

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LOS TABLEROS DE MADERA PLÁSTICA PRODUCIDOS EN CUBA RESPECTO A LOS TABLEROS CONVENCIONALES

EVALUATION OF PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD-PLASTIC BOARDS PRODUCED IN CUBA COMPARED TO CONVENTIONAL BOARDS

Yonny Martínez-López¹; Raúl R. Fernández-Concepción²; Daniel A. Álvarez-Lazo³; Máryuri García-González⁴; Emilio Martínez-Rodríguez⁵.

¹Departamento de Ciencias Forestales, Facultad Agroforestal de Montaña, Universidad de Guantánamo. Av. Che Guevara km 1.5 Carretera Jamaica. C. P. 95100.

Guantánamo, CUBA. Correo-e: yonny78@cug.co.cu Tel.: 0121 32 6113(*Autor para correspondencia).

²Centro de Estudios Forestales (CEF), ³Departamento de Producción Forestal, ⁴Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad de Pinar del Río. Calle Martí núm. 270. C. P. 20100. Pinar del Río, CUBA.

⁵Estación Experimental Agro-Forestal Baracoa. km 13 Carretera a Guantánamo, CUBA.

RESUMEN

Las propiedades físico-mecánicas de los tableros de madera plástica se evaluaron y compararon con los tableros convencionales (tablero de partículas de bagazo de caña, tablero contrachapado y tablero de fibras de bagazo de caña) más utilizados en Cuba. El tablero de madera plástica se elaboró con residuos de la industria forestal (aserrín), residuos industriales (termoplásticos) y aditivos químicos en proporciones de 50, 30 y 20 %, respectivamente; el tablero se obtuvo mediante moldeo por extrusión. Los resultados se analizaron con la prueba de Kruskal-Wallis y comparaciones múltiples post-hoc DMS de Fisher, para determinar las diferencias con relación a los tableros convencionales. Los resultados indican que las propiedades físicas de los tableros de madera plástica mejoraron con el aumento de la densidad. La absorción de agua e hinchamiento fueron menores respecto a los tableros convencionales, mientras que las propiedades mecánicas (flexión, compresión y tracción) fueron superiores. La tracción, flexión y compresión en los tableros de madera plástica fue estadísticamente similar ($P > 0.05$) que en los tableros contrachapados. Dadas sus propiedades, se considera que los tableros de madera plástica son capaces de sustituir tanto a los convencionales como a los de madera en condiciones de intemperie.

PALABRAS CLAVE: Residuos industriales, industria del tablero, extrusión, tableros contrachapados.

ABSTRACT

The physico-mechanical properties of wood-plastic (WP) boards were evaluated and compared with those of conventional boards (sugarcane bagasse particleboard, plywood board and sugarcane bagasse fiberboard) more commonly used in Cuba. The WP board was made with waste from the forestry industry (sawdust), industrial waste (thermoplastics) and chemical additives in amounts of 50, 30 and 20%, respectively; the board was obtained by extrusion molding. Results were analyzed with the Kruskal-Wallis test and Fisher's LSD post-hoc multiple comparisons analysis to determine differences relative to conventional boards. Results indicate that the physical properties of wood-plastic boards improved with increasing density. Water absorption and swelling were lower than in conventional boards, whereas the mechanical properties (bending, compression and tensile strength) were higher. Tensile strength, bending and compression in the wood-plastic boards were statistically similar ($P > 0.05$) in the plywood. Given their properties, it can be concluded that wood-plastic boards are able to replace both conventional and wood boards in outdoor conditions.

KEYWORDS: Industrial waste, board industry, extrusion, plywood boards.



Recibido: 03 de febrero, 2014
Aceptado: 09 de octubre, 2014
doi: 10.5154/r.rchscfa.2014.02.003
<http://www.chapingo.mx/revistas>

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la sociedad junto con la revolución tecnológica ha dado lugar a la mayor producción de residuos en la historia de la humanidad. De acuerdo con Shukla y Kandem (2008), los nuevos modelos de desarrollo deberán basarse en tecnologías de producción sin residuos o con un mínimo de ellos, acompañados de una política de recuperación de residuos. Uno de los sectores productivos que más ha crecido en estos últimos años corresponde a la fabricación de plásticos. Esto conlleva a que las cantidades de residuos plásticos aumenten y, en consecuencia, las cantidades de plásticos reciclados incrementen, provocando la potenciación de la industria recuperadora y dando origen a productos como la madera plástica que forma parte del enriquecimiento de la industria del tablero a nivel mundial. La madera plástica fue creada en Estados Unidos y tiene más de 15 años de ser comercializada en otros países, difundiendo su uso progresivamente (Yeh, Agarwal, & Gupta, 2009).

El desarrollo de nuevos materiales derivados del reciclaje de plásticos y de la madera se está convirtiendo en una alternativa real y ventajosa. La aplicación de estos materiales en productos de diferentes ámbitos proporciona una gama de oportunidades y posibilidades; sus propiedades ofrecen numerosas ventajas ya que soportan las condiciones climáticas, no requieren mantenimiento y resisten el ataque de plagas (Moya, Poblete, & Valenzuela, 2012). Tales ventajas aportan mayor valor agregado que la madera y los tableros convencionales para la construcción.

Los materiales compuestos fabricados a base de mezclas de plásticos sintéticos y harinas o fibras vegetales son de creciente interés en la ciencia e ingeniería de materiales. Los plásticos reciclados también se han usado en la fabricación de nuevas formulaciones de materiales compuestos, debido principalmente a razones ambientales y de costos (Wambua, Ivens, & Verpoest, 2003). Algunas de las formulaciones obtenidas pueden presentar propiedades similares o mejores que los mismos plásticos sintéticos, con la ayuda de determinados aditivos químicos como los agentes acoplantes y plastificantes (Jayaraman & Bhattacharyya 2004; Lucchetta, Bariani, & Knight, 2006; Yeh et al., 2009).

El valor ecológico de los tableros de madera plástica es evidente, ya que este material permite fabricar estructuras recicladas y reciclables que favorecen la reutilización y la valorización de los residuos. Este tipo de tablero no se daña en la intemperie ni en contacto con el agua, no alberga bacterias, no se corroe ni sufre el ataque de ratones e insectos, por lo que puede conservarse por muchos años. El tablero puede cortarse con serrucho o sierra eléctrica y puede ser torneado, cepillado o perforado. En tal contexto, el objetivo de esta investigación es demostrar, mediante las propiedades físicas (humedad, densidad, absorción de agua e hinchamiento) y mecánicas (flexión, compresión y tracción), que el tablero de madera plástica (MP) producido en Cuba presenta pro-

INTRODUCTION

Today, society together with the technological revolution has given rise to the greatest production of waste in the history of mankind. According to Shukla and Kandem (2008), new development models should be based on production technologies without waste or a minimum thereof, accompanied by a waste recovery policy. One of the productive sectors that has grown the most in recent years is the plastics industry. This leads to the amount of plastic waste increasing and, consequently, the amount of recycled plastic also, strengthening the recovery industry and giving rise to products such as wood-plastic which is part of the increasing profitability of the board industry worldwide. Wood-plastic was created in the United States and has been marketed in other countries for over 15 years, gradually spreading its use (Yeh, Agarwal, & Gupta, 2009).

Development of new materials derived from recycling plastic and wood is becoming a viable and attractive alternative. The application of these materials in an array of products provides a wide range of opportunities and possibilities; their properties offer many advantages since they withstand weather conditions, require no maintenance and resist pest attack (Moya, Poblete, & Valenzuela, 2012). These advantages provide greater value added than wood and conventional boards used in building.

Composite materials made from blends of synthetic plastics and plant flour or fibers are of increasing interest in materials science and engineering. Recycled plastics have also been used for the production of new formulations of composite materials, mainly due to environmental and cost reasons (Wambua, Ivens, & Verpoest, 2003). Some of the formulations obtained can have similar or better properties than synthetic plastics, with the help of certain chemical additives such as coupling agents and plasticizers (Jayaraman & Bhattacharyya, 2004; Lucchetta, Bariani, & Knight, 2006; Yeh et al., 2009).

The ecological value of wood-plastic boards is evident, since this material allows making recycled and recyclable structures that promote the reuse and valuation of waste. This type of board is not damaged by weathering or contact with water, harbors no bacteria, does not corrode and is not attacked by mice and insects, enabling it to be used for many years. The board can be cut with a hand saw or power saw and may be turned, planed or drilled. In this context, the aim of this research is to demonstrate, through physical (moisture, density, water absorption and swelling) and mechanical (bending, compression and tensile) properties, that the wood-plastic (WP) board produced in Cuba has superior properties to those of wood and conventional boards, which validate increasing its scope of use.

pedades superiores que la madera y los tableros convencionales, las cuales validan que su utilización tenga mayor campo de aplicación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Composición del tablero de madera plástica

Residuos plásticos.

La matriz termoplástica corresponde a diversos tipos de polietileno, recuperados tanto del material de desecho de uso cotidiano de la sociedad como de las industrias. Entre los más abundantes se encuentran el polietileno de alta y baja densidad (PEAD, PEBD), polipropileno (PP) y tereftalato de polietileno (PET), obtenidos a través de la Empresa de Recuperación de Materia Prima de la provincia de Pinar del Río, Cuba. Estos residuos fueron lavados, secados y triturados en partículas con promedio de 0.7 mm. En la elaboración del tablero de madera plástica fueron utilizados todos los tipos de termoplásticos según los siete grupos de su clasificación internacional (PET, PVC [cloruro de polivinilo], PEAD, PP, PEBD, PS [Poliestireno], Otros) (Yadama, Lowell, Peterson, & Nicholls, 2009), en proporciones equitativas que complementan 30 % de dicho tablero.

Madera

El aserrín se obtuvo en las áreas productivas del aserradero Combate de las Tenerías perteneciente a la empresa Forestal Integral Macurije, Pinar del Río, Cuba, uno de los principales aserraderos del país debido a la capacidad productiva y surtidos que producen a partir de la especie *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret & Golfari. Esta materia prima forma parte del 50 % del tablero de MP.

Aditivos

Los aditivos químicos utilizados fueron: Ácido esteárico (HSt), calcio esteárico (CaSt), zinc esteárico (ZnSt), carbonato de calcio (CaCO_3), polietileno wax y PVC, en proporciones equitativas que representaron 20 % de la composición del tablero de MP.

Evaluación físico-mecánica del tablero de madera-plástica

Las siguientes propiedades físicas del tablero de MP fueron determinadas: Preparación de las probetas de acuerdo con la NC 314 (2004); contenido de humedad según especificaciones de la NC-EN 322 (2003); densidad del tablero acorde con la NC-EN 323 (2003); y la absorción de agua e hinchamiento se determinaron según la NC-EN 317 (2003). Por otra parte, se evaluaron las siguientes propiedades mecánicas: Resistencia a la flexión a partir de la NC-EN 310 (2003), resistencia a la compresión según la AITIM D-1037-99 y resistencia a la tracción acorde con la norma NC-EN 319 (2003).

MATERIALS AND METHODS

Composition of wood-plastic board

Plastic waste

The thermoplastic matrix corresponds to various types of polyethylene, retrieved from both everyday societal and industrial waste. Among the most abundant are high and low density polyethylene (HDPE, LDPE), polypropylene (PP) and polyethylene terephthalate (PET), obtained through the *Empresa de Recuperación de Materia Prima* (Raw Resource Recovery Company) of the province of Pinar del Río, Cuba. These residues were washed, dried and ground into particles averaging 0.7 mm. In making the wood-plastic board, we used all the different types of thermoplastics according to the seven internationally-classified groups (PET, PVC [polyvinyl chloride], HDPE, PP, LDPE, PS [polystyrene], Others) (Yadama, Lowell, Peterson, & Nicholls, 2009), in equal proportions comprising 30 % of this board.

Wood

Sawdust was obtained in the production area at the *Combate de las Tenerías* (CT) sawmill belonging to the *Forestal Integral Macurije* in Pinar del Río, Cuba. The CT sawmill is one of the country's most important due to its productive capacity and wide array of products made from the species *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret & Golfari. This raw material makes up 50 % of the WP board.

Additives

Chemical additives used were: stearic acid (HSt), stearic calcium (CaSt), stearic zinc (ZnSt), calcium carbonate (CaCO_3), polyethylene wax and PVC in equal proportions that accounted for 20 % of the composition of the WP board.

Physico-mechanical evaluation of the wood-plastic board

The following physical properties of the WP board were determined: preparation of test specimens according to NC 314 (2004); moisture content according to specifications in NC-EN 322 (2003); board density in accordance with NC-EN 323 (2003); and water absorption and swelling were determined according to NC-EN 317 (2003). On the other hand, the following mechanical properties were evaluated: bend (flexural) strength based on NC-EN 310 (2003), compression strength according to AITIM D-1037-99 and tensile strength according to the standard NC-EN 319 (2003). In addition to the WP board, the physico-mechanical properties of conventional boards made of sugarcane bagasse particles, sugarcane bagasse fibers and plywood were also evaluated. The test specimens were obtained from already-made boards, whose dimensions coincide with the WP board specimens.

Además del tablero de MP, se evaluaron también las propiedades físico-mecánicas de tableros convencionales elaborados de partículas de bagazo de caña, fibras de bagazo de caña y contrachapado. Las probetas fueron obtenidas de tableros ya elaborados, cuyas dimensiones coinciden con las probetas del tablero de MP.

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos se analizaron con el programa STATISTICA 7.1 (StatSoft Inc., 2005) determinando los valores medios de cada propiedad y sus diferencias con relación a los tableros convencionales. Las propiedades de los tableros se analizaron mediante las pruebas de Kruskal-Wallis (H). Además se realizó la prueba de comparaciones múltiples de post-hoc DMS de Fisher, teniendo en cuenta que permite establecer comparaciones de tendencia y definir otros tipos de comparaciones entre valores medios (Moya et al., 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se muestran los valores medios obtenidos en el análisis de los diferentes ensayos de los tableros evaluados, valorando cada una de sus propiedades físicas y mecánicas. Estos resultados se corroboran en el Cuadro 2 donde se muestran los resultados obtenidos a partir del análisis estadístico realizado para comparar cada uno de los tableros evaluados.

Contenido de humedad de los tableros

En el Cuadro 1 se presentan los valores medios del contenido de humedad (CH) de los tableros evaluados. El tablero de MP tuvo 4.13 % de humedad; este contenido está dado por el empleo de los residuos termoplásticos como materia prima, los cuales favorecen la resistencia a la penetración del agua y, además, permiten un buen encapsulamiento entre las partículas de la madera utilizada y la matriz termoplástica, debilitando así la capacidad higroscópica de la madera. Estos resultados se relacionan con los obtenidos por Moya et al. (2012), quienes determinaron que la variación del CH en tableros de MP depende del contenido de aserrín utilizado,

Statistical analysis

The results were analyzed with STATISTICA 7.1 software (StatSoft Inc., 2005) by determining the average values of each property and their differences in relation to conventional boards. Also, board properties were analyzed using Kruskal-Wallis (H) tests. Furthermore, Fisher's LSD post-hoc multiple comparisons test was performed, taking into account that it enables establishing trend comparisons and defining other types of comparisons between mean values (Moya et al., 2012).

RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 shows the mean values obtained in the analysis of the different tests conducted on the boards, valuing each of their physical and mechanical properties. These results were corroborated in Table 2 which shows the results obtained from the statistical analysis performed to compare each of the boards evaluated.

Moisture content of the boards

Table 1 shows the mean moisture content (MC) values of the boards tested. The WP board had 4.13 % moisture; this content is given by the use of thermoplastic waste as raw material, which promotes resistance to water penetration and also allows good encapsulation between the particles of the wood used and the thermoplastic matrix, thus weakening the wood's hygroscopic capacity. These results are related to those obtained by Moya et al. (2012), who determined that MC variation in WP boards depends on the sawdust content used, employing proportions of 20, 40 and 60 %. The comparisons showed that the best stability is between 40 and 60 % wood. With these wood proportions in the composite, moisture content ranged from 3.47 to 6.48 %. Several authors have reported similar moisture content levels in composites manufactured from wood flour and thermoplastics by injection molding (Dominkovics, Dányádi, & Pukánszky, 2007; Raukola & Makinen, 2003; Rowell, Lange, & Peterson, 2000).

CUADRO 1. Valores obtenidos en las pruebas físico-mecánicas del tablero de madera plástica y los tableros convencionales.

TABLE 1. Values obtained in the physycal-mechanical wood plastic panel boards and conventional tests.

Tipos de tableros / Types of boards	Humedad / Moisture (%)	Densidad / Density (kg·m ⁻³)	*Absorción de agua / * water adsorption (%)	Hinchamiento / Swelling (%)	Flexión / Bending (MPa)	Compresión / Compression (MPa)	Tracción / Tensile strength (MPa)
TMP/ WPB	4.13	1,050.00	0.22	0.15	17.53	138.1028.2	
TPbc/ SBpb	9.84	520.84	15.10	17.9	6.25	43.1014.35	
TFbc/ SBfb	10.59	526.16	13.19	12.3	9.42	82.2115.20	
TC / PB	10.85	610.58	10.47	11.4	11.14	96.1431.45	

TMP: Tablero madera plástica. TPbc: Tablero de partículas de bagazo de caña. TC: Tablero contrachapado. TFbc: Tablero de fibras de bagazo de caña. *Absorción de agua después de 72 h.

WPB: Wood-plastic board. SBpb: Sugarcane bagasse particleboard. PB: Plywood board. SBfb: Sugarcane bagasse fiberboard. *Water absorption after 72 h.

CUADRO 2. Comparaciones múltiples de las propiedades físico-mecánicas de los tableros, obtenidas mediante pruebas de post hoc DMS Fisher. TABLE 2. Multiple comparisons of the physico-mechanical properties of the boards obtained using Fisher's LSD post-hoc tests.

Tableros / Boars	Humedad / Moisture	Densidad / Density	Absorción de agua / Water absorption	Hinchamiento / Swelling	Flexión / Bending	Compresión / Compression	Tracción / Tensile strength
TMP/WPB	1.000 a (±0.02)	1.000 a (±0.41)	1.000 a (±0.00)	1.000 a (±0.00)	0.090 a (±0.49)	0.050 a (±0.49)	1.000 a (±2.80)
TPbc/SBpb	0.002 b (±0.09)	0.001 b (±2.38)	0.002 b (±0.12)	0.001 b (±0.09)	0.007 b (±0.38)	0.001 b (±0.49)	0.008 b (±2.14)
TFbc/ SBfb	0.001 b (±0.19)	0.001 b (±1.48)	0.03 b (±0.23)	0.008 b (±0.02)	0.002 b (±0.38)	0.009 b (±0.53)	0.001b (±2.57)
TC/ PB	0.001 b (±0.13)	0.005 b (±3.84)	0.03 b (±1.012)	0.002 b (±0.23)	0.230 a (±0.48)	0.050 a (±0.49)	1.000 a (±1.07)

TMP: Tablero madera plástica. TPbc: Tablero de partículas de bagazo de caña. TC: Tablero contrachapado. TFbc: Tablero de fibras de bagazo de caña. Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas ($P = 0.05$). ± Desviación estándar.

WPB: Wood-plastic board. SBpb: Sugarcane bagasse particleboard. PB: Plywood board. SBfb: Sugarcane bagasse fiberboard. Different letters in each column indicate significant differences ($P = 0.05$). ± Standard deviation.

empleando dosificaciones que variaron entre 20, 40 y 60 %. Las comparaciones permitieron demostrar que la mejor estabilidad se encuentra entre 40 y 60 % de madera. Con estas proporciones de madera en el compuesto, los contenidos de humedad variaron desde 3.47 a 6.48 %. Varios autores han reportado contenidos de humedad similares en compuestos fabricados a base de harinas de madera y termoplásticos mediante moldeo por inyección (Dominkovics, Dányádi, & Pukánszky, 2007; Raukola & Makinen, 2003; Rowell, Lange, & Jacobson, 2000).

El CH en los tableros convencionales varió de 9 a 10 %. Este comportamiento se debe a que dichos tableros se producen con más de 80 % de madera, lo cual atribuye mayor absorción de agua, aumentando su CH, según resultados obtenidos por Yadama et al. (2009).

Densidad

Tenorio, Moya y Camacho (2012) infieren que la densidad es un factor importante que puede determinar las propiedades físico-mecánicas de un compuesto o tablero. Estudios realizados por Poblete (2001) demuestran que el aumento en la densidad del tablero favorece incrementos en la flexión y la tracción, y a su vez promueve la disminución de la absorción de agua y aumento de la expansión tanto lineal como en el espesor, aspectos que coincidieron con las propiedades físico-mecánicas de los tableros de MP.

En el Cuadro 1 se muestra que la densidad del tablero de MP ($1,050 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) fue considerablemente mayor con relación a los tableros convencionales, la cual proporcionó buenas propiedades físico-mecánicas. En el análisis de las comparaciones múltiples se corrobora esta afirmación, existiendo diferencias significativas en la densidad del tablero de MP en relación con los tableros convencionales. Los resultados confirman que la densidad es directamente

The MC in conventional boards ranged from 9-10 %. This behavior is because these boards are produced with more than 80 % wood, which gives greater water absorption, increasing their MC, according to results obtained by Yadama et al. (2009).

Density

Tenorio, Moya and Camacho (2012) state that density is an important factor that can determine the physico-mechanical properties of a composite or board. Studies conducted by Poblete (2001) show that increased board density provides increased bend and tensile strength, and in turn promotes decreased water absorption and increased expansion, both linear and in thickness, aspects matching the physico-mechanical properties of the WP boards.

Table 1 shows that the density of the WP board ($1,050 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) was considerably higher relative to conventional boards, which provided good physico-mechanical properties. The analysis of multiple comparisons corroborated this claim, showing significant differences in the density of WP board in relation to conventional boards. Results confirm that density is directly proportional to the mechanical properties of the boards and inversely proportional to the physical properties, since increases in density caused less water absorption and swelling. However, the increased density in conventional boards is due to the increase in the lignocellulosic composite (wood), which leads to a higher concentration of hygroscopic material that induces low resistance to physical properties (Poblete & Roque, 2006).

Water absorption

The behavior of the WP board is very different to that of the conventional boards since the former only absorbs, on average, 0.22 % water during immersion for 72 h. Table 1 shows

proporcional a las propiedades mecánicas de los tableros e inversamente proporcional a las propiedades físicas, dado que los aumentos en la densidad causaron menor absorción de agua e hinchamiento. Sin embargo, el aumento de densidad en los tableros convencionales deriva del aumento del compuesto lignocelulósico (madera), lo cual provoca mayor concentración de materia higroscópica que induce baja resistencia a las propiedades físicas (Poblete & Roque, 2006).

Absorción de agua

El comportamiento del tablero de MP es muy diferente a los tableros convencionales ya que solo absorbe, en promedio, 0.22 % de agua durante inmersión por 72 h. El Cuadro 1 muestra los valores obtenidos de la absorción de agua para cada tipo de tablero.

El comportamiento del tablero de MP respecto a la absorción de agua puede deberse a dos factores fundamentales. En primer lugar a la naturaleza higroscópica de la madera (*P. caribaea* var *caribaea*), debido a la presencia de grupos hidroxilos (OH) en los carbohidratos, tales como celulosa y hemicelulosa, que forman la pared celular de las fibras vegetales (Beg & Pickering 2008a, 2008b; Rowell, Pettersen, Han, & Rowell, 2005). En segundo lugar, hay que considerar la baja calidad de encapsulamiento de las partículas por parte de la matriz termoplástica, ya que en el proceso de fabricación del compuesto se pueden formar poros libres o zonas de fallas que facilitan la entrada de agua al tablero (Yadama et al., 2009). En el análisis de comparaciones múltiples (Cuadro 2) se demuestra que existen diferencias entre el tablero de MP y los convencionales; esto corresponde fundamentalmente a la acción de la matriz termoplástica en el material.

Para los tableros convencionales, la absorción de agua constituye un factor determinante que limita su utilidad como material para la construcción, debido a que sufren gran deformación dimensional bajo la acción del agua (Poblete & Roque, 2006), aspecto que no ocurre en el tablero de MP.

Hinchamiento

El comportamiento de los tableros respecto al hinchamiento se puede observar en el Cuadro 1. Los resultados demostraron que el tablero de MP tiene en promedio 0.15 % de hinchamiento, valor muy inferior respecto a los tableros convencionales. Este comportamiento es favorecido por la influencia de la matriz termoplástica, que provoca una mayor impermeabilidad del tablero. El análisis de comparaciones múltiples (Cuadro 2) corrobora la superioridad del tablero de MP con relación a los convencionales, reflejando diferencias significativas entre ellos.

Las propiedades favorables que presenta el tablero de MP con relación a las propiedades físicas evaluadas, pueden estar relacionadas con la adición de aditivos químicos. Es-

the water absorption values obtained for each type of board. The behavior of WP board regarding water absorption may be due to two main factors. One is the hygroscopic nature of the wood (*P. caribaea* var *caribaea*) due to the presence of hydroxyl groups (OH) in the carbohydrates, such as cellulose and hemicellulose, which form the cell wall of plant fibers (Beg & Pickering 2008a, 2008b; Rowell, Pettersen, Han, & Rowell, 2005). The other is the low quality of encapsulation of the particles by the thermoplastic matrix, since the composite manufacturing process can form free pores or fault zones that facilitate the entry of water into the board (Yadama et al., 2009). The analysis of multiple comparisons (Table 2) shows that there are differences between the WP and conventional boards, mainly due to the action of the thermoplastic matrix in the material.

For conventional boards, water absorption is a determining factor which limits their usefulness as a building material because they suffer high warping under the action of water (Poblete & Roque, 2006), which was not the case in the WP board.

Swelling

The behavior of the boards with respect to swelling can be seen in Table 1. Results show that the WP board has on average 0.15 % swelling, a much lower value than that of conventional boards. This behavior is favored by the influence of the thermoplastic matrix, which causes greater board impermeability. The analysis of multiple comparisons (Table 2) confirms the superiority of WP board relative to conventional ones, reflecting significant differences between them.

The favorable physical properties presented by the WP board in the tests may be related to the addition of chemical additives. These can influence the interactions of the composite with water, since they allow greater dispersion of the wood flour or fibers in the thermoplastic matrix, promoting better performance of the physical properties due to the ability to resist wetting of the matrix with the surface of the wood particles and generating more homogeneous composites (Beg & Pickering, 2008a; Haque, Hasan, Islam, & Ali, 2009; Karmarkar, Chauhan, Modak, & Chanda, 2007; Yadama et al., 2009).

In general, the behavior of WP board with regard to physical properties is somewhat unusual in that the assumption that the higher the board density the greater the swelling, as occurs in conventionally-derived boards, was not satisfied. In the WP board, although it has high density, it is not possible for the irreversible force of swelling to be released when immersed in water, since it has little chance of penetrating into the board and causing warping. According to studies by Poblete and Burgos (2011) on fiberboard, the relationship between swelling and board density is not significant for both 2h and 24 h of immersion in water.

tos pueden influir en las interacciones del compuesto con el agua, ya que permiten mayor dispersión de las harinas o fibras de la madera en la matriz termoplástica, favoreciendo mejor comportamiento de las propiedades físicas debido a la capacidad de resistir el humedecimiento de la matriz con la superficie de las partículas de madera y generando compuestos más homogéneos (Beg & Pickering, 2008a; Haque, Hasan, Islam, & Ali, 2009; Karmarkar, Chauhan, Modak, & Chanda, 2007; Yadama et al., 2009).

De manera general, el comportamiento del tablero de MP respecto a las propiedades físicas es un poco inusual ya que no se cumplen los supuestos de que mientras mayor es la densidad del tablero, mayor debe ser la hinchazón, como sucede en los tableros derivados convencionales. En el tablero de MP, aunque posee densidad alta, no es posible que los esfuerzos irreversibles de la hinchazón sean liberados al realizar la inmersión en agua, por lo que ésta tiene poca posibilidad de penetrar en el interior del tablero y provocar alguna deformación dimensional. Según estudios realizados por Poblete y Burgos (2011) en tableros de fibras, la relación entre hinchamiento y densidad del tablero no es significativa tanto para 2 h como 24 h de inmersión en agua.

Flexión

Los valores obtenidos para este ensayo mecánico se muestran en el Cuadro 1. El tablero de MP muestra valores superiores a los 17 MPa, solamente el tablero contrachapado muestra semejante resistencia, pues según el análisis de comparaciones múltiples no existen diferencias estadísticas (Cuadro 2). Este comportamiento puede atribuirse a que los tableros contrachapados presentan características peculiares por la orientación de sus chapas, las cuales están ubicadas de forma opuesta en números impares, con la adición de resinas o colas sintéticas que favorecen la compactación del tablero. Dichos tableros ofrecen buen comportamiento ante las propiedades mecánicas evaluadas. Por su parte, el comportamiento del tablero de MP puede atribuirse a la buena dispersión de las partículas de madera en la matriz termoplástica, teniendo en cuenta la dosificación de la madera (50 %) en el tablero, que además contribuye al fortalecimiento de la interfase entre ambas partículas (madera-termoplásticos), pudiendo alcanzar mayor densificación del compuesto. No obstante, investigaciones referidas por Wang, Sain, y Cooper (2005) indican que los incrementos de las proporciones de madera en los compuestos tienden a disminuir las propiedades de flexión.

En esta investigación se obtienen mejoras en las propiedades mecánicas a partir de la dosificación de cada materia prima empleada para producir el tablero de MP con relación a tableros similares que fueron obtenidos por investigadores como Bouafif, Koubaa, Perré, & Cloutier (2009) y Moya et al. (2012).

Bending

The values obtained for this mechanical test are shown in Table 1. The WP board shows values above 17 MPa; only the plywood shows similar strength, since the analysis of multiple comparisons shows there are no statistical differences between them (Table 2). This behavior can be attributed to the plywood having special characteristics due to the orientation of its veneers, which are oppositely placed in odd numbers, with the addition of synthetic resins or glues that promote board compaction. These boards offer good behavior in terms of the mechanical properties evaluated. For its part, the WP board's behavior can be attributed to the good dispersion of the wood particles in the thermoplastic matrix, taking into account the wood fraction (50 %) in the board, which also helps to strengthen the interface between the two particles (wood-thermoplastic), resulting in higher densification of the composite. However, studies referred to by Wang, Sain, and Cooper (2005) indicate that increases in wood proportions in the compounds tend to reduce bending properties.

In the present study, improvements in mechanical properties are obtained from the dosage of each raw material used to produce the WP board relative to similar boards which were obtained by researchers such as Bouafif, Koubaa, Perré, & Cloutier (2009) and Moya et al. (2012).

Compression

Table 1 shows the results obtained in this test. The WP board has 138 MPa compression, which is much higher than the values obtained by conventional boards. This can be corroborated in the analysis of multiple comparisons shown in Table 2, where it can be seen that there is a difference in compression between the WP and conventional boards, except for the plywood. The behavior of the WP board can be attributed to the strength of the bond between the sawdust and thermoplastic particles, while in the plywood the strength provided by the orientation of its veneers allows it to have good compressive strength.

As a common factor for all mechanical properties, a variation in the density of the wood requires an adjustment to board compaction. Lower density species must be compressed to a greater degree than higher density ones, which undoubtedly influences the properties of the boards (Poblete, 2001). The WP board was manufactured with *P. caribaea* var *caribaea* wood at an approximate density of 600 kg·m⁻³ with 3.5 % moisture. Given the technology used to produce it (extrusion), compaction of the material was favored by the influence of the thermoplastic waste and chemical additives. This facilitated good interaction between the sawdust particles and the thermoplastic matrix due to the high temperatures involved in the process, which provided good compression properties. To assess this compatibility in the material, the compression ratio (CR), which is the ratio

Compresión

En el Cuadro 1 se muestran los resultados obtenidos en este ensayo. El comportamiento del tablero de MP presenta compresión de 138 MPa, muy superior a los valores alcanzados por los tableros convencionales. Esto se puede corroborar en el análisis de comparaciones múltiples reflejado en el Cuadro 2, en el cual se puede observar que existe diferencia en la compresión entre los tableros de MP y los convencionales, excepto el tablero contrachapado. El comportamiento del tablero de MP puede atribuirse a la fortaleza entre el enlace de las partículas de aserrín y termoplástico, mientras que en el tablero contrachapado, la fortaleza que le brinda la orientación de sus chapas permite que este tenga buena resistencia a la fuerza de compresión.

Como un factor común para todas las propiedades mecánicas, una variación en la densidad de la madera obliga a un ajuste en la compactación del tablero. Las especies de menor densidad deberán ser comprimidas en mayor proporción que las de densidades más altas, lo que indudablemente influye en las propiedades de los tableros (Poblete, 2001). El tablero de MP se fabricó con madera de *P. caribaea* var *caribaea* de una densidad aproximada de $600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ con 3.5 % de humedad. Dada la tecnología empleada para su elaboración (extrusado), la compactación del material fue favorecida por la influencia de los residuos termoplásticos y aditivos químicos. Esto favoreció una buena interacción entre las partículas de aserrín y la matriz termoplástica debido a las altas temperaturas del proceso, la cual aportó buenas propiedades de compresión. Para evaluar esta compatibilidad en el material, se determina la razón de compresión (RC) que corresponde al cociente entre la densidad del tablero y la densidad de la madera. El parámetro RC siempre debe ser mayor de 1, considerando que una mayor compresión permite mejor contacto entre las partículas y mayor eficiencia del aglomerante, tanto para el proceso de pelletización como extrusado. Cuando la RC es menor de 1, el tablero tiene una densidad menor a la de la madera utilizada y no habrá compactación del material. En general, es recomendable lograr valores de RC entre 1.5 y 2.2 (Poblete, 2001). La RC del tablero de MP fue de 1.75, la cual se considera muy buena, corroborando así la buena compactación del tablero y demostrando la alta compatibilidad de la materia prima utilizada, lo cual contribuye a que el tablero tenga buenas propiedades mecánicas con relación a la compresión y demás propiedades.

Tracción

En el Cuadro 1 se muestran los valores obtenidos con relación al comportamiento de tracción de los tableros evaluados. Se puede observar que el tablero de MP tiene un valor superior a los 28 MPa, comportamiento solo superado por el tablero contrachapado con un valor de 31 MPa. Este comportamiento se puede corroborar en el análisis de comparaciones múltiples (Cuadro 2), donde se muestra que no existen

between board density and wood density, is determined. The CR parameter should always be greater than 1, based on the fact that higher compression allows better contact between the particles and greater binding efficiency, for both the pelletizing and extrusion process. When the CR is less than 1, the board has a lower density than that of the wood used and the material cannot be compacted. In general, it is advisable to achieve CR values of between 1.5 and 2.2 (Poblete, 2001). The CR of the WP board was 1.75, which is considered very good, thus corroborating the board's good compaction and showing the high compatibility of the raw material used, which helps the board have good mechanical properties in relation to compression and other properties.

Tensile strength

The values obtained with respect to the tensile behavior of the boards tested are shown in Table 1. It can be seen that the WP board has a value greater than 28MPa, behavior only surpassed by the plywood board with a value of 31MPa. This behavior can be corroborated in the analysis of multiple comparisons (Table 2), which shows that there are no statistical differences in tensile strength between the WP board and the plywood, due to the characteristics of this board, explained in previous sections, which allows it to offer high resistance to opposing tensile forces.

Studies by authors such as Bledzki and Faruk (2004), Ngueho, Koubaa, Cloutier, Soulounganga, and Wolcott, (2010), Yang, Kim, Park, Lee, and Hwang (2006), and Zabihzadeh (2010) show that tensile strength decreases with increasing wood use. That is why WP board has better tensile strength relative to conventional boards, excluding plywood.

The tensile strength values of the WP board are higher than those indicated as acceptable by US Plastic Lumber for composites made by extrusion with 50 % wood fibers and recycled thermoplastics, setting values of 8 MPa (US Plastic Lumber, 2004). In turn, these values are similar to those of most of the composites made with different virgin and recycled thermoplastics, with or without the use of chemical additives, by injection, compression or extrusion methods, which have been assessed by various researchers such as Bledzki and Faruk (2004), Yang et al. (2006), Ngueho et al. (2010), Zabihzadeh (2010) and Moya et al. (2012).

CONCLUSIONS

The wood-plastic (WP) board produced in Cuba has a density-dependent relationship that provides it with better physico-mechanical properties compared to conventional boards. WP boards have the following characteristics: 4.13 % moisture, 0.22 % water absorption, 0.15 % swelling, 17 MPa maximum bending stress, 28 MPa tensile strength and 138 MPa compressive strength. These properties validate their usefulness as a building material.

End of English Version

diferencias estadísticas en la tracción entre el tablero de MP y el contrachapado, debido a las características de este tablero, explicadas en epígrafes anteriores, que le permite ofrecer alta resistencia a las fuerzas opuestas de la tracción.

Estudios realizados por autores como Bledzki y Faruk (2004), Ngueho, Koubaa, Cloutier, Soulounganga, y Wolcott, (2010), Yang, Kim, Park, Lee, y Hwang (2006), y Zabihzadeh (2010) demuestran que la resistencia a la tracción disminuye en la medida que se incrementa la utilización de madera. Es por ello que el tablero de MP presenta mejor comportamiento ante la tracción en relación con los tableros convencionales, con excepción de los tableros contrachapados.

Los valores de resistencia a la tracción del tablero de MP son superiores a los indicados como aceptables por *US Plastic Lumber* para los compuestos fabricados por extrusión con 50 % de fibras de madera y termoplásticos reciclados, fijando valores de 8 MPa (*US Plastic Lumber*, 2004). A la vez, estos valores son similares a la mayoría de los compuestos elaborados con diferentes termoplásticos vírgenes y reciclados, con y sin la utilización de aditivos químicos, mediante los métodos de inyección, compresión o extrusión, que han sido evaluados por diferentes investigadores como Bledzki y Faruk (2004), Yang et al. (2006), Ngueho et al. (2010), Zabihzadeh (2010) y Moya et al. (2012).

CONCLUSIONES

El tablero de madera plástica, producido en Cuba, posee relación dependiente de la densidad que le proporciona mejores propiedades físico-mecánicas con respecto a los tableros convencionales. El tablero de madera plástica posee las siguientes características: 4.13 % de humedad, 0.22 % de absorción de agua, 0.15 % de hinchamiento, 17 MPa de carga máxima a la flexión, 28 MPa a la tracción y 138 MPa a la compresión. Dichas propiedades validan la utilidad del tablero de madera plástica como material para la construcción.

REFERENCIAS

AITIM D 1037-99. (1999). Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials. España: Universidad Politécnica de Madrid.

Beg, M. D. H., & Pickering, K. L. (2008a). Part I: Effects on physical and mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(7), 1091–1100. doi: 10.1016/j.compositesa.2008.04.013

Beg, M. D. H., & Pickering, K. L. (2008b). Reprocessing of wood fibre reinforced polypropylene composites. Part II: Hydrothermal ageing and its effects. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(7), 1565–1571. doi: 10.1016/j.compositesa.2008.06.002

Bouafif, H., Koubaa, A., Perré, P., & Cloutier, A. (2009). Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. *Composites Part A: Applied*

Science and Manufacturing, 40(12), 1975–1981. doi: 10.1016/j.compositesa.2009.06.003

- Bledzki, A., & Faruk, O. (2004). Creep and impact properties of wood fibre–polypropylene composites: Influence of temperature and moisture content. *Composites Science and Technology*, 64(5), 693–700. doi: 10.1016/S0266-3538(03)00291-4
- Dominkovics, Z., Dányádi, L., & Pukánszky, B. (2007). Surface modification of wood flour and its effect on the properties of PP/wood composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(8), 1893–1901. doi: 10.1016/j.compositesa.2007.04.001
- Haque, M., Hasan, M., Islam, M., & Ali, M. (2009). Physic-mechanical properties of chemically treated palm and coir fiber reinforced polypropylene composites. *Bioresource Technology*, 100(20), 4903–4906. doi: 10.1016/j.biortech.2009.04.072
- Jayaraman, K., & Bhattacharyya, D. (2004). Mechanical performance of wood fiber–waste plastic composite materials. *Resources Construction and Recycling*, 41(4), 307–319. doi: 10.1016/j.resconrec.2003.12.001
- Karmarkar, A., Chauhan, S. S., Modak, J., & Chanda, M. (2007). Mechanical properties of wood–fiber reinforced polypropylene composites: Effect of a novel compatibilizer with isocyanate functional group. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(2), 227–233. doi: 10.1016/j.compositesa.2006.05.005
- Lucchetta, G., Bariani, P., & Knight, W. (2006). A new approach to the optimization of blends composition in injection moulding of recycled polymers. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1), 1–4. doi: 10.1016/S0007-8506(07)60460-0
- Moya, C., Poblete, H., & Valenzuela, L. (2012). Propiedades físicas y mecánicas de compuestos de polietileno reciclado y harinas de corteza y madera de *Pinus radiata* fabricados mediante moldeo por inyección. *Revista Maderas, Ciencia y Tecnología*, 14(1), 13–29. doi: 10.4067/S0718-221X2012000100002
- NC-EN 310. (2003). Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión. La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-EN 317. (2003). Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la dilatación del espesor después de inmersión en agua. La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-EN 319. (2003). Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las caras del tablero. La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-EN 322. (2003). Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la humedad. La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
- NC-EN 323. (2003). Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la densidad. La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
- NC 314. (2004). Tableros de partículas y tableros de fibras - acondicionamiento y preparación de probetas para los ensayos. La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización.
- Ngueho, M., Koubaa, A., Cloutier, A., Soulounganga, P., & Wolcott,

- M. (2010). Effect of bark fiber content and size on the mechanical properties of bark/HDPE composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41, 131–137. doi: 10.1016/j.compositesa.2009.06.005
- Poblete, H. (2001). Tableros de partículas. Chile: Ed. El Kultrún.
- Poblete, H., & Roque, C. (2006). Relación entre la densidad y propiedades de tableros HDF producidos por un proceso seco. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 8(3), 169–182. doi: 10.4067/S0718-221X2006000300004
- Poblete, W., & Burgos, O. (2011). *Eucaliptus nitens* como materia prima para la fabricación de tableros de partículas. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 12(1), 25–35. doi: 10.4067/S0718-221X2010000100003
- Raukola, J., & Makinen, K. (2003). Wood plastic composites with conical Conex[®] Wood Extruder. Finland: VTT Processes.
- Rowell, R., Lange, S., & Jacobson, R. (2000). Weathering performance of plant-fiber/thermoplastic composites. *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology. Section A. Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 353(1), 85–94. doi: 10.1080/10587250008025650
- Rowell, R., Pettersen, R., Han, J., & Rowell, J. (2005). *Cell wall chemistry in handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press LLC.
- Shukla, S. R., & Kandem, D. P. (2008). Properties of laminated veneer lumber (LVL) made with low density hardwood species: Effect of the pressure duration. *Holz als Roh und Werkstoff*, 66(2), 119–127. doi: 10.1007/s00107-007-0209-1
- StatSoft (2005). STATISTICA versión 7.1. USA. Autor.
- Tenorio, C., Moya, R., & Camacho, D. (2012). Propiedades físico-mecánicas de tableros terciados construidos con especies tropicales de plantaciones para uso estructural. *CERNE*, 18(2), 317–325. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74423522017>
- U. S. Plastic Lumber. (2004). Technical data. 2600 W. Chicago, IL: Author.
- Wambua, P., Ivens, J., & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 63(9), 1259–1264. doi: 10.1016/S0266-3538(03)00096-4
- Wang, W., Sain, M., Cooper, P. A. (2005). Hygrothermal weathering of rice hull/HDPE composites under extreme climatic conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 90(3), 540–545. doi: 10.1016/j.polyimdegradstab.2005.03.014
- Yadama, V., Lowell, E., Peterson, N., & Nicholls, D. (2009). Wood-thermoplastic composites manufactured using Beetle-Killed Spruce from Alaska. *Polymer Engineering and Science*, 49(1), 129–136. doi: 10.1002/pen.21231
- Yang, H., Kim, H., Park, H., Lee, B., & Hwang, T. (2006). Water absorption behavior and mechanical properties of lignocellulosic filler-polyolefin bio-composites. *Composite Structures*, 72(4), 429–437. doi: 10.1016/j.compstruct.2005.01.013
- Yeh, S.-K., Agarwal, S., & Gupta, R. (2009). Wood-plastic composites formulated with virgin and recycled ABS. *Composites Science and Technology*, 69(13), 2225–2230. doi: 10.1016/j.compscitech.2009.06.007
- Zabihzadeh, M. (2010). Water uptake and flexural properties of natural filler/HDPE composites. *Bioresources*, 5(1), 316–323. Obtenido de http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/viewFile/BioRes_05_1_0216_Zabijzadeh_Water_Uptake_Flexural_Lignocell_HDPE_Composites/ 511