

# Obtención de Materiales Compuestos Híbridos de Matriz Poliéster Reforzada con Fibras de Coco y Vidrio para la Elaboración de Tableros

Delgado F.\*; Galeas S.\*; Guerrero V.\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica  
Quito, Ecuador (Tel: 593-2-2507-144 ext.2433; e-mail: lanum,fim@epn.edu.ec)

**Resumen:** En el presente estudio se exponen los resultados de la caracterización mecánica de compuestos híbridos de matriz poliéster reforzados con fibras de coco y vidrio. Para ello, se fabricaron probetas de tracción, flexión e impacto de acuerdo a las normas ASTM D 3039, ASTM D 7264 y ASTM D 5628, respectivamente. Se utilizó la técnica de estratificación manual y se colocó a las fibras de acuerdo a la disposición tipo sándwich vidrio-coco-vidrio. Se evaluaron las propiedades mecánicas de las fracciones volumétricas de refuerzo de 0,15 y 0,20 y dentro de éstas se variaron las proporciones de coco-vidrio en 25/75, 50/50, 75/25. Los ensayos mecánicos determinaron que las propiedades fueron superiores con la fracción volumétrica de refuerzo de 0,20, y que la configuración Fc50-Fv50, combinó características deseables en aplicaciones estructurales, tales como las buenas propiedades mecánicas y baja densidad. Así, con respecto a la matriz poliéster para los ensayos a tracción, su módulo elástico (3960 MPa) y esfuerzo máximo (38,56 MPa) aumentaron en un 231% y 40% respectivamente. En los ensayos de flexión el incremento de las propiedades fue de 104% para el módulo elástico (4094 MPa) y 51% para el esfuerzo máximo (89,23 MPa). Los ensayos de impacto revelaron que el compuesto híbrido absorbió un 361% más energía que la matriz poliéster (0,07J). Finalmente se elaboraron tableros con esta formulación y se realizaron ensayos de tracción y flexión bajo las normas ASTM D 3034 y ASTM D 3500, respectivamente. Los resultados encontrados se compararon con las propiedades mecánicas de la madera contrachapada de 12 mm y 18 mm y se fabricó un prototipo.

**Palabras clave:** Compuestos híbridos, resina poliéster, fibra de coco, fibra de vidrio, tableros, madera contrachapada.

**Abstract:** This study shows the results of the mechanical characterization of hybrid polyester matrix composites reinforced with coconut and glass fibers by hand lay-up. Tensile, flexural and impact specimens were produced according to ASTM standards D 3039, D 7264 and D 5628, respectively. Fibers were placed according to sandwich arrangement glass-coconut-glass. Mechanical properties were evaluated to reinforcement volume fractions of 0.15 and 0.20 and within these formulations coconut/glass ratios of 25/75, 50/50, 75/25 were studied. Mechanical tests determined that 0.20 volume fraction reinforced materials have the best properties and Fc50-Fv50 configuration shows desirable combined features for structural applications, such as good mechanical properties and low density. Thus, the tensile strength (38,56 MPa) and modulus (3960 MPa) of this material were around 40 and 231% higher than those of the matrix. The flexural strength (89,23 MPa) and modulus (4094 MPa) improved approximately 51 and 104%, in comparison to the polyester. Impact tests revealed that the hybrid compound absorbed 361% more energy than the polyester matrix (0.07 J). Finally, boards were made with this formulation, then, tensile and flexural tests were carried out according to standards ASTM D 3034 and ASTM D 3500, respectively. These results were compared with 12 mm and 18 mm plywood and a prototype was made.

**Keywords:** Hybrid compounds, polyester resin, coconut fiber, glass fiber, boards, plywood.

## 1. INTRODUCCIÓN

El interés actual en utilizar fibras naturales en compuestos híbridos se debe a la creciente preocupación por la preservación del medio ambiente y el uso de materias primas renovables. Existe un gran interés en la búsqueda de fibras naturales que puedan reemplazar adecuadamente a fibras sintéticas, como la fibra de vidrio o combinarlas con estas para la obtención de materiales compuestos altamente

competitivos (Mohanty et al.).

Un material compuesto reforzado con fibras relativamente nuevo es el denominado híbrido, que se obtiene al utilizar dos o más clases diferentes de fibras en una única matriz. Los compuestos híbridos han despertado el interés en aplicaciones estructurales ya que el material ofrece a los diseñadores la libertad de adaptar nuevos materiales, para alcanzar propiedades mecánicas que con los compuestos tradicionales no se pueden conseguir. También, se reduce el coste en la obtención de este tipo de materiales, al sustituir una parte de fibras costosas por fibras más baratas, sin que tenga un efecto significativo en las propiedades mecánicas. (Chou).

El Ecuador es un paraíso a nivel de fibras naturales. Las fibras con mayor demanda internacional son las fibras de cabuya, algodón y abacá, sin embargo, se considera que existe una extensa variedad de fibras, especialmente a nivel de especies exóticas de la Costa y Amazonía que no son explotadas y que podrían atender los requerimientos de los mercados extranjeros. (Pabón). Este es el caso de la fibra encontrada en las cáscaras de coco.

A nivel nacional la producción de fruta de coco está alrededor de 50886 t, siendo Esmeraldas el mayor productor con 37415 t, seguido de Manabí con 11569 t, de acuerdo a una investigación realizada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). Lamentablemente, en el Ecuador no se explotan los residuos sólidos generados, por lo que se convierten en desechos que son destinados a botaderos de basura.

Existen pocos estudios al respecto de esta problemática, razón por la cual este proyecto aspira utilizar este desecho y convertirlo en un producto que alcance un valor agregado mediante la elaboración de materiales compuestos híbridos en los que se implemente a la fibra de coco como parte del refuerzo. Esto es, combinar de manera sinérgica las propiedades individuales de la fibra de coco y la fibra de vidrio en una matriz de resina poliéster para obtener compuestos de alta versatilidad de aplicación. El empleo de este compuesto híbrido podría tener una amplia aplicación industrial en diversos campos como el automotriz, construcción, revestimientos internos de autos y elementos tales como pedales, muebles y tableros, etc.

El proyecto, además de poder beneficiar a los productores de coco y contribuir a una cultura ambiental en la región, espera abrir campos de investigación para crear alternativas de utilización de este recurso.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Materiales

Se emplearon fibras de coco extraídas de cáscaras de coco maduro residual recolectadas de los mercados de la ciudad de Quito. La extracción de la fibra se realizó por medio de una trituradora universal y se obtuvieron longitudes de 3 a 6 cm en el 82% de los casos.

Se utilizó fibra de vidrio en forma de mats que están constituidos de filamentos individuales de 50 mm de largo, espesor de 0,56 mm y una relación peso/área de 0,0338 g/cm<sup>2</sup>. El mat está constituida por fibras de vidrio tipo E y C, las mechas están unidas entre sí con un aglomerante en polvo y emulsión.

Como matriz se utilizó la resina poliéster marca Anderpol 859, que a su vez fue diluida con un 10% en volumen de

monómero estireno. Se adicionó como activador del proceso de curado un 0,5% de octoato de cobalto al 6% de Co y un 1,5% de peróxido de metil etil cetona (MEKP por sus siglas en inglés) para catalizar la reacción.

### 2.2 Métodos

La elaboración de los compuestos híbridos se realizó por el método de estratificación manual y se consideró la configuración tipo sándwich para la disposición de las fibras dentro del refuerzo. Se empleó una presión de 1000 psi para el conformado de las piezas y se estableció el curado a temperatura ambiente de 20 °C durante una hora.

Para la elaboración de tableros se empleó una presión de 0,75 psi y se redujo en 50% la cantidad de octoato y MEKP empleada en las probetas. Los ensayos mecánicos se realizaron transcurridas al menos 2 semanas a partir de su fabricación, para asegurar una reticulación mayor al 90%. Se fabricaron un mínimo de 5 probetas por cada configuración de refuerzo. Las configuraciones elaboradas fueron: Fc100-Fv0, Fc75-Fv25, Fc50-Fv50, Fc25-Fv75, Fc0-Fv100 y se realizaron para cada fracción volumétrica de refuerzo de 0,15 y 0,20.

Cabe señalar que se calculó la densidad de cada una de los materiales formulados a partir de los valores de densidad de la fibra de coco y vidrio, el peso del material compuesto y la geometría del mismo. Las densidades fueron calculadas tanto para las probetas como para los tableros.

#### 2.2.1 Ensayos de tracción y flexión de los compuestos híbridos

Se determinaron las propiedades mecánicas a tracción tales como el módulo elástico, esfuerzo máximo y deformación máxima, mediante la norma ASTM D 3039-07, en la cual se empleo una velocidad de ensayo de 2 mm/min y probetas de dimensiones 250×25×2,5 mm.

Las propiedades mecánicas a la flexión tales como el módulo elástico, esfuerzo máximo y deformación máxima fueron determinadas mediante la norma ASTM D 7264-07, en la cual se empleo una velocidad de ensayo de 1 mm/min y probetas rectangulares de dimensiones 160×13×4 mm.

#### 2.2.2 Selección de la configuración y fracción volumétrica de refuerzo para la elaboración de tableros y ensayos de impacto

Se compararon las propiedades mecánicas de los compuestos híbridos de fracción volumétrica de 0,15 y 0,20 y se eligió la fracción con mejores resultados. La configuración de refuerzo más adecuada se definió al comparar mediante el método de criterios ponderados, la configuración que presentó la mejor relación de buenas propiedades y cantidad de fibra natural en el refuerzo. Con esta configuración y fracción de refuerzo se

elaboraron probetas de impacto y se fabricaron tableros de 70 cm x 70 cm y 1 cm de espesor.

2.2.3 Ensayos de impacto de los compuestos híbridos

La energía de impacto se determinó de acuerdo a la norma ASTM D 5628-07. Se determinó la energía requerida para agrietar compuestos híbridos bajo las condiciones de impacto por caída de dardo. Para esto se realizaron probetas cuadradas de 60x60 y 2 mm de espesor.

2.2.4 Evaluación de las propiedades mecánicas de tableros de los compuestos híbridos

En los tableros se determinó las propiedades mecánicas a la flexión de acuerdo a la norma ASTM D 3043, para paneles estructurales. Propiedades como la resistencia y rigidez se compararon con las de la madera contrachapada con fibras paralelas/perpendiculares de 12 mm y 18 mm.

Las propiedades a tracción se determinaron mediante la norma ASTM D 3500 la resistencia y rigidez del compuesto y se compararon con las de la madera contrachapada con fibras paralelas/perpendiculares de 12 mm y 18 mm.

2.2.5 Análisis de factibilidad técnica y fabricación de un prototipo

El análisis de factibilidad técnica consistió en pruebas de corte, perforación, lijado y pegado de piezas. El objetivo de este análisis fue el de crear características que no fueron posibles obtener durante la fabricación del material, tales como ranuras, agujeros, entre otros y observar el desempeño de las herramientas comúnmente usadas en la confección de prototipos de madera. Posteriormente, se fabricó un prototipo y se analizó sus características.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Ensayos de tracción

En la Figura 1 se muestran los módulos elásticos a tracción de los diferentes compuestos híbridos obtenidos.

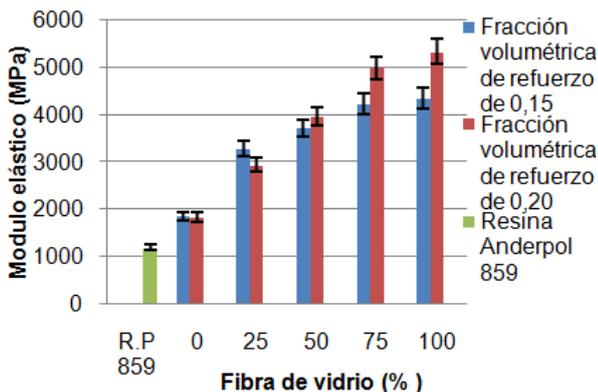


Figura 1. Módulo elástico a tracción de los compuestos híbridos.

Se puede observar que a mayor cantidad de fibra de vidrio en el refuerzo se tiene un incremento del módulo elástico en todas las configuraciones, mientras que con la adición de fibra de coco disminuye la rigidez del compuesto. Las bajas propiedades de la fibra de coco a la tracción, así como la pobre adherencia entre la fibra natural y la matriz originaron la disminución de las propiedades mecánicas en los compuestos.

En relación con la matriz poliéster, las configuraciones con Fc100-Fv0, para ambas fracciones de refuerzo, incrementaron su módulo en 55%, lo cual permitió predecir un aumento en el módulo elástico de los compuestos híbridos. Con respecto a la matriz poliéster, las configuraciones con Fc0-Fv100 y fracciones volumétricas de refuerzo del 0,15 y 0,20, presentaron los módulos más elevados con valores de 263 y 345% respectivamente.

Por otra parte, en los compuestos híbridos Fc50-Fv50 y Fc25-Fv75, se observó que el tener un 25% adicional de fibra de vidrio en este último, mejoró su módulo en 13,71% para la fracción volumétrica de refuerzo de 0,15 y un 26% para una fracción de 0,20 con respecto al compuesto Fc50-Fv50.

En la Fig. 2 se presentan los resultados del esfuerzo máximo a tracción de las diferentes configuraciones de los compuestos híbridos.

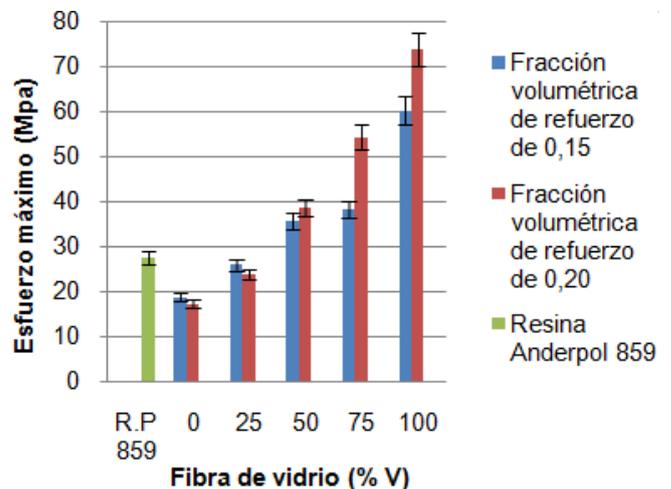


Figura 2. Esfuerzo máximo a tracción de los compuestos híbridos.

Se puede notar en la Fig. 2 que el esfuerzo máximo aumenta conforme se incrementa el porcentaje de vidrio en el refuerzo. Así, al emplear una configuración Fc0-Fv100 y fracciones volumétricas de refuerzo del 0,15 y 0,20 se mejoró la resistencia del material con respecto a la resina poliéster en 119 y 169%, respectivamente.

Por otra parte, las formulaciones Fc100-Fv0 y Fc75-Fv25 presentaron resistencias menores a la matriz poliéster en 46,63 y 59,69%, para las fracciones volumétricas del 0,15 y

0,20 respectivamente.

Esto fue equivalente a los resultados encontrados en las investigaciones de Santa fe Junior, las cuales demostraron que la fibra de coco no fue un efectivo refuerzo de matrices poliméricas como la resina poliéster y que su adición tiende a disminuir la resistencia mecánica de los compuestos (Santa fe, et al, 2010). Estos resultados sugieren posibles problemas de adhesión entre la matriz y el refuerzo, lo cual generó una baja distribución homogénea de las tensiones a las fibras.

En la Tabla 1, se presenta los valores medios encontrados de deformación para cada formulación de refuerzo.

Tabla 1. Deformaciones máximas a tracción de los compuestos híbridos.

Formulación	Deformación máxima (mm/mm)			
	Fracción volumétrica 0.15		Fracción volumétrica 0.20	
	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
R.P. 859	0.0238	0.0023	0.0238	0.0023
Fc100-Fv0	0.0114	0.0019	0.0099	0.0008
Fc75-Fv25	0.0085	0.0024	0.0086	0.0003
Fc50-Fv50	0.0110	0.0005	0.0105	0.0016
Fc25-Fv75	0.0092	0.0009	0.0099	0.0020
Fc0-Fv100	0.0150	0.0010	0.0150	0.0007

Se observa que la mayor deformación fue la alcanzada por la resina poliéster.

Por otra parte, para la mayoría de los casos los compuestos híbridos presentaron deformaciones menores a las configuraciones Fc100-Fv0 y Fc0-Fv100. Este efecto es positivo para una aplicación estructural, ya que éstas requieren menor deformación del material.

En la Fig. 3 se muestran las curvas esfuerzo vs. deformación a la tracción para las diferentes configuraciones de refuerzo a una fracción volumétrica de 0,20.

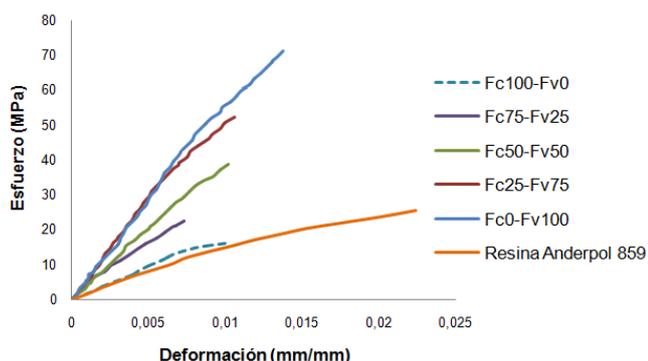


Figura 3. Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de las diferentes configuraciones de compuestos híbridos con fracción volumétrica de 0,20.

En esta Figura se observa el comportamiento mecánico del material para cada ensayo y el efecto de las distintas configuraciones de refuerzo. En cada ensayo se observó aumentos del módulo elástico y esfuerzo máximo conforme se incrementó la fracción de fibra de vidrio y disminuciones

en las propiedades al adicionar fibra de coco.

En la Fig. 4 se presentan las probetas de tracción ensayadas.

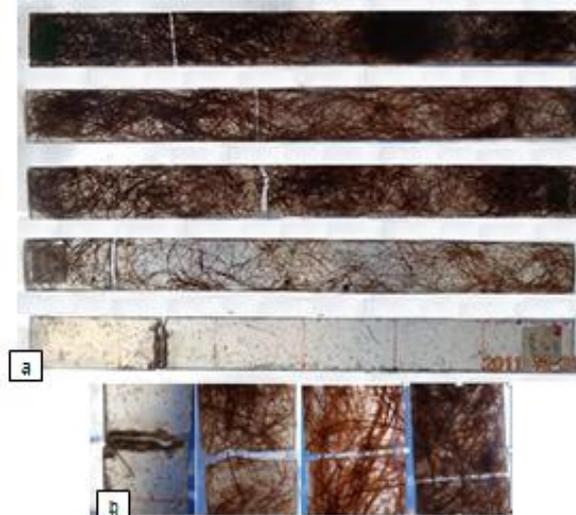


Figura 4. Probetas de tracción compuesto híbrido fibra de coco/vidrio a) Ensayadas; b) Acercamiento a la zona de fractura

Se observa el incremento de la concentración de fibra de coco en el refuerzo, así como la zona de fractura de las probetas. Estas zonas revelaron que la falla de los compuestos comenzó desde la matriz hacia las fibras. Las fibras de coco que no fallaron impidieron una fragmentación del material. Se observó que este comportamiento se hace más notable con el incremento del porcentaje de fibra natural en el refuerzo híbrido.

### 3.2 Ensayos de flexión

Al igual que en los ensayos de tracción, la concentración de fibra de vidrio aumentó el módulo elástico en todas las configuraciones como se observa en la Fig. 5. Esto fue consecuencia de las elevadas propiedades mecánicas de la fibra de vidrio y de su mejor adherencia a la matriz debido a agentes compatibilizantes apropiados para la mayoría de las matrices orgánicas que ésta posee en comparación con la fibra de coco (Neto y Pardini).

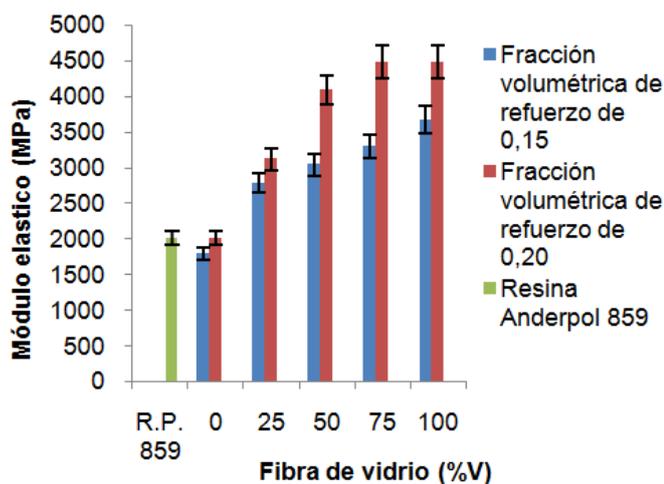


Figura 5. Módulo elástico a flexión de los compuestos híbridos.

La adherencia permitió que las cargas se transmitieran eficientemente de la matriz a la fibra de vidrio. Un comportamiento similar se observó en los estudios realizados por Cristiane Borges, en los que se combinaron fibras de sisal y vidrio (Borges et al.).

En los materiales reforzados con una fracción volumétrica de 0,15, se observó que el menor módulo elástico fue el de la formulación Fc100-Fv0, con un 10,7% menor al módulo de la resina poliéster y al incrementar la fracción volumétrica al 0,20 solo se logró alcanzar el módulo de la matriz sin refuerzo. Esto puede atribuirse al empleo de fibras cortas en el refuerzo, dado que existen zonas no cubiertas por la fibra en las que las cargas se transmiten directamente a la matriz, disminuyen las propiedades mecánicas del compuesto (Callister).

Por otra parte, los compuestos híbridos presentaron buenas propiedades mecánicas, debido a la presencia de fibra de vidrio como es el caso de la configuración Fc50-Fv50 la cual incrementó su módulo elástico con respecto a la matriz en un 51% y 103% para las fracciones del 0,15 y 0,20 respectivamente.

En la Fig. 6 se presentan los resultados del esfuerzo máximo a la flexión de las diferentes configuraciones de los compuestos híbridos.

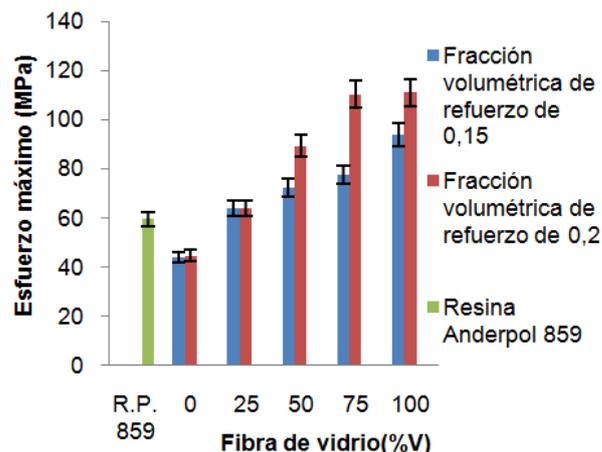


Figura 6. Esfuerzo máximo a flexión de los compuestos híbridos.

Se observa en la Fig. 6 que para una fracción volumétrica de refuerzo del 0,15, la mayor resistencia a la flexión la tuvo la formulación Fc0-Fv100 y la menor la Fc100-Fv0. Esta última presentó un esfuerzo menor en un 25% con respecto a la resina poliéster. Esto puede explicarse ya que las propiedades mecánicas de la fibra de coco son menores en relación a las de la matriz. En la formulación Fc75-Fv25, la presencia del 25% de fibra de vidrio en el refuerzo no mejoró el esfuerzo máximo con respecto a la matriz.

De igual manera, para la formulación Fc25-Fv75, el adicionar un 25% de fibra de vidrio en relación a la configuración Fc50-Fv50, casi no incrementó la resistencia del material a la flexión. Un efecto contrario se observó al incrementar la fracción volumétrica de refuerzo a 0,20. Las configuraciones Fc0-Fv100 y Fc25-Fv75, presentaron la mayor resistencia a la flexión. Además, la configuración Fc25-Fv75 con respecto a la formulación Fc50-Fv50, mejoró su esfuerzo máximo en 23,64%.

En la Tabla 2 se presentan los valores medios de deformación para las diferentes formulaciones.

Tabla 2. Deformaciones máximas a flexión de los compuestos híbridos.

Formulación	Deformación máxima (mm/mm)			
	Fracción volumétrica 0.15		Fracción volumétrica 0.20	
	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
R.P. 859	0.0412	0.0024	0.0412	0.0024
Fc100-Fv0	0.0360	0.0054	0.0282	0.0039
Fc75-Fv25	0.0299	0.0035	0.0253	0.0018
Fc50-Fv50	0.0312	0.0054	0.0274	0.0040
Fc25-Fv75	0.0298	0.0047	0.0305	0.0009
Fc0-Fv100	0.0356	0.0025	0.0338	0.0044

Con respecto a la deformación máxima, al igual que en los ensayos de tracción, la resina Anderpol 859, exhibió el mayor valor. Por otra parte, en la mayoría de los casos, las configuraciones híbridas presentaron las deformaciones más bajas en relación las configuraciones Fc100-Fv0, Fc0-Fv100. En la Fig. 7 se muestran las curvas esfuerzo vs. deformación a la flexión para las diferentes configuraciones de refuerzo a

una fracción volumétrica de 0,20.

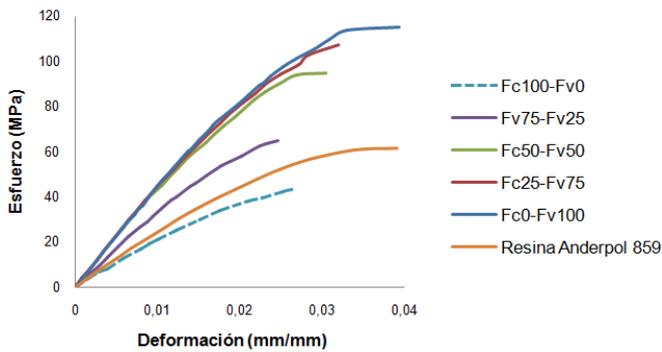


Figura 7. Curvas esfuerzo vs. deformación a flexión de las diferentes configuraciones de compuestos híbridos con fracción volumétrica de 0,20.

Al igual que en los ensayos de tracción se observó que el módulo elástico y esfuerzo máximo se incrementa a medida que aumenta la fracción de fibra de vidrio. Además, las curvas presentaron un tramo inicial lineal hasta aproximadamente la mitad del esfuerzo en la que el material sufriría deformaciones reversibles, seguido de un comportamiento no lineal hasta la fractura del mismo.

En la Fig. 8, se muestran las probetas a flexión utilizadas para los ensayos.



Figura 8. Probetas de flexión compuestas híbridas; a) Ensayadas; b) Acercamiento a la fractura; c) Vista lateral

Se observa que la falla del material se originó en la matriz y luego se trasladó a las fibras. Así, a pesar de existir una rotura del material, las fibras que no se rompieron unieron las dos mitades de la probeta fracturada.

### 3.3 Selección de la configuración y fracción volumétrica de refuerzo

Con base en los resultados analizados, se observó que las propiedades mecánicas como la rigidez y la resistencia aumentaron considerablemente al emplear un refuerzo con una fracción volumétrica de 0.20. Al mismo tiempo, el incremento de la concentración de fibra de coco dentro del refuerzo se tradujo en una reducción de la densidad del material, razón por la cual se escogió a esta fracción

volumétrica.

Para la selección de la configuración de refuerzo, el método de criterios ponderados demostró que la configuración Fc50-Fv50 exhibió la mejor combinación de cantidad de fibra natural y buenas propiedades mecánicas, razón por la cual se la seleccionó para las siguientes etapas del proceso, tales como ensayos de impacto y fabricación de un prototipo.

### 3.4 Ensayos de impacto

En los ensayos de impacto el compuesto Fc50-Fv50 evidenció un aumento de 361% en la resistencia al impacto con relación a la matriz poliéster. Por otra parte, al compararlo con una matriz reforzada al 20% con fibra de vidrio se observó una disminución de 37% en la capacidad de absorción de energía de impacto, como se muestra en la Fig. 9.

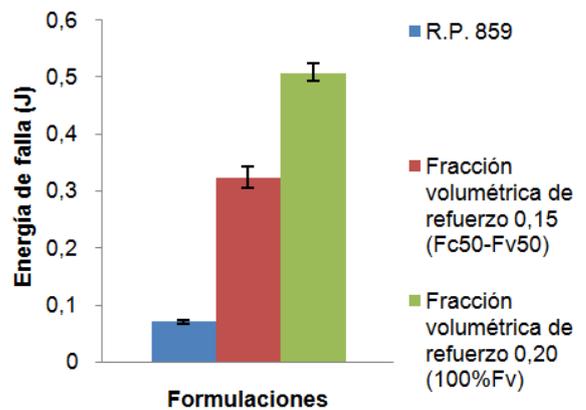


Figura 9. Energía absorbida por los materiales compuestos híbridos durante el ensayo de impacto.

Experimentalmente, se observó que a pequeñas alturas de caída de dardo las superficies de las probetas no presentaron visualmente ninguna señal de daño. Sin embargo, para alturas superiores a los 72 cm se notó en el punto opuesto al impacto, desde la aparición de microfisuras hasta la fractura de la probeta.

Se puede observar en la Fig. 10 las probetas de matriz poliéster y de compuesto híbrido ensayadas a impacto.

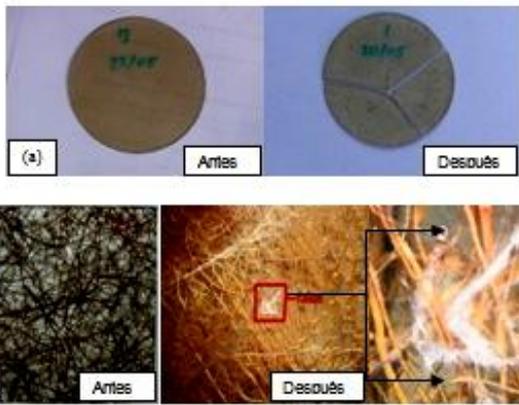


Figura 10. a) Probetas de matriz poliéster; b) Probetas de compuesto híbrido Fc50-Fv50 al 20% de refuerzo.

Para el caso de la matriz poliéster se aprecia una fragmentación total de la probeta debido a la fragilidad del material. Por otro lado, en el compuesto híbrido se observó la presencia de microfisuras y emblanquecimientos en la zona opuesta al impacto.

A impactos más severos el material presentó agrietamientos y separación de la capa de fibra de vidrio en la zona de impacto. A pesar de esto, el refuerzo impidió desprendimiento del material, ya que las fibras que no fallaron mantuvieron unido al mismo.

En la Fig. 11 se presentan todas las propiedades mecánicas del compuesto híbrido Fc50-Fv50 y se comparan con las propiedades de la matriz poliéster y la configuración Fc0-Fv100.

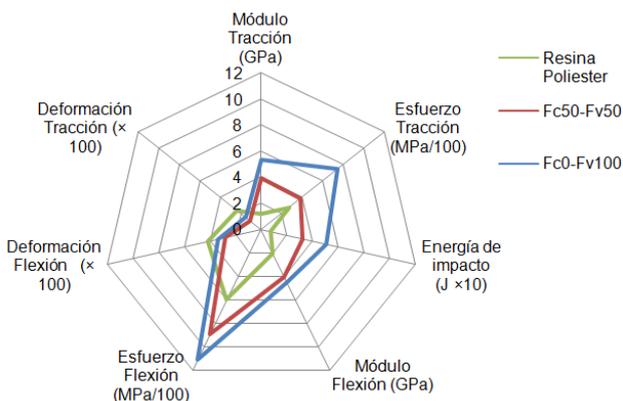


Figura 11. Gráfico multiteje de las propiedades mecánicas exhibidas en las configuraciones de refuerzo para una fracción volumétrica de 0,20

Se observa que la configuración Fc50-Fv50 es superior en todas las propiedades a la matriz sin refuerzo. Con relación a la configuración Fc0-Fv100, el compuesto Fc50-Fv50, presentó menores propiedades mecánicas, sin embargo, estas se aproximaron en mayor grado a las propiedades exhibidas a la flexión por la configuración Fc0-Fv100. Es así, que el compuesto Fc50-Fv50 presentó mejores propiedades a la flexión que a la tracción. Esto sugiere la utilización del compuesto híbrido en aplicaciones en las que se requieran

elevadas propiedades a la flexión, como es el caso de los paneles estructurales.

### 3.4. Evaluación de las propiedades mecánicas de tableros de compuesto híbrido

Las propiedades mecánicas presentadas por los tableros de compuesto híbrido se compararon con las propiedades de la madera contrachapada a espesores de 12 mm y 18 mm. El material compuesto híbrido con el 20% de refuerzo y configuración Fc50-Fv50, presentó excelentes propiedades incluso por encima de las exhibidas por la madera contrachapada. Así, el compuesto híbrido alcanzó una resistencia a la tracción superior a la madera de 12 mm en 35.8% y un 10.9% con respecto a la madera de 18 mm como se muestra en la Fig. 12. Cabe señalar que la desviación estándar de la resistencia a tracción del híbrido fue de aproximadamente 6,75 MPa.

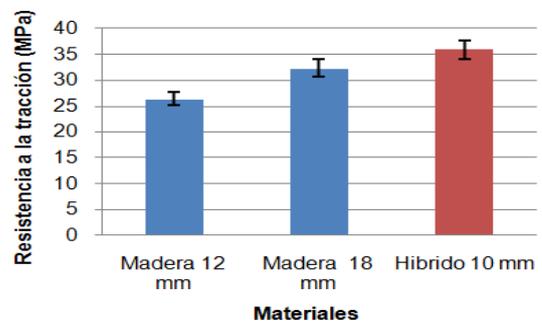


Figura 12. Comparación de la resistencia máxima a la tracción alcanzada por la madera contrachapada y el material híbrido Fc50-Fv50 reforzado al 20%

En la Fig. 13 se compara la resistencia máxima a la flexión alcanzada por la madera contrachapada y el material híbrido Fc50-Fv50 reforzado al 20%.

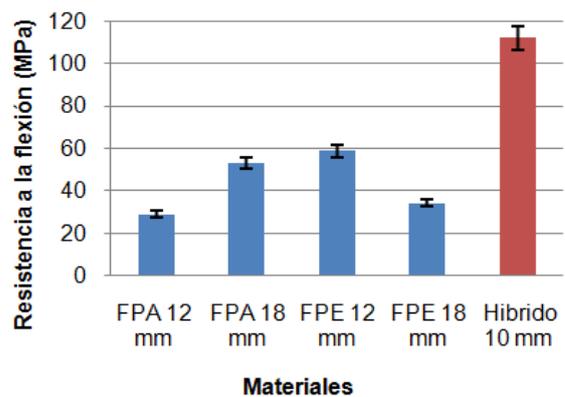


Figura 13. Comparación de la resistencia máxima a la flexión alcanzada por la madera contrachapada y el material híbrido Fc50-Fv50 reforzado al 20%

De acuerdo a la Fig. 13 se observa un comportamiento similar en los ensayos de flexión con una resistencia superior en 286.6, 112.5, 91 y 229.3 % con respecto a la madera con FPA (Fibra Paralela) 12 mm, FPA 18 mm, FPE (Fibra Perpendicular) 12 mm, y FPE 18 mm, respectivamente.

Para el caso del módulo elástico a la flexión este fue mayor en un 59% a la madera con FPA 12 mm y en un 20.5% a la madera FPE 18 mm. Por otra parte, con respecto a la madera con FPA 18 mm y FPE 12 mm disminuyó en 12.1 y 11.2 % cada uno como se muestra en la Fig. 14.

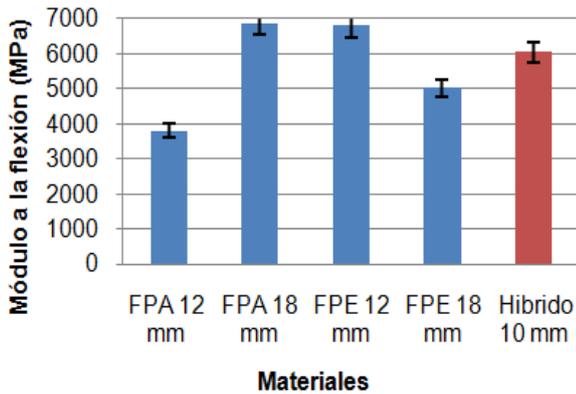


Figura 14. Comparación del módulo a la flexión alcanzado por la madera contrachapada y el material híbrido Fc50-Fv50 reforzado al 20%.

En la madera contrachapada se observó que la orientación de la fibra condicionó el desempeño mecánico de la madera, no así en el material híbrido, ya que al tener las fibras distribuidas aleatoriamente, favoreció el isotropismo de las propiedades mecánicas en el material.

Por otra parte, la densidad del material aumentó en un rango de 86-124% en relación a la madera de 12 y 18 mm. Esto se debe a la alta cantidad de resina necesaria para remojar las fibras de coco y a la baja presión de moldeo utilizada, lo cual impidió la salida de resina del molde.

Así también, se debe considerar que la densidad de la resina poliéster de 1,2 g/cm<sup>3</sup> fue mayor al de la madera de 0,55-0,66 g/cm<sup>3</sup>, llegando en este caso a una relación de 2 a 1, lo cual incrementó el peso del compuesto.

### 3.2.5. Análisis de factibilidad técnica y fabricación de un prototipo.

Se observó que el uso de serruchos y sierras, no fue apropiado en vista de la alta resistencia del material lo cual generó resistencia al corte e hizo que las cuchillas al poco tiempo de uso terminen por destruirse. El uso de caladoras mejoró la facilidad de corte, sin embargo debido al material de las cuchillas estas empezaron a gastarse. Se recomienda emplear herramientas con carburo de tungsteno.

En las pruebas de perforación se observó ciertas delaminaciones en el material al ingreso y salida de la broca. Como solución a este inconveniente se recomienda emplear una broca mas afiliada, la cual crea una penetración gradual y reducir la velocidad del taladro a la salida de la broca (Mazundar).

Posteriormente, se aprovechó la perforación realizada con el taladro para encaminar un tornillo autoroscable. En el ingreso del tornillo se observó que la distribución al azar de las fibras en el material, potenció el agarre de las roscas. Por otro lado, al evaluar el uso de clavos se observaron despostillamientos en la superficie del material así como dificultad en la penetración debido a la alta resistencia conferida por las fibras de vidrio a la superficie. Este efecto no se observó con el uso de tornillos. En sí, el mecanizado planteó varios desafíos tales como:

- Los cortes del material crean discontinuidad en las fibras y alteran el rendimiento de la pieza
- Expone las fibras a productos químicos y la humedad
- La temperatura durante el corte puede exceder la temperatura de exotermia de la resina ya que se produce un calentamiento local, lo cual podría degradar el material.
- La vida de las herramientas fue más corta debido a la naturaleza abrasiva del compuesto.
- La presencia de delaminaciones (separación de las capas) en la elaboración de prototipos.

En vista de la factibilidad técnica y disponibilidad de equipos elaboró el prototipo de un mueble mostrado en la Figura 13. Sin embargo, para fines industriales se recomienda realizar un estudio detallado de las pruebas de maquinado al material.



Figura 15. Mueble para dispositivos audiovisuales

## 4. CONCLUSIONES

La caracterización mecánica mostró que las fracciones volumétricas del 0,15 y 0,20 de refuerzo demostraron efectos similares en las propiedades mecánicas del material con incrementos del módulo elástico, resistencia y densidad al aumentar la fracción de fibra de vidrio y disminución de éstas con el incremento de fibra de coco. Se eligió la fracción volumétrica del 0,20 por demostrar propiedades mecánicas superiores a la fracción de 0,15.

Para el caso de los compuestos híbridos para una fracción volumétrica de refuerzo del 0,20, la mejor formulación de refuerzo fue la configuración Fc50-Fv50. Esta logró combinar características deseables en aplicaciones estructurales, tales como las buenas propiedades mecánicas y la baja densidad, razón por la cual se seleccionó a esta configuración para los ensayos de impacto y la fabricación de tableros.

En la configuración Fc50-Fv50, el módulo elástico (3960 MPa) y esfuerzo máximo a la tracción (38,56 MPa) aumentaron en un 231 y 40% con respecto a la matriz poliéster. En los ensayos de flexión, el incremento de las propiedades con respecto a la matriz fue de 104% para el módulo elástico (4094 MPa) y 51% para el esfuerzo máximo (89,23 MPa).

En los ensayos de impacto el compuesto Fc50-Fv50 evidenció con relación a la matriz poliéster un aumento de 361% en la absorción de energía. Por el contrario, al compararlo con una matriz reforzada al 20% con fibra de vidrio se observó una disminución de 37% en la capacidad de absorción.

Con relación a la madera contrachapada los tableros de compuesto híbrido presentaron resistencias a la tracción, superiores en un 38,9 y 10,9% con respecto a la madera de 12 mm y 18 mm, respectivamente. De igual manera la resistencia a la flexión se incrementó en 287 y 113,91 % con respecto a la madera con fibras paralelas de 12 y 18 mm. Con relación a tableros de madera con fibras perpendiculares y espesores de 12 y 18mm el incremento fue de 91% y 229%, respectivamente. Cabe mencionar que pese a que la madera contrachapada y el compuesto obtenido tienen distinta naturaleza, se realizó una comparación entre estos materiales debido a que con este estudio se busca reemplazar la madera por este tipo de material.

La densidad del material fue de 1,23 g/cm<sup>3</sup> y representó un aumento del 86% con respecto a la densidad de la madera 0,66 g/cm<sup>3</sup>.

El post-maquinado reveló facilidad en el manejo y conformado de piezas. Sin embargo, al compararlo con la madera, el material híbrido requirió de materiales de corte más resistentes. Adicionalmente, se observó un elevado desprendimiento de polvo, por lo cual es recomendable utilizar material de protección.

Sería recomendable profundizar el estudio de este tipo de material compuesto híbrido realizando ensayos de resistencia al desgaste. Además se podrían obtener los compuestos empleando un diferente método de procesamiento que permita tener más control del proceso y mayor reproducibilidad, como es el caso del moldeo por transferencia de resina (RTM).

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) por el financiamiento para la realización de esta investigación en el marco de ejecución del proyecto PIC-08-493 "Desarrollo de nuevos materiales para aplicaciones estructurales e industriales".

## REFERENCES

- [1] W. Callister, "Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales", Editorial Reverté, Buenos Aires, 2002, pp. 540-542,547, 556-558.
- [2] T. Chou, "Microstructural design of fiber composites", Cambridge University Press, New York, 1992, pp. 231, 232.
- [3] Ministerio de Agricultura y Ganadería, "Ecuador estimación de la producción", [Online] <http://www.mag.com.ec>, 2006 (Febrero, 2010).
- [4] K. Mazundar, "Composites manufacturing", CRC- PRESS, Florida, 2002, pp.19-21.
- [5] Mohanty et al., "Natural fibers, biopolymers, and biocomposites", Taylor y Francis Group, Boca Raton, 2005, pp. 40-47.
- [6] Santa fe, et al., "Mechanical properties of tensile tested coir fiber reinforced polyester composites", Revista Matéria,15,(2),113, 2010.
- [7] Viera et al., "Interferencia da lavagem de fibras sobre o desempenho do sizing nas propriedades mecanicas em compositos hibridos vidro/sisal " Revista Iberoamericana de polimeros, Vol 10, 4, 2009.