



Artículo / Article

Propiedades mecánicas del material compuesto elaborado con bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) y polipropileno

Mechanical properties of the composite material made with bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) and polypropylene

Karen Catharine Lázaro León¹, Héctor E. Gonzáles Mora² y Aldo J. Cárdenas Oscanoa³

Resumen

Los materiales compuestos se usan desde la antigüedad. A partir de 1939 se emplearon las fibras naturales como refuerzo de una matriz plástica, ya que ofrecen ciertas ventajas en comparación con las sintéticas, ya que son renovables, biodegradables, menos abrasivas, no causan irritación en los ojos, y presentan una menor demanda energética para su producción. Se utilizaron partículas provenientes de la parte apical de cañas residuales de bambú (*Guadua angustifolia*) para la obtención de materiales compuestos de polipropileno (PP) reforzados, sin y con agente acoplante (anhídrido maléico de polipropileno-MAPP). En la elaboración se elaboraron materiales compuestos por el método de extrusión y compresión con tamaños de malla ASTM: -20/+40, -40/+60 y -60/+80; con proporciones de mezcla bambú/plástico: 50/50, 40/60 y 30/70; y con 0 y 2 % de MAPP. En total se obtuvieron 18 formulaciones, a las cuales se les evaluaron sus propiedades mecánicas de tensión, flexión e impacto. Los resultados muestran que los materiales presentaron los mejores valores con el tamaño de malla -60/+80 y la proporción 30/70 para la tensión, flexión e impacto, y que el MAPP mejora las propiedades de los materiales compuestos con bambú.

Palabras clave: Bambú, flexión, impacto, materiales compuestos, polipropileno, tensión.

Abstract

Composite materials have been utilized since ancient times. Natural fibers have been used as reinforcement for plastic matrices since 1939, because they offer certain advantages compared to synthetic fibers: they are renewable, biodegradable, less abrasive, do not cause eye irritation, and their production involves less energy demand. Particles from the apical parts of residual bamboo (*Guadua angustifolia*) canes were used in this study to obtain composite polypropylene (PP) materials, with or without a coupling agent (maleic anhydride-polypropylene, MAPP). These materials were made using the extrusion/compression method, with -20/+40, -40/+60 and -60/+80 ASTM mesh sizes; 50/50, 40/60 and 30/70 mixing ratios, and 0 and 2 % MAPP. A total of 18 formulations were obtained, and their mechanical properties of tension, flexion and impact were assessed. The results show that the materials had the best values for tension, flexion and impact with the -60/+80 mesh size and the 30/70 ratio, and that MAPP improves the properties of composite materials made with bamboo. Resistance to impact for composite materials is directly proportional when a coupling agent is added.

Key words: Bamboo, flexion, impact, composite materials, polypropylene, tension.

Fecha de recepción/ Reception date: 2 de julio de 2016; Fecha de aceptación/ Acceptance date: 27 de octubre de 2016

¹ Bachiller en Ciencias Forestales. Perú. Correo-e: kphiru@hotmail.com

² Facultad de Ciencias Forestales, Dpto. Industrias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú. Correo-e: egonzales@lamolina.edu.pe

³ Laboratorio de Anatomía de la Madera y Propiedades Físicas. Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica de la Madera. CITEMADERA. Perú.

Introducción

Los materiales compuestos se usan desde la antigüedad (Pérez, 2012). A partir de 1939 se emplearon las fibras naturales como refuerzo de una matriz plástica, para el año 2000 se utilizó en diferentes partes de autos, a partir de fibras de kenaf, abacá, cáñamo y lino. Desde el 2004, se comenzaron a producir partes de artículos electrónicos como estuches de celulares y carcasas, con fibras de kenaf; y del 2006 en adelante, se fabrican artículos deportivos con fibras de cáñamo, lino y kenaf (Brief, 2011).

Las fibras naturales ofrecen ciertas ventajas en comparación con las sintéticas, ya que son renovables, biodegradables, menos abrasivas, no causan irritación en los ojos y presentan una menor demanda energética para su producción (Mutjé *et al.*, 2006; Venkateshwaran *et al.*, 2012).

En el Perú, *Guadua angustifolia* Kunth es muy apreciado por su rápido crecimiento; se utiliza en la construcción de viviendas, cobertizos, galpones, almacenes, casas de campo, etcétera; sin embargo, su aprovechamiento genera muchos residuos, aproximadamente de una caña solo se usa 30 por ciento (González, 2005).

Al mezclarse los polímeros con rellenos lignocelulósicos no hay una adecuada adhesión, por las características hidrofóbicas e hidrofílicas de sus moléculas (Fuentes *et al.*, 2013); es por eso que se usan agentes acoplantes como el anhídrido maléico de polipropileno (MAPP) para modificar la superficie de la fibra y conseguir una buena interfase con la matriz polimérica, lo que mejora las propiedades mecánicas de los compuestos (Faruk *et al.*, 2012).

Las propiedades mecánicas son importantes para todo material compuesto, porque permiten definir un uso final del producto de acuerdo a su resistencia a la tensión, flexión e impacto (Faruk *et al.*, 2012).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el comportamiento de la combinación de los diferentes tamaños de partículas, proporciones de mezcla bambú/plástico y adición de MAPP en las propiedades mecánicas de tensión, flexión e impacto, a fin de recomendarla o las formulaciones que aseguren un mejor desempeño.

Materiales y Métodos

Las partes apicales de la caña de *Guadua angustifolia* fueron recolectadas en el Caserío Limoncito, distrito La Florida, Cajamarca, Perú. Se dejaron secar a medio ambiente; posteriormente se colocaron se secó en horno MOORE a 60 °C hasta alcanzar un contenido de humedad de 12 por ciento, se molió y tamizó para obtener tres tamaños de

Introduction

Composite materials have been used since ancient times (Pérez, 2012). Natural fibers have been used to reinforce plastic matrices since 1939; by the year 2000, composites containing kenaf, abaca, hemp and flax fibers were integrated into various autoparts. Since 2004, certain elements for electronics, such as mobile phone cases and covers containing kenaf fibers began to be produced, and since 2006, sports items are made with hemp, flax and kenaf fibers (Brief, 2011).

Natural fibers provide certain advantages compared to synthetic fibers, as they are renewable, biodegradable, less abrasive, and do not cause eye irritation, and their production entails lower energy requirements (Mutjé *et al.*, 2006; Venkateshwaran *et al.*, 2012).

Guadua angustifolia Kunth is widely appreciated in Peru due to its rapid growth; it is used to build houses; it is used in the construction of homes, sheds, barns, storehouses, country houses, etc. However, its exploitation generates much waste, as only 30 % of the cane is used (González, 2005).

When polymers are mixed with lignocellulosic fillers, there is no adequate adhesion due to the hydrophobic and hydrophilic characteristics of their molecules (Fuentes *et al.*, 2013). Therefore, coupling agents such as maleic anhydride-polypropylene (MAPP) are used to modify the fiber surface and thus obtain a good interface with the polymeric matrix and thereby improve the mechanical properties of the composites (Faruk *et al.*, 2012).

Mechanical properties are important for all composite materials because they make it possible to determine a final use of the product according to its resistance to tension, flexion and impact (Faruk *et al.*, 2012).

The objective of the present work was to assess the effect of the combination of the various particle sizes, bamboo/plastic mixing ratios, and addition of MAPP on the mechanical properties of tension, flexion and impact, in order to recommend the formulation that will ensure the best performance.

Materials and Methods

The apical parts of the *Guadua angustifolia* cane were collected in the village of Limoncito, in the La Florida district of Cajamarca, Peru. They were left to dry in the open air and later placed in a MOORE oven at 60 °C until their moisture content decreased to 12 percent; they were subsequently ground and sifted in order to obtain three particle sizes as reinforcement material (with 20, 40, 60 and 80 ASTM mesh sizes).

A polypropylene homopolymer with a fluidity index of 12.5g 10 min⁻¹ (2.16kg 230 °C⁻¹) was used as a thermoplastic matrix.

partícula como material de refuerzo (malla ASTM 20, 40, 60 y 80).

Como matriz termoplástica se usó un homopolímero, de polipropileno, con un índice de fluidez de $12.5 \text{ g } 10 \text{ min}^{-1}$ ($2.16 \text{ kg } 230 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). El agente acoplante fue el MAPP, a una concentración de 2 %. Se secaron las partículas en estufa LABOR MÚSZE RIPARI a $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, por 48 horas para reducir el contenido de humedad; se elaboraron diferentes mezclas, las cuales se muestran en el Cuadro 1. La preparación de la materia prima, el secado de las muestras y el ensayo de flexión se llevaron a cabo en los laboratorios de productos de Transformación Química, de Secado y de Propiedades Físico-Mecánicas de la madera, del departamento de Industrias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima-Perú.

La extrusión de materiales hizo en el laboratorio del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), con una máquina extrusora de 1 husillo (elaborada en el mismo laboratorio), esta trabajó a una temperatura de $175\text{-}185 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y 30 rpm; después, el material extruido se molió para su posterior prensado.

Los materiales compuestos se formaron en una prensa hidráulica de vulcanizado de caucho usando moldes de $21 \times 21 \text{ cm}$, a una velocidad de 0.9 cm s^{-1} y una presión de 40 bares; el curado del material se realizó durante 4 minutos, a una temperatura entre 177 y $195 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Para el corte se usó láser, a una velocidad de 0.78 mm min^{-1} y una potencia de 45 w, para obtener las probetas, cuyas dimensiones y normas empleadas se resumen en el Cuadro 2. Los ensayos mecánicos de tensión e impacto se llevaron a cabo en las instalaciones de una empresa colaboradora. Para las pruebas de tensión se usó una máquina para ensayos universales Zwick/Roell, con una velocidad de 5 mm min^{-1} y una celda de caga de 5 Kn; en el ensayo de impacto se empleó una máquina con una bala de 2.010 kg.

The coupling agent was MAPP, at a 2 % concentration. The particles were dried in an LABOR MÚSZE RIPARI oven at $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ during 48 hours in order to reduce their moisture content. Various mixtures, shown in Table 1 were produced. The preparation of the raw materials, the drying of the samples and the flexion trial took place at the laboratories of *Transformación Química, de Secado y de Propiedades Físico-Mecánicas de la Madera* (Wood Products' Chemical Transformation, Drying and Physical-Mechanical Properties), of the *Universidad Nacional Agraria La Molina* (UNALM), (La Molina National Agrarian University, UNALM) in Lima, Peru.

The extrusion of materials was carried out in the laboratory of the *Peruano de Energía Nuclear*, IPEN, (Peruvian Institute of Nuclear Energy) with a single screw extruder (made in the same laboratory) operating at a temperature of $175\text{-}185 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and 30 rpm; the extruded material was then ground and subsequently pressed.

The composite materials were formed in a hydraulic press for rubber vulcanization using $21 \times 21 \text{ cm}$ molds at a speed of 0.9 cm s^{-1} and a pressure of 40 bars; the materials were treated during 4 minutes at a temperature of 177 to $195 \text{ }^{\circ}\text{C}$. They were then cut with a laser at a speed of 0.78 mm min^{-1} and a potency of 45 w in order to obtain the test specimens, whose dimensions and norms are shown in Table 2. The mechanical tension and impact trials were carried out in the facilities of a collaborating company. The tension tests were carried out in a Zwick/Roell universal assay machine, with a speed of 5 mm min^{-1} and a 5 kN load cell, while a machine with a 2.010 kg ball was utilized for the impact trial.



Cuadro 1. Mezclas obtenidas con diferentes tamaños partícula, polipropileno y agente acoplante.

Formulación	Tamaño de malla ASTM	Rango tamaño de partícula (μm)	Composición		
			Bambú (%)	Polipropileno (%)	Agente acoplante (%)
F ₁	-20/+40	[425-850]	50	50	0
F ₂	-20/+40	[425-850]	40	60	0
F ₃	-20/+40	[425-850]	30	70	0
F ₄	-40/+60	[250-425]	50	50	0
F ₅	-40/+60	[250-425]	40	60	0
F ₆	-40/+60	[250-425]	30	70	0
F ₇	-60/+80	[180-250]	50	50	0
F ₈	-60/+80	[180-250]	40	60	0

Continúa Cuadro 1...

Continúa Cuadro 1...

Formulación	Tamaño de malla ASTM	Rango tamaño de partícula (µm)	Composición		
			Bambú (%)	Polipropileno (%)	Agente acoplante (%)
F ₉	-60/+80	[180-250]	30	70	0
F ₁₀	-20/+40	[425-850]	50	48	2
F ₁₁	-20/+40	[425-850]	40	58	2
F ₁₂	-20/+40	[425-850]	30	68	2
F ₁₃	-40/+60	[250-425]	50	48	2
F ₁₄	-40/+60	[250-425]	40	58	2
F ₁₅	-40/+60	[250-425]	30	68	2
F ₁₆	-60/+80	[180-250]	50	48	2
F ₁₇	-60/+80	[180-250]	40	58	2
F ₁₈	-60/+80	[180-250]	30	68	2

Table]. Mixtures obtained with different particle sizes, polypropylene and a coupling agent.

Formulation	ASTM mesh size	Particle size interval (µm)	Composition		
			Bamboo (%)	Polypropylene (%)	Coupling agent (%)
F ₁	-20/+40	[425-850]	50	50	0
F ₂	-20/+40	[425-850]	40	60	0
F ₃	-20/+40	[425-850]	30	70	0
F ₄	-40/+60	[250-425]	50	50	0
F ₅	-40/+60	[250-425]	40	60	0
F ₆	-40/+60	[250-425]	30	70	0
F ₇	-60/+80	[180-250]	50	50	0
F ₈	-60/+80	[180-250]	40	60	0
F ₉	-60/+80	[180-250]	30	70	0
F ₁₀	-20/+40	[425-850]	50	48	2
F ₁₁	-20/+40	[425-850]	40	58	2
F ₁₂	-20/+40	[425-850]	30	68	2
F ₁₃	-40/+60	[250-425]	50	48	2
F ₁₄	-40/+60	[250-425]	40	58	2
F ₁₅	-40/+60	[250-425]	30	68	2
F ₁₆	-60/+80	[180-250]	50	48	2
F ₁₇	-60/+80	[180-250]	40	58	2
F ₁₈	-60/+80	[180-250]	30	68	2



Cuadro 2. Dimensiones y normas ASTM usadas para la elaboración de las probetas.

Propiedad	Número total de probetas	Dimensiones de probetas			Norma ASTM
		Espesor (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	
Tensión	126	2.5 ± 0.2	165	19	D 638 - 03 ^a
Flexión	126	2.5 ± 0.2	127	12.7	D 790 - 03 ^b
Impacto	360	2.5 ± 0.2	120	65	D 5420 - 04 ^c

Fuente: ^a = ASTM, 2003a; ^b = ASTM, 2003b; ^c = ASTM, 2004.

Table 2. ASTM dimensions and norms used for making the test specimens.

Property	Total number of test specimens	Dimensions of the test specimens			ASTM Norm
		Thickness (mm)	Length (mm)	Width (mm)	
Tension	126	2.5 ± 0.2	165	19	D 638 - 03 ^a
Flexion	126	2.5 ± 0.2	127	12.7	D 790 - 03 ^b
Impact	360	2.5 ± 0.2	120	65	D 5420 - 04 ^c

Source: ^a = ASTM, 2003a; ^b = ASTM, 2003b; ^c = ASTM, 2004.

El modelo estadístico fue un diseño completamente al azar (DCA), con arreglo factorial de 3 x 3 x 2 (tamaño de malla, proporción mezcla bambú/plástico y concentración de agente acoplante); con 7 repeticiones para los ensayos de tensión y flexión y 20 para el de impacto. El diseño fue el siguiente:

$$A_i = A_0 + KOT + K1P + K2C + (K3)TP + (K4)TC + (K5)PC + (K6)TPC + \varepsilon TPCI$$

Donde:

A_0 = Media general

KOT , $K1P$ y $K2C$ = Efecto del nivel i -ésimo tratamiento, respectivamente

$(K3)TP$, $(K4)TC$ y $(K5)PC$ = Representan los efectos de interacción doble, respectivamente

$(K6)TPC$ = Efecto de interacción triple en la combinación

$\varepsilon TPCI$ = Efecto del error aleatorio en la combinación

T = Tamaño de malla ASTM (-20/+40, -40/+60, -60/+80)

P = Proporción de mezcla bambú/plástico (50/50, 40/60, 30/70)

C = Concentración de agente acoplante (0, 2)

I = Número de repeticiones

Se hizo un análisis de varianza con el programa *Statistical Analysis System* versión 9.2 (SAS, 2008). Cuando se observaron diferencias entre tratamientos ($p < 0.05$) se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey.

The statistical model was a completely random design (CRD), with a 3 x 3 x 2 factorial arrangement (mesh size, bamboo/plastic mixing ratio and coupling agent concentration); with 7 replications for the tension and flexion trials and 20 for the impact trial. The design was as follows:

$$A_i = A_0 + KOT + K1P + K2C + (K3)TP + (K4)TC + (K5)PC + (K6)TPC + \varepsilon TPCI$$

Where:

A_0 = Overall mean

KOT , $K1P$ and $K2C$ = Effect of the i th treatment level, respectively

$(K3)TP$, $(K4)TC$ and $(K5)PC$ = Represent the double interaction effects, respectively

$(K6)TPC$ = Triple interaction effect on the combination

$\varepsilon TPCI$ = Effect of the random error on the combination

T = ASTM mesh size (-20/+40, -40/+60, -60/+80)

P = Bamboo/plastic mixing ratio (50/50, 40/60, 30/70)

C = Coupling agent concentration (0, 2)

I = Number of repetitions

A variance analysis was carried out with the SAS 9.2 *Statistical Analysis System* (SAS, 2008). When differences were observed between treatments ($p < 0.05$), Tukey's mean comparison test was applied.

Resultados y Discusión

Tensión

En la Figura 1 se representa la variación de los valores promedio y la desviación estándar de la resistencia máxima a la tensión, de todas las muestras de material compuesto. Se observa que la presencia de agente acoplante favoreció la resistencia máxima. La mayor resistencia se registró con la proporción 30/70 y tamaño de malla -60/+80 de 17.8 MPa; por el contrario, la proporción 50/50, para el mismo tamaño de malla -60/+80, sin agente acoplante presentó la menor resistencia (11.9 MPa), aunque no superaron el valor del plástico (31.4 MPa).

Results and Discussion

Tension

Figure 1 shows the variation in the mean values and the standard deviation for the maximum resistance to tension of all the composite samples. The presence of the coupling agent was observed to favor maximum resistance. The highest resistance, of 17.8 MPa, was registered with the 30/70 ratio and the -60/+80 mesh size; conversely, the 50/50 ration for the same -60/+80 mesh size, without a coupling agent had the least resistance (11.9 MPa), without, however, exceeding the value for plastic (31.4 MPa).

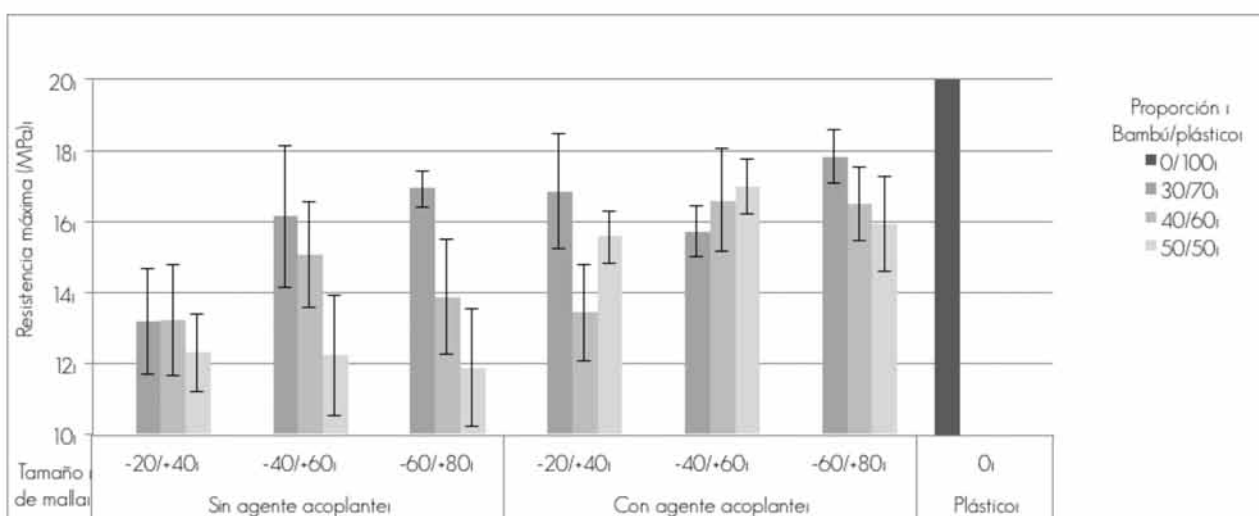


Figura 1. Resistencia máxima a la tensión de los materiales compuestos bambú/plástico.

Figure 1. Maximum resistance to tension of bamboo/plastic composite materials.

En investigaciones de Cárdenas (2012), Lisperguer *et al.* (2013), Martínez-López *et al.* (2014) y Samariha *et al.* (2015) se documentaron, para materiales compuestos con 50 por ciento de partículas, resultados entre 15 y 28.8 MPa. Moya *et al.* (2012) registraron valores de 17 a 38 MPa, para compuestos que contenían de 20 a 60 % de partículas, pero no superaron el del plástico (40 MPa). Asimismo, Idrus *et al.* (2011) citan 19 MPa para compuestos con 30 % de partículas. Además, López *et al.* (2012) obtuvieron una resistencia de 60 y 50 MPa, para compuestos con 40 y 30 % de fibras de yute, cuando se les agregó el agente acoplante. Durowaye *et al.* (2014) indican valores de 4 a 6 MPa, con 25 % de partículas de sisal.

Los resultados de las probetas evaluadas son inferiores a los señalados en la bibliografía; además ninguna formulación fue mayor al del plástico; esto se puede deber a la aglomeración de las partículas, la irregularidad de la forma del relleno; así como, a una baja interacción entre el refuerzo y la matriz, que produce una mala transferencia de esfuerzo, por lo que la

Researches by Cárdenas (2012), Lisperguer *et al.* (2013), Martínez-López *et al.* (2014) and Samariha *et al.* (2015) obtained results of 15 to 28.8 MPa for composite materials with 50 % particles. Moya *et al.* (2012) registered values of 17 to 38 MPa for composites with 20 to 60 % particles; however, these values did not exceed those of plastic (40 MPa). Likewise, Idrus *et al.* (2011) cite 19 MPa for composites with 30 % particles. Furthermore, López *et al.* (2012) obtained a resistance of 60 and 50 MPa for materials with 40 and 30 % jute fibers when the coupling agent was added. Durowaye *et al.* (2014) register values of 4 to 6 MPa with 25 % particles of sisal.

Results for the assessed test specimens are lower than those cited in the bibliography; furthermore, no formulation had values above those of plastic. This may be due to the clustering of the particles, the irregularity of the filler form, or a low interaction between the reinforcement and the matrix resulting in poor stress transfer, causing the load to act as a defect instead of a reinforcement in the matrix and therefore producing the crack

carga actuó como un defecto, y no como un refuerzo en la matriz, lo cual hizo que se produjera la grieta más rápido (Liu *et al.*, 2008; Rosa *et al.*, 2009; Idrus *et al.*, 2011; Cárdenas, 2012; Santos *et al.*, 2012; Moya *et al.*, 2012; Naghmouchi *et al.*, 2013; Ravi *et al.*, 2014).

Si bien, los valores son inferiores, en las formulaciones con agente acoplante hubo un incremento en los resultados, lo cual indica que las partículas formaron enlaces éster, en consecuencia el material compuesto soporta más carga (Rosa *et al.*, 2009). En la Figura 2 se presentan espacios vacíos dentro del material compuesto, tomados con un espectrómetro (USB DIGITAL MICROSCOPE (VEHO VMS 004).

more quickly (Liu *et al.*, 2008; Rosa *et al.*, 2009; Idrus *et al.*, 2011; Cárdenas, 2012; Santos *et al.*, 2012; Moya *et al.*, 2012; Naghmouchi *et al.*, 2013; Ravi *et al.*, 2014).

Although formulations with a coupling agent had lower values, there was an increase in the results; this indicates that the particles formed ester bonds, and therefore the composite material can bear more load (Rosa *et al.*, 2009). Figure 2 shows void spaces within the composite material, taken with a USB DIGITAL MICROSCOPE (VEHO VMS 004 spectrometer).

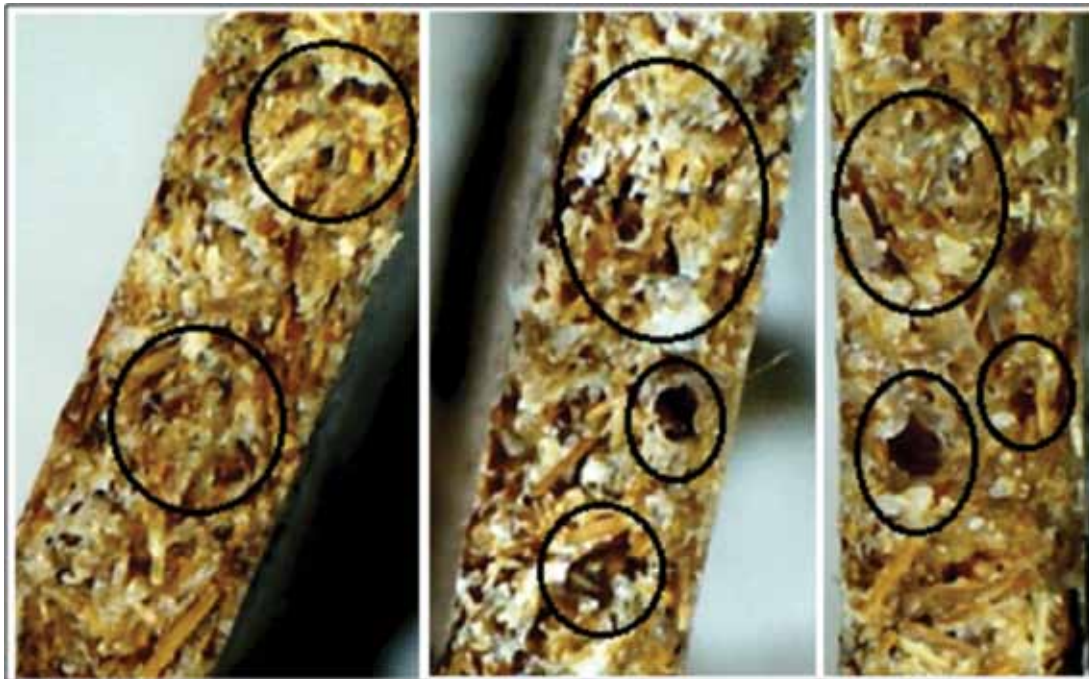


Figura 2. Imágenes de espacios vacíos (dentro de los círculos) en la sección transversal de materiales compuestos bambú/plástico obtenidos con tamaño de malla -60/+80 y proporciones 50/50, 40/60 y 30/70, respectivamente.

Figure 2. Images of void spaces (circled) in a cross-section of bamboo/plastic composite materials obtained with a -60/+80 mesh and 50/50, 40/60 and 30/70 ratios, respectively.

El análisis estadístico evidenció que no hay diferencias significativas en la interacción del tamaño de malla con la concentración de agente acoplante ($p = 0.5802$), pero sí en las otras variables ($p < 0.0001$). En el Cuadro 3 se consignan los valores de la comparación múltiple de medias, el cual indica que la mejor combinación resultó con el tamaño de partículas -60/+80, la proporción 30/70 y cuando se usó MAPP.

According to the statistical analysis, there are no significant differences in the interaction between the mesh size and the coupling agent concentration ($p = 0.5802$); however, such differences were found in other variables ($p < 0.0001$). Table 3 records the values obtained from the mean comparison test, which show that the best combination was that of the -60/+80 particle size, the 30/70 ratio and the use of MAPP.



Cuadro 3. Valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba Tukey para la resistencia máxima a la tensión.

Tamaño de malla ASTM			Proporción de mezcla bambú/plástico (%)			Concentración de agente acoplante (%)		
Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
-20+40	14.09	B	50/50	14.14	B	0	13.86	B
-40+60	15.45	A	40/60	14.77	B	2	16.15	A
-60+80	15.48	A	30/70	16.11	A			

Table 3. Values for maximum resistance to tension obtained using Tukey's mean comparison test.

ASTM mesh size			Bamboo/plastic mixing ratio (%)			Coupling agent concentration (%)		
Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey
-20+40	14.09	B	50/50	14.14	B	0	13.86	B
-40+60	15.45	A	40/60	14.77	B	2	16.15	A
-60+80	15.48	A	30/70	16.11	A			

La variación de los valores promedio y la desviación estándar del módulo de elasticidad a la tensión se presentan en la Figura 3. Se observa un incremento en el MOE en la mayoría de las combinaciones al aumentar las partículas en la mezcla (el valor del polipropileno fue 0.6 GPa). En el caso de las probetas con aditivo es evidente se observa el beneficio de agregar el agente acoplante, ya que aumentó el módulo de elasticidad de los materiales compuestos. La proporción de mezcla 50/50, con la partícula -20/+40 tuvo el MOE (1.7 GPa) más alto; por el contrario, la proporción de mezcla 40/60 para el mismo tamaño de partícula le correspondió el menor MOE (1.2 GPa).

The variation in the mean values and standard deviation of the modulus of elasticity to tension is shown in Figure 3. The MOE was observed to increase in most combinations with larger amounts of particles in the mixture (the value for polypropylene was 0.6 GPa). In the case of test specimens with an additive, the benefit of adding the coupling agent is evident, as it increased the modulus of elasticity of the composite material. The 50/50 mixing ratio with particle size -20/+40 attained the highest MOE (1.7 GPa); conversely, the 40/60 mixing ratio with the same particle size had the lowest value for MOE (1.2 GPa).

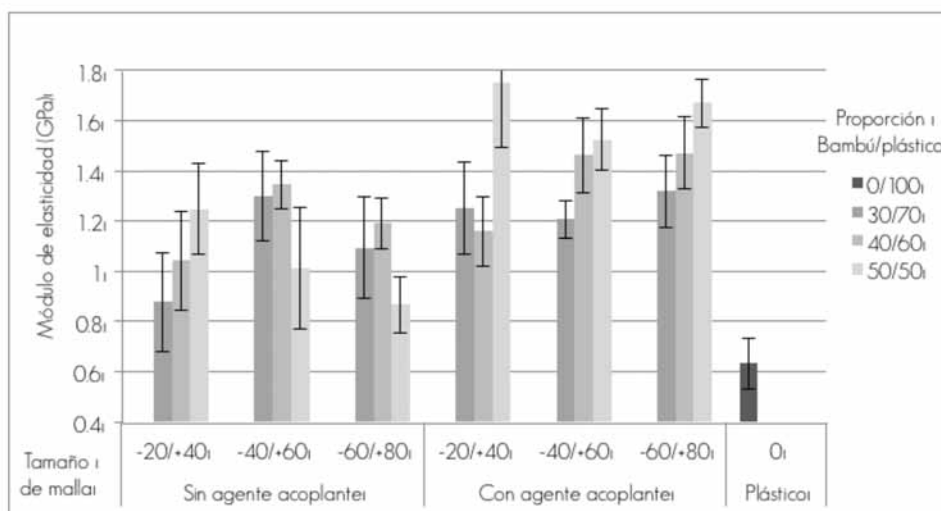


Figura 3. MOE en tensión de los materiales compuestos bambú/plástico elaborados.
Figure 3. MOE of bamboo/plastic composite materials in tension.

En investigaciones realizadas por Rosa *et al.* (2009), Idrus *et al.* (2011), López *et al.* (2012), Naghmouchi *et al.* (2013) y Ravi *et al.* (2014); se documenta que los valores del MOE son directamente proporcionales con el aumento del contenido de partículas, otros valores obtenidos por Cárdenas (2012), Lisperguer *et al.* (2013) y Samariha *et al.* (2015) varían de 0.9 a 3.6 GPa, para materiales compuestos con 50 % de partículas. Moya *et al.* (2012) citan de 7 a 9 GPa para compuestos con 20 a 60 % de refuerzo. Idrus *et al.* (2011) registraron 1.1 GPa para compuestos con 30 % de partículas; López *et al.* (2012) obtuvieron entre 7 y 6 GPa, con 40 y 30 % de fibras de yute.

Los registros del presente estudio superan el valor del plástico, lo cual puede deberse a que las partículas le aportan rigidez al material compuesto; es decir, actúan como refuerzo (Rosa *et al.*, 2009; Moya *et al.*, 2012; Naghmouchi *et al.*, 2013; Ravi *et al.* 2014); sin embargo la mayoría de los resultados están por debajo de los citados en bibliografía. En las formulaciones con agente acoplante hubo un incremento en los resultados, la proporción 50/50 que tuvo el valor más alto, esto responde a que el agente acoplante pudo enlazarse con los grupos hidroxilos del refuerzo y con ello mejorar la rigidez del compuesto (Takatani *et al.*, 2008; Rosa *et al.*, 2009; López *et al.*, 2012; Naghmouchi *et al.*, 2013).

El análisis estadístico evidenció diferencias significativas en todas las variables ($p < 0.0477$). En el Cuadro 4 se exhiben la comparación múltiple de medias; se observa que la mejor combinación resultó con el tamaño de partículas -60/+80 y -40/+60, la proporción 50/50 y 40/60, y MAPP.

Researches by Rosa *et al.* (2009), Idrus *et al.* (2011), López *et al.* (2012), Naghmouchi *et al.* (2013) and Ravi *et al.* (2014) indicate that the MOE values are directly proportional to the increase in the content of particles; other values cited by Cárdenas (2012), Lisperguer *et al.* (2013) and Samariha *et al.* (2015) vary from 0.9 to 3.6 GPa for composite materials with 50 % particles. Moya *et al.* (2012) documented a value of 7 to 9 GPa for composites with 20 to 60 % reinforcement. Idrus *et al.* (2011) registered 1.1 GPa for compounds with 30 % particles; López *et al.* (2012) cite values of 7 and 6 GPa with 40 and 30 % jute fibers.

The present study records higher values than those of plastic; this is because the particles provide rigidity to the composite material, i.e. they act as a reinforcement (Rosa *et al.*, 2009; Moya *et al.*, 2012; Naghmouchi *et al.*, 2013; Ravi *et al.* 2014). However, most results are below those cited in the bibliography. In formulations using a coupling agent, there was an increase in the results; the 50/50 ratio had the highest value, as the coupling agent was able to bond with the hydroxyl groups and thereby improve the rigidity of the composite (Takatani *et al.*, 2008; Rosa *et al.*, 2009; López *et al.*, 2012; Naghmouchi *et al.*, 2013).

The statistical analysis evidenced significant differences in all the variables ($p < 0.0477$). Table 4 shows the multiple mean comparison; the best combination was observed to be the one with -60/+80 and -40/+60 particle sizes, the 50/50 and 40/60 ratios and the use of MAPP.

Cuadro 4. Comparación múltiple de medias por medio de la prueba Tukey para MOE en tensión.

Tamaño de malla ASTM			Proporción de mezcla bambú/plástico (%)			Concentración de agente acoplante (%)		
Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
-20+40	1.22	B	50/50	1.35	A	0	1.11	B
-40+60	1.31	A	40/60	1.28	A	2	1.43	A
-60+80	1.27	AB	30/70	1.17	B			

Table 4. Multiple mean comparison using Tukey's test for MOE in tension.

ASTM mesh size			Bamboo/plastic mixing ratio (%)			Coupling agent concentration (%)		
Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey
-20+40	1.22	B	50/50	1.35	A	0	1.11	B
-40+60	1.31	A	40/60	1.28	A	2	1.43	A
-60+80	1.27	AB	30/70	1.17	B			

Flexión

Las mezclas sin aditivo muestran una tendencia similar en cuanto a los diferentes tamaños de partícula. En el caso de las probetas con aditivo la presencia de agente acoplante mejora la resistencia de los materiales compuestos; a la proporción de mezcla 30/70 con el tamaño de partícula -60/+80, le correspondió la mayor resistencia (22.7 MPa), por el contrario, la partícula -40/+60 y la proporción de mezcla 50/50 tuvo la menor resistencia (15 MPa); sin embargo, no superaron el valor del plástico 25.4 MPa (Figura 4).

Flexion

Mixtures without an additive show a similar tendency as to the various particle sizes. In the case of test specimens with an additive, the presence of a coupling agent improves the resistance of composite materials; the highest resistance (22.7 MPa) was reached using the 30/70 mixing ratio; conversely, the -40/+60 particle and the 50/50 mixing ratio had the lowest resistance (15 MPa). These values, however, did not surpass those of plastic (25.4 MPa) (Figure 4).

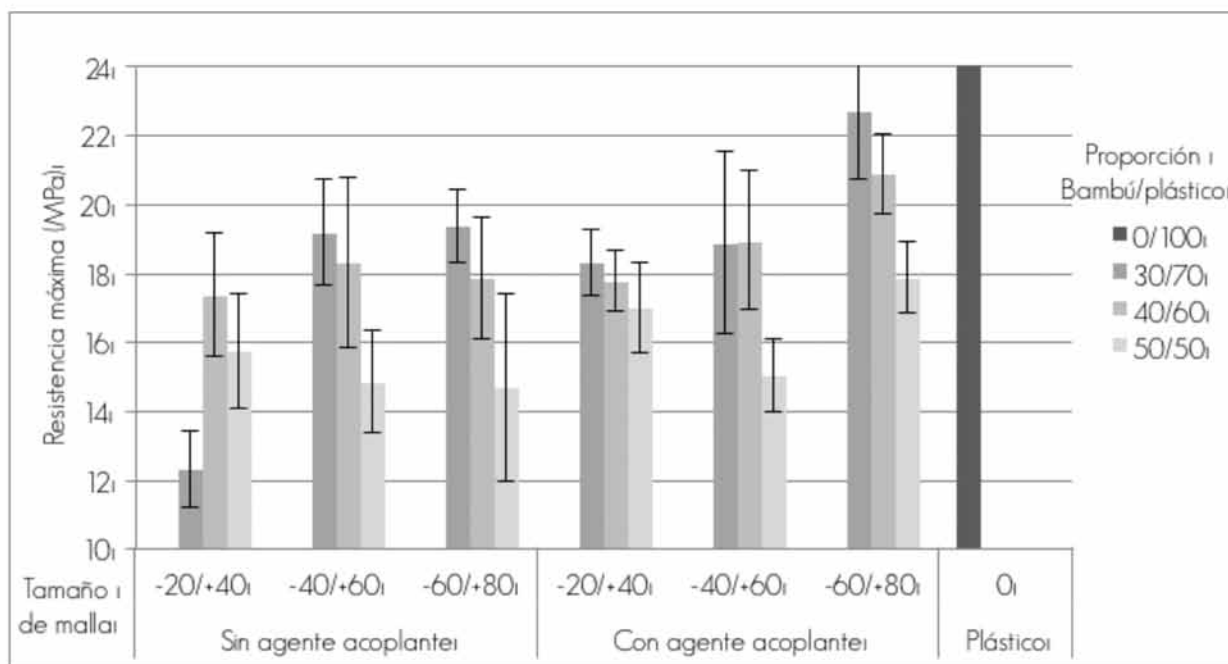


Figura 4. Resistencia máxima en flexión de los materiales compuestos bambú/plástico.
 Figure 4. Maximum resistance in flexion of bamboo/plastic composite materials.

Cárdenas (2012), Lisperguer *et al.* (2013), Martínez-López *et al.* (2014), y Samariha *et al.* (2015) consignan valores de 17.5 a 60 MPa para materiales compuestos con 50 % de partículas; Bahari y Krause (2016) registran un valor de 59.6 MPa para compuestos con 25 % de partículas; Stark y Rowland (2003) documentan valores entre 38.7 a 42.6 MPa para compuestos con 40 % de partículas. Asimismo, Idrus *et al.* (2011) señalan que la resistencia se incrementa directamente con la cantidad de fibras; los resultados que se muestran en la Figura 4, no coinciden.

Cárdenas (2012), Lisperguer *et al.* (2013), Martínez-López *et al.* (2014), and Samariha *et al.* (2015) register values of 17.5 to 60 MPa for composite materials with 50 % particles; Bahari and Krause (2016) register a value of 59.6 MPa for composites with 25 % particles; Stark and Rowland (2003) cite values of 38.7 to 42.6 MPa for composites with 40 % particles. Likewise, Idrus *et al.* (2011) point out that resistance increases in direct proportion to the number of fibers; results shown in Figure 4 do not coincide.

La mayoría de los resultados del presente estudio son inferiores a los bibliográficos, además ninguna formulación superó el valor del plástico; los anterior puede deberse a que los espacios vacíos entre la fibra y la matriz ocasionan una pobre unión interfacial, así como a la aglomeración de partículas que origina una escasa dispersión en la matriz (Ravi *et al.*, 2014), lo cual produjo una mala transferencia de esfuerzo, que, a su

Most values obtained in the present study are lower than those reported in the bibliography; furthermore, no formulation surpassed the value for plastic. This may be due to the presence of void spaces between the fiber and the matrix, which result in a poor interfacial union, as well as to the clustering of particles, which leads to a scarce dispersion in the matrix (Ravi *et al.*, 2014). All of this caused a poor stress transfer, which in turn

vez, produce la falla más rápido. Al igual que en los resultados de la resistencia máxima en tensión, los materiales compuestos con agente acoplante aumentaron su resistencia, lo cual indica que las partículas formaron enlaces ésteres favoreciendo que soporten más carga (Rosa *et al.*, 2009).

No se obtuvieron diferencias significativas en la interacción de la proporción de mezcla con la concentración de agente acoplante ($p = 0.0552$) pero sí en las otras variables ($p < 0.0001$). En el Cuadro 5 se resume la información de la comparación múltiple de medias. La mejor combinación resultó con el tamaño de partículas -60/+80, la proporción 30/70 y 40/60, y MAPP.

produced the flaw more rapidly. As in the outcome for maximum resistance in tension, the composite materials made with a coupling agent increased their resistance, which is an indication that the particles formed ester bonds that favored their ability to bear more load (Rosa *et al.*, 2009).

There were no significant differences in the interaction of the mixing ratio and the coupling agent concentration ($p = 0.0552$); however, some such differences did occur for the other variables ($p < 0.0001$). Table 5 summarizes the results of the multiple mean comparison. The best combination was obtained with the -60/+80 particle size, the 30/70 and 40/60 ratios and the use of MAPP.

Cuadro 5. Comparación múltiple de medias por medio de la prueba Tukey para la resistencia máxima en flexión.

Tamaño de malla ASTM			Proporción de mezcla bambú/plástico (%)			Concentración de agente acoplante (%)		
Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
-20+40	16.4	C	50/50	15.85	B	0	16.60	B
-40+60	17.53	B	40/60	18.51	A	2	18.59	A
-60+80	18.89	A	30/70	18.4	A			

Table 5. Multiple mean comparison using Tukey's test for maximum resistance in flexion.

ASTM mesh size			Bamboo/plastic mixing ratio (%)			Coupling agent concentration (%)		
Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey
-20+40	16.4	C	50/50	15.85	B	0	16.60	B
-40+60	17.53	B	40/60	18.51	A	2	18.59	A
-60+80	18.89	A	30/70	18.4	A			

La variación de los promedios del módulo de elasticidad y la desviación estándar a la flexión se presentan en la Figura 5; se observa un aumento en el MOE para la mayoría de las combinaciones al aumentar las partículas en la mezcla (el valor del polipropileno fue 0.6 GPa). Para las probetas con aditivo, se tiene una tendencia similar para las diferentes formulaciones; la proporción de mezcla 40/60 con la partícula -60/+80 presentó el mayor MOE (0.9 GPa), la proporción de mezcla 30/70 con la partícula -20/+40 tuvo el menor MOE (0.7 GPa).

The variations in the modulus of elasticity means and standard deviation for flexion are shown in Figure 5; an increase in the MOE is observed in most combination with an increased number of particles in the mixture (the value for polypropylene was 0.6 GPa). The test specimens with an additive displayed a similar tendency for the various formulations; the highest MOE (0.9 GPa) was attained using the 40/60 mixing ratio with the -60/+80 particle size, while the 30/70 mixing ratio with the -20/+40 particle size had the lowest MOE (0.7 GPa).



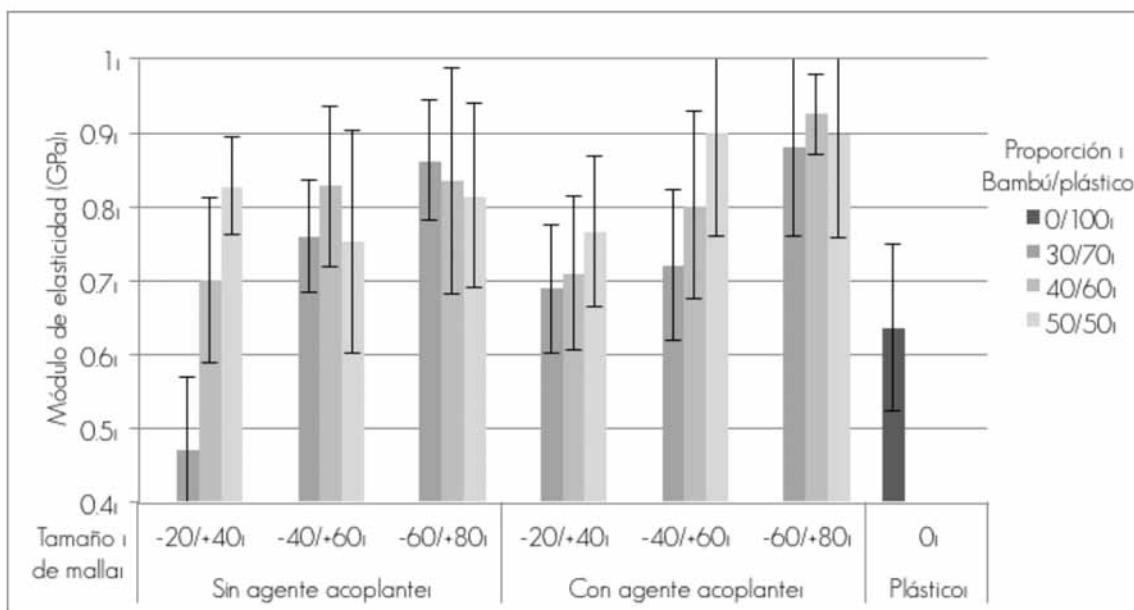


Figura 5. MOE en flexión de los materiales compuestos bambú/plástico.
 Figure 5. MOE of the bamboo/plastic composite materials in flexion.

Idrus *et al.* (2011), Mattos *et al.* (2014) y Ravi *et al.* (2014) al analizar compuestos con fibras y polipropileno señalan que el MOE aumenta, de forma directa, con la cantidad de fibras. Por otro lado, Cárdenas (2012), Lisperguer *et al.* (2013), Chen *et al.* (2014), Samariha *et al.* (2015) y, Bahari y Krause (2016) registran valores entre 0.9 a 5.2 GPa para compuestos con 50 % de partículas; Stark y Rowland (2003) y Liu *et al.* (2008) consignan 2.1 y 3.2 GPa para compuestos entre 30 a 40 % de refuerzo.

Los resultados de la presente investigación, en la mayoría de las formulaciones, superan el valor del plástico, esto se puede deber a que las partículas le otorgan rigidez al material compuesto (Ravi *et al.*, 2014; Bahari y Krause 2016); sin embargo, están por debajo de los valores citados en la literatura, debido a la mala unión entre los materiales, lo cual crea espacios vacíos, aglomeración de partículas por la pobre dispersión en la matriz (Stark y Rowland, 2003; Ravi *et al.*, 2014; Bahari y Krause, 2016).

El análisis estadístico indicó que no hay diferencias significativas entre las dobles interacciones de concentración de agente acoplante con tamaño de malla ($p = 0.7565$) y proporción de mezcla ($p = 0.5995$). En el Cuadro 6 se muestran los valores de la comparación múltiple de medias; la mejor combinación resultó usando el tamaño de partículas -60/+80, la proporción 50/50 y 40/60, y MAPP.

In their analysis of composites with fibers and polypropylene, Idrus *et al.* (2011), Mattos *et al.* (2014) and Ravi *et al.* (2014) point out that the MOE increases in direct proportion to the number of fibers. On the other hand, Cárdenas (2012), Lisperguer *et al.* (2013), Chen *et al.* (2014), Samariha *et al.* (2015), and Bahari and Krause (2016) register values ranging between 0.9 and 5.2 GPa for composites with 50 % particles, while Stark and Rowland (2003) and Liu *et al.* (2008) report values of 2.1 to 3.2 GPa for composites with 30 to 40 % reinforcement.

The results of the present research, in most formulations, exceed the values for plastic. This is because the particles confer rigidity to the composite material (Ravi *et al.*, 2014; Bahari and Krause 2016). Nevertheless, these values are below those cited in the literature due to the poor union between the materials that produces void spaces, particle clustering as a result of poor dispersion in the matrix (Stark and Rowland, 2003; Ravi Kumar *et al.*, 2014; Bahari and Krause, 2016).

The statistical analysis indicated that there are no significant differences between the double interactions of the coupling agent concentration with the mesh size ($p = 0.7565$) and mixing ratio ($p = 0.5995$). Table 6 shows the values for the multiple mean comparison; the best combination resulted from the use of a -60/+80 particle size, 50/50 and 40/60 mixing ratios, and MAPP.



Cuadro 6. Comparación múltiple de medias por medio de la prueba Tukey para MOE en flexión.

Tamaño de malla ASTM			Proporción de mezcla bambú/plástico (%)			Concentración de agente acoplante (%)		
Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
-20+40	0.69	C	50/50	0.82	A	0	0.76	B
-40+60	0.8	B	40/60	0.80	A	2	0.81	A
-60+80	0.86	A	30/70	0.73	B			

Table 6. Multiple mean comparison using Tukey's test for MOE in flexion.

ASTM mesh size			Bamboo/plastic mixing ratio (%)			Coupling agent concentration (%)		
Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey
-20+40	0.69	C	50/50	0.82	A	0	0.76	B
-40+60	0.8	B	40/60	0.80	A	2	0.81	A
-60+80	0.86	A	30/70	0.73	B			

Impacto

En la Figura 6 se representa la variación de los valores promedio y la desviación estándar del ensayo de impacto de todas las muestras de material compuesto. Se observa que no hay una tendencia marcada con respecto a la energía absorbida por el material compuesto, al parecer numéricamente todas son parecidas. Respecto a las probetas con aditivo, hay un ligero aumento en los valores de la energía absorbida por los materiales compuestos, la mezcla con el tamaño de partícula -40/+60 y la proporción 30/70 absorbió mayor energía (0.44 J), y a la mezcla con el tamaño de partícula -20/+40 y la proporción 30/70 le correspondió menor energía (0.33 J); sin embargo, no superaron el valor del plástico (2 J).

Impact

Figure 6 represents the variation in the mean values and the standard deviations of the impact trial for all the samples of composite materials. No marked tendency in regard to the energy absorbed by the composite materials is observed; they all appear to be numerically similar. As for the test specimens with an additive, there is a light increase in the values of energy absorbed by the composite materials. The mixture with a -40/+60 particle size and 30/70 mixing rate reached the highest value (0.44 J), and the lowest value (0.33 J) was for the -20/+40 particle size with the 30/70 ratio; however, the values for plastic (2 J) were higher.

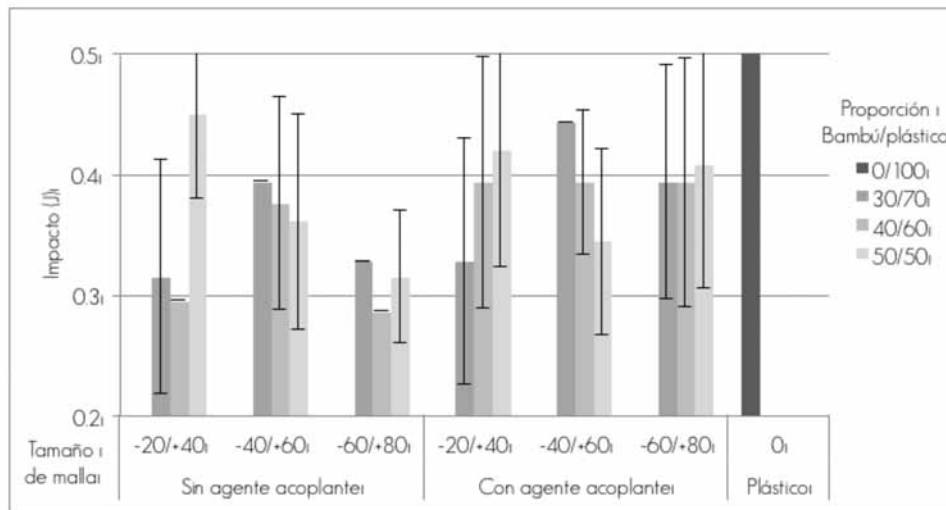


Figura 6. Resistencia al impacto de los materiales compuestos bambú/plástico.

Figure 6. Resistance of bamboo/plastic composite materials to impact.

Faruk *et al.* (2012) indican que el ensayo de impacto es la habilidad del material para resistir una fractura, luego de un esfuerzo aplicado a gran velocidad. Kumar *et al.* (2014) enfatizan que las fibras son importantes porque transmiten el esfuerzo a la matriz. En un estudio de Kinochita *et al.* (2009) señalan que los valores de impacto son directamente proporcionales con el aumento del tamaño de partículas. Cárdenas (2012) obtuvo valores entre 660 y 682 J m⁻¹, Lisperguer *et al.* (2013) entre 6 a 7 J m⁻¹ para compuestos con 50 por ciento de refuerzo. Bahari y Krause (2016) registran un valor de 3.8 kJ m⁻² para compuestos con 25 por ciento de refuerzo no pudiendo superar el valor del plástico 20 kJ m⁻².

Durowaye *et al.* (2014) documentan de 1.9 a 1.2 para compuestos con 25 % de partículas de sisal. Los valores de las probetas evaluadas son inferiores, y ninguna formulación superó el valor del plástico; lo anterior responde a una inadecuada adhesión de los materiales, que genera microespacios entre las partículas y la matriz, además al incrementar la cantidad de partículas puede haber una aglomeración de las mismas, por la pobre dispersión en la matriz (Stark y Rowland, 2003; Ravi *et al.*, 2014; Bahari y Krause, 2016).

El análisis estadístico evidenció que hay diferencias significativas con la concentración de agente acoplante (p = 0.0001) y la doble interacción entre el tamaño de malla, con la proporción de mezcla (p<0.0001) y la concentración de agente acoplante (p = 0.0187), pero no con las otras variables (p>0.0814). La comparación múltiple de medias, indica que la mejor combinación resultó usando el tamaño de partículas -60/+80, la proporción 50/50 y 40/60, y cuando se usó MAPP (Cuadro 7).

Faruk *et al.* (2012) point out that the impact trial is the ability of the material to resist a fracture after stress is applied at a high speed. Kumar *et al.* (2014) emphasize the importance of the fibers in transmitting the stress to the matrix. A study by Kinochita *et al.* (2009) shows the values of impact to be directly proportional to the increase in particle size. Cárdenas (2012) registers values of 660 to 682 K m⁻¹, while Lisperguer *et al.* (2013) obtained values of 6 to 7 J m⁻¹ for composites with 50 % reinforcement. Bahari and Krause (2016) record a value of 3.8 kJ m⁻² for composites with 25 % reinforcement; both these values are lower than the 20 kJ m⁻² obtained for plastic.

Durowaye *et al.* (2014) document a value of 1.9 to 1.2 for composites with 25 % sisal particles. The values for the assessed test specimens are lower, and no formulation exceeded the value for plastic. This is due to an inadequate adhesion of the materials, which generates microspaces between the particles and the matrix; furthermore, as the number of particles increases, these may cluster due to poor dispersion in the matrix (Stark and Rowland, 2003; Ravi *et al.*, 2014; Bahari and Krause, 2016).

The statistical analysis evidenced the presence of significant differences in the coupling agent concentrations (p = 0.0001) and in the double interaction between mesh size and mixing ratio (p<0.0001) and coupling agent concentration (p = 0.0187), but not in regard to other variables (p>0.0814). The multiple mean comparison indicates that the best combination resulted from the use of a -60/+80 particle size, the 50/50 and 40/60 mixing ratios and MAPP (Table 7).

Cuadro 7. Comparación múltiple de medias por medio de la prueba Tukey para el ensayo de impacto.

Tamaño de malla ASTM			Proporción de mezcla bambú/plástico (%)			Concentración de agente acoplante (%)		
Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
-20+40	0.36	A	50/50	0.38	A	0	0.34	B
-40+60	0.37	A	40/60	0.36	A	2	0.39	A
-60+80	0.36	A	30/70	0.36	A			

Table 7. Multiple mean comparison using Tukey's test for the impact trial.

ASTM mesh size			Bamboo/plastic mixing ratio (%)			Coupling agent concentration (%)		
Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey	Level	Mean	Tukey
-20+40	0.36	A	50/50	0.38	A	0	0.34	B
-40+60	0.37	A	40/60	0.36	A	2	0.39	A
-60+80	0.36	A	30/70	0.36	A			

Se observó que en las mayorías de las formulaciones con MAPP hubo un incremento en las propiedades mecánicas, debido al incremento en la adhesión interfacial de la presencia del agente acoplante (Lisperguer *et al.* 2013).

Conclusiones

Los materiales compuestos con tamaño de malla -60/+80, 30 por ciento de contenido de partícula de bambú y con agente acoplante registran valores más altos. Los materiales compuestos con tamaño de malla -20/+40, 50 por ciento de contenido de partícula de bambú y sin agente acoplante presentan los menores valores.

La resistencia máxima a tensión y flexión para la mayoría de los materiales compuestos fue inversamente proporcional al aumento de partículas de bambú y directamente proporcional al agente acoplante, sin superar al plástico; mientras que el módulo de elasticidad en ambas propiedades aumenta en forma directa con el contenido de partículas y el agente acoplante, por encima del plástico.

La resistencia al impacto para los materiales compuestos es directamente proporcional, cuando se agrega agente acoplante.

Agradecimientos

Al Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad, INNOVATE PERÚ, por apoyar y financiar parte de la investigación con el proyecto 414-PNICP-PIAP-2014; así mismo, a la Universidad Nacional Agraria La Molina, especialmente a mi Facultad Ciencias Forestales, al Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) en especial al Ing. Javier Gago y al Ing. Carlos Rojas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Karen Catherine Lázaro León: procesamiento de la materia prima, evaluación de las propiedades, análisis de datos y revisión de manuscrito; Héctor E. Gonzáles Mora, Aldo J. Cárdenas Oscanoa: revisión del manuscrito.

Referencias

- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2003a. Standard Test Method for Tensile Properties for Plastics. ASTM D 638-03. West Conshohocken, PA, USA. 17 p.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2003b. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM D 790-03. West Conshohocken, PA, USA. 11 p.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 2004. Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimen by Means of a Striker Impacted by a Falling Weight (Gardner Impact). ASTM D 5420-04. West Conshohocken, PA, USA. 8 p.

In most formulations with MAPP there was an increase in the mechanical properties due to the increased interfacial adhesion obtained with the use of a coupling agent (Lisperguer *et al.* 2013).

Conclusions

Composite materials made with a -60/+80 mesh size, a 30 % content of bamboo particles and a coupling agent register the highest values. Composites made using a -20/+40 mesh size, 50 % bamboo particles and no coupling agent have the lowest values.

The maximum resistance to tension and flexion for most composite materials was inversely proportional to the increase in the number of bamboo particles and directly proportional to the amount of coupling agent, without exceeding the values for plastic, whereas the modulus of elasticity for both properties increases in direct proportion to the content of particles and of a coupling agent, with values above those of plastic.

Resistance to impact for the compound materials is directly proportional when a coupling agent is added.

Acknowledgements

The authors would like to express our gratitude to the *Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad, INNOVATE PERÚ* (National Program of Innovation for Competitiveness and Productivity) for the support it provided and for having funded part of the research under project 414-PNICP-PIAP-2014, as well as to the *Universidad Nacional Agraria La Molina* (La Molina National Agrarian University), particularly to my Faculty of Forestry, and to the *Instituto Peruano de Energía Nuclear* (Peruvian Institute of Nuclear Energy, IPEN), especially to Javier Gago, Eng., and to Carlos Rojas, Eng.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Contribution by author

Karen Catherine Lázaro León: raw material processing, assessment of properties, data analysis and writing of the paper; Héctor E. González Mora and Aldo J. Cárdenas Oscanoa: review of the manuscript.

End of the English version



- Bahari, S. and A. Krause. 2016. Utilizing Malaysian bamboo for use in thermoplastic composites. *Journal of Cleaner Production* 110: 16 - 24.
- Brief, L. 2011. Opportunities in Natural fiber Composites. <http://www.lucintel.com/lucintelbrief/potentialofnaturalfibercompositesfinal.pdf> (25 de diciembre de 2015).
- Cárdenas, A. 2012. Evaluación de la eficiencia como preservante antifúngico del borato de zinc y su efecto en las propiedades físicas y mecánicas de materiales compuestos de plástico y madera de pino. Tesis Mg. Sc. Productos Forestales. Departamento de Madera, Celulosa y Papel. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal, México. 145 p.
- Chen, Y., N. Stark, M. Tshabalala, J. Gao and Y. Fan. 2014. Properties of wood-plastic composites (WPCs) reinforced with extracted and delignified wood flour. *Holzforschung* 68(8): 933 - 940.
- Durowaye, S. I., G. I. Lawal and O. I. Olagbaju. 2014. Microstructure and Mechanical Properties of Sisal Particles Reinforced Polypropylene composite. *International Journal of Composite Materials* 4(4): 190 - 195.
- Faruk, O., A. Bledzki, H. Fink and M. Sain. 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science* 37: 1552 - 1596.
- Fuentes, C. A., L. Q. N. Tran, M. V. Hellemont, V. Janssens, C. Dupont-Gillain, A. W. Van Vuure and I. Verpoest. 2013. Effect of physical adhesion on mechanical behavior of bamboo fibre reinforced thermoplastic composites. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 418: 7-15.
- González, H. 2005. Elaboración de una propuesta para el aprovechamiento y la transformación del bambú en el ámbito del PRODAPP (Puerto Inca-Oxapampa). Informe Final. Lima, Perú. 95 p.
- Idrus, M., S. Hamdan, M. Rahman and M. Islam. 2011. Treated Tropical Wood Sawdust-Polypropylene Polymer Composite: Mechanical and Morphological Study. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology* 2: 435 - 444.
- Kinochita H., K. Kaizu, M. Fukuda, H. Tokunaga, K. Koga and K. Ikeda. 2009. Development of green composite consists of woodchips, bamboo fibers and biodegradable adhesive. *Composites Part B: Engineering* 40(7): 607 - 612.
- Lisperguer, J., X. Bustos, Y. Saravia, C. Escobar y H. Venegas. 2013. Efecto de las Características de Harina de Madera en las Propiedades físico-mecánicas y térmicas de Polipropileno Reciclado. *Revista Maderas. Ciencia y tecnología* 15(3): 321 - 336.
- Liu, H., Q. Wu, G. Han, F. Yao, Y. Kojima and S. Suzuki. 2008. Compatibilizing and toughening bamboo flour-filled HDPE composites: Mechanical properties and morphologies. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39(12): 1891 - 1900.
- López, J. P., S. Boufi, N. E. Mansouri, P. Mutjé and F. Vilaseca. 2012. PP composites based on mechanical pulp, deinked newspaper and jute strands: A comparative study. *Composites Part B: Engineering* 43(8): 3453 - 3461.
- Martínez-López, Y., R. Fernández-Concepción, D. Álvarez-Lazo, M. García-González y E. Martínez-Rodríguez. 2014. Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los tableros de madera plástica producidos en Cuba respecto a los tableros convencionales. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 20 (3): 227 - 236.
- Mattos, B. D., A. L. Misso, P. H. G. de Cademartori, E. A. de Lima, W. L. E. Magalhães and D. A. Gatto. 2014. Properties of polypropylene composites filled with a mixture of household waste of mate-tea and wood particles. *Construction and Building Materials* 61: 60 - 68.
- Moya V., C., H. Poblete W. y L. Valenzuela H. 2012. Propiedades físicas y mecánicas de compuestos de polietileno reciclado y harinas de corteza de madera de *Pinus radiata* fabricados mediante moldeo por inyección. *Maderas. Ciencia y tecnología* 14 (1): 13 - 29.
- Mutjé, P., F. Vilaseca, M. E. Vallejos, A. López, J. Gironès, J. A. Méndez y M. A. Pèlach. 2006. Fibras de plantas madereras recicladas vs filamentos de plantas anuales en el refuerzo de matrices termoplásticas. <http://www.riadicyp.org/index.php/ciadicy-2006/madera-y-materias-primas/send/49-madera/584-fibras-de-plantas-madereras-recicladas-vs-filamentos-de-plantas-anuales-en-el-refuerzo-de-matrices-termoplasticas> (15 de febrero de 2015).
- Naghmouchi, I., S. Boufi, M. Delgado, L. Granda, F. Vilaseca y P. Mutjé. 2013. Fabricación de madera plástica a partir de serrín de hueso de aceituna y polipropileno. In: XIII Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología de Metalurgia y Materiales. 17 de enero de 2016. Puerto Iguazú, Argentina. 7 p.
- Pérez, A. 2012. Pequeña historia de los materiales compuestos. <http://albertoperez.tumblr.com/post/23554188761/peque%C3%B1a-historia-de-los-materiales-compuestos> (14 de marzo de 2016).
- Ravi, K. N., Ch. Ranga R., B. Raghava and K. Srinivas. 2014. Mechanical Properties of Vakka Fiber Reinforced Polypropylene Composites. In: Thansekhar, M. R. and N. Balaji (eds.). International Conference on Innovations in Engineering and Technology (ICIET). LN. College of Engineering and Technology. International Journal of Innovate Research in Science, Engineering and Technology (IJRSET) 3(3): 1162 - 1166.
- Rosa, S., E. Santos, C. Ferreira and S. Nachtigall. 2009. Studies on the Properties of Rice-Hulk-Filled-PP Composites- Effect of Maleated PP. *Materials Research* 12 (3): 333 - 338.
- Samaraha, A., A. Hemmasi, I. Ghasemi, B. Baziyar and M. Nemat. 2015. Effects of nanoclay contents on properties of bagasse flour/reprocessed high density polyethylene/nanoclay composites. *Maderas. Ciencia y tecnología* 17 (3): 637 - 646.
- Santos, P., S. Bragança, E. Ayres, P. Santiago and R. Lambert. 2012. The Potential of Bamboo in the Design of Polymer Composites. *Materials Research* 15 (4): 639 - 644.
- Statistical Analysis System (SAS). 2008. The SAS System for Windows version 9.2. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. n/p.
- Stark, N., and R. Rowland. 2003. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood Fiber Science* 35 (2): 167 - 174.
- Takatani, M., A. Ishikawa, K. Sakamoto, K. Ikeda and T. Okamoto. 2008. The properties of Bamboo Flour-Plastic Composites with High Filler Content Formulations. *Journal of The Adhesion Society of Japan* 44(6): 214 - 219.
- Venkateshwaran, N., A. Elayaperumal and G. Sathiya. 2012. Prediction of tensile properties of hybrid-natural fiber composites. *Composites: Part B* 43: 793 - 796.

