que a las 2h las tres clases de tableros tienen un hinchamiento en espesor con valores similares (13%). A las 24 h, los tableros sin almidón tienen un TS de 29,8%, con un 5% de almidón un TS de 24.8% y con un 10% de almidón un TS de 23.1%. Aunque estadísticamente no se observa que dependa del almidón añadido, esto puede ser debido a que se utilizó poca cantidad. Habría que realizar nuevos ensayos añadiendo mayores cantidades de almidón, ya que los resultados parecen indicar que a mayor proporción de almidón menor es el TS a las 24h. El hinchamiento en espesor es muy alto, por lo que habría que añadir alguna cera para obtener valores menores.

##### **Absorción de agua después de inmersión (WA).**

El comportamiento de las tres clases de tableros sobre la absorción de agua después de inmersión (WA) es similar a las 2h ( $WA \approx 30\%$ ) y a las 24 h ( $WA \approx 51\%$ ), no habiendo diferencias significativas entre las tres clases de tableros. En los tableros con un 10% de almidón se observa que hay mayor desviación estándar. Este dato puede indicar que en la elaboración del tablero todo el almidón no ha gelificado, por tanto unas probetas han absorbido más agua que otras en el ensayo.

##### **Propiedades mecánicas.**

Los valores de cohesión interna (IB) son muy altos. Los tableros con un 5% de almidón alcanzan valores medios de  $0.86 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  y los que no contenían almidón  $0.58 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , existiendo una gran desviación. Este aspecto puede ser debido a la competencia por el

agua entre el cemento, las partículas y el almidón. El análisis estadístico indica que no hay diferencias significativas entre las tres clases de tableros.

Los resultados del ensayo a flexión a los 8, 28 y 90 días indicaron que los 6 tipos de tableros aumentaron los valores del módulo de rotura en flexión (MOR) y el módulo de elasticidad en flexión (MOE) a lo largo del tiempo, lo que parece indicar que la biomasa de palmera tolera la alcalinidad del cemento. Los valores de MOR y MOE dependen de la clase de tablero. Los tableros clase B con un 5% de almidón tenían a los 28 días un MOR de  $15.76 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , y un MOE de  $1872 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , en cambio sin almidón (clase A) el valor de MOR era de  $13.61 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , y el MOE  $1799 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ . En los tableros de clase C, aunque se tienen buenos valores de MOR y MOE, se intuye que todo el almidón no ha gelificado y que ha habido competencia por el agua entre las partículas de palmera, el cemento y el almidón.

El tiempo que los tableros estuvieron en la prensa parece que influye en las propiedades a lo largo del fraguado. El tiempo de prensado fue de 2 y 3 horas y los tableros de maderamiento industriales permanecen 8 horas. Se estima que a mayor tiempo de prensado mejores son las propiedades mecánicas obtenidas, aunque esta afirmación habrá de confirmarse con nuevos ensayos donde se contemple un proceso de elaboración con mayor tiempo en la prensa.

Las tres clases de tableros ensayadas pueden clasificarse como tableros tipo P2 (EN 312, 2010), para usos generales, incluso para la utilización para muebles. Para poder tener mayores prestaciones y clasificarse como estructurales habría que disminuir el TS.

Otras fibras vegetales se degradan con el cemento, en cambio parece que a la biomasa del tronco de la palmera canaria tolera la alcalinidad, ya que aumenta la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad a los 90 días de fraguado. En paneles de morteros de cemento con fibras de sisal y banano, Savastano et al., (2009) concluyeron que las reducciones MOR y MOE producidos al año en ambiente húmedo, podrían atribuirse a una microfisuración progresiva. Por lo que para poder confirmar que las partículas de palmera canaria no se degradan con cemento habría que realizar ensayos al año de fraguado.

Kriker et al., (2008) utilizaron fibras de raquis de palmera datilera con tratamientos alcalinos como refuerzo del hormigón y concluyeron que el rendimiento era muy bajo. En este trabajo se han utilizado partículas de tronco de palmera canaria sin tratamientos,

con muy poca cantidad de cemento (20%), por lo que la alcalinidad de la mezcla era menor que en los hormigones.

Según Vo and Navard, (2016) los azúcares solubles de las fibras vegetales tienen efectos adversos sobre las prestaciones del hormigón. La palmera canaria tiene un gran contenido de azúcares, sin embargo, en este ensayo no se aprecian esos efectos, por tanto, puede depender del tipo de azúcares de la biomasa vegetal.

Con tratamientos con tetrahidruro de silicio, Bilba and Arsene, (2008) destacan que el bagazo de caña de azúcar toleraba la alcalinidad del cemento. Ferrández-García et al., (2015) indican que el contenido de silicio de la caña común produce un efecto beneficioso para su durabilidad en morteros de cemento. El tronco de palmera canaria contiene silicio, luego puede ser que se favorezca el que no haya degradación de las partículas.

### **Propiedades térmicas.**

No hay diferencias entre las tres clases de tableros que tienen una conductividad térmica media de  $0.054 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Este valor indica que son buenos aislantes térmicos.

En las investigaciones consultadas sobre conductividad térmica de paneles de fibras vegetales, Agoudjil et al., (2011) con paneles de raquis de palmera datilera obtuvieron una conductividad térmica de  $0,083 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , Behzad and Sain, (2007) con paneles de cáñamo  $\lambda = 0.111 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  y Kalaprasad et al., (2000) con paneles de sisal  $\lambda = 0,070 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Los paneles de palmera canaria y cemento tienen menor conductividad térmica que otras fibras vegetales que han sido propuestas en otros trabajos para su utilización como materiales aislantes térmicos.

Los tableros tienen una resistencia térmica media de  $0.105 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$  y no hay diferencias significativas entre las tres clases. Los paneles de palmera-cemento poseen una resistencia térmica mayor que las maderas en general.

Los valores térmicos obtenidos indican que los tableros de partículas de palmera canaria-cemento se comportan como buenos aislantes.

#### 4.4.2. CONCLUSIONES

1. Los resultados demuestran que se pueden obtener con pequeñas cantidades de cemento (mediante un proceso de calor y presión), placas de cemento-palmera canaria con buenas propiedades mecánicas y térmicas.
2. A lo largo del tiempo la resistencia a flexión aumenta, por lo que parece que las partículas del tronco de la palmera canaria toleran la alcalinidad del cemento. Con un 5% de almidón como plastificante, aumentan las propiedades mecánicas (MOR y MOE). El almidón no influye significativamente en el resto de propiedades de los paneles.
3. Las tres clases de tableros obtenidos tienen las propiedades adecuadas para su uso general, incluso en aplicaciones para muebles, destacando las bajas conductividades térmicas logradas que abriría las puertas para su empleo como aislantes térmicos.
4. Sería necesario seguir investigando sobre las distintas proporciones de partículas de palmera canaria, cemento, agua y almidón, y mayor tiempo en la prensa de platos calientes para conseguir un producto con menor hinchamiento en espesor después de inmersión en agua.
5. Las partículas de tronco de palmera canaria se considera una buena alternativa para la fabricación de placas de fibras con cemento. El uso de los residuos de palmera podría ser una buena aplicación para el reciclaje y obtención de un nuevo material "verde" que produciría un beneficio industrial y ambiental.



---

## 5. BIBLIOGRAFÍA.

- Agoudjil, B., Benchabane, A., Boudenne, A., Ibos, L. and Fois, M. (2011). Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood. *Energy and buildings*, 43(2), 491-497.
- Akgül, M. and Tozluoğlu, A. (2008). Utilizing peanut husk (*Arachis hypogaea* L.) in the manufacture of medium-density fibreboards. *Bioresource Technology*, 99 (13), 5590-5594.
- Alma, M.H., Kalaycioğlu, H., Bektaş, I. and Tutus, A. (2005). Properties of cotton carpel-based particleboards. *Industrial Crops and Products*, 22 (2), 141-149.
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F. and Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1-17. DOI:10.1016/j.susmat.2015.05.002.
- Ashori, A. and Nourbakhsh, A. (2008). Effect of press cycle time and resin content on physical and mechanical properties of particleboard panels made from the underutilized low-quality raw materials. *Industrial crops and products*, 28(2), 225-230.
- Baskaran, M., Sudesh, K., Sulaiman, O., Arai, T., Kosugi, A., Mori, Y. and Hashim, R. (2012). Some properties of particleboard manufactured from oil palm trunk using polyhydroxyalkanoates. *JIRCAS Working Report*, (73), 60-63.
- Behzad, T. and Sain M. (2007). Measurement and prediction of thermal conductivity for hemp fiber reinforced composites. *Polymer Engineering and Science*, 47 (7), 977-983.
- Belkharouch, D. and Chaker, A. (2016). Effects of moisture on thermal conductivity of the lightened construction material. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(17), 7119-7125. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.01.160.
- Bilba, K., Arsène, M. A. and Ouensanga, A. (2003). Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. *Cement and concrete composites*, 25(1), 91-96.

- Bilba, K. and Arsene, M.A. (2008). Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites. *Composites Part A*, 39, 1488-95.
- Boquillon, N., Elbez, G. and Schonfeld, U. (2004). Properties of wheat straw particleboards bonded with different types of resin. *J Wood Sci.* 50(3), 230–235. DOI 10.1007/s10086-003-0551-9
- Bouajila, J., Limare, A., Joly, C. and Dole, P. (2005). “Lignin plasticization to improve binderless fiberboard mechanical properties,” *Polym. Eng. Sci.* 45 (6), 809–816. DOI: 10.1002/pen. 20342.
- Chakraborty, S., Kundu, S.P., Roy, A., Adhikari, B. and Majumder, S.B. (2013). Polymer modified jute fibre as reinforcing agent controlling the physical and mechanical characteristics of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 49, 214-222.
- Chandra, S. and Flodin, P. (1987). Interactions of polymers and organic admixtures on Portland cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 17(6), 875-890.
- Chikhi, M. (2016). Young’s modulus and thermophysical performances of bio-sourced materials based on date palm fibers. *Energy and Buildings*, 129, 589-597. DOI: 10.1016/j.enbuild. 2016.08.034.
- Ciannamea, E. M., Stefani, P. M. and Ruseckaite, R. A. (2010). Medium-density particleboards from modified rice husks and soybean protein concentrate-based adhesives. *Bioresource Technology*, 101(2), 818-825.
- Çöpür, Y., Güler, C., Akgül, M. and Taşçioğlu, C. (2007). Some chemical properties of hazelnut husk and its suitability for particleboard production. *Building and Environment*, 42 (7), 2568-2572.
- Cosereanu, C. N., Brenci, L. M. N., Zeleniuc, O. I. and Fotin, A. N. (2014). Effect of particle size and geometry on the performance of single-layer and three-layer particleboard made from sunflower seed husks. *BioResources*, 10(1), 1127-1136.
- Dewacker, D.R. and Mcad, B. (1996). Cement mortar systems using blends of polysaccharides and cold-water-soluble unmodified starches, US Patent, 5, 575, 840.
- El Mansouri, N. E., Pizzi, A. and Salvadó, J. (2007). Lignin-based wood panel adhesives without formaldehyde. *European Journal of Wood and Wood Products*, 65(1), 65-70.



- EN 310. (1993). Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 312. (2010). Wood-based panels. Especificaciones. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 317. (1993). Particleboards and fibreboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 319. (1993). Particleboards and fibreboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 323. (1993). Wood-based panels. Determination of density. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN ISO 10534-2. (2002). Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes - Part 2: Transfer-function method. (ISO 10534-2:1998). European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN ISO 11654. (1997). Acoustics. Sound absorbers for use in buildings. Rating of sound absorption. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN ISO 11925-2 (2010). Reaction to fire tests – ignitability of products subjected to direct impingement of flame – Part 2: Single-flame source test. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 12667. (2001). Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 13501-1:2007 + A1 (2010). Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using data from reaction to fire tests. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Fan, M., Ndikontar, M. K., Zhou, X. and Ngamveng, J. N. (2012). Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. *Construction and Building Materials*, 36, 135-140.

- Fatima, S. and Mohanty A.R. (2011). Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Applied Acoustics*, 72: 108–114.
- Felby, C., Pedersen, L. S. and Nielsen, B. R. (1997). Enhanced auto adhesion of wood fibers using phenol oxidases. *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 51(3), 281-286.
- Faustino, J., Pereira, L., Soares, S., Cruz, D., Paiva, A., Varum, H. and Pinto, J. (2012). Impact sound insulation technique using corn cob particleboard. *Construction and Building Materials*, 37, 153-159. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.064.
- Ferrández-García, C. E., Andreu-Rodríguez, J., Ferrández-García, M T., Ferrández-Villena, M. and García-Ortuño, T. (2012). Panels made from giant reed bonded with non-modified starches. *BioResources*, 7(4), 5904-5916.
- Ferrandez-García, M. T., Ferrandez-García, C. E., Andreu-Rodríguez, J., Ferrandez-Villena, M. and Garcia-Ortuño, T. (2013). The suitability of utilising cotton stalk for low cost binderless panels. In *Actual Tasks on Agricultural Engineering. Proceedings of the 41. International Symposium on Agricultural Engineering*, Opatija, Croatia, 19-22 February 2013 (pp. 383-387). University of Zagreb Faculty of Agriculture.
- Ferrández-García, A., García-Ortuño, T., Ferrández-García, M.T., Ferrández-Villena, M., Rodríguez, J. A. and Ferrández-García, C.E. (2015). Valorization of vine prunings as raw material in the manufacture of particleboard. *Proceeding, International Conference Sustainable Materials Science and Technology*. Paris (France), 15-17 July 2015. 228
- Ferrández-García, M.T., García-Ortuño, T., Ferrández-Villena, M., Andreu-Rodríguez, J. and Ferrández-García, C.E. (2015). Estudio de las propiedades de placas de cemento mejoradas con almidón. *VII Congreso Ibérico de Agroingeniería. Retos de la nueva agricultura mediterránea* ISBN 978-84-16024-30-8. Editor: Universidad Miguel Hernández. 387-389.
- Ferrández-García, C.E., García-Ortuño, T., Andreu-Rodríguez, J., Ferrández-Villena, M. and Ferrández- García M. T. (2015). Mechanical Properties of a Cement Mortar Reinforced with Arundo donax L. Reeds. *International Journal of Civil and Structural Engineering– IJCSE*, 2(1), 305-308.

- Ferrández-García, A., Ferrández-García, M.T., Ferrández-Villena, M., Andreu-Rodríguez, J., García-Ortuño, T. and Ferrández-García, C.E. (2015). The influence of Starch in Canary Island date palm trunk panels without synthetic adhesive. Proceeding, International Conference Sustainable Materials Science and Technology. Paris (France), 15-17 July 2015. 223.
- Gao, Z., Wang, X. M., Wan, H. and Brunette, G. (2011). Binderless panels made with black spruce bark. *BioResources*, 6(4), 3960-3972.
- García-Ortuño, T., Andreu-Rodríguez, J., Ferrandez-Garcia, M. T., Ferrandez-Garcia, C. E., Medina, E., Paredes, C. and Moreno-Caselles, J. (2013). Evaluation of the different uses of *Washingtonia robusta* pruning waste. *Communications in soil science and plant analysis*, 44(1-4), 623-631.
- Ghalehno, M. D., Nazerian, M. and Bayatkashkooli, A. (2011). Influence of utilization of bagasse in surface layer on bending strength of three-layer particleboard. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(4), 533-535.
- Ghosh, S. K., Nayak, L. K. and Bhattacharya, S. K. (2006). Physico-mechanical Properties of Date Palm Leaf Particle Board. *Journal of Agricultural Engineering*, 43(4), 89-91.
- Guler, C., Bektas, I. and Kalaycioglu, H. (2006). The experimental particleboard manufacture from sunflower stalks (*Helianthus annuus* L.) and Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.). *Forest Products Journal*, 56 (4), 56-60.
- Guler, C., Copur, Y. and Tascioglu, C. (2008). The manufacture of particleboards using mixture of peanut hull (*Arachis hypogaea* L.) and European Black pine (*Pinus nigra* Arnold) wood chips. *Bioresource Technology*, 99 (8), 2893-2897.
- Guntekin, E. and Karakus, B. (2008). Feasibility of using eggplant (*Solanum melongena*) stalks in the production of experimental particleboard. *Industrial Crops and Products*, 27(3), 354-358.
- Gupta, G., Yan, N. and Feng, M. W. (2011). Effects of pressing temperature and particle size on bark board properties made from beetle-infested lodgepole pine (*Pinus contorta*) barks. *Forest Products Journal*, 61(6), 478-488.

- Gürü, M., Tekeli, S. and Bilici, I. (2006). Manufacturing of urea-formaldehyde-based composite particleboard from almond shell. *Materials and Design*, 27 (10), 1148-1151.
- Halvarsson, S., Edlund, H. and Norgren, M. (2010). Manufacture of high-performance rice straw fibreboards. *Ind. Eng. Chem. Res*, 49(3), 1428–35. DOI:10.1021/ie901272q
- Han, G. P., Umemura, K., Zhang, M., Honda, T. and Kawai, S. (2001). Development of high-performance UF-bonded reed and wheat straw medium-density fiberboard. *J. Wood Sci.* 47 (5), 350–355. DOI: 10.1007/BF00766784.
- Hashim, R., Saari, N., Sulaiman, O., Sugimoto, T., Hiziroglu, S., Sato M. and Tanaka, R. (2010) Effect of particle geometry on the properties of binderless particleboard manufactured from oil palm trunk. *Material and Design*, 31(9), 4251–4257
- Hashim, R., Nadhari, W. N. A. W., Sulaiman, O., Sato, M., Hiziroglu, S., Kawamura, F. and Tanaka, R. (2012). Properties of binderless particleboard panels manufactured from oil palm biomass. *BioResources*, 7(1), 1352-1365.
- Hervillard, T., Cao, Q., and Laborie, M-PG. (2007). Improving water resistance of wheat straw based medium density fiberboards bonded with aminoplastic and phenolic resins. *BioResources* 2 (2), 148–56.
- Hüttermann, A., Mai, C. and Kharazipour, A. (2001). Modification of lignin for the production of new compounded materials. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 55(4), 387-394.
- Iskanderani, F. I. (2008). Physical properties of particleboard panels manufactured from phoenix dactylifera-L (date palm) mid-rib chips using urea formaldehyde binder. *International Journal of Polymeric Materials*, 57(10), 979-995.
- Juliana, A.H., Paridah, M.T., Rahim, S., Azowa, I.N. and Anwar, U.M.K. (2012). Properties of particleboard made from kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) as function of particle geometry. *Materials and Design*, 34, 406-411.
- Kalaprasad, G., Pradeep, P., Mathew, G., Pavithran, C. and Thomas, S. (2000). Thermal conductivity and thermal diffusivity analyses of low-density polyethylene composites reinforced with sisal, glass and intimately mixed sisal/glass fibres, *Composites Science and Technology*, 60 (16), 2967–2977.

- Kalaycioglu, H. and Nemli, G. (2006). Producing composite particleboard from kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) stalks. *Industrial Crops and Products*, 24 (2), 177-180.
- Karlinasari, L., Hermawan, D., Maddu, A., Bagus, M., Lucky, I. K., Nugroho, N. and Hadi, Y. S. (2012). Acoustical properties of particleboards made from betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) as building construction material. *BioResources*, 7(4), 5700-5709. DOI: 10.15376/biores.7.4.5700-5709
- Kerdthongmee, P., Saleh, A., Eadkhong, T. and Danworaphong, S. (2016). Investigating Sound Absorption of Oil Palm Trunk Panels Using One-microphone Impedance Tube. *BioResources*, 11(4), 8409-8418. DOI: 10.15376/biores.11.4.8409-8418
- Kharazipour, A., Hüttermann, A. and Luedemann, H. D. (1997). Enzymatic activation of wood fibres as a means for the production of wood composites. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 11(3), 419-427.
- Khidir, E.A., Nik Mohamed, N.A., Nor, M., Jailani, M., Tahir, M F.M., Zulkifli, R. and Nuawi, M. Z. (2014). Effect of density on the sound absorption of date palm fibers. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 663, pp. 437-441). Trans Tech Publications. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.663.437.
- Kim, S. (2009). Incombustibility, physico-mechanical properties and TVOC emission behavior of the gypsum–rice husk boards for wall and ceiling materials for construction. *Industrial crops and products*, 29(2), 381-387.
- Kriker, A., Bali, A., Debicki, G., Bouziane, M. and Chabannet, M. (2008). Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates. *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 639-648.
- Kües, U., Bohn, C., Euring, M., Müller, C., Polle, A. and Kharazipour, A. (2007). 18. Enzymatically Modified Wood in Panel Board Production. *Wood Production, Wood Technology, and Biotechnological Impacts*, 433.
- Kurokochi, Y. and Sato, M. (2015). Properties of binderless board made from rice straw: The morphological effect of particles. *Industrial Crops and Products*, 69, 55-59. DOI:10.1016/j.indcrop.2015.01.044.
- Lee, B.H., Kim, H.S., Kim, S., Kim, H.J., Lee, B., Deng, Y., Feng, Q. and Luo, J. (2011). Evaluating the flammability of wood-based panels and gypsum particleboard using a

- cone calorimeter. *Construction and Building Materials*, 25, 3044-3050. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.01.004
- Lee, H. J., Ahn, C. S., Kim, J. H., Yoo, H. J., Han, Y. S., & Song, K. H. (2004). Characteristics of kenaf/rayon fabrics. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 28(9/10), 1282-1291.
- Leiva, P., Ciannamea, E., Ruseckaite, R.A. and Stefani, P.M. (2007). Medium-Density Particleboards from Rice Husks and Soybean Protein Concentrate. *J. of Applied Polymer Science*, 106, 1301-1306.
- Li, X., Li, Y., Zhong, Z., Wang, D., Ratto, J. A., Sheng, K. and Sun, X. S. (2009). Mechanical and water soaking properties of medium density fiberboard with wood fiber and soybean protein adhesive. *Bioresource Technology*, 100(14), 3556-3562.
- Li, X.J., Cai, Z.Y., Winandy, J.E. and Basta, A.H. (2010). Selected properties of particleboard panels manufactured from rice straws of different geometries. *Bioresource Technology*, 101(12), 4662–4666. doi:10.1016/j.biortech.2010.01.053
- Lindström, T. and Westman, L. (1980). The colloidal behaviour of kraft lignin. III. Swelling behaviour and mechanical properties of kraft lignin gels. *Colloid Polym. Sci.* 258, 390–397.
- Lü, X., Lu, T., Lipponen, O. and Viljanen, M. (2013). “Title of chapter,” *Insulation Materials Made with Vegetable Fibres*. In *Nearly Zero Energy Building Refurbishment* (pp. 411-455). Springer London.
- Mancera, C., El-Mansouri, N., Vilaseca, F., Ferrando, F. and Salvado, J. (2011). The effect of lignin as natural adhesive on the physico-mechanical properties of vitis vinifera fiberboards. *BioResources* 6(3), 2851-2860.
- Mahjoub, R., Yatim, JM., Mohd Sam, A.R. and Hashemi, S.H. (2014). Tensile properties of kenaf fiber due to various conditions of chemical fiber surface modifications. *Construction and Building Materials*, 55,103-13.
- Mekhermeche, A., Kriker, A. and Dahmani, S. (2016). Contribution to the study of thermal properties of clay bricks reinforced by date palm fiber. In M. Aillerie, C. T. Salame, and P. Papageorgas (Eds.), *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1758, No. 1, p. 030004). AIP Publishing. DOI: 10.1063/1.4959400

- Mo, X., Cheng, E., Wang, D. and Sun, X. S. (2003). Physical properties of medium-density wheat straw particleboard using different adhesives. *Industrial Crops and Products*, 18(1), 47-53.
- Mobarak, F., Fahmy, Y., & Augustin, H. (1982). Binderless lignocellulose composite from bagasse and mechanism of self-bonding. *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 36(3), 131-136.
- Moubarik, A., Allal, A., Pizzi, A., Charrier, F. and Charrier, B. (2010) Preparation and mechanical characterization of particleboard made from maritime pine and glued with bio-adhesives based on cornstarch and tannins. *Maderas Ciencia y Tecnología*, 12(3), 189-197.
- Müller, C. M., Laurindo, J. B. and Yamashita, F. (2009). Effect of cellulose fibers on the crystallinity and mechanical properties of starch-based films at different relative humidity values. *Carbohydrate Polymers*, 77(2), 293-299.
- Nikvash, N., Euring, M. and Kharazipour, A. (2013). Use of MUF resin for improving the wheat protein binder in particleboards made from agricultural residues. *Journal of Materials Science Research*, 2(2), 126.
- Nemli, G. and Kalaycıoğlu, H. (2001). Suitability of date palm (*Phoenix dactylifera*) branches for particleboard production. *European Journal of Wood and Wood Products*, 59, 411-412.
- Ntalos, G. A. and Grigoriou, A. H. (2002). Characterization and utilisation of vine prunings as a wood substitute for particleboard production. *Industrial Crops and Products*, 16(1), 59-68.
- Okuda, N. and Sato, M. (2006). Water resistance properties of kenaf core binderless boards. *Journal of Wood Science*, 52(5), 422-428.
- Onuaguluchi, O. and Banthia, N. (2016). Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 68, 96-108.
- Papadopoulos, A.N., Traboulay, E.A. and Hill, C.A.S. (2002). One layer experimental particleboard from coconut chips (*Cocos nucifera* L.). *Holz als Roh - und Werkstoff*, 60 (6), 394-396.

- Papadopoulos, A. N., Hill, C. A. S., Gkaraveli, A., Ntalos, G. A. and Karastergiou, S. P. (2004). Bamboo chips (*Bambusa vulgaris*) as an alternative lignocellulosic raw material for particleboard manufacture. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 62(1), 36-39.
- Park, J., Seyama, T., Shiroma, R., Ike, M., Srichuwong, S., Nagata, K., Arai-Sanoh, Y., Kondo, M. and Tokuyasu, K. (2009). Efficient recovery of glucose and fructose via enzymatic saccharification of rice straw with soft carbohydrates. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 73(5) 1072-1077. DOI: 10.1271/bbb.80840.
- Ping, L., Pizzi, A., Guo, Z. D. and Brosse, N. (2011). Condensed tannins extraction from grape pomace: characterization and utilization as wood adhesives for wood particleboard. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 907-914.
- Pintiaux, T., Viet, D., Vandenbossche, V. Rigal, L. and Rouilly, A. (2015). Binderless materials obtained by termo-compressive processing of lignocellulosic fibers: A comprehensive Review. *Bioresources* 10(1), 1915-1963.
- Quintana, G., Velasquez, J., Betancourt, S. and Ganan, P. (2009). Binderless fiberboard from steam exploded banana bunch. *Industrial crops and products*, 29(1), 60-66.
- Ramakrishna, G. and Sundararajan, T. (2005). Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 575-582.
- Reglamento (UE) nº 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo de 9 de marzo de 2011 por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo.
- Rials, T.G. and Wolcott, M.P., (1997). Chapter 4: "Physical and mechanical properties of agro-based fibers," In: Rowell, R.M. et al. (Eds.), *Paper and Composites from Agro-Based Resources*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Riquelme-Valdes, J., Ramirez, E., Contreras, D., Freer, J. and Rodriguez, J. (2008). Fiberboard manufactured without resin using the Fenton reaction. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 53(4), 1722-1725.
- Roma, L. C., Martello, L. S. and Savastano, H. (2008). Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers.



- 
- Construction and Building Materials*, 22(4), 668-674. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.10.001
- Sain, M. and Panthapulakkal, S. (2006). Bioprocess preparation of wheat straw fibers and their characterization. *Industrial Crops and Products*, 23(1), 1-8.
- Sampathrajan, A., Vijayaraghavan, N. C. and Swaminathan, K. R. (1991). Acoustic aspects of farm residue-based particle boards. *Bioresource technology*, 35(1), 67-71. DOI: 10.1016/0960-8524(91)90083-V.
- Sauter S.L. (1996). Developing composites from wheat straw. In: Proceedings of the 30th international symposium of Washington State University on particleboard/composite materials. 197–214.
- Savastano, H., Santos, S.F., Radonjic, M. and Soboyejo, W. O. (2009). Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 31(4), 232-243.
- Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A. and Chotard, T. (2008). Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: influence of the fibre/matrix interaction. *Journal of the European Ceramic Society*, 28,183-92.
- Sen, T. and Reddy, H. J. (2011). Application of sisal, bamboo, coir and jute natural composites in structural upgradation. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 2 (3), 186.
- Shao, S., Jin, Z., Wen, G., & Iiyama, K. (2009). Thermo characteristics of steam-exploded bamboo (*Phyllostachys pubescens*) lignin. *Wood science and technology*, 43(7-8), 643-652.
- Shen, K. C. (1986). U.S. Patent No. 4,627,951. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Sudin, R. and Swamy, N. (2006). Bamboo and wood fibre cement composites for sustainable infrastructure regeneration. *Journal of materials science*, 41(21), 6917-6924.
- Suzuki, S., Shintani, H., Park, S. Y., Saito, K., Laemsak, N., Okuma, M., and Iiyama, K. (1998). Preparation of binderless boards from steam exploded pulps of oil palm (*Elaeis guineensis* Jaxq.) fronds and structural characteristics of lignin and wall

- polysaccharides in steam exploded pulps to be discussed for self-bindings. *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 52(4), 417-426.
- Tabarsa, T., Ashori, A. and Gholamzadeh, M. (2011). Evaluation of surface roughness and mechanical properties of particleboard panels made from bagasse. *Composites Part B: Engineering*, 42(5), 1330-1335.
- Tao, Y., Li, P. and Cai, L. (2016). Effect of Fiber Content on Sound Absorption, Thermal Conductivity, and Compression Strength of Straw Fiber-filled Rigid Polyurethane Foams. *BioResources*, 11(2), 4159-4167. DOI: 10.15376/biores. 11.2.4159-4167.
- Tondi, G., Wieland, S., Wimmer, T., Schnabel, T. and Petutschnigg, A. (2012). Starch-sugar synergy in wood adhesion science: basic studies and particleboard production. *Eur. J. Wood products*, 70, 271-278.
- Umemura, K., Sugihara, O. and Kawai, S. (2013). Investigation of a new natural adhesive composed of citric acid and sucrose for particleboard. *Journal of wood science*, 59(3), 203-208.
- Umemura, K., Sugihara, O. and Kawai, S. (2015). Investigation of a new natural adhesive composed of citric acid and sucrose for particleboard II: Effects of board density and pressing temperature. *Journal of wood science*, 61(1), 40-44.
- Van Dam, J. E., van den Oever, M. J. and Keijsers, E. R. (2004). Production process for high density high performance binderless boards from whole coconut husk. *Industrial crops and products*, 20(1), 97-101.
- Vo, L.T. and Navard, P. (2016). Treatments of plant biomass for cementitious building materials – A review. *Construction and Building Materials*, 121,161-76.
- Yan, L., Kasal, B. and Huang, L. (2016). A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. *Composites Part B: Engineering*, 92: 94-132.
- Wang, Z., Gu, Z., Hong, Y., Cheng, L. and Li, Z. (2011). Bonding strength and water resistance of starch-based wood adhesive improved by silica nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 86, 72-76.

- Wellons, J. D. and Krahmer, R. L. (1973). Self bonding in bark composites. *Wood science*, 6(2), 112-122.
- Widsten, P. (2002). Oxidative activation of wood fibers for the manufacture of medium-density fiberboard (MDF). Helsinki University of Technology.
- Widyorini, R., Xu, J., Umemura, K. and Kawai, S. (2005). Manufacture and properties of binderless particleboard from bagasse I: effects of raw material type, storage methods, and manufacturing process. *Journal of Wood Science*, 51(6), 648-654.
- Wu, Y., Sha, T., Zhao, Z., He, Z. and Yi, S. (2016). Influence of Different Pretreatments on the Acoustic Properties of Dawn Redwood (*Metasequoia glyptostroboides* Hu et Cheng). *BioResources*, 11(1), 2734-2743. DOI: 10.15376/biores.11.1.2734-2743.
- Xu, J., Sugawara, R., Widyorini, R., Han, G. and Kawai, S. (2004). Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *Journal of Wood Science*, 50 (1), 62-67.
- Yan, L., Kasal, B. and Huang, L. (2016). A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. *Composites Part B: Engineering*, 92, 94-132.
- Yang, H. S., Kim, D. J. and Kim, H. J. (2003). Rice straw–wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. *Bioresource Technology*, 86(2), 117-121. DOI: 10.1016/S0960-8524(02)00163-3.
- Yang, W. and Rånby, B. (1996). Radical living graft polymerization on the surface of polymeric materials. *Macromolecules*, 29(9), 3308-3310.
- Yeniocak, M., Goktas, O., Erdil, Y.Z., Ozen, E. and Alma, M.H. (2014). Investigating the use of vine pruning stalks (*Vitis vinifera* l. cv. Sultani) as raw material for particleboard manufacturing. *Wood Research*, 59(1), 167-176.
- Yeniocak, M., Goktas, O., Ozen, E., Gecgel, A. and AŞ, O.Y.T. (2016). Improving mechanical and physical properties of particleboard made from. *Wood Research*, 61(2), 265-274.
- Yorozu, T., Hirano, M., Oka, K. and Tagawa, Y. (1987). Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface. *IEEE translation journal on magnetics in Japan*, 2(8), 740-741.

- Zhang, D., Zhang, A. and Xue,L. (2015). A review of binderless fiberboards and its self-bonding mechanism. *Wood Science and Technology*, 49(4), 661-679. DOI: 10.1007/s00226-015-0728-6.
- Zhang, D. F., Ju, B. Z., Zhang, S. F., He, L. and Yang, J. Z. (2007). The study on the dispersing mechanism of starch sulfonate as a water-reducing agent for cement. *Carbohydrate Polymers*, 70(4), 363-368.
- Zhang, L. and Hu, Y. (2014). Novel lignocellulosic hybrid particleboard composites made from rice straws and coir fibers. *Materials & Design*, 55, 19-26.
- Zhou, X., Zheng, F., Li, H. and Lu, CH. (2010). An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings*, 42, 1070-1074.
- Zhu, X., Kim, B. J., Wang, Q. and Wu, Q. (2014). Recent advances in the sound insulation properties of bio-based materials. *BioResources*, 9(1), 1764-1786. DOI: 10.15376/biores.9.1.1764-1786
- Zulkifli, R., Nor, M.J.M., Ismail, A.R., Nuawi, M.Z. and Tahir, M.F.M. (2009). Effect of perforated size and air gap thickness on acoustic properties of coir fibre sound absorption panels. *European Journal of Scientific Research*, 28(2), 242-252.

**ANEXO: PUBLICACIONES**





**PUBLICACIÓN 1: FIRE-RESISTANCE, PHYSICAL, AND  
MECHANICAL CHARACTERIZATION OF RICE  
STRAW BINDERLESS PARTICLEBOARDS**







# FIRE-RESISTANCE, PHYSICAL, AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF RICE STRAW BINDERLESS PARTICLEBOARDS

Cristina C. Ferrandez-Garcia; Teresa Garcia-Ortuño, Maria T. Ferrandez-Garcia, Manuel Ferrandez-Villena, and Clara. E. Ferrandez-Garcia \*

Binderless rice straw particleboards were successfully manufactured by hot pressing at low temperature (110°C) and pressure (2.6 MPa), using a three step process. Two particle sizes were used: 0.25-1 mm and 0.25 mm. Three pressing times (15, 30, and 60 min) were studied. 18 types of boards were made with five repetitions. The physical and mechanical properties were assessed in accordance with the European Standards for wood-based particleboards, namely density, thickness swelling, water absorption, thermal conductivity, modulus of rupture, modulus of elasticity, internal bonding strength and reaction to fire. Two panels exceeded the requirements for general uses. The panels had a low thermal conductivity (0.076 to 0.091 W/mK). The panels can be classified as fire retardants (Bd0)

*Keywords:* *Oryza sativa*; Reaction to fire; Flammability; Bio-based panels; Self-bonded

*Contact information:* Department of Engineering, Escuela Politécnica Superior de Orihuela, Universidad Miguel Hernández de Elche, Spain. \* Corresponding author: cferrandez@umh.es

## INTRODUCTION

Rice is one of the most important crops in the world. According to FAO the rice production for 2015 was 750 mill tons. Considering that the rate grain/straw is one, after the harvest there were 750 mill tons of rice straw globally on the fields. Rice growers usually deal with the straw mainly by burning it on site, resulting in a significant emission of CO<sub>2</sub> and so contributing to air pollution. The increasing awareness of the climate change, the depletion of forest resources and the environmental pollution has driven the research of agricultural residues to produce building materials including particleboards (Li *et al.* 2010). As rice straw is a renewable lignocellulosic waste, several researchers have studied the feasibility of turning these residues into useful products such as particleboard, fiberboard and filler for thermoplastic composites (Halvarsson *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2010; Zang and Hu 2014).

Traditionally, straw has been used as an insulating building material due to its multiple advantages: availability, renewability, low thermal conductivity, and lightweight. It was used to fill the walls, under the wood floors, and under the roofs through all Europe.

In comparison with wood, straw has several drawbacks to be a real substitute for particleboard manufacturing. Straw has less lignin and cellulose, more hemicellulose (Rials and Wolcott, 1997), and higher ash content than wood, resulting in poor mechanical properties and great absorption of water when particleboards are manufactured following the parameters of the wood particleboard industry. In order to

improve their properties, straw particles need to be pretreated and subjected to higher pressing conditions (Pintiaux et al, 2015). In the first attempts of using straw for board-making it was reported that the presence of a waxy outer layer had a negative impact due to its low wettability that made the union with thermosetting resins incompatible, and therefore this layer needed to be removed (Sauter, 1996; Han et al, 2001; Boquillon et al, 2004; Hervillard et al, 2007). On the other hand, the increasing concern about the potential toxicity of the synthetic binders has led the researchers to focus their studies in manufacturing “binderless”. Several reviews in this matter have been conducted recently (Pintiaux et al, 2015; Zang et al 2015). They highlight the severity of the parameters that have been used to achieve a good physical and mechanical performance: steam injection pretreatment, very high pressing temperatures, and very high pressure. In a previous study, Ferrandez-Garcia et al (2012) developed a method to manufacture particleboards by hot pressing with low temperature and pressure using three pressing steps. The raw material was particles of giant reed and were bonded with non-modified starches. The method proved to be promising for other agro-lignocellulosic materials. According to Park et al (2009) the stem of rice contains starch reaching sometimes over 20% of the dry weight. Consequently, self-bonded particleboards of rice straw could be manufactured by hot pressing with the three-step method taking advantage of the fact that rice straw contains starch.

An important issue of the bio-based building materials is the little information of their reaction to fire. Renewable building materials have the potential to replace partly commonly used materials like cement, yet important requirements have to be fulfilled. The fire safety has to be addressed according to the EU Construction Product Regulation No 305/2011, CPR (COST Action FP1404, 2014). A few studies have been conducted in order to investigate the fire reaction of boards made of or containing agricultural residues such as rice husk (Kim, 2009), and kenaf (Lee et al, 2014). But there is no information available in the literature of the reaction to fire of binderless rice-straw particleboards.

The aim of this research was to manufacture binderless particleboards of rice straw using a low pressing temperature and pressure and study their physical- mechanical properties, and their reaction to fire. In particular, the influence of the particle size and the pressing time were the variables studied in order to select the best performing boards.

## **EXPERIMENTAL**

### **Materials**

Rice straw was supplied by IVIA (Valencian Institute of Agricultural Research, Spain) from the Albufera nature reserve (Valencia). The straw was chipped in a laboratory-scale ring-knife chipper. The particles were then classified, using a horizontal screen shaker. Two particle sizes were used in this study: the particles that passed the sieve of 1 mm but were retained on the sieve of 0.25 mm, and the particles that passed the 0.25 mm sieve.

No binder was employed in the manufacturing of the particleboards.

### **Methods**

#### *Manufacture of rice-straw binderless particleboards*

The method used to manufacture the particleboards was adapted from Ferrandez-Garcia *et al.* (2012), with the particularity that no binder was used. Eighteen types of panel were made. Each panel was prepared with 2000g of particles, and 200g of distilled water. Five repetitions were made for every panel type.

Boards measuring 600 mm x 400 mm were manually pre-formed in a mold and then pressed in a hot-press under 2.6 N/mm<sup>2</sup> at 110 °C for 15, 30 and/or 60 min. After pressing, the boards stayed in the mold without pressure while cooling down for 1 hour under ambient conditions. After that, two thirds of the particleboards were brushed with distilled water at a rate of 120 g/m<sup>2</sup> on the upper surface and then they were hot pressed again under the same pressing conditions. Subsequently, one third of the panels were subjected to a third pressing cycle. The experimental design is shown in Table 1. The pressing temperature was kept low (110°C) to avoid surface burning given that some pressing times were long.

**Table 1.** Manufacturing Conditions of the straw-particleboards

Particleboard type	Particle size (mm)	Pressing Pressure (N/mm <sup>2</sup> )	Pressing Temperature (°C)	Pressing time (min)	Cycles
1	< 0.25	2.6	110	15	1
2	< 0.25	2.6	110	15+15	2
3	< 0.25	2.6	110	15+15+15	3
4	< 0.25	2.6	110	30	1
5	< 0.25	2.6	110	30+30	2
6	< 0.25	2.6	110	30+30+30	3
7	< 0.25	2.6	110	60	1
8	< 0.25	2.6	110	60+60	2
9	< 0.25	2.6	110	60+60+60	3
10	0.25 to 1	2.6	110	15	1
11	0.25 to 1	2.6	110	15+15	2
12	0.25 to 1	2.6	110	15+15+15	3
13	0.25 to 1	2.6	110	30	1
14	0.25 to 1	2.6	110	30+30	2
15	0.25 to 1	2.6	110	30+30+30	3
16	0.25 to 1	2.6	110	60	1
17	0.25 to 1	2.6	110	60+60	2
18	0.25 to 1	2.6	110	60+60+60	3

#### *Measurement of physical and mechanical properties*

Some physical and mechanical properties were determined in accordance with the appropriate European Standards: density (EN 323, 1993), water absorption (WA), and thickness swelling (TS) after 2 and 24-hour immersion (EN 317, 1993), modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) (EN 310, 1993), and internal bond (IB) (EN 319, 1993). In addition, thermal conductivity (EN 12667, 2001), and the reaction to fire using a single-flame source (EN ISO 11925-2, 2010) were measured. Tests for mechanical properties, WA, TS, and density were conducted on an Imal universal testing machine (Model IB600, Modena, Italy). Tests for the thermal conductivity were performed on a heat flow meter instrument (NETZSCH Instruments Inc., USA). Reaction to fire tests were carried out on a flammability meter (CEAST model 1653, Torino, Italy). Particleboards were then classified according to EN-13501-1: 2007+A1 2009.

Data for each test were analysed statistically. Analysis of variance (ANOVA) and t-tests calculations were used to test ( $\alpha=0.05$ ) for significant differences between factors and levels. A comparison of the means was performed when the ANOVA indicated a significant difference employing Duncan's test.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Physical Properties

The results of density, thickness swelling, water absorption, and thermal conductivity of the produced particleboards are shown in Table 2.

Rice straw binderless panels with densities in the 980-1148 kg/m<sup>3</sup> range were successfully manufactured. This property did not depend on the particle size nor the pressing time.

**Table 2.** Average results of physical and thermal properties.

Panel type	Density (kg/m <sup>3</sup> )	TS 2h (%)	TS 24h (%)	WA 2h (%)	WA 24h (%)	Conductivity (W/mK)
1	1046.46 (19.30)	14.27 (0.64)	33.14 (1.14) <sup>c</sup>	34.16 (0.43)	48.79 (9.06) <sup>a</sup>	0.078 (0.006)*
2	1128.77 (84.76)	13.37 (1.18)	36.36 (1.76) <sup>cd</sup>	35.40 (4.39)	54.42 (1.79) <sup>a</sup>	0.088 (0.009)*
3	1135.67 (1.80)	48.06 (1.76)	60.69 (0.34) <sup>i</sup>	75.93 (4.13)	87.13 (2.28) <sup>d</sup>	0.084 (0.000)*
4	1086.27 (9.89)	13.69 (1.58)	30.52 (1.01) <sup>b</sup>	38.44 (2.17)	48.02 (3.27) <sup>a</sup>	0.080 (0.011)*
5	1049.01 (6.17)	24.78 (3.73)	41.84 (1.71) <sup>e</sup>	48.68 (2.82)	67.27 (2.65) <sup>b</sup>	0.082 (0.004)*
6	1147.86 (13.39)	47.88 (1.63)	53.73 (1.75) <sup>gh</sup>	70.62 (0.71)	84.26 (0.85) <sup>d</sup>	0.076 (0.001)*
7	1088.63 (4.09)	11.26 (0.33)	23.15 (0.88) <sup>a</sup>	33.54 (0.12)	45.74 (0.05) <sup>a</sup>	0.091 (0.001)*
8	1118.35 (28.46)	12.73 (2.35)	26.14 (0.46) <sup>ab</sup>	29.65 (3.90)	44.54 (1.30) <sup>a</sup>	0.082 (0.005)*
9	1101.54 (18.02)	34.04 (2.47)	46.58 (2.12) <sup>ef</sup>	58.12 (0.54)	73.59 (0.25) <sup>bc</sup>	0.076 (0.002)*
10	997.46 (13.21)	56.50 (2.13)	60.78 (0.51) <sup>i</sup>	107.40 (1.5)	133.12 (1.35) <sup>g</sup>	0.077 (0.004)*
11	1015.86 (16.94)	42.50 (4.79)	50.08 (2.65) <sup>g</sup>	86.93 (1.52)	101.86 (4.05) <sup>e</sup>	0.090 (0.002)*
12	1102.97 (2.82)	59.74 (4.11)	64.25 (2.16) <sup>i</sup>	92.19 (2.39)	102.70 (1.99) <sup>e</sup>	0.088 (0.015)*
13	979.85 (25.01)	43.37 (4.93)	59.01 (0.90) <sup>h</sup>	78.29 (1.93)	91.58 (11.82) <sup>de</sup>	0.083 (0.010)*
14	1099.91 (97.25)	38.8 (10.97)	54.04 (3.18) <sup>gh</sup>	59.24 (9.46)	72.53 (12.32) <sup>b</sup>	0.087 (0.006)*
15	1074.82 (84.54)	44.6 (11.15)	55.90 (1.85) <sup>h</sup>	70.68 (16.92)	82.69 (8.59) <sup>c</sup>	0.081 (0.003)*
16	1007.38 (83.40)	46.57 (5.51)	53.70 (5.92) <sup>gh</sup>	96.25 (0.50)	114.49 (2.69) <sup>f</sup>	0.084 (0.010)*
17	1081.38 (31.82)	45.49 (5.01)	54.51 (3.48) <sup>gh</sup>	64.12 (5.54)	81.51 (4.17) <sup>gh</sup>	0.080 (0.004)*
18	1122.68 (38.34)	50.62 (5.70)	55.70 (4.79) <sup>gh</sup>	75.11 (2.06)	91.52 (7.35) <sup>gh</sup>	0.078 (0.005)*

Values in brackets are standard deviation.

Values with the same letter in the same column are not significantly different based on Duncan's multiple-range test at the 0.05 significance level.

TS: Thickness swelling after 2 and 24 hours in water; WA: water absorption after 2 and 24 hours water immersion.

### Thickness swelling and water absorption

Particleboards should have a maximum thickness swelling value of 16% for 24 h immersion for load bearing (P4 grade according to EN 312, 2010), and there is no

minimum value of TS in the standards for general uses and furniture manufacturing in dry ambient (P1 and P2 grades, respectively).

Average thickness swelling of the specimens for 2 h immersion ranged from 11.26 to 59.74%. For 24 h immersion, the results lay between 23.15 and 60.69%. This property depended on the particle size, swelling less the boards made with the fines, and increasing with the cycles of pressing. This phenomenon did not occur with the boards made with the coarser particle size. The TS and WA values were in accordance with other binderless particleboards (Lindström and Westman, 1980; Bouajila et al., 2005). One of the major problems of the self-bonded panels is their low water resistance. This property is usually expressed as the combination of TS and WA. Pintiaux et al (201) reported in their review that binderless boards had difficulties to achieve water resistances good enough to pass the standards. It is widely known that non-woody materials including straw have more hemicellulose than woody materials, and are therefore more hydrophilic. Halvarsson et al (2009) reported a value of TS and WA of 75 and 90% respectively with selected boards made from pretreated wheat straw.

The results of TS and WA of some of the experimental panels of the present study were good, considering that no waxes were added. The boards made with the smaller particle size absorbed less water than the ones with bigger particles. This could be due to a major content of silica refined from the cuticle when chipping the stems. Generally, the silica particles pass the sieve with openings of 0.25 mm. Kurokochi and Sato (2015) made binderless rice straw particleboards by hot pressing at 200 °C, 5 Mpa during 10 min. They obtained boards with similar TS and WA values and concluded that the wax-like substances of the epidermis of the rice straw contributed to the water resistance property of the board.

#### *Thermal conductivity*

The results of the thermal conductivity tests is shown in table 2. The thermal conductivity value of the experimental panels was low, it ranged from 0.076 to 0.091 W/mK. These values were not influenced by the particle size nor the pressing time. These results are lower than those of the woody particleboards. Hence, they can be considered good thermal insulating panels. In order to be used as insulating materials their density should be reduced.

#### ***Mechanical properties***

Based on EN standards (EN 312, 2010), the minimum requirements for general uses in dry ambient are a MOR value of 11.5 N/mm<sup>2</sup> and an IB value of 0.24 N/mm<sup>2</sup> (P1 grade). A MOR value of 13 N/mm<sup>2</sup>, a MOE value of 1600 N/mm<sup>2</sup>, and an IB value of 0.35 N/mm<sup>2</sup> are the minimum requirements for furniture manufacturing (P2 grade). For load bearing (P4 grade), the values of MOR, MOE, and IB are 15 N/mm<sup>2</sup>, 2300 N/mm<sup>2</sup>, and 0.35 N/mm<sup>2</sup>, respectively.

The results of the mechanical tests can be seen in table 3. MOR values ranged from 4.79 to 18.02 N/mm<sup>2</sup>. MOE values lay between 542 and 2696 N/mm<sup>2</sup>. The IB test results ranged from 0.02 to 0.30 N/mm<sup>2</sup>. The mechanical properties were highly dependent on the particle size and the number of pressing cycles. Best results were achieved by the boards made with the smaller particle size for the three properties. The mechanical values increased when increasing the pressing times and the cycles. The boards with the better mechanical behaviour were boards 8 and 9. They were made with the small particle size and 60 min of pressing, after 2 and 3 pressing cycles respectively.

**Table 3.** Mean values of mechanical properties of rice straw particleboards.

Type	MOR (N/mm <sup>2</sup> )	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	IB (N/mm <sup>2</sup> )
1	10.67 (0.13) <sup>e</sup>	1337.53 (17.36) <sup>d</sup>	0.04 (0.00) <sup>cd</sup>
2	12.14 (0.41) <sup>f</sup>	1542.13 (14.64) <sup>fg</sup>	0.09 (0.01) <sup>e</sup>
3	12.52 (0.13) <sup>fg</sup>	1848.05 (50.09) <sup>h</sup>	0.08 (0.01) <sup>e</sup>
4	11.94 (0.20) <sup>f</sup>	1511.18 (56.79) <sup>f</sup>	0.10 (0.00) <sup>e</sup>
5	11.32 (0.67) <sup>e</sup>	1429.26 (36.24) <sup>e</sup>	0.16 (0.01) <sup>g</sup>
6	15.09 (0.28) <sup>h</sup>	2696.85 (95.11) <sup>i</sup>	0.18 (0.01) <sup>g</sup>
7	13.08 (0.18) <sup>g</sup>	1458.38 (73.99) <sup>e</sup>	0.15 (0.01) <sup>f</sup>
8	17.54 (0.54) <sup>i</sup>	1885.60 (25.43) <sup>h</sup>	0.28 (0.02) <sup>h</sup>
9	18.02 (0.42) <sup>i</sup>	2587.44 (37.72) <sup>i</sup>	0.30 (0.01) <sup>i</sup>
10	4.84 (0.68) <sup>a</sup>	587.84 (99.46) <sup>a</sup>	0.01 (0.00) <sup>a</sup>
11	4.79 (0.49) <sup>a</sup>	542.77 (56.82) <sup>a</sup>	0.02 (0.01) <sup>a</sup>
12	6.34 (0.37) <sup>b</sup>	841.29 (61.13) <sup>b</sup>	0.04 (0.01) <sup>bc</sup>
13	6.23 (0.01) <sup>b</sup>	913.34 (96.12) <sup>bc</sup>	0.03 (0.00) <sup>b</sup>
14	8.27 (0.72) <sup>c</sup>	1005.00 (133.19) <sup>c</sup>	0.02 (0.01) <sup>a</sup>
15	8.52 (0.22) <sup>c</sup>	1469.02 (149.64) <sup>e</sup>	0.03 (0.01) <sup>a</sup>
16	9.49 (0.33) <sup>d</sup>	1221.77 (69.10) <sup>d</sup>	0.04 (0.01) <sup>bc</sup>
17	8.48 (0.24) <sup>c</sup>	1463.34 (59.25) <sup>e</sup>	0.04 (0.01) <sup>bc</sup>
18	8.20 (0.74) <sup>c</sup>	1501.73 (100.32) <sup>fg</sup>	0.05 (0.01) <sup>cd</sup>

*Values in parenthesis are standard deviations*

In figure 1 shows clearly the influence of the particle size and the pressing time of the experimental panels.

Boards 8 and 9 showed a value of MOR and MOE exceeding the standard for load bearing (P4 grade) but failed to comply with the IB minimum requirement of 0.35 N/mm<sup>2</sup>. Thus, these panels can only be classified as grade P1, for general uses. Although the density of the panels was high the internal bonding strength was poor. Presumably the temperature and pressure of the hot-pressing step was not enough for the starch to exhibit its adhesive capability. Ferrandez-Garcia et al (2012) used the same conditions to bond particles of giant reed with starch obtaining slightly better IB values. But, with higher temperature and pressure, Kurokochi and Sato (2015) reported lower values of IB (ranging from 0.01 to 0.17 N/mm<sup>2</sup>) for binderless rice straw panels made by hot pressing with particles of 1mm size.

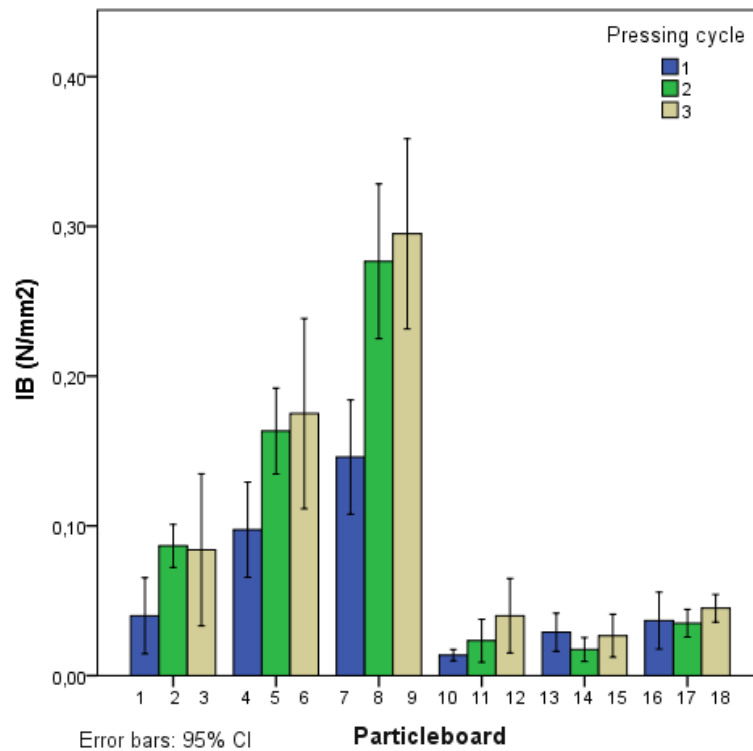


Fig 1. IB values of binderless particleboards

### Reaction to fire test results

Three specimens of one board of each particle size that had achieved the best mechanical behaviour (boards 9 and 18) were used in order to carry out the reaction to fire test. The specimens were conditioned prior to the test to constant mass at a temperature of  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  and a relative humidity of  $60 \pm 5\% \text{HR}$ . The samples were vertically fixed in the frame and the flame was applied during 30 seconds with an inclination of  $45^\circ$  impinged 40 mm above the bottom edge, as shown in figure 2.



Fig 2. Specimens placed in the frame for reaction to fire test.



**Fig 3.** Samples after the fire reaction test.

The results are shown in table 4. The flame spread,  $F_s$ , is the measure of the height burnt. As it can be deduced from figure 3 the burnt area was superficial. The result did not depend on the particle size. The standard states that when  $F_s < 150$  mm in 60 seconds the boards are classified as B. If in addition to that there hasn't been any flaming droplets, which was the case, the boards are classified as d0. Therefore, the binderless rice straw particleboards are classified as Bd0. Flammability tests should be carried out to find out if the boards could be classified as a superior class. Wood particleboards are class Dd0, meaning that their reaction to fire is worst than that of the rice straw particleboards. This could be explained by the high content of silica in the rice material. Silica is known to be a fire retardant (Lee et al 2014)

**Table 4.** Results of the fire reaction test

Board Particle size (mm)	Weight loss %	Burnt height (mm) ( $F_s$ )	Burnt width (mm)	Board Ignition	Combustion	Filter paper Ignition	Smoke
< 0.25	0.19 (0.029)	51.43 (6.53)	17.77 (2.68)	yes	No	No	No
0.25 a 1	0.17 (0.020)	52.24 (4.88)	18.09 (0.63)	yes	No	No	No

There are 7 fire Classes according to the Eurocode. Classification is a means to consider the building material contribution to the generation and spread of fire and smoke within the room of origin or in a given area. Products are generally considered in relation to their end use application. Class A is for products that will not contribute to the fire load and fire growth. Class F is for products which no reaction to fire performances are determined or which cannot be classified in one of the other classes. Class B is as Class C but satisfying more stringent requirements. According to their end use, Wood-based panels are Class D, but the results of the test classifies the experimental panels as Class B, in the same category as Gypsum boards, Fire retardant wood and fire retardant polymers

## CONCLUSIONS



1. Binderless boards were successfully manufactured from rice straw by hot pressing using a three step process at low temperature (110°C) and pressure (2.6 MPa)
2. The physical-mechanical properties depended highly on the particle sizes used and on the pressing times.
3. Particleboards types 8 and 9 exceeded the minimum requirements for general uses (P1 grade, according to EN 312: 2010)
4. The boards can be considered as thermal insulating panels, due to the low results obtained. This property did not depend on the particle size nor the pressing time.
5. The reaction to fire test showed that binderless rice straw particleboards can be considered as fire retardants.

## REFERENCES CITED

- Boquillon, N., Elbez, G., and Schonfeld, U. (2004). "Properties of wheat straw particleboards bonded with different types of resin," *J Wood Sci.* 50(3), 230–235. DOI 10.1007/s10086-003-0551-9
- Bouajila, J., Limare, A., Joly, C., and Dole, P. (2005). "Lignin plasticization to improve binderless fiberboard mechanical properties," *Polym. Eng. Sci.* 45 (6), 809–816. DOI: 10.1002/pen.20342
- EN 310 (1993). "Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength."
- EN 312 (2010). "Particleboards. Specifications."
- EN 317 (1993). "Particleboards and fibreboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water."
- EN 319 (1993). "Particleboards and fibreboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board."
- EN 323 (1993). "Wood-based panels. Determination of density."
- EN 12667 (2001). "Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance."
- EN ISO 11925-2 (2010). "Reaction to fire tests – ignitability of products subjected to direct impingement of flame – Part 2: Single-flame source test."
- EN 13501-1:2007 + A1 (2010). "Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using data from reaction to fire tests."
- Ferrandez-Garcia, C. E., Andreu-Rodriguez, J., Ferrandez-Garcia, M T., Ferrandez-Villena, M., and Garcia-Ortuño, T. (2012). "Panels made from giant reed bonded with non-modified starches," *BioResources* 7(4), 5904-5916.
- Halvarsson, S., Edlund, H., and Norgren, M. (2010). "Manufacture of high-performance rice straw fibreboards," *Ind. Eng. Chem. Res.* 49(3), 1428–35. DOI: 10.1021/ie901272q
- Han, G. P., Umemura, K., Zhang, M., Honda, T., and Kawai, S. (2001). Development of high-performance UF-bonded reed and wheat straw medium-density fiberboard. *J. Wood Sci.* 47 (5), 350–355. DOI: 10.1007/BF00766784.
- Hervillard, T., Cao, Q., and Laborie, M-PG. (2007). Improving water resistance of wheat straw based medium density fiberboards bonded with aminoplastic and phenolic resins. *BioResources* 2 (2), 148–56.

- Kurokocha, Y., and Sato, M. (2015). "Properties of binderless board made from rice straw: The morphological effect of particles," *Ind. Crop Prod.* 69, 55-59.  
**DOI:** 10.1016/j.indcrop.2015.01.044.
- Lee, B.H., Kim, H.S., Kim, S., Kim, H.J., Lee, B., Deng, Y., Feng, Q., and Luo, J. (2011). "Evaluating the flammability of wood-based panels and gypsum particleboard using a cone calorimeter," *Construction and Building Materials* 25, 3044-3050. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.01.004
- Li, X.J., Cai, Z.Y., Winandy, J.E., and Basta, A.H. (2010). "Selected properties of particleboard panels manufactured from rice straws of different geometries," *Bioresour. Technol.* 101(12), 4662–4666. doi:10.1016/j.biortech.2010.01.053
- Lindström, T., and Westman, L. (1980). "The colloidal behaviour of kraft lignin. III. Swelling behaviour and mechanical properties of kraft lignin gels," *Colloid Polym. Sci.* 258, 390–397.
- Park, J., Seyama, T., Shiroma, R., Ike, M., Srichuwong, S., Nagata, K., Arai-Sanoh, Y., Kondo, M., and Tokuyasu, K. (2009). "Efficient recovery of glucose and fructose via enzymatic saccharification of rice straw with soft carbohydrates," *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 73(5) 1072-1077. DOI: 10.1271/bbb.80840.
- Pintiaux, T., Viet, D., Vandebossche, V. Rigal, L., and Rouilly, A. (2015). "Binderless materials obtained by thermo-compressive processing of lignocellulosic fibers: A comprehensive Review," *Bioresources* 10(1) 1915-1963
- Rials, T.G., and Wolcott, M.P., (1997). Chapter 4: "Physical and mechanical properties of agro-based fibers," In: Rowell, R.M. et al. (Eds.), *Paper and Composites from Agro-Based Resources*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Sauter SL. (1996). "Developing composites from wheat straw," In: Proceedings of the 30th international symposium of Washington State University on particleboard/composite materials. 197–214.
- Zhang, D., Zhang, A., and Xue, L. (2015). "A review of binderless fiberboards and its self-bonding mechanism," *Wood Sci Technol.* DOI: 10.1007/s00226-015-0728-6

Article submitted:

**PUBLICACIÓN 2: ACOUSTIC AND THERMAL  
EVALUATION OF PALM PANELS AS BUILDING  
MATERIAL**



**UNIVERSITAS**  
*Miguel Hernández*



## Acoustic and thermal evaluation of palm panels as building material.

Cristina C. Ferrández-García, Clara E. Ferrández-García\*, Manuel Ferrández-Villena, M. Teresa Ferrández-García, and Teresa García-Ortuño

The aim of this study was to determine the acoustic and thermal properties of boards made from Washingtonia palm tree pruning waste. The particles used were obtained from the rachis of the palm fronds. 8% of urea formaldehyde was employed to bind the particles by hot pressing at 120°C during 6 min and 1.6 Mpa.. Three types of panels with different particle size were made and the size influence was evaluated. Their physico-mechanical properties were also analyzed, concluding that their mechanical performance was superior to the existing insulating boards used in the building industry. The thermal conductivity of the panels had an average value of 0.062 W / (K .m) and did not depend on the size of the particles. At frequencies of 125 and 250 Hz, the experimental boards could be classified as class D acoustic panels. The manufactured panels had high values of sound transmission loss (TL), although they are of small thickness, which indicates that they have good acoustic insulation capacity. Acoustic properties could be improved by increasing the thickness of the boards. These panels, due to their mechanical, thermal and acoustic properties, could be used as lining and false ceilings.

*Keywords:* Building materials, panel properties, particle size, thermal performance, sound absorption coefficient, sound transmission loss, Washingtonia palm.

*Contact information:* Department of Engineering, Escuela Politécnica Superior de Orihuela, Universidad Miguel Hernández de Elche, Spain. \* Corresponding author: cferrandez@umh.es

### INTRODUCTION

The introduction of the concept of “sustainability” in the building design has led the research towards the development of thermal and acoustic insulating materials using natural or recycled materials. Some of them, such as kenaf or wood fiber, are already commercialized, but its diffusion could be further improved, as their performance is similar to the synthetic ones (Asdrubali et al. 2015). Vegetable fibers have been used traditionally in constructions as insulating material, until they were no longer used by the use of technical materials that consume a lot of energy in their development. The use of sustainable materials is now becoming a common practice for noise and heat-transfer reduction in building and civil engineering due to the increasing health risk concern associated with materials such as glass- and mineral-fibre. (Fatima and Mohanty, 2011). A vegetable material used as acoustic and thermal absorbent is wood and, particularly, woody particleboards. Because of the shortage of wood, several investigations have been carried out in order to substitute it in board production using rice stems (Yang et al. 2003), coconut fibers (Zulkifli et al. 2009), bamboo (Karlinsari et al. 2012), corn cobs (Faustino et al. 2012), and farm waste (Sampathrajan et al. 1991).

In general, vegetable materials are porous, good noise absorbents and they have good acoustic insulating properties across a wide range of frequencies. At the same time, the increase of the percentage of vegetable fibers as raw material in the development of

building materials produce a significant decrease in the material density and in their thermal parameters (Belkharchouche and Chaker 2016).

The fact that vegetable fibers can be cheaper, light and environmentally friendly, justifies that they have been studied as an alternative to the synthetic fibers in the acoustic context (Yorozu et al. 1987). In the same way, recycling natural resources and the use of waste contribute to an environmental improvement.

Yang et al. (2003) evaluated acoustic panels of rice stems, with a density of 0.4 and 0.6 g/m<sup>3</sup>, indicating that they were suitable as an insulating material for sound absorption in wooden constructions. The test showed a decrease of the sound absorption coefficient for mid frequencies and an increase of the sound absorption for the range of low and high frequencies. They found no differences due to the particle size of the rice stems fibers. Kalinasari et al. (2012) tested fast-growing tropical species and concluded recommending them for architectural acoustics in building constructions at low and high frequencies. Faustino et al. (2012) demonstrated that a panel made of corn particles had an interesting acoustic behavior for building uses.

The greatest challenge working with vegetable fibers is their great variation in thermal properties and characteristics dependent on their complex structural geometric architectures (Lü et al. 2013). But, in most of the studies, the use of vegetable fibers has proved to decrease the thermal conductivity as reported by several authors: the use of palm fibers for brick making has been shown to improve the thermal properties (Mekhermeche et al. 2016), so that an increase of the fiber fraction of the bricks resulted in a decrease in thermal conductivity, specific heat, heat capacity, and an increase in thermal resistance; the thermal performance of reinforced tiles with sisal and eucalyptus fibers were reported to be acceptable as a substitute of fiber-cement sheets (Roma et al. 2008); the addition of palm fibers to gypsum improved the thermal insulation of buildings (Chikhi, 2016).

Tao et al. (2016) measured the addition of vegetable fibers in Polyurethane and the effect in the acoustic and thermal insulation properties concluding that increasing the fiber proportions produced an increase of insulating properties. The acoustic and thermal properties of different fiber panels from the palm oil trunk were studied by Kerdtongmee et al. (2016) and from the date palm (Khidir et al 2014, Mekhermeche et al 2016). There are some researchers who, based on the reviews carried out, promoted new treatments and techniques to improve insulating properties (Wu, et al. 2016; Zhu et al. 2014).

In this study the use of Washingtonia palm tree fibers is proposed as raw material for the construction of acoustic and thermal insulation panels. Commonly known as Mexican fan palm is a fast-growing plant, especially in permeable and nutrient-rich soils, where it can reach heights of 30 m. They are widely spread in Spain and usually used in gardening and landscaping. The old leaves are pruned at least once a year, producing an average of 30 kg of palm fronds (RH 8%), according to measurements made on the palm trees used in this study. These wastes are landfilled when they could be used.

The main objective of this work was to evaluate the acoustic and thermal properties of boards made from Washingtonia palm pruning waste and to assess the influence of the particle size in the physical and mechanical properties determined in the experimental particleboards.

## EXPERIMENTAL

### Materials

The material used was the rachis of the fronds obtained from the pruning of the Washingtonia palm trees supplied from the gardens of the University Miguel Hernández of Elche. The leaflets were removed from the fronds and then they were left to dry for 6 months in the open air. Later they were defibrated by a blade shredder and the particles were classified by their dimensions, as they crossed the sieves of a vibrating screening machine.

Commercial urea formaldehyde was used as binder, with a solid content of 64 to 66%. Eight percent of binder was used, based on the weight of the palm particles, and four percent of ammonium sulfate as hardener.

### Manufacturing process

Three types of boards with different particle sizes (0.25 to 1.00 mm, 1.00 to 2.00 mm and 2.00 to 4.00 mm) were obtained from the rachis of the Washingtonia palm, as shown in Fig. 1. Particles were blended in an IMAL blender for five minutes. The resin, an 8% of urea formaldehyde was sprayed by nozzles.



**Fig 1.** Particles obtained from the rachis of Washingtonia palm-tree.

To prepare the boards, the mat was manually formed in a mould of dimensions 400 mm x 600 mm and then subjected to a hydraulic press of hot plates at a pressure of 1.6 MPa and a temperature of 120°C for 6 minutes. The resulting boards had an average size of 600 x 400 x 6.5 mm and were left to cool upright for 24 h.



**Fig 2.** Acoustic and bending tests samples (circular and rectangular shape respectively) of the three types of panels.

Five boards of each type were manufactured and then the samples were cut with the appropriate dimensions following the European Standards for each type of laboratory tests as shown in Fig. 2.

## Methods

Experimental laboratory tests were carried out in accordance with the European standards applicable to particleboards. The density test was carried out according to EN 323 (1993) using 3 samples of each board with dimensions 50 x 50 mm. The mechanical properties were determined with a universal testing machine (IMAL model IB600, Italy), which complies with the speed indicated in the standards for each test. In order to obtain the modulus of rupture (MOR) and the modulus of elasticity in flexion (MOE), the test was performed according to the European standard EN 310 (1993). For the determination of the internal cohesion (IB) or tensile strength test the European standard EN 319 (1993) was used which states that the load is applied perpendicular to the face of the sample and at a constant speed throughout the test.

The thermal conductivity was also determined using the method of the heat flow meter (EN 12667, 2001). Tests for the thermal conductivity were performed on a heat flow meter instrument (NETZSCH instruments, Inc, USA). The samples used in this test had dimensions of 300 x 300 x 6.5 mm.

The acoustical properties measured were the sound absorption coefficient and the transmission loss. The method to determine the sound absorption coefficient of a material under normal incidence is based on the acoustic impedance tube. This test method uses an impedance tube, two microphone positions and a digital signal analysis system, according to EN ISO 10534-2 (2002). This technique requires a prior correction procedure to minimize the differences in amplitude and phase characteristics between the two microphones. To perform the tests, the Acupro Spectronics impedance tube was used, with a frequency ranging from 50 to 6300 Hz. Some of the test samples used in the tests are shown in Fig 2.

Data for each test were analyzed statistically using the SPSS v.22.00 software. From the average results, standard deviation was obtained and an analysis of variance (ANOVA) was conducted. Duncan test calculations ( $P < 0.05$ ) were used to compare the differences between types.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Physical and mechanical properties

To carry out the laboratory tests the specimens of the different tests were kept at a controlled atmosphere with a temperature of 20°C and a relative humidity of 65%. The average values obtained from the tests are shown in Table 1. The density values obtained ranged from 677.1 to 885.75 kg/m<sup>3</sup>. They can be considered as medium density boards. According to the statistical analysis there were significant differences between boards with different particle sizes.

The values of the modulus of rupture in flexion (MOR) for particles of 0.25 to 1.00 mm reached 16.95 N/mm<sup>2</sup>, decreasing with larger particles. The flexural strength depended on the particle size. The modulus of elasticity in flexion (MOE) also depended on the particle size. The MOE values ranged from 1550.49 to 665.06 N/mm<sup>2</sup>. The internal cohesion (IB) values achieved were not influenced by the particle size. The IB



results were high and lay form 0.98 to 1.06 N/mm<sup>2</sup>. It is observed that the panel with the higher density had better mechanical properties.

**Table 1.** Physical and mechanical properties of the experimental panels

Particle size (mm)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	MOR (N/mm <sup>2</sup> )	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	IB (N/mm <sup>2</sup> )
0.25 – 1.00	885.75 <sup>c</sup> (50.95)	16.95 <sup>c</sup> (2.68)	1550.49 <sup>c</sup> (146.71)	0.98 <sup>a</sup> (0.16)
1.00 – 2.00	746.30 <sup>b</sup> (54.12)	12.24 <sup>b</sup> (0.96)	1170.83 <sup>b</sup> (230.61)	1.06 <sup>a</sup> (0.05)
2.00 – 4.00	677.71 <sup>a</sup> (28.18)	7.21 <sup>a</sup> (0.31)	665.06 <sup>a</sup> (61.88)	1.06 <sup>a</sup> (0.07)

( ) standar deviation. <sup>a, b,...</sup> Duncan test  $p < 0.5$

The boards manufactured by hot-pressing at low temperature (120°C) using the smaller particle size (0.25 to 1.00 mm) can be classified as grade P1, for general uses since they meet the requirements of mechanical properties indicated by the European standards (EN 312: 2010). The minimum requirements for a P1 type panel (thickness from 6 to 13 mm) are a MOR value of 12.5 N/mm<sup>2</sup> and an IB value of 0.28 N/mm<sup>2</sup>. Therefore only the particleboards made with particles of 0.25-1 mm fit in this category and could be implemented in general applications. These boards have superior mechanical properties than the insulation boards used in construction, where there is no bending strength requirement, only in the Japanese Standard and is a MOR value of 2 N/mm<sup>2</sup>.

### Thermal properties

The results of thermal properties (conductivity, resistance and gradient) of the experimental panels are shown in table 2.

**Table 2.** Thermal properties of the Washingtonia palm tree particleboards.

Particle size (mm)	T. Conductivity. W/(K·m)	T. Resistance K·m <sup>2</sup> /W	T. Gradient K/m
0.25 – 1.00	0.059 <sup>a</sup> (0.006)	0.107 <sup>a</sup> (0.005)	2989.32 <sup>a</sup> (693.2)
1.00 – 2.00	0.062 <sup>a</sup> (0.007)	0.108 <sup>a</sup> (0.004)	3019.39 <sup>a</sup> (447.8)
2.00 – 4.00	0.062 <sup>a</sup> (0.004)	0.108 <sup>a</sup> (0.002)	2831.62 <sup>a</sup> (484.63)

( ) standar deviation. <sup>a, b,...</sup> Duncan test  $p < 0.5$

The boards have good thermal insulation properties, with an average thermal conductivity of 0.062 W/(K m), a thermal resistance of 0.108 K·m<sup>2</sup>/W and a thermal gradient of 2950 K/m. The Duncan test indicates that there are no significant differences among the panels.

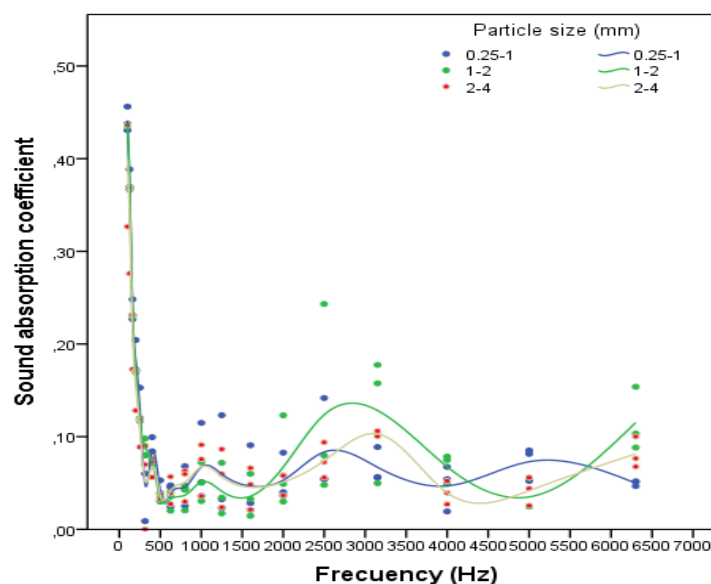
**Table 3.** Thermal conductivity of different materials for comparison purposes.

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	T. Conductivity [W/(K·m)]
Washingtonia palm tree panels (present study)	746	0.062
Cork (Boards)	120	0.042
Wood fiber sheets	200	0.047
Maple wood	750	0.349
Ash wood	750	0.349
Beech wood	800	0.143
Oak wood	850	0.209
Mineral wool	<100	0.037

The value of thermal conductivity achieved by the panels manufactured from Washingtonia palm tree are shown in Table 3 with those of other wood types used as insulating building materials. It can be concluded that the thermal conductivity value is much smaller than wood with equal density and somewhat larger than the cork and wood boards with low density. Therefore, Washingtonia palm tree particleboards are a good thermal insulating material.

### Acoustic properties

Fig. 3 shows the average values obtained from the sound absorption coefficient of the tests carried out on three specimens of each board.

**Fig 3.** Acoustic absorption coefficient as a function of frequency

As seen in the graph of the tests made with boards with three different particle sizes, a high sound absorption value is obtained for very low frequencies (at 50 Hz the

absorption coefficient is 0.45), then this value decreases for higher frequencies to very low values. The graphs of the different types of panels seem to indicate that there are no significant differences between the different types of boards. They all fall in the range of 0.05 to 0.10.

**Table 4.** Sound absorption coefficients

Material	Particle size (mm)	Board thickness (mm)	Frequency (Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
Palm particles	0.25-1.00	6.5	0.45 (0.04)	0.31 (0.01)	0.10 (0.03)	0.07 (0.02)	0.06 (0.01)	0.05 (0.01)
	1.00-2.00	6.5	0.44 (0.00)	0.32 (0.01)	0.10 (0.03)	0.05 (0.02)	0.07 (0.01)	0.07 (0.02)
	2.00-4.00	6.5	0.40 (0.06)	0.30 (0.04)	0.10 (0.01)	0.07 (0.02)	0.05 (0.01)	0.06 (0.01)
Wood		50	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Plywood		10	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11
ISO 11654 (Insulation classes)			D	D	-	-	-	-
( ) Standard deviation								

Table 4 shows the sound absorption coefficients as a function of the normalized center frequencies for octave bands. The results obtained have been referred to these frequencies since they are the most used in architectural acoustics and in the majority of the consulted works and studies. This will facilitate the subsequent comparison of the results with the values obtained for other materials of the same density commonly used in construction and thus classify them according to ISO 11654 (1997).

The sound absorption coefficients obtained have an average value for frequencies lower than 400 Hz. For higher frequencies low values are obtained. The results indicate that they are better absorbers of the noise than the commercial plywood and panels of equal density for low frequencies, for medium and high frequencies similar values are obtained. According to ISO, for frequencies less than 250 Hz, they could be classified as "D" category, up to 400 Hz "E" category, and for higher frequencies, they would not be considered acoustic absorbers.

The statistical analysis shows that there are no significant differences with regard to the particle size used. This seems to be because of the similar density of the boards indicating a similar porosity. Yang et al (2003) studied the influence of the particle size in the sound absorption coefficient in panels made with rice stem fibers and observed that there was not such influence and it only depended on the density. In contrast, Karlinasari et al. (2012) verified that in bamboo panels a higher sound absorption coefficient was obtained with the smaller particle size. Zulkifli et al. (2009) verified in panels made of coconut fiber that when the thickness of the panels was increased and they were perforated, the sound absorption coefficient was increased.

Since the sound absorption coefficient depends on the thickness of the panels, (the panels tested had an average thickness of 6.5 mm) increasing the thickness would improve the sound absorption properties.

The sound transmission loss (TL) is a parameter expressed in decibels (dB) that depends on the frequency and the thickness, and its value indicates how much the incident sound energy attenuates when passing through a material.

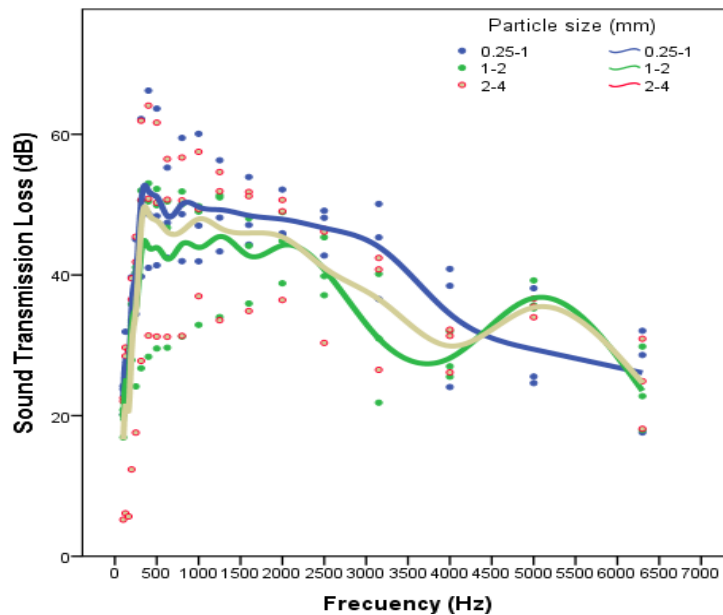


Fig. 4. Sound transmission loss as a function of frequency.

Fig. 4 shows the average TL values obtained in the test of three samples of each board. The highest values were reached at a frequency of 450 Hz up to 50 dB, then the values decrease with frequency close to 30 dB. No influence of particle size is observed. These values indicate that the Washingtonia palm tree panels of 6.5 mm thick have good acoustic insulation capacity.

## CONCLUSIONS

1. The mechanical properties of the experimental panels manufacture from Washingtonia palm tree depended on the particle size. With a particle size from 0.25 to 1.00 mm, boards classified as grade P1 for general uses in dry ambient were obtained. An increase in the density of the panels would have improved the modulus of rupture (MOR) and the internal bond (IB), although in all cases the flexural MOR was higher than the requirements for insulation boards.
2. The thermal conductivity of the studied panels has an average value of 0.062 W / (K .m) and does not depend on the size of the particles. It is observed that this parameter is much smaller than that of wood of equal density and somewhat greater than the boards of cork and wood fiber sheets of a low density.
3. At frequencies of 125 and 250 Hz, the experimental boards could be classified as class D acoustic panels. On the other hand, the sound absorption coefficients of the Washingtonia palm boards were higher at frequencies lower than 400 Hz than those of commercial wood-based materials and plywood. There are no significant differences with regard to the particle size.
4. The manufactured panels had high values of sound transmission loss (TL), although they are of small thickness, which indicates that they have good acoustic insulation

capacity. Acoustic properties could be improved by increasing the thickness of the boards.

5. These boards, due to their mechanical, thermal and acoustic properties, could be used as lining and false ceilings.
6. Potentially, the insulators based on by-products of the Washingtonia palm tree could constitute an economically viable and sustainable alternative to existing materials.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work has been financed by the Ministerio de Economía y Competitividad of Spain (MINECO, AGL2013-41612-R)

## REFERENCES CITED

- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., and Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1-17.
- Belkharouch, D., and Chaker, A. (2016). Effects of moisture on thermal conductivity of the lightened construction material. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(17), 7119-7125.
- Chikhi, M. (2016). Young's modulus and thermophysical performances of bio-sourced materials based on date palm fibers. *Energy and Buildings*, 129, 589-597.
- EN 310. (1993). Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 317. (1993). Particleboards and fibreboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 319. (1993). Particleboards and fibreboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 323. (1993). Wood-based panels. Determination of density. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN ISO 10534-2. (2002). Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes - Part 2: Transfer-function method. (ISO 10534-2:1998). European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN ISO 11654. (1997). Acoustics. Sound absorbers for use in buildings. Rating of sound absorption. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 12667. (2001). Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Fatima S. and Mohanty A.R. (2011). "Acoustical and fire retardant properties of jute composite materials," *Applied Acoustics* 72, 108-114. Doi: 10.1016/j.apacoust.2010.10.005

- Faustino, J., Pereira, L., Soares, S., Cruz, D., Paiva, A., Varum, H., and Pinto, J. (2012). Impact sound insulation technique using corn cob particleboard. *Construction and Building Materials*, 37, 153-159.
- Karlinasari, L., Hermawan, D., Maddu, A., Bagus, M., Lucky, I. K., Nugroho, N., and Hadi, Y. S. (2012). Acoustical properties of particleboards made from betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) as building construction material. *BioResources*, 7(4), 5700-5709.
- Kerdthongmee, P., Saleh, A., Eadkhong, T., and Danworaphong, S. (2016). Investigating Sound Absorption of Oil Palm Trunk Panels Using One-microphone Impedance Tube. *BioResources*, 11(4), 8409-8418.
- Khidir, E. A., Nik Mohamed, N. A., Nor, M., Jailani, M., Tahir, M. F. M., Zulkifli, R., and Nuawi, M. Z. (2014). Effect of density on the sound absorption of date palm fibers. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 663, pp. 437-441). Trans Tech Publications.
- Lü, X., Lu, T., Lipponen, O., and Viljanen, M. (2013). "Insulation Materials Made with Vegetable Fibres," In: *Nearly Zero Energy Building Refurbishment* (pp. 411-455). Springer London.
- Mekhermeche, A., Kriker, A., and Dahmani, S. (2016, July). Contribution to the study of thermal properties of clay bricks reinforced by date palm fiber. In M. Aillerie, C. T. Salame, and P. Papageorgas (Eds.), *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1758, No. 1, p. 030004). AIP Publishing.
- Roma, L. C., Martello, L. S., and Savastano, H. (2008). "Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers," *Construction and Building Materials*, 22(4), 668-674.
- Sampathrajan, A., Vijayaraghavan, N. C., and Swaminathan, K. R. (1991). Acoustic aspects of farm residue-based particle boards. *Bioresource technology*, 35(1), 67-71.
- Tao, Y., Li, P., and Cai, L. (2016). Effect of Fiber Content on Sound Absorption, Thermal Conductivity, and Compression Strength of Straw Fiber-filled Rigid Polyurethane Foams. *BioResources*, 11(2), 4159-4167.
- Wu, Y., Sha, T., Zhao, Z., He, Z., and Yi, S. (2016). Influence of Different Pretreatments on the Acoustic Properties of Dawn Redwood (*Metasequoia glyptostroboides* Hu et Cheng). *BioResources*, 11(1), 2734-2743.
- Yang, H. S., Kim, D. J., and Kim, H. J. (2003). Rice straw-wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. *Bioresource Technology*, 86(2), 117-121.
- Yorozu, T., Hirano, M., Oka, K. and Tagawa, Y. (1987). Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface. *IEEE translation journal on magnetism in Japan*, 2(8), 740-741.
- Zhu, X., Kim, B. J., Wang, Q., and Wu, Q. (2014). Recent advances in the sound insulation properties of bio-based materials. *BioResources*, 9(1), 1764-1786.
- Zulkifli, R., Nor, M. J. M., Ismail, A. R., Nuawi, M. Z., and Tahir, M. F. M. (2009). Effect of perforated size and air gap thickness on acoustic properties of coir fibre sound absorption panels. *European Journal of Scientific Research*, 28(2), 242-252.

Article submitted:

**PUBLICACIÓN 3: PROPIEDADES ACÚSTICAS DE  
PANELES PREFABRICADOS RESIDUOS DE CAÑAS**









IX congresso ibérico de  
**AGROENGENHARIA 2017**  
4 a 6 de setembro  
Bragança – Portugal

## **Propiedades acústicas de paneles prefabricados de residuos de cañas.**

Cristina C. Ferrández García<sup>1</sup>, Alfredo Castelló<sup>1</sup>, Clara Eugenia Ferrández García<sup>1</sup>, Manuel Ferrández-Villena<sup>1</sup>, M<sup>a</sup> Teresa Ferrández García<sup>1</sup>, Teresa García Ortuño<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería. Escuela Politécnica Superior de Orihuela (Alicante). Universidad Miguel Hernández de Elche. España

### **Resumen**

Tradicionalmente, las fibras vegetales han sido utilizadas en construcción como materiales aislantes, sin embargo, en el último siglo fueron reemplazadas por nuevos materiales cuyos procesos de fabricación tienen mayor consumo energético. El objetivo de este estudio fue determinar las propiedades acústicas y mecánicas de paneles hechos de residuos de caña común. El documento se centra en la evaluación de la absorción acústica de los tableros para ser empleados en edificación. Los materiales utilizados fueron partículas a partir de cañas y urea formaldehído como adhesivo. Se elaboraron paneles con tres tamaños de partículas y se evaluó su influencia. Para determinar el coeficiente de absorción, las muestras se sometieron a pruebas con frecuencias desde 50 a 6300 Hz. Los resultados mostraron que los tableros tuvieron un coeficiente de absorción medio para la gama de frecuencias bajas y altas, existiendo diferencias significativas según el tamaño de partícula. Los tableros con partículas de 2 a 4 mm podrían clasificarse como absorbentes del sonido clase D (EN ISO 11654), y los de tamaño de partícula de 0.25 a 1 tuvieron la mayor pérdida de transmisión sonora. Al contrario que en las propiedades acústicas, a menor tamaño de partícula utilizada, mejores eran las propiedades mecánicas de los tableros. Los resultados indicaron que éste puede ser un material aislante acústico interesante para usos comerciales.

**Palabras clave:** Tablero aglomerado, *Arundo donax* L., propiedades mecánicas y acústicas.

## **Acoustical properties of panels made from residues of giant reed**

### **Abstract**

Traditionally, vegetal fibers have been used in construction as isolating material, however, in the last century they were replaced with new materials which manufacture processes have higher energy consumption. The aim of this study was to determine the mechanical and acoustical properties of panels made from residues of giant reed. This paper was focused in the evaluation of the sound absorption of the particleboards and to apply them in construction. The materials were obtained from giant reed residues and urea formaldehyde as adhesive. Panels were made using three different particle sizes and its influence was analyzed. In order to determine the sound absorption coefficient, panels were tested in frequencies that ranged from 50 to 6300 Hz. The results showed that the panels had a medium sound absorption coefficient in low and in high frequencies, depending vastly on the particle size. Panels made of particles from 2 to 4 mm could be classified as D type (EN ISO 11654), and the ones made of particles from 0.25 to 1 mm had the higher sound transmission loss. In contrast to the acoustical properties, the smaller the particle used, the better mechanical properties the particleboards had. The results showed that this material could be an interesting acoustic isolator material in commercial uses.

**Keywords:** Particleboard, *Arundo donax* L., mechanical and acoustical properties.

## 1. Introducción

Tradicionalmente, las fibras vegetales han sido utilizadas en edificación como material aislante. En este último siglo, han sido remplazadas por materiales tecnificados que consumen gran cantidad de energía en su elaboración. Actualmente el uso de materiales sostenibles se está convirtiendo en una práctica común para la reducción de ruido en la edificación e ingeniería civil. Los materiales de construcción verde deben ser renovables, locales y abundantes. Uno de los materiales vegetales utilizado como absorbente del sonido es la madera en forma de tableros o en paneles de partículas. Para satisfacer la demanda causada por la disminución de los suministros de madera maciza y materiales a base de madera, se han realizado varias investigaciones que han utilizado fibras vegetales en el desarrollo de tableros de partículas.

En general los materiales vegetales son porosos y buenos absorbentes del sonido, con buenas propiedades aislantes acústicas en una amplia gama de frecuencias. El hecho de que las fibras vegetales puedan ser más económicas, ligeras y respetuosas con el medio ambiente, justifica que se hayan estudiado como una alternativa a las fibras sintéticas (Zhu et al. 2014). Algunas, como el kenaf o la fibra de madera, ya se encuentran en el mercado, con lo que su empleo podría empezar a extenderse. Asdrubali et al. (2015), indican que el rendimiento de las fibras vegetales es similar a las fibras sintéticas. Como sustitutos de materiales acústicos, se han realizado varias investigaciones con tableros de partículas que han utilizado diferentes residuos vegetales, entre ellos tallos de arroz (Yang et al. 2003), fibras de coco (Zulkifli et al. 2009), bambú (Karlinasari et al. 2012), residuos vegetales (Sampathrajan et al. 1991, Lü et al. 2013), yute con látex (Fatima and Mohanty, 2011), residuos de la palma de aceite (Kerdtongmee et al. 2016) y fibras de palmera datilera (Khidir et al 2014).

Yang et al. (2003) fabricaron paneles acústicos de tallos de arroz, con una densidad específica de 400 y 600 kg·m<sup>-3</sup>, que eran adecuados como material aislante en la absorción de sonido en las construcciones de madera. Este ensayo mostró que, independiente del tamaño de partícula utilizado, se producía una disminución en el coeficiente de absorción del sonido para frecuencias medias y un aumento en la absorción de sonido en el rango de frecuencia baja y alta. Karlinasari et al. (2012) indicaron que los paneles de bambú tenían buen comportamiento como absorbentes acústicos en frecuencias altas y bajas, y que en medias frecuencias tenían valores muy bajos. Con paneles de fibras de coco Zulkifli et al. (2009) concluyeron que aumentando el espesor y realizando perforaciones a los tableros mejoraban las propiedades acústicas, mientras que con paneles de fibras de raquis de palmera datilera de baja densidad (77 kg·m<sup>-3</sup>, 100 kg·m<sup>-3</sup> y 125 kg·m<sup>-3</sup>) Khidir et al., (2014) indicaron que el coeficiente de absorción acústica aumentaba al aumentar la densidad.

En este trabajo se utiliza como material caña común, que ya fue tradicionalmente utilizada en la zona del levante español como material de construcción. La caña es la mayor de las gramíneas de las regiones mediterráneas, siendo una planta salvaje en la que no se ha realizado selección de genotipos ni mejora genética. Es una planta perenne que forma densos cañaverales. Con la industrialización, los materiales vegetales dejaron de emplearse en los edificios, convirtiéndose la caña común en una planta invasora que puede provocar graves problemas. Cuando la caña crece en los márgenes de las corrientes fluviales, al producirse crecidas de agua, es arrancada y transportada, formando grandes masas que obstruyen los cauces, provocando inundaciones y arrasando a su paso todo tipo de construcciones.

El objetivo de este estudio fue determinar las cualidades de las partículas de caña común en la elaboración de tableros aislantes acústicos, evaluar dichos tableros mediante la obtención del coeficiente de absorción y pérdida de transmisión acústica, así como las propiedades mecánicas de los tableros y a la vez comprobar la influencia del tamaño de partícula utilizada en el tablero. Con la utilización de cañas se contribuiría al control y reciclaje de estos residuos, y una mejora ambiental.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Materiales

El material utilizado fue caña común procedente de la limpieza del cauce del río Segura. Las cañas se dejaron secar durante 6 meses al aire. Posteriormente se desfibraron mediante una desfibradora de cuchillas y se clasificaron las partículas por las dimensiones, según atravesaban los tamices de una tamizadora vibradora.

Como aglutinante se utilizó urea formaldehído (UF) comercial con un contenido en sólidos del 64 a 66%, en un 8% basado en el peso de las partículas de palmera. Como endurecedor se utilizó un 4% de sulfato amónico.

### 2.2. Proceso de fabricación

Se fabricaron 3 tipos de tableros con distinto tamaño de partículas (0.25 a 1 mm; 1 a 2 mm y 2 a 4 mm) obtenidas de las cañas. Las partículas se mezclaron mediante inyección con un 8% de UF en una amasadora volteadora de eje horizontal marca IMAL.

Para elaborar los tableros de partículas aglomeradas (EN 309), se formó la manta en un molde de dimensiones 400 mm x 600 mm y se sometió en una prensa de platos calientes a una presión de 2.6 MPa y temperatura de 120° C durante 4 minutos. Los tableros formados se dejaron enfriar al aire en posición vertical durante 24 h.

Se fabricaron 8 tableros de cada tipología. Posteriormente se cortaron las probetas con las dimensiones adecuadas que indican las normas europeas para cada uno de los ensayos de laboratorio.

### 2.3. Métodos

Se empleó la microscopía electrónica de barrido (SEM) para determinar la textura y analizar las propiedades morfológicas de la caña común. Se tomaron micrografías a partir la caña y de secciones transversales de los tres tipos de tableros de 5 cm por 5 mm. Se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido de Emisión de Campo Modelo Nova NanoSEM 200 Marca FEI con una resolución de 1nm a 30Kv, 1.5 nm a 10 kV (Bajo vacío). Voltaje Acelerador: 200 V a 30 kV.

Los ensayos mecánicos de laboratorio se realizaron conforme a las normas europeas aplicadas a los tableros de partículas. Para el ensayo de densidad se procedió según indica la norma EN 323 utilizando 6 probetas de cada tablero de dimensiones 50 x 50 mm. Las propiedades mecánicas se determinaron mediante la máquina universal de ensayos marca IMAL, que cumple con la velocidad indicada para cada ensayo. Para obtener el módulo de ruptura en flexión (MOR) y el módulo de elasticidad en flexión (MOE) en N·mm<sup>-2</sup>, se realizó el ensayo de acuerdo con la norma europea EN 310 utilizando 6 probetas de cada tablero. Para el ensayo de cohesión interna o resistencia a tracción (IB) en N·mm<sup>-2</sup> se utilizaron tres probetas y se empleó la norma europea EN 319 que indica que la carga se aplica perpendicular a la cara de la probeta y a velocidad constante durante todo el ensayo.

Ensayos acústicos. El método seguido para determinar el coeficiente de absorción acústica de un material bajo incidencia normal, es el basado en el tubo de impedancia acústica. Este método de ensayo utiliza un tubo de impedancia, dos posiciones de micrófono y un sistema digital de análisis de señal, según la norma EN ISO10534-2. Esta técnica necesita un procedimiento previo de corrección de ensayo para minimizar las diferencias en las características de amplitud y de fase entre los dos micrófonos. Para realizar los ensayos se utilizó el tubo de impedancia Acupro Spectronics, con una

gama de frecuencias entre 50 y 6300 Hz. En la figura 1 se puede observar el montaje para la medición.



Figura 1. Montaje de tubo de impedancia para la determinación del coeficiente de absorción

Para los ensayos acústicos se utilizaron tres probetas de cada tipo de tablero. Las diferentes probetas se pueden observar en la figura 2.



Figura 2. Probetas de ensayos acústicos.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1 Microscopia electrónica de barrido

Según se puede ver en la figura 3, (en la micrografía de la superficie de la caña común), tiene haces vasculares de fibras compactos rodeados por fitolitos de sílice, alineados a lo largo de toda la superficie exterior de la caña, que le dan el aspecto brillante y satinado.

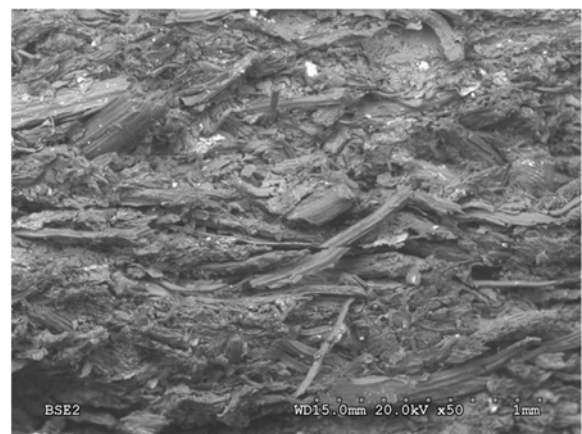
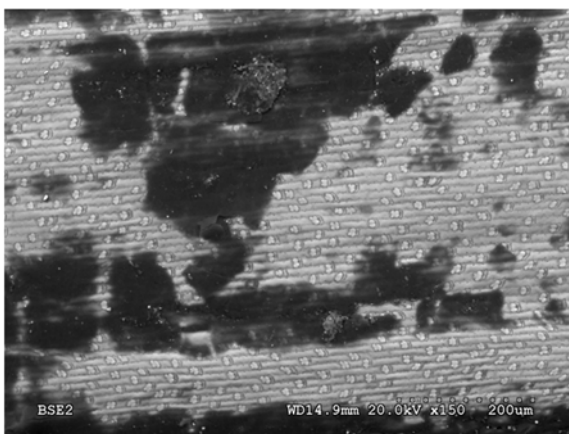


Figura 3. Micrografía de la superficie de la caña común    Figura 4. Fractura del tablero partículas 0.25 a 1 mm

Las figuras 4, 5 y 6 son micrografías de la fractura de paneles elaborados con partículas de 0.25 a 1 mm, de 1 a 2 mm y de 2 a 4 mm.

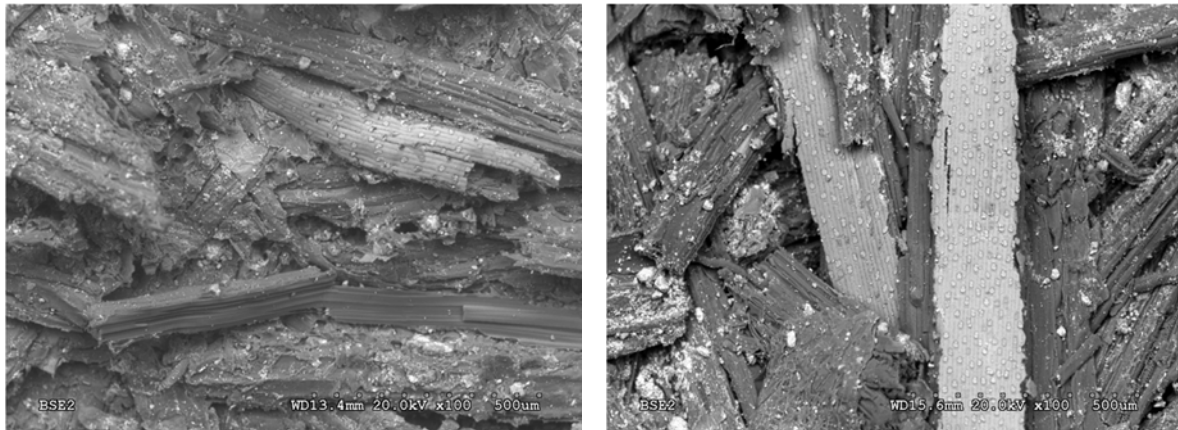


Figura 5. Fractura del tablero partículas 1 a 2 mm    Figura 6. Fractura del tablero partículas 2 a 4 mm

Como se observa en los paneles con partículas de mayor tamaño existe mucha porosidad y los tableros fracturan más fácilmente cuando las partículas corresponden a las capas superiores de la caña, donde se pueden observar los fitolitos. Todo parece indicar que los tableros con tamaños de partículas mayores tendrán menor densidad y menores propiedades mecánicas ya que tienen una gran superficie de fitolitos que impiden una mejor cohesión de las partículas presentando más dificultad de adhesión de la resina Urea Formaldehído. En los tableros con partículas de pequeño tamaño se observa que tienen menor porosidad salvo las fibras de los haces vasculares que al ser de mayor dureza no se han comprimido.

### 3.2. Propiedades físicas y mecánicas

Para proceder a los ensayos de laboratorio, las probetas de los diferentes ensayos se mantuvieron a una atmósfera controlada con una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 65%. Los valores medios obtenidos de los ensayos se indican en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los tableros de partículas de caña común.

Partícula (mm)	Densidad (kg·m <sup>-3</sup> )	MOR (N·mm <sup>-2</sup> )	MOE (N·mm <sup>-2</sup> )	IB (N·mm <sup>-2</sup> )
0.25 a 1	817.8	17.2	2300.3	1.2
1 a 2	752.6	13.2	1789.6	1.2
2 a 4	719.6	10.0	1190.7	1.0
EN 312 clase P4	660-820	16	2300	0.40

La densidad de los tableros oscila entre 719.6 y 817.8 kg·m<sup>-3</sup>, aumentando unos 50 kg·m<sup>-3</sup> aproximadamente de un tamaño de partícula al tamaño superior. Con la presión aplicada se obtiene una densidad media, existiendo diferencias significativas entre los tableros con diferente tamaño de partícula, a mayor tamaño de partícula menor densidad.

La resistencia a flexión (MOR) depende del tamaño de partícula. El MOR para partículas de 0.25 a 1 mm alcanza un valor de 17.2 N·mm<sup>-2</sup>, disminuyendo con partículas de mayor tamaño. El módulo de elasticidad en flexión (MOE) también depende del tamaño de partícula obteniendo valores de 1190.7 a 2300.3 N·mm<sup>-2</sup>. Los valores de cohesión interna (IB) no dependen del tamaño de partícula y se obtienen valores altos desde 1.0 hasta 1.2 N·mm<sup>-2</sup>.

Los tableros con partículas de 0.25 a 1 mm pueden tener un uso estructural, ya que alcanzan las propiedades mecánicas mínimas requeridas por las normas europeas (EN 312). Todos los tableros tienen propiedades mecánicas superiores a los tableros aislantes usados en la construcción.

### 3.3. Propiedades acústicas

En la figura 7 se indican los valores obtenidos del coeficiente de absorción acústica de los ensayos realizados con tres probetas de cada tablero. Como puede observarse, existen diferencias notables entre los tableros fabricados según el tamaño de las partículas. En la figura 8 se indican los valores medios del ensayo de absorción acústica en función del tamaño de partícula, para frecuencias de bandas de octavas normalizadas.

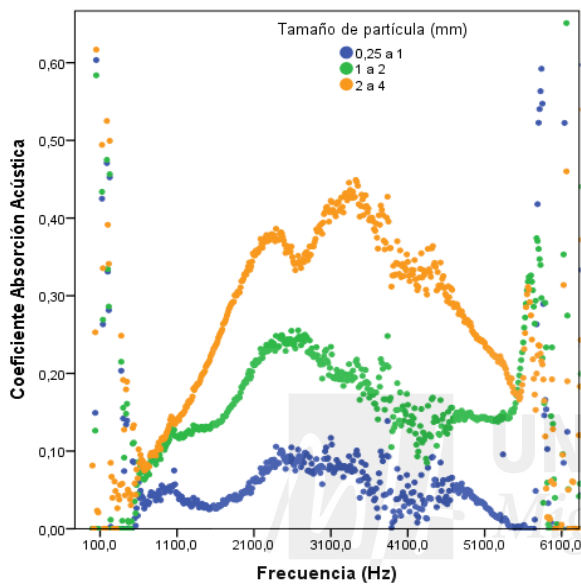


Figura 7. Resultados del ensayo

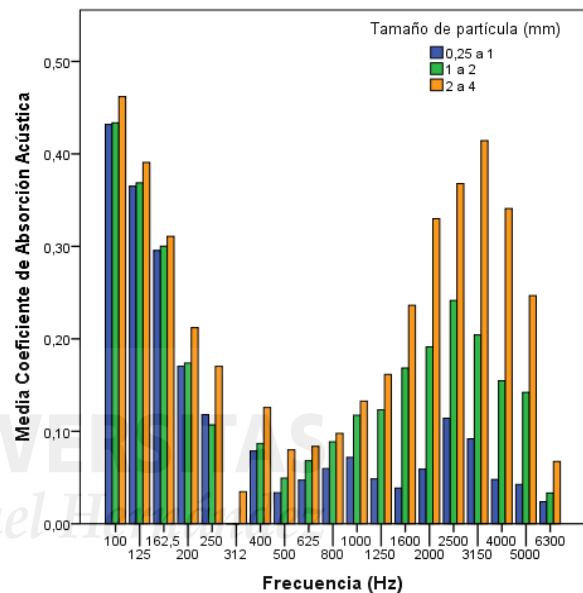


Figura 8. Coef.  $\alpha$  en función del tipo de tablero

Como se indica en la gráfica del ensayo de absorción acústica, con los tres tamaños de partícula se obtiene un valor alto para frecuencias muy bajas (con 50 Hz el coeficiente de absorción es 0,7), posteriormente va disminuyendo para frecuencias medias hasta valores bajos y nuevamente vuelve a aumentar. Las gráficas de los diferentes tipos de paneles indican que hay diferencias significativas entre unos tipos de tableros y otros, especialmente en las bandas de 1250 a 5000 Hz. Realizado el análisis estadístico se puede concluir que hay diferencias significativas respecto al tamaño de partícula utilizado, ya que a mayor tamaño de partícula, mayores son los coeficientes de absorción acústica. Esto puede ser debido a que los tableros tienen distintas densidades, lo que indica una porosidad diferente también observada en las micrografías. Pero es probable que también influya el tamaño de partícula, pues con la disminución de densidad entre las partículas de 0.25 a 1 mm y de 1 a 2 mm, las diferencias entre los valores de absorción acústica no son tan significativas como con los paneles de partículas 2 a 4 mm, teniendo una diferencia de densidad similar.

Según la norma EN ISO 11654, con valores de coeficiente de absorción acústica desde 0.30 hasta 0.55 serían absorbentes de clase D, con valores de 0.15 hasta 0.25 se clasificarían como absorbente clase E y para valores menores estarían sin clasificar. En general los tableros de caña de partículas de 2 a 4 mm podrían clasificarse como tableros absorbentes acústicos clase D, salvo para la frecuencia de 500 Hz.

Otros estudios con otras fibras vegetales coinciden con este trabajo en la disminución en el coeficiente de absorción del sonido para frecuencia medias y aumento de la absorción de sonido en el rango de frecuencia baja y alta. En cambio hay diversos resultados respecto a la influencia de la partícula del tablero. Con fibras de tallo de arroz (Yang et al. 2003) observaron que no influye el tamaño de las partículas, e indican que solo depende de la densidad. En este trabajo se han observado mayores valores de absorción acústica en partículas de mayor tamaño, en cambio Karlinasari et al. (2012) comprobaron que en paneles de bambú se obtenía mayor coeficiente de absorción acústica con menor tamaño de partícula.

En la tabla 2 se muestran los coeficientes de absorción acústica en función de las frecuencias centrales de bandas de octavas normalizadas. Los resultados obtenidos se han referido a estas frecuencias ya que son las más usadas en acústica arquitectónica y en la mayoría de trabajos y estudios consultados. Esto facilita la posterior comparación de los resultados con los valores obtenidos para otros materiales de la misma densidad empleados habitualmente en construcción.

*Tabla 2. Coeficientes de absorción acústica ( $\alpha$ ) en función de la frecuencia*

Material	Partícula(mm)	Frecuencia (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Paneles decaña	0.25 a 1	0.37	0.12	0.03	0.07	0.06	0.05
	1 a 2	0.37	0.11	0.05	0.12	0.19	0.15
	2 a 4	0.39	0.17	0.08	0.13	0.33	0.34
Madera		0.15	0,11	0,10	0.07	0.06	0.07
Panel de madera contrachapada 1cm espesor		0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11

Los resultados obtenidos indican que los tableros de partículas de 2 a 4 mm son mejores absorbentes del ruido que las maderas y paneles contrachapados comerciales de igual densidad. Los tableros con partículas de 1 a 2 mm son más absorbentes del sonido que los tableros de madera. Con los tableros de partículas de 0.25 a 1 mm se obtienen valores menores a partir de frecuencias de 125 Hz.

El coeficiente de absorción acústica depende del espesor del panel. Los paneles ensayados tenían un espesor medio de 6.7 mm, por lo que aumentando el espesor se mejorarían sus propiedades de absorción del sonido.

Otro indicador importante es la pérdida de transmisión, un parámetro expresado en dB que depende de la frecuencia e indica en cuanto se atenúa la energía sonora incidente al atravesar un material. En la figura 8 se indican los valores obtenidos en función de las frecuencias centrales de bandas de octavas normalizadas.

La energía acústica perdida es mayor en los tableros de partículas de menor tamaño, siendo menor la energía sonora que la energía incidente hasta 52 dB a una frecuencia de 400 Hz. La media de pérdida de transmisión acústica para los tableros de 0.25 a 1 mm es de 37.5 dB, para los tableros de 1 a 2 mm es 31.5 dB y para los tableros de 2 a 4 mm 15 dB. La pérdida de transmisión acústica depende de la densidad del tablero y del tamaño de partícula. Esto nos indica que los tableros de caña pueden ser buenos aislantes acústicos ya que con partículas de menor tamaño se atenúa más el sonido y con partículas de mayor tamaño es mayor el coeficiente de absorción acústica.

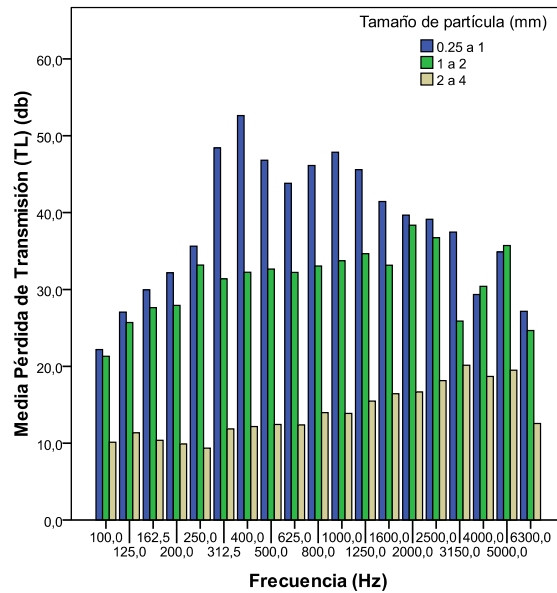


Figura 8. Pérdida de transmisión acústica en función de la frecuencia y del tipo de tablero

#### 4. Conclusiones

Los tableros obtenidos son de densidad media y ésta depende del tamaño de partícula con una diferencia entre ellos de 50 en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Según las propiedades mecánicas obtenidas, los tableros de partículas de 0.25 a 1 mm son tableros estructurales (EN 312), los de partículas de 1 a 2 mm son tableros de uso general y los de 2 a 4 mm sólo podrían utilizarse como aislantes (EN ISO 11654). Todos los tableros tenían un módulo de ruptura en flexión mayor que el necesario para los tableros para aislamiento.

Los tableros de caña con un tamaño de partícula de 2 a 4 mm son adecuados como material de aislamiento para absorción del sonido. Estos tableros tienen mejores valores que la madera en general y que los tableros contrachapados empleados en la construcción. Con partículas de menor tamaño hay mayor pérdida de energía sonora.

El tamaño de partícula del tablero es una variable importante ya que influye en todas las propiedades tanto mecánicas como acústicas.

La elaboración de tableros de caña común tiene menor coste energético. El secado del material se ha realizado al exterior (sin consumo de energía) y la temperatura de la prensa ( $120^{\circ}\text{C}$ ) es menor que la temperatura utilizada en la elaboración de tableros industriales ( $180^{\circ}\text{C}$ ).

La utilización de este residuo para producir tableros de partículas aglomeradas conllevaría un beneficio ambiental, evitaría la contaminación de los ríos y se obtendrían tableros de menor coste energético.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad de España (MINECO, AGL2013-41612-R)



## Bibliografía

- Asdrubali, F., D'Alessandro, F. and Schiavoni, S. 2015. A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4: 1-17.
- EN 309. 2005. Tableros de partículas. Definición y clasificación. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 310. 1993. Tableros derivados de la madera. Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 312. 2010. Tableros de partículas. Especificaciones. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 319. 1993. Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las caras del tablero. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 323 .1993. Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la densidad. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN ISO 10534-2. 2002. Acústica Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia. (ISO 10534-2:1998). European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN ISO 11654. 1997. Acústica. Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica. (ISO 11654:1997). European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Fatima, S. and MohantyA.R. 2011. Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Applied Acoustics*, 72: 108–114.
- Karlinasari, L., Hermawan, D., Maddu, A., Bagus, M., Lucky, I. K., Nugroho, N. and Hadi, Y. S. 2012. Acoustical properties of particleboards made from betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) as building construction material. *BioResources*, 7(4): 5700-5709.
- Kerdongmee, P., Saleh, A., Eadkhong, T., and Danworaphong, S. 2016. Investigating Sound Absorption of Oil Palm Trunk Panels Using One-microphone Impedance Tube. *BioResources*, 11(4):8409-8418.
- Khidir, E. A., Nik Mohamed, N. A., Nor, M., Jailani, M., Tahir, M. F. M., Zulkifli, R., and Nuawi, M. Z. 2014. Effect of density on the sound absorption of date palm fibers. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 663, pp. 437-441). *Trans Tech Publications*.
- Lü, X., Lu, T., Lipponen, O. and Viljanen, M. 2013. Insulation Materials Made with Vegetable Fibres. In *Nearly Zero Energy Building Refurbishment* (pp. 411-455). Springer London.
- Sampathrajan, A., Vijayaraghavan, N. C., and Swaminathan, K. R. 1991. Acoustic aspects of farm residue-based particleboards. *Bioresource Technology*, 35(1): 67-71.
- Yang, H. S., Kim, D. J. and Kim, H. J. 2003. Rice straw–wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. *Bioresource Technology*, 86(2): 117- 121
- Zhu, X., Kim, B. J., Wang, Q. and Wu, Q. 2014. Recent advances in the sound insulation properties of bio-based materials. *BioResources*, 9(1): 1764-1786.
- Zulkifli, R., Nor, M. J. M., Ismail, A. R., Nuawi, M. Z. and Tahir, M. F. M. 2009. Effect of perforated size and air gap thickness on acoustic properties of coir fibre sound absorption panels. *European Journal of Scientific Research*, 28(2): 242-252.



**PUBLICACIÓN 4: EVALUACIÓN DE PANELES DE  
TRONCO DE PALMERA-CEMENTO**







IX congresso ibérico de  
**AGROENGENHARIA 2017**  
4 a 6 de setembro  
Bragança – Portugal

## Evaluación de paneles de tronco de palmera-cemento

Cristina C. Ferrandez-Garcia<sup>1</sup>, Clara Eugenia Ferrandez-Garcia<sup>1</sup>, Manuel Ferrandez-Villena<sup>1</sup>,  
M<sup>a</sup> Teresa Ferrandez-Garcia<sup>1</sup>, Teresa Garcia-Ortuño<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería. Escuela Politécnica Superior de Orihuela (Alicante). Universidad Miguel Hernández de Elche. España

### Resumen

Los paneles de madera-cemento cada vez se utilizan más como materiales prefabricados para la construcción. Debido a los problemas medioambientales, se está incrementando el uso de recursos renovables. Por ello, se está aumentando en todo el mundo la utilización de otras fibras vegetales en el desarrollo de nuevos productos. En este trabajo se discute el uso de partículas de palmera canaria en la fabricación de paneles de fibras con un 20 % de cemento, utilizando como plastificante distintas proporciones de almidón. En la elaboración se utilizó una presión de 2.6 MPa y una temperatura de 100°C. Se estudió la densidad, hinchamiento en espesor, cohesión interna, resistencia a la flexión y la conductividad térmica. Las pruebas mecánicas indicaron que los valores de MOR y MOE aumentaron con el tiempo, por lo que las partículas de la palmera, parecieron tolerar la alcalinidad del cemento. El tablero con un 5% de almidón tenía a los 28 días un MOR de 15.76 N·mm<sup>-2</sup>, y un MOE de 1872 N·mm<sup>-2</sup>. Los tableros con espesores de 6.7 mm tenían una conductividad térmica media de 0.054 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>. Estas placas alcanzaron buenas propiedades mecánicas y podrían utilizarse para usos generales y como aislante térmico.

**Palabras clave:** Phoenix canariensis, cemento, almidón, propiedades físicas, mecánicas y térmicas

## Evaluation of cement-palm trunk's panel

### Abstract

Wood-cement panels are increasingly used as prefabricated materials for construction. Due to environmental problems, the use of renewable resources is incrementing. Because of this, the utilization of other vegetable fibres in the development of new products, is increasing worldwide. This paper discusses the use of Canary palm particles in the fibre panels production with 20% cement, using as a plasticizer different proportions of starch. These panels were made with a pressure of 2.6 MPa and temperature of 100°C. The study of density, thickness swelling, internal cohesion, bending strength and thermal conductivity of these panels, was carried out. The mechanical tests indicated that the values of MOR and MOE increased over time, so that palm particles seemed to tolerate the alkalinity of cement. 5 % starch panel had a 15.76 N·mm<sup>-2</sup> of MOR and 1872 N·mm<sup>-2</sup> of MOE at 28 days. The boards with thicknesses of 6.7 mm had an average thermal conductivity of 0.054 W · W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>. These boards achieved good mechanical properties and could be used for general purposes as well as thermal insulation.

**Keywords:** Phoenix canariensis, cement, starch, physical, mechanical and thermal properties

## 1. Introducción

Cada vez se utilizan más en la edificación los paneles de madera-cemento para encofrados, cubiertas, paneles sandwich, revestimientos, tabiques-particiones, casas prefabricadas, falsos techos y solados. Son tableros elaborados con partículas de madera o fibras de celulosa mezcladas con cemento, agua y aditivos químicos. Generalmente, se fabrican mediante un proceso húmedo con alta temperatura y presión durante unos minutos para, posteriormente, dejar curar entre 8 y 18 días presionados a una temperatura de 75 a 80°C.

Ante la escasez de maderas, las últimas tendencias se dirigen hacia la utilización de otras fibras vegetales. En todo el mundo se genera gran cantidad de residuos vegetales a partir de diversas fuentes, de forma que la utilización de estos deshechos contribuiría a su reciclaje y valorización. Uno de los residuos vegetales que pueden ser utilizados son las partículas del tronco de palmera canaria, los cuales, se consiguen con facilidad como consecuencia de los restos de esta planta cuando se infecta por la plaga del picudo rojo (*Rhynchophorus ferrugineus*). Estas palmeras deben ser trituradas y los residuos llevados a vertederos autorizados. La utilización de estos deshechos puede contribuir a la adopción de soluciones sostenibles para el control y erradicación de especímenes contaminados y producir una mejora ambiental.

Se han ensayado diferentes fibras vegetales con cementos y morteros de cemento: fibras de sisal, bambú, cáscara de coco y yute natural (Sen and Reddy, 2011), fibras de cáñamo (Sedan et al., 2008), fibras de sisal y banano (Savastano et al., 2009), fibras de raquis de palmera datilera (Kriker et al., 2008) y *Arundo donax* L. (Ferrández-García et al., 2015).

Chandra and Flodin, (1987) concluyeron que en general, las fibras vegetales presentan problemas de degradación con el cemento. Por lo que hay diferentes propuestas de modificación de las fibras vegetales para evitar su degradación: Tratamiento alcalino de fibras de yute (Chakraborty et al., 2013), tratamiento con silano de fibras del bagazo de caña de azúcar (Bilba and Arsene, 2008), modificación de las fibras de kenaf mediante diversos tratamientos químicos (Mahjoub et al., 2014) y tratamientos en tres soluciones alcalinas de fibras de raquis de palmera datilera (Kriker et al., 2008).

En ensayos realizados de compuestos de fibras vegetales con cemento Savastano et al., (2009) indicaron que sufrieron una severa disminución de la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad en flexión, después de la exposición durante un año a ambientes templados o tropicales, concluyendo que las reducciones podrían atribuirse a la carbonatación de la matriz seguida de lixiviación y microfisuración progresiva. Igualmente Ramakrishna and Sundararajan, (2005) demostraron que la degradación se debía a la carbonatación de las fibras vegetales.

En una revisión sobre las recientes investigaciones del uso de fibras vegetales en materiales compuestos de cemento, Yan et al., (2016) dedujeron que los elementos celulósicos presentan una gran variabilidad en las propiedades mecánicas, debido a que se degradan principalmente por la degradación alcalina y por la mineralización de las fibras. Estos mecanismos producen cambios en la composición química de las fibras que provocan una disminución en su resistencia, una degradación de la matriz polimérica y una degradación en el enlace interfacial de la matriz de fibra / polímero.

En general en la bibliografía consultada se indica que en los materiales compuestos de cemento reforzado con fibras vegetales se producía una disminución del calor de hidratación (Bilba et al., 2003; Sudin and Swamy, 2006; Fan et al., 2012), atribuyéndolo a distintos componentes de las fibras vegetales. Por lo que Vo and Navard (2016) indicaron que seleccionar fuentes de biomasa con bajo contenido en estos compuestos, minimizaría estos inconvenientes.

Onuaguluchi, and Banthia, (2016) recomendaron en la revisión realizada sobre las fibras naturales reforzando composites de cemento que se mejoraría al principio la hidratación del cemento aumentando la temperatura de curado, añadiendo aceleradores químicos y utilizando materiales que tuviesen un área superficial alta.

Igualmente se ha investigado la adición de almidón al cemento. Dewacker and Mcad, (1996) sugirieron que una mezcla de polisacáridos tales como celulosa y almidón eran un buen agente de retención de agua. Estos aditivos son también agentes retardantes del fraguado, mejoran el tiempo de trabajabilidad y modifican la hidratación del cemento. Zhang et al., (2007), realizaron un estudio sobre el mecanismo de dispersión del almidón sulfonado como agente reductor del agua para el cemento. Ferrández-García et al., (2015), estudiaron placas de cemento con distintas proporciones de almidón, concluyendo que tenían propiedades mecánicas de tableros estructurales.

El tronco de palmera canaria ha sido estudiado para la elaboración de tableros de partículas por Ferrández-García et al., (2015) e indicaron que usando como adhesivo un 20% de almidón y un tiempo de 30 minutos de prensado en caliente, los tableros podían clasificarse como tipo P2 que podrían utilizarse para la fabricación de muebles, revestimiento de pisos y falsos techos

El objetivo de este estudio fue evaluar un nuevo composite con biomasa del tronco de la palmera canaria aglomerada con cemento y almidón, analizar las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de estos paneles, y averiguar si se produce degradación de las partículas de palmera a lo largo del tiempo. Dado que los tableros se consideran productos de alto valor y larga duración, la fabricación de tales tableros podría ayudar a disminuir la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>, fijándola, contribuyendo así a mejorar el medio ambiente.

## **2. Materiales y Métodos**

### **2.1. Materiales**

Los materiales empleados fueron cemento portland tipo CEM II/B-LL 32,5N, agua, partículas de tronco de palmera canaria y distintas proporciones de almidón de patata.

La biomasa de palmera canaria se obtuvo de palmeras de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela. Los troncos de palmera se cortaron, después se trocearon y se mantuvieron al aire libre para su secado durante 6 meses. Posteriormente se trituraron en una desfibradora de cuchillas para conseguir partículas con un tamaño inferior a 0.25 mm y una humedad relativa del 54%, por lo que se dejaron secar al aire durante 3 meses más hasta una humedad relativa del 10%.

Como plastificante se utilizó almidón de patata de la industria alimentaria con un grado de pureza del 90%. Químicamente el almidón es una mezcla de dos polisacáridos muy similares que son la amilosa y la amilopectina. El almidón de patata contiene típicamente grandes gránulos ovales y gelifica a una temperatura de 58-65°C.

### **2.2. Proceso de fabricación**

El proceso de fabricación consistió en mezclar en seco el cemento y las partículas de palmera con proporciones diferentes de almidón (0%, 5% y 10%), obteniendo 3 clases de paneles. Posteriormente se pulverizó un 10% de agua sobre la masa, removiéndola durante 15 minutos para su homogeneización. La manta se formó en un molde de dimensiones 600 mm x 400 mm y se sometió a presión y calor en una prensa de platos calientes, con una presión de 2.6 MPa, una temperatura de 100°C durante 2 o 3 horas. Posteriormente, se dejaron los paneles enfriar en posición horizontal hasta su enfriamiento. Los tableros tenían unas dimensiones aproximadas de 600 x 400 x 6.7 mm. Una vez fríos, se cortaron las probetas para realizar los ensayos necesarios para la caracterización de las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de cada uno de las 6 tipos de tableros sometidos a estudio. Para cada tipo se elaboraron 10 paneles.

El tiempo en la prensa y los porcentajes de cada uno de los componentes de la mezcla en función de la dosificación en peso, fueron los que se indican en la tabla 1.

Tabla 1. Dosificación en peso

Tipo de tablero	Tiempo (h)	Partículas de palmera	Cemento Portland	Agua	Almidón
A1	2	1	0.20	0.10	0
A2	3	1	0.20	0.10	0
B1	2	1	0.20	0.10	0.05
B2	3	1	0.20	0.10	0.05
C1	2	1	0.20	0.10	0.10
C2	3	1	0.20	0.10	0.10

### 2.3. Métodos

El método seguido fue experimental mediante ensayos en el laboratorio de resistencia de materiales. Los valores se determinaron siguiendo las normas europeas establecidas para los tableros de partículas de madera (EN 309). Antes de proceder a los ensayos se cortaron las probetas de cada tablero y se acondicionaron a una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 65%.

Se midió a los 28 días la densidad (EN 323), el hinchamiento en espesor y absorción de agua tras 2 y 24 horas de inmersión en agua (EN 317) y la cohesión interna o resistencia a tracción (EN 319).

Para evaluar la posible degradación de las partículas de palmera canaria en contacto con el cemento, se evaluó el módulo de ruptura a flexión (MOR) y el módulo de elasticidad a flexión (MOE) a los 8, 28 y 90 días según la norma EN 310. En este ensayo se utilizaron 2 probetas de cada tablero.

Los ensayos mecánicos se realizaron en la máquina de ensayos marca IMAL, que cumple con la velocidad requerida en cada ensayo, según indican las normas europeas aplicables.

La conductividad y la resistencia térmica se determinaron mediante el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor (EN 12667). Los ensayos térmicos se realizaron en un medidor de flujo de calor marca NETZSCH instruments, Inc, USA. En este ensayo se utilizó una probeta de cada tablero con dimensiones de 300 x 300 x 6.7 mm.

De los valores medios de los ensayos se obtuvo la desviación estándar y se realizó el análisis de la varianza (ANOVA). Para comparar las diferencias entre los tipos de tableros se utilizó el test de Duncan ( $P < 0.05$ ). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa informático SPSS v. 21.0

## 3. Resultados y Discusión

### 3.1. Propiedades físicas

Los valores de densidad se observan en la figura 1. La densidad de los tableros disminuye al añadir almidón desde 1083.65 kg·m<sup>-3</sup> en los tableros sin almidón hasta 1039.26 kg·m<sup>-3</sup> en los tableros que se ha añadido un 10% de almidón. Aunque en el análisis estadístico no se observa que la densidad dependa del tipo de tablero.



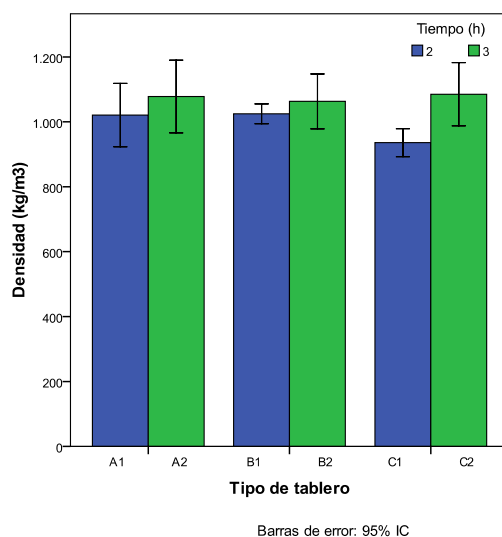


Figura 1. Densidad media en función del tipo de tablero.

Los resultados del ensayo de hinchamiento en espesor (TS) se indican en la figura 2. En el ensayo de inmersión en agua de los tableros se observa que a las 2h los tres tipos de tableros tienen un hinchamiento en espesor con valores similares (13%). A las 24 h, los tableros sin almidón tienen un TS de 29,8%, con un 5% de almidón un TS de 24.8% y con un 10% de almidón un TS de 23,1%. Aunque estadísticamente no se observa que dependa del almidón añadido, esto puede ser porque se utilizó poca cantidad. Habría que realizar nuevos ensayos añadiendo mayores cantidades de almidón, ya que los resultados parecen indicar que a mayor proporción de almidón menor es el TS a las 24h.

El hinchamiento en espesor es muy alto, por lo que habría que añadir alguna cera para conseguir valores menores.

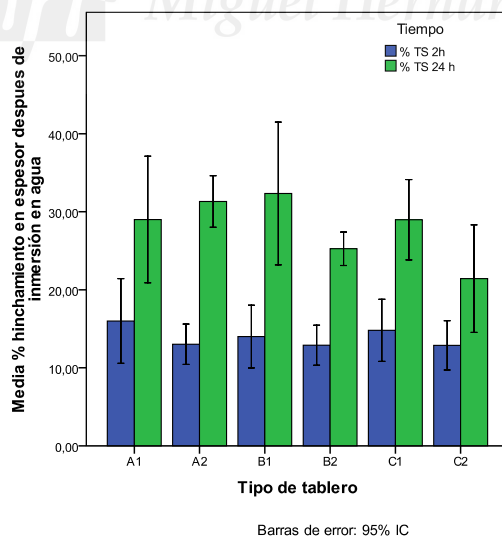


Figura 2. Porcentaje de hinchamiento en espesor a las 2 y 24 h

Como se observa en la figura 3, el comportamiento de las tres clases de tableros sobre la absorción de agua después de inmersión (WA) es similar a las 2h (WA ≈ 30%) y a las 24 h (WA ≈ 51%), no habiendo diferencias significativas entre los tres tipos de tableros. En los tableros con un 10% de almidón se observa que hay mayor desviación estándar. Este dato puede indicar que en la elaboración del tablero todo el almidón no ha gelificado, por tanto unas probetas han absorbido más agua que otras en el ensayo.

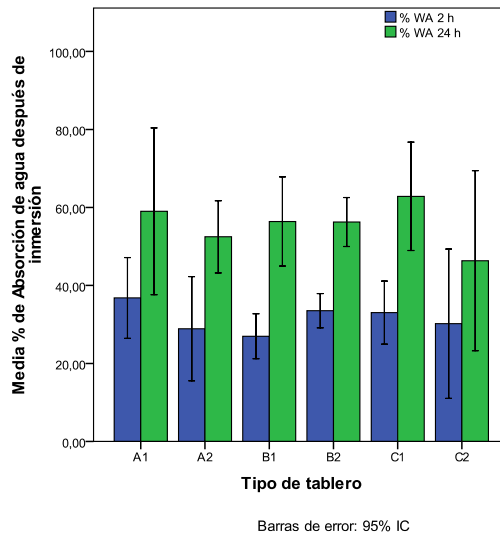


Figura 3. Porcentaje de absorción de agua a las 2 y 24 h

### 3.2. Propiedades mecánicas

Los valores de cohesión interna (IB) se muestran en la figura 4 destacando que son muy altos. Los tableros con un 5% de almidón alcanzan valores medios de  $0.86 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  y los que no contenían almidón  $0.58 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , existiendo una gran desviación. Este aspecto puede ser debido a la competencia por el agua entre el cemento, las partículas y el almidón. El análisis estadístico indica que no hay diferencias significativas entre las tres clases de tableros ni del tiempo que estuvieron en la prensa de platos calientes.

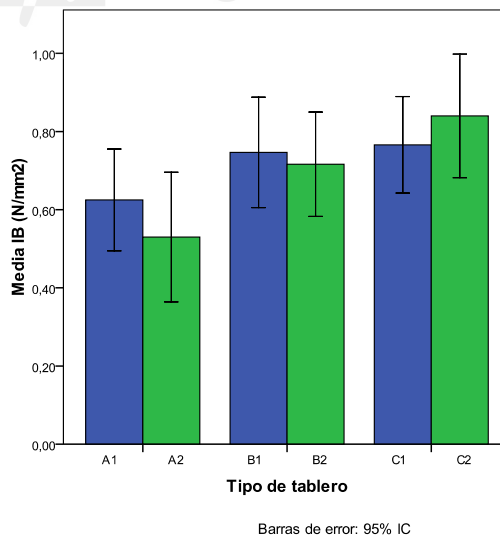


Figura 4. Cohesión interna en función del tipo de tablero

Los resultados del ensayo a flexión a los 8, 28 y 90 días se muestran en las figuras 5 y 6. Se observa que en los 6 tipos de tableros aumentan los valores del módulo de rotura en flexión (MOR) y el módulo de elasticidad en flexión (MOE) a lo largo del tiempo, lo que indica que la biomasa de palmera tolera la alcalinidad del cemento. Los valores de MOR y MOE dependen del tipo de tablero. El tablero con un 5% de almidón tenían a los 28 días un MOR de  $15.76 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , y un MOE de  $1872 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , en cambio sin almidón el MOR es de  $13.61 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ , y el MOE  $1799 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ . En los tableros de clase C, aunque tienen buenos valores de MOR y MOE, parece que todo

el almidón no ha gelificado, que ha habido competencia por el agua entre las partículas de palmera, el cemento y el almidón. No se observan diferencias significativas debido al tiempo que estuvieron los tableros en la prensa de platos calientes.

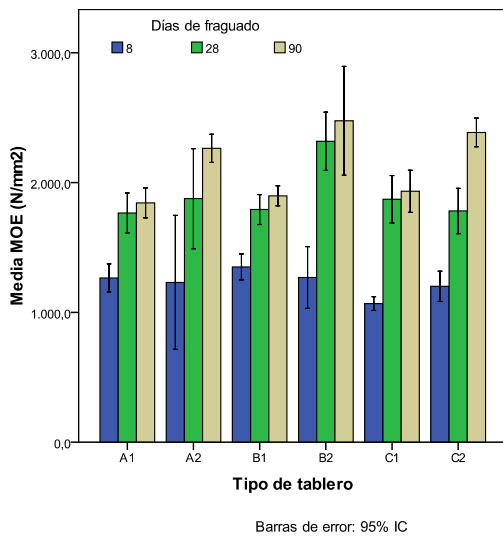


Figura 5. Módulo de rotura de flexión (MOR)

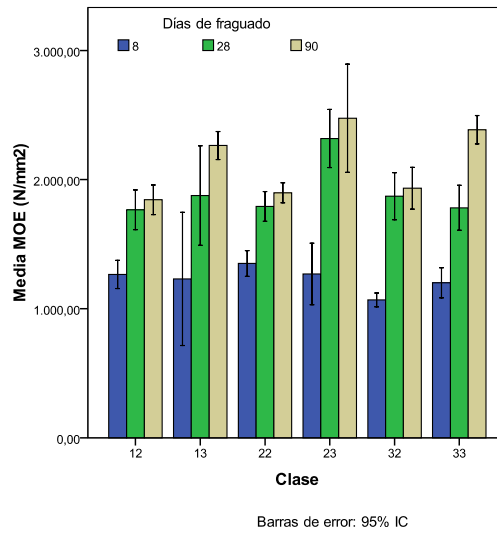


Figura 6. Módulo de elasticidad de flexión (MOE)

El tiempo que los tableros estuvieron en la prensa parece que influye en las propiedades a lo largo del fraguado. El tiempo de prensado fue de 2 y 3 horas y los tableros de madera-cemento industriales permanecen 8 horas. Parece que a mayor tiempo mejores propiedades mecánicas, esto habrá de confirmarse con nuevos ensayos donde se contemple un proceso de elaboración con mayor tiempo en la prensa.

Las tres clases de tableros ensayadas pueden clasificarse como tableros tipo P2 (EN 312, 2010), para usos generales, incluso utilización para muebles. Para poder tener mayores prestaciones y clasificarse como estructurales habría que disminuir el TS.

Otras fibras vegetales se degradan con el cemento, en cambio parece que a la biomasa del tronco de la palmera canaria tolera la alcalinidad, ya que aumenta la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad a los 90 días de fraguado. En paneles de morteros de cemento con fibras de sisal y banano, Savastano et al., (2009) concluyeron que las reducciones MOR y MOE producidos al año en ambiente húmedo, podrían atribuirse a una microfisuración progresiva. Por lo que para poder confirmar que las partículas de palmera canaria no se degradan con cemento habría que realizar ensayos al año de fraguado.

Kriker et al., (2008) utilizaron fibras de raquis de palmera datilera con tratamientos alcalinos como refuerzo del hormigón, y concluyeron que el rendimiento era muy bajo. En este trabajo se han utilizado partículas de tronco de palmera canaria sin tratamientos, con muy poca cantidad de cemento (20%), por lo que la alcalinidad de la mezcla era menor que en los hormigones.

Según Vo and Navard, (2016) los azúcares solubles de las fibras vegetales tienen efectos adversos sobre las prestaciones del hormigón. La palmera canaria tiene un gran contenido de azúcares, sin embargo, en este ensayo no se aprecian esos efectos, por tanto, puede depender del tipo de azúcares de la biomasa vegetal.

Con tratamientos con tetrahidruro de silicio, Bilba and Arsene, (2008) destacan que el bagazo de caña de azúcar toleraba la alcalinidad del cemento. Ferrández-García et al., (2015) indican que el contenido de silicio de la caña común produce un efecto beneficioso para su durabilidad en morteros de cemento. El tronco de palmera canaria contiene silicio, luego puede ser que favorezca que no haya degradación de las partículas.

### 3.2. Propiedades térmicas

En la figura 7 se exponen los valores obtenidos de conductividad térmica. No hay diferencias entre las tres clases de tableros que tienen una conductividad térmica media de  $0.054 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Este valor indica que son buenos aislantes térmicos.

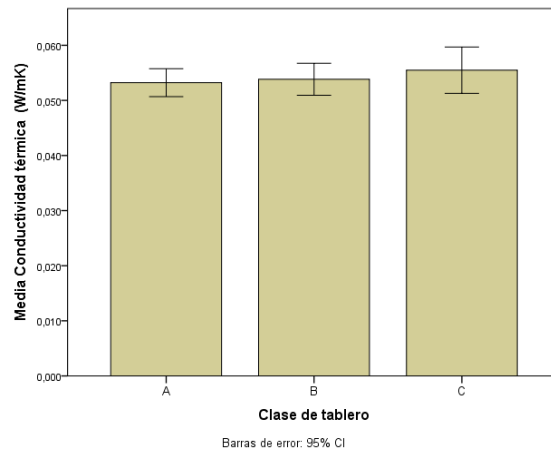


Figura 7. Conductividad térmica  $\lambda$  en función de la clase de tablero

En la tabla 2 se muestran los valores de conductividad térmica de diferentes fibras vegetales.

Tabla 2. Conductividad térmica  $\lambda$  obtenida en diferentes ensayos

Referencia	Material	Conductividad térmica ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
Este trabajo	Tronco palmera canaria-cemento	0.054
Agoudjil et al. (2011)	Raquis palmera datilera	0.083
Behzad and Sain (2007)	Cáñamo	0.111
Kalaprasad et al. (2000)	Sisal	0.070

Como se observa, los paneles de palmera canaria y cemento tienen mejores propiedades térmicas que otras fibras vegetales que han sido propuestas en otros trabajos, para su utilización como materiales aislantes térmicos.

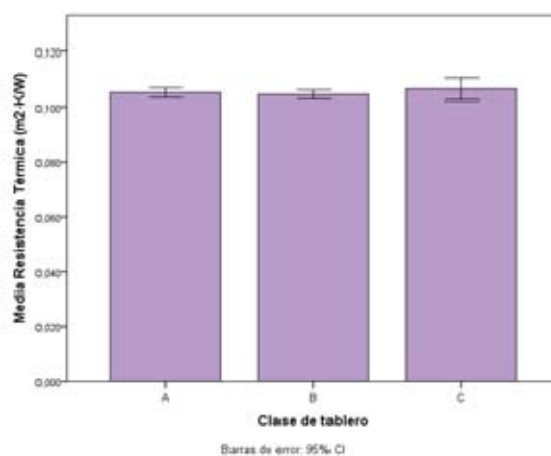


Figura 8. Resistencia térmica en función de la clase de tablero.

En la figura 8 se indican los valores obtenidos de la resistencia térmica de los tableros. Como se observó, no hay diferencias significativas entre ellos. La resistencia térmica media fue de  $0.105 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ . Los paneles de palmera-cemento poseen una resistencia térmica mayor que las maderas en general.

Los valores térmicos obtenidos indican que los tableros de partículas de palmera canaria-cemento se comportan como buenos aislantes.

#### **4. Conclusiones**

Los resultados demuestran que se pueden obtener con pequeñas cantidades de cemento (mediante un proceso de calor y presión), placas de cemento-palmera canaria con buenas propiedades mecánicas y térmicas.

A lo largo del tiempo la resistencia a flexión aumenta, por lo que parece que las partículas del tronco de la palmera canaria toleran la alcalinidad del cemento. Con un 5% de almidón como plastificante, aumentan las propiedades mecánicas (MOR y MOE). El almidón no influye significativamente en el resto de propiedades de los paneles.

Las tres clases de tableros obtenidos tienen las propiedades adecuadas para su uso general, incluso en aplicaciones para muebles. Destacando las bajas conductividades térmicas logradas que abriría las puertas para su empleo como aislantes térmicos.

Sería necesario seguir investigando sobre las distintas proporciones de partículas de palmera canaria, cemento, agua y almidón, y mayor tiempo en la prensa de platos calientes para obtener un producto con menor hinchamiento en espesor después de inmersión en agua.

Las partículas de tronco de palmera canaria pueden ser una alternativa para la fabricación de placas de fibras con cemento. El uso de los residuos de palmera podría ser una buena aplicación para el reciclaje y obtención de un nuevo material "verde" que produciría un beneficio industrial y ambiental.

#### **Agradecimientos**

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad de España (MINECO, AGL2013-41612-R).

#### **Bibliografía**

Agoudjil, B., Benchabane, A., Boudenne, A., Ibos, L., and Fois, M. 2011. Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood. *Energy and buildings*, 43(2): 491-497.

Behzad, T. and Sain M. 2007. Measurement and prediction of thermal conductivity for hemp fiber reinforced composites. *Polymer Engineering and Science*, 47 (7): 977–983.

Bilba K and Arsene MA. 2008. Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites. *Composites Part A*, 39:1488-95.

Chakraborty, S., Kundu, S.P., Roy, A., Adhikari, B. and Majumder, S.B. 2013. Polymer modified jute fibre as reinforcing agent controlling the physical and mechanical characteristics of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 49: 214-222.

Chandra, S., and Flodin, P. 1987. Interactions of polymers and organic admixtures on Portland cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 17(6): 875-890.

- EN 12667. 2001. Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 309. 2005. Tableros de partículas. Definición y clasificación. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 310. 1993. Tableros derivados de la madera. Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 312. 2010. Tableros de partículas. Especificaciones. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 317. 1993. Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la hinchazón en espesor después de inmersión en agua. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 319. 1993. Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las caras del tablero. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 323. 1993. Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la densidad. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Ferrández-García, M.T., García-Ortuño, T., Ferrández-Villena, M., Andreu-Rodríguez, J., and Ferrández-García, C.E. 2015. Estudio de las propiedades de placas de cemento mejoradas con almidón. VII Congreso Ibérico de Agroingeniería. Retos de la nueva agricultura mediterránea ISBN 978-84-16024-30-8. Editor: Universidad Miguel Hernández. Pp 387-389.
- Ferrández-García, C.E., García-Ortuño, T., Andreu-Rodríguez, J., Ferrández-Villena, M. and Ferrández-García M. T. 2015. Mechanical Properties of a Cement Mortar Reinforced with *Arundo donax* L. Reeds. *International Journal of Civil and Structural Engineering– IJCSE*, 2(1): 305-308.
- Ferrández-García, A., Ferrández-García, M.T., Ferrández-Villena, M., Andreu-Rodríguez, J., García-Ortuño, T., Ferrández-García, C.E. 2015. The influence of Starch in Canary Island date palm trunk panels without synthetic adhesive. Proceeding, International Conference Sustainable Materials Science and Technology. Paris (France), 15-17 July 2015. Pp 223.
- Kalaprasad, G., Pradeep, P., Mathew, G., Pavithran, C. and Thomas, S. 2000. Thermal conductivity and thermal diffusivity analyses of low-density polyethylene composites reinforced with sisal, glass and intimately mixed sisal/glass fibres, *Composites Science and Technology*, 60 (16): 2967–2977.
- Kriker, A., Bali, A., Debicki, G., Bouziane, M., and Chabannet, M. 2008. Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates. *Cement and Concrete Composites*, 30(7): 639-648.
- Mahjoub, R., Yatim, J.M., Mohd Sam, A.R., and Hashemi, S.H. 2014. Tensile properties of kenaf fiber due to various conditions of chemical fiber surface modifications. *Construction and Building Materials*, 55:103-113.
- Ramakrishna, G., and Sundararajan, T. 2005. Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. *Cement and Concrete Composites*, 27(5): 575-582.
- Savastano, H., Santos, S. F., Radonjic, M., and Soboyejo, W. O. 2009. Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 31(4): 232-243.
- Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A., and Chotard, T. 2008. Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: influence of the fibre/matrix interaction. *Journal of the European Ceramic Society*, 28:183-92.

- Sen, T., and Reddy, H. J. 2011. Application of sisal, bamboo, coir and jute natural composites in structural upgradation. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 2 (3):186.
- Vo, L.T. and Navard, P. 2016. Treatments of plant biomass for cementitious building materials – A review. *Construction and Building Materials*, 121:161-76.
- Yan, L., Kasal, B., and Huang, L. 2016. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. *Composites Part B: Engineering*, 92: 94-132.

