

Materiales Compuestos Lignocelulósicos Obtenidos Mediante Extrusión.

Villamar D.* Galeas S.* Guerrero V.*

* Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica
Quito, Ecuador (e-mail: lanum.fim@epn.edu.ec)

Resumen: La presente investigación estudia la obtención de madera plástica en diferentes composiciones y su caracterización mediante ensayos mecánicos de tracción, flexión e impacto, así como la determinación de dureza y densidad de los diferentes compuestos. La primera variable estudiada fue la presencia de anhídrido maléico como agente compatibilizante de la mezcla. En segunda instancia se consideraron los efectos de variar la composición en peso del polvo de madera dentro del material compuesto, para lo cual se emplearon porcentajes de 25, 33 y 40%. La tercera variable muestra el efecto del tamaño de las partículas de polvo de madera, los tamaños utilizados fueron en promedio de 180, 300 y 450 μm . Finalmente se consideró el tipo de madera, por un lado se empleó como relleno una mezcla de diferentes maderas escogida al azar en un aserradero y por otro lado se utilizó madera de amarillo de Guayaquil (*Centrolobium ochroxyllum*). El material que mostró tener las mejores características en conjunto fue el que contenía compatibilizante, una fracción de polvo de madera de 40% de madera mezclada y con un tamaño de partícula de 450 μm . Este material registró la mayor resistencia y el mayor módulo de tracción con valores de 29.1 y 3380.95 MPa. Los resultados del ensayo de flexión se reportaron entre los más altos, con una resistencia de 53.13 MPa y un módulo de 2351.15 MPa. Sin embargo el material registra una resistencia al impacto de 74.5 kJ/m² casi 14% inferior al promedio de los diferentes compuestos.

Palabras clave: Madera plástica, materiales compuestos lignocelulósicos, polipropileno, aserrín, propiedades mecánicas, extrusión, agente compatibilizante.

Abstract: This investigation studies the formulation of different wood plastic composites and their mechanical characterization by tensile, bending and impact tests as well as hardness and density properties determination. The first variable studied was the effect of maleic anhydride as compatibilizer. The wood powder percentage in the composite was studied, the matrix weight was replaced in 25, 33 and 40%. Other variable studied was the effect of wood flour particle dimensions, the average sizes used were 180, 300 and 450 μm . Two types of wood were used in this research, a random blend of different woods and a local lumber called Amarillo de Guayaquil (*Centrolobium ochroxyllum*). The material with the best performance during the mechanical tests was the one with the compatibilizer and 40% of mixed wood flour with a particle size of 450 μm . This material showed the highest results of strength and modulus at the tensile test, 29.1 and 3380.95 MPa, respectively. The material's behavior during bending tests reported values of strength and modulus up to 53.13 MPa and 2351.15 MPa, respectively. Nevertheless, concerning the izod test the material resistance was 74.5 kJ/m², almost 14% less than the average value from the whole group of composites.

Keywords: Wood plastic composites, polypropylene, wood flour, mechanical properties, extrusion, compatibilizer agent.

1. INTRODUCCIÓN

El interés creciente de la sociedad actual en el medio ambiente ha obligado a que la industria adquiera nuevas técnicas y procesos que permitan un mejor aprovechamiento de los recursos naturales. Por esta razón en la actualidad se ha abierto un gran espacio para la investigación de nuevos materiales más amigables con el entorno.

Los materiales compuestos son la unión de dos o más materiales que poseen propiedades físicas o químicas diferentes y que dentro de la estructura final se mantienen separados ya sea a nivel macro o microscópico. El material que se presenta en fase continua y actúa como aglomerante se conoce como matriz, mientras que el material de fase discontinua o dispersa se denomina refuerzo.

El concepto de material reforzado es muy antiguo. Hay referencias bíblicas de ladrillos de arcilla reforzados con paja en el antiguo Egipto. Las varillas de hierro fueron usadas como refuerzo estructural en el siglo XIX. Las resinas fenólicas reforzadas con fibras de asbesto fueron introducidas al inicio del siglo XX. El primer bote de fibra de vidrio fue hecho en 1942; los plásticos reforzados fueron usados también en aeronaves y componentes eléctricos al mismo tiempo. El bobinado de filamentos fue inventado en 1946 e incorporado en aplicaciones de misiles en 1950. El primer compuesto a base de boro y fibras de carbono de alta resistencia fue introducido en los años sesenta con aplicaciones de compuestos avanzados para componentes de aeronaves en 1968. A inicios de la década de los setenta los compuestos se expandieron extensamente en las industrias aeronáutica, automotriz, deportiva y biomédica. En el mercado de los ochenta se incrementó significativamente el uso de fibras de alto módulo. En la actualidad existen diversos tipos de materiales de origen tanto sintético como natural, con un sinnúmero de aplicaciones, que han llevado a una evolución permanente en este campo. Las exigencias crecientes a las que se someten a los materiales requieren una combinación de sus propiedades dando origen a nuevos materiales compuestos [2].

En la Tabla 1 se muestra una clasificación amplia de los materiales compuestos con algunos ejemplos.

Tabla 1: Clasificación de los materiales compuestos [5], [9]

Material	Ejemplos
Materiales compuestos naturales	Madera Hueso Bambú Músculos y otros tejidos
Materiales microcompuestos	Aleaciones metálica (Aceros) Termoplásticos endurecidos (Poliestireno de impacto, ABS) Hojas de moldeo continuo (SMC) Termoplásticos reforzados
Macrocompuestos (Productos ingenieriles)	Acero galvanizado Vigas de hormigón armado Palas de helicópteros Esquíes
Nanocompuestos	Nano fibras Nano redes de carbono Nano capas Grafeno

Los materiales compuestos son de variada procedencia, algunos se encuentran en la naturaleza mientras que otros han sido creados por el hombre. Los compuestos lignocelulósicos, son un ejemplo de estos últimos; están conformados por una matriz polimérica y un refuerzo lignocelulósico. La madera plástica, objeto de esta investigación, tiene su origen en los años sesenta. Se obtuvo un

compuesto termoestable moldeado que contenía fibras de celulosa como relleno. En los años setenta la investigación se volcó sobre los compuestos con matriz termoplástica. El problema de estos materiales era la difícil dispersión de la fibra de celulosa y por ende la falta de homogeneidad en el material resultante. Superados estos inconvenientes, en los años ochenta la mejora de las propiedades de estos materiales fue el centro de atención [7].

En la actualidad, la madera plástica ha logrado incursionar en diferentes mercados. Este producto, según las estimaciones hechas por BCC Research, crece a una tasa de 13,8% anual. Se estima que en el 2016 el mercado de madera plástica alcanzará los 4,6 millones de toneladas métricas como se muestra en la Fig. 1.

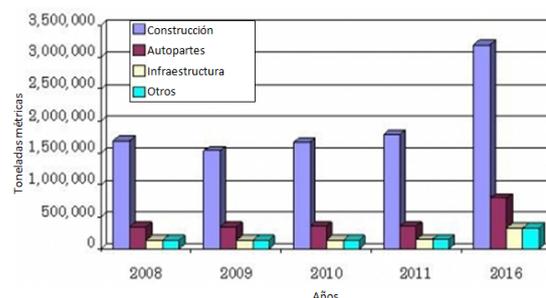


Figura 1: Mercado global para las aplicaciones de compuestos de madera plástica [1]

El compuesto obtenido en la presente investigación es la unión de residuos de madera utilizados como material de refuerzo de una matriz de polipropileno. El uso de un relleno lignocelulósico como la madera permite dos ventajas: la primera, disminuir el uso de un polímero derivado del petróleo como lo es el polipropileno, y la segunda utilizar los residuos de madera que usualmente se desechan en los aserraderos. El uso de polipropileno como matriz confiere al material características como estabilidad dimensional y la capacidad de repeler el agua. La madera plástica podría reemplazar a la madera en algunas de sus aplicaciones pero, para ello es necesario en primer lugar determinar si el material es fácilmente procesable y si el producto de ese proceso tiene las características buscadas en un material.

Sin embargo, predecir las características mecánicas del nuevo material representa un reto, por esta razón se debe recurrir a investigaciones similares que sirvan como referencia para las variables estudiadas. A continuación, en la Tabla 2 se muestran las propiedades de un material de madera plástica obtenido por Huang et al. [4]. En este caso la matriz es polietileno de alta densidad y se estudian los efectos de la variación del porcentaje de madera en el compuesto.

En la Tabla 2 se puede ver como la resistencia a la tracción y a la flexión del material tienden a aumentar con la

inclusión de madera en la matriz polimérica. Por otra parte se observa el efecto contrario en la resistencia al impacto. Adicionalmente, en la Tabla 3 se aprecia el efecto del tamaño de partícula del polvo de madera.

Tabla 2: Efecto del contenido de madera en las propiedades del material [4]

Polvo de madera (%)	Resistencia a la tracción (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Resistencia al impacto (kJ/m ²)
0	18.4	17.2	---
10	21.1	21.1	12.3
20	22.2	24.1	11.1
30	24.6	32.4	9.9
40	26.3	36.7	9.4
50	27.5	43.2	8.6

Tabla 3: Efecto del tamaño del polvo de madera en las propiedades del material [4]

Tamaño (mm)	Resistencia a la flexión (MPa)	Resistencia al impacto (kJ/m ²)
0.54	44.64	11.76
0.28	39.18	12.58
0.18	33.26	10.28
0.15	29.33	9.32
0.12	27.9	7.79

A menor tamaño de partícula se observa una disminución en la resistencia a la flexión del material compuesto. Un efecto parecido se tiene en la resistencia al impacto con la diferencia que parecería existir un punto óptimo de resistencia con un tamaño a de partícula de 0.28 mm.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Equipos

La extrusión de pellets se realizó mediante una extrusora Coperion ZSK 18 ML de doble tornillo cilíndrico. La relación L/D de los tornillos es de 38:1. Esta máquina cuenta con siete zonas independientes para el control de temperatura y una bomba de vacío que permite la desgasificación del material.

El moldeo de las probetas se realizó en una inyectora Milacron MT 55. Esta máquina posee cuatro zonas de control de temperatura y está equipada con un molde que por cada ciclo fabrica dos probetas de tracción, dos probetas de flexión, y cuatro probetas de impacto, como se observa en la Fig. 2.

2.2 Materiales

El tipo de explotación maderera que se lleva a cabo en el país no permite saber a ciencia cierta detalles como la edad del árbol talado o la parte del troco de donde proviene la madera que se compra. Conseguir este tipo de información al adquirir residuos de madera es más difícil aún. Por este motivo la madera escogida para este proyecto

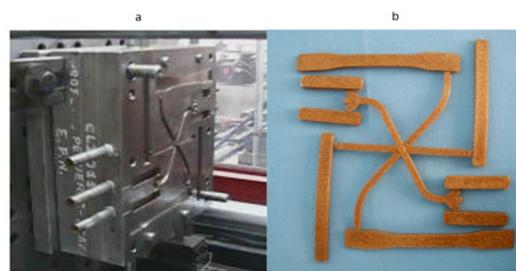


Figura 2. Molde de inyección (a) y probetas inyectadas (b)

se obtuvo en un aserradero local y no posee ninguna característica especial. El primer tipo de madera es una mezcla de diferentes especies, el segundo tipo es madera de amarillo de Guayaquil considerada una madera fina, dura y pesada [8].

El polímero matriz fue polipropileno homopolímero PH1310 de la marca Petroquim. En la Tabla 4 se presentan sus principales características. El compatibilizante usado fue anhídrido maleico para polipropileno (MAPP) Bonp GPM200E producido por Ningbo Wecreat Functional Plastics Co., Ltd, sus principales características se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 4. Propiedades del polipropileno.

Propiedades	Ensayos ASTM	Unidades	Valor
Índice de fluidez (2.16 kg/230°C)	D-1238/95	g/10 min	13
Temperatura de Ablandamiento VICAT (1kg)	D-1525/97	°C	154
Temperatura de deformación térmica – HDT (455 kPa)	D-648/97	°C	95
Resistencia al impacto IZOD a 23°C	D- 256/93	J/m	34
Resistencia a la tracción (en el punto de fluencia)	D-638/97	MPa	34
Elongación (en el punto de fluencia)	D-638/97	%	12
Módulo de elasticidad en flexión	D-790/97	MPa	1500

Tabla 5. Propiedades del MAPP.

Propiedades	Ensayos ASTM	Unidades	Valor
Índice de fluidez (2.16 kg/190°C)	D-1238	g/10 min	80-90
Temperatura de fusión	----	°C	150
Densidad	----	g/cm ³	0.96
Contenido de anhídrido maléico	D-792	wt%	1.4

2.3 Métodos

La primera fase de este proceso consistió en la preparación de los residuos de madera. El polvo de madera se separó en

tres tamaños diferentes mediante un proceso de tamizado, los tamices usados fueron: el N35 con orificios de 0.5 mm, el N45 con orificios de 0,355 mm, el N60 con orificios de 0,25 mm, el N70 con orificios de 0,212 mm y el N100 con orificios de 0,150 mm. Por otra parte, debido a que el contenido de humedad presente en la madera está usualmente entre 5 y 8% [6], se realizó un proceso de secado en estufa a 60 °C por 12 horas hasta reducir la humedad hasta un porcentaje menor al 1%, de esta manera se evitan daños en el equipo y defectos en el material. [7]

El siguiente paso fue determinar el peso de los componentes de la madera plástica que ingresan a la extrusora. La fracción en peso de madera está determinada por el peso de polvo de madera comparado con el del material compuesto. El MAPP se mezcló con el polipropileno en una concentración de 2% en peso. [3]

La tercera fase implicó la extrusión e inyección del material de manera que se obtuvieron probetas de madera plástica para la caracterización del material. En la Tabla 6 se muestran las diferentes composiciones de los materiales obtenidos.

Tabla 6. Propiedades del polipropileno.

Código	% Peso de matriz	Madera de refuerzo	% Peso del refuerzo	Aditivo	Tamaño de partícula (mm)
PP	100	---	0	---	---
PP70MM30 - 0.45	70	Mezcla	30	---	0.45
PP73MM25C2 - 0.18	73	Mezcla	25	MAPP	0.18
PP73MM25C2 - 0.30	73	Mezcla	25	MAPP	0.30
PP73MM25C2 - 0.45	73	Mezcla	25	MAPP	0.45
PP58MM40C2 - 0.45	58	Mezcla	40	MAPP	0.45
PP65MM33C2 - 0.45	65	Mezcla	33	MAPP	0.45
PP68MA40C2 - 0.45	68	Amarillo	30	MAPP	0.45

Las probetas moldeadas se caracterizaron mediante ensayos de tracción (ASTM D638-10), flexión (ASTM D 790-10) e impacto (ASTM D256-10). Además se determinó la dureza y la densidad de cada material. El número de especímenes probados fue de siete en cada ensayo. Las cifras tabuladas corresponden al promedio de los valores obtenidos en los ensayos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Ensayos de tracción

En la tabla 7 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de tracción realizado a los diferentes compuestos. Se presentan tanto las resistencias como los módulos obtenidos y junto a estos se encuentran las desviaciones estándar que se calcularon para los diferentes grupos de compuestos.

Tabla 7: Resistencias y módulos a tracción de los compuestos de madera plástica.

Código	Resistencia a la tracción (MPa)		Módulo de tracción (MPa)	
	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
PP	24.62	0.77	1077.92	107.14
PP70MM30 - 0.45	29.10	0.90	3380.95	290.27
PP73MM25C2 - 0.18	27.68	0.82	3141.67	175.79
PP73MM25C2 - 0.30	24.91	1.57	2264.17	214.02
PP73MM25C2 - 0.45	25.17	0.98	3270.00	164.32
PP58MM40C2 - 0.45	27.62	1.17	3155.55	255.79
PP65MM33C2 - 0.45	28.46	1.19	1666.67	147.31
PP68MA40C2 - 0.45	25.72	0.88	2511.43	292.36

Para establecer una relación entre el promedio y la desviación de los datos se calcularon los coeficientes de variación de los valores presentados en la tabla 7. Así, para la resistencia a la tracción se obtuvieron coeficientes de variación entre 3.1 y 6.3%, mientras que para los módulos estos valores oscilaron entre 5.0 y 11.6%. Estos resultados muestran una baja dispersión de los datos, lo que puede atribuirse a la reproducibilidad del método de procesamiento de las probetas.

En la Figura 3 se muestran los gráficos de los diferentes materiales sometidos a tracción.

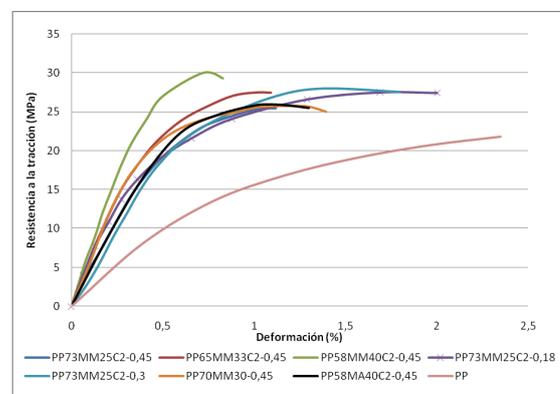


Figura 3: Curvas esfuerzo vs. deformación a tracción de las diferentes composiciones ensayadas.

La resistencia a la tracción del material con 40% de madera es 5% mayor a la del que tiene 33% que a su vez es 7.5% mayor que la del que contiene 25% de madera. Si se comparan los módulos se encuentra una tendencia parecida pero las diferencias porcentuales son de 7.5% y 25%, respectivamente. El material sin compatibilizante presenta una resistencia menor a la presentada por todos los compuestos de madera de mezcla, sin embargo su módulo se mantiene en rangos similares. El compuesto reforzado con madera de amarillo tiene una resistencia y un módulo 14 y 33% menores que los presentados por su similar de madera mezclada. Entre los materiales con

diferente tamaño de partícula se observó que la mayor resistencia se registra con el relleno de 30 μm el cual es 3 y 10% mayor que los de 180 y 450 μm respectivamente.

El PP muestra una resistencia y un módulo muy inferiores a los del resto de materiales, esto demuestra un comportamiento totalmente plástico del material y una curva lineal solamente en su origen. El PP tiene un valor de 24.62 MPa mientras que el valor tabulado es de 34 MPa. Las curvas de la mayor parte de las formulaciones estudiadas muestran un comportamiento similar entre ellas y con una zona lineal muy amplia.

Si se comparan los dos tipos de madera se puede observar que las probetas de material reforzado con la mezcla de maderas muestran una mayor resistencia y un mayor módulo que las de material reforzado con madera de amarillo. Este comportamiento puede deberse a las diferencias en la morfología de los dos tipos de madera. En el caso de la mezcla de maderas se observan porosidades que pueden haber influido en una mejor impregnación del polímero en la madera. Por otra parte, la madera de Amarillo posee una superficie más lisa, como se puede apreciar en la Figura 4.

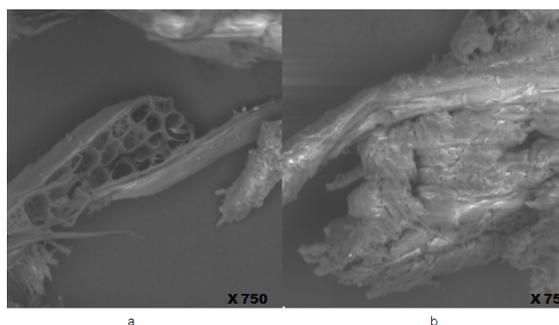


Figura 4: Micrografías SEM a 750X de partículas de (a) Mezcla de maderas y (b) Madera de Amarillo.

3.2 Ensayos de flexión

En la Tabla 8 se encuentran los valores promedio de resistencia y módulo que se obtuvieron en el ensayo de flexión de los ocho materiales fabricados. Al igual que para el ensayo de tracción se encuentran también los valores de desviación estándar de cada grupo de materiales.

Se calcularon los coeficientes de variación para los resultados obtenidos del ensayo de flexión. En este caso los coeficientes de variación para los valores de resistencia a la flexión se encuentran entre 1.1 y 2.3%, mientras que para los módulos estos valores oscilaron entre 3.3 y 10.0%. Al igual que en el ensayo de tracción, estos resultados muestran una baja dispersión de los datos, lo que puede atribuirse a que la extrusión e inyección son métodos con un alto grado de reproducibilidad.

En la Figura 5 se presentan las curvas esfuerzo vs. deformación para los diferentes materiales ensayados a flexión.

Tabla 8: Resistencias y módulos a flexión de los compuestos de madera plástica.

Código	Resistencia a la tracción (MPa)		Módulo de tracción (MPa)	
	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
PP	40.24	0.93	1117.71	70.17
PP70MM30 - 0.45	53.13	0.6	2351.15	116.14
PP73MM25C 2 - 0.18	56.02	0.71	2404.71	102.87
PP73MM25C 2 - 0.30	46.02	0.58	1790.79	73.07
PP73MM25C 2 - 0.45	44.8	0.71	1858.47	186.03
PP58MM40C 2 - 0.45	50.71	0.57	2090.51	157.38
PP65MM33C 2 - 0.45	50.9	1.12	2155.74	114.04
PP68MA40C2 - 0.45	56.79	1.08	2204.08	73.33

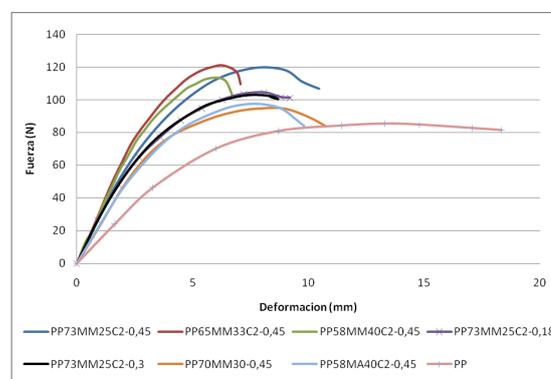


Figura 5: Curvas esfuerzo vs. deformación a flexión de las diferentes composiciones ensayadas.

Como se puede observar en la Figura 5, el módulo y la resistencia del PP son inferiores a los del material compuesto. Nuevamente se aprecia el comportamiento netamente plástico del polipropileno frente al comportamiento rígido del compuesto. Los materiales que muestran una mayor resistencia son aquellos que tienen un particulado más grueso.

Los resultados del ensayo de flexión muestran dos materiales con resistencia superior al resto, son el PP73MM25C2 -0,45 y el PP65MM33C2 -0,45. Sus resistencias superan con más de 5% a la que posee el material con 40% de refuerzo, que es el siguiente en magnitud. El material sin compatibilizante muestra valores de resistencia y módulo 11% menores que el compuesto de polvo de madera de 180 μm , el más débil de los que contenían madera mezclada y compatibilizante. Nuevamente el material reforzado con polvo de amarillo presenta valores inferiores a su similar de madera mezclada, 13.3% y 23.8% en resistencia y módulo respectivamente. Si se focaliza el estudio en el tamaño de partícula, los mejores resultados se obtuvieron con el polvo de 450 μm . Nuevamente, la madera mezclada proporcionó mejores características mecánicas que la madera de ama-

rillo. El módulo de elasticidad aumentó en un 33% y la resistencia en más de 15%.

3.3 Ensayos de impacto

En la Figura 6 se muestran los diferentes valores de tenacidad registrados por los diversos compuestos en el ensayo de resistencia al impacto.

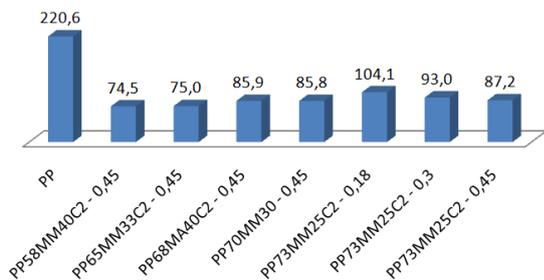


Figura 6. Resistencia al impacto Izod sin muesca (kJ/m^2)

Claramente se puede apreciar que el polipropileno resiste más del doble que cualquiera de los materiales que contienen polvo de madera. Entre los compuestos, los materiales con 25% de madera son los más tenaces, siendo el de particulado más fino el de mejores resultados superando con casi 12 y 20% a los de particulado mediano y grueso. Se aprecia una disminución de la tenacidad con el aumento en la fracción volumétrica de madera, así el material con mayor contenido de madera es 14.5% menos resistente que el de menor contenido de madera. La tenacidad del material con madera de amarillo supera en 15% el valor de tenacidad del compuesto con madera mezcla.

La Figura 7 muestra la dureza de los materiales, medidas en escala shore D, que se tomaron a las diferentes probetas fabricadas. Las probetas que contenían compatibilizante se muestran 5% más duras que las que no lo tienen. La cantidad de madera en el compuesto parece aumentar la dureza del mismo, las probetas con mayor contenido de madera son 3.3% más duras que las que solo contenían 25%. Los dos tipos de madera presentan valores de dureza muy similares.

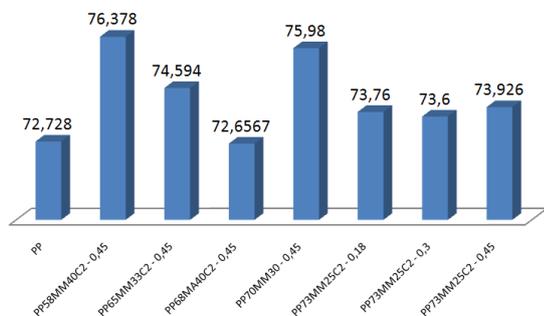


Figura 7. Dureza de los materiales en escala Shore D.

La Figura 8 muestra las densidades calculadas para las probetas. Todas las probetas que contienen 25% de madera

tienen los mismos valores de densidad. Los valores más altos se encuentran en las probetas que contienen la mayor cantidad de madera y aún así la diferencia con los otros compuestos no sobrepasa el 7%. La mayor diferencia existente es entre el polipropileno y el compuesto con 40% de madera, 16.6%. Ni el compatibilizante ni el tipo de madera muestran efecto alguno en la densidad del compuesto.

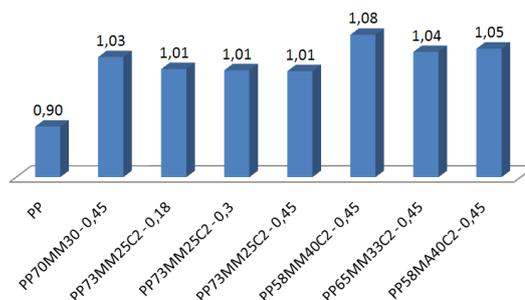


Figura 8. Densidad de los materiales (g/cm^3).

En la Figura 9 se puede observar un gráfico resumen donde se comparan todas las características mecánicas de los materiales obtenidos mediante un gráfico multiteje.

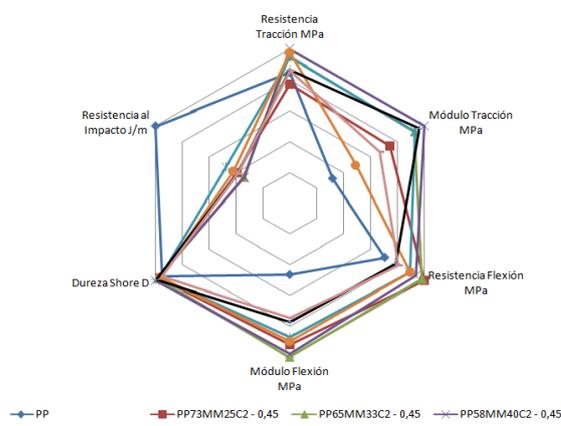


Figura 9. Comparación de propiedades.

Se observa que todos los materiales compuestos tienen una forma común, esto significa que sus propiedades son similares. Por su relativa gran tenacidad y su desventaja en los otros parámetros, el PP ocupa un espacio diferente al de los otros materiales en este gráfico. Otro material que posee una figura más reducida que el resto es el que no contiene compatibilizante, mostrando sus falencias frente al resto de compuestos. Los materiales que destacan como los mejores son el PP58MM40C2-0,45 y el PP65MM33C2-0,45 y para los materiales con 25% de madera el de polvo más fino muestra un mejor comportamiento. Estos resultados concuerdan con los antes mencionados.

4. CONCLUSIONES

El material que contiene compatibilizante no mostró un aumento significativo en su resistencia a la tracción respecto al material que no lo contiene.

Los módulos de tracción de los materiales con y sin compatibilizante fueron casi idénticos.

El uso de compatibilizante aumentó tanto la resistencia a la flexión como el módulo elástico a la flexión. Se obtuvo un incremento respectivo de 25% y 30% en estos valores.

Los materiales compuestos tuvieron una mayor resistencia a la tracción que la matriz pura. A mayor porcentaje de madera en el compuesto se obtuvieron mayores valores de resistencia y módulo elástico a la tracción, el módulo del PP fue superado 3 a 1 por el del PP58MM40C2 - 0,45 que también mostró una resistencia a la tracción de 18,5% más que el PP.

La resistencia y el módulo elástico de flexión también aumentan al aumentar el contenido de madera en el compuesto; siendo el material sin compatibilizante el de menores resultados entre los compuestos, supera en un 11% la resistencia y en un 66% el módulo de flexión del PP.

Al comparar los resultados obtenidos durante esta investigación con los que se encontró en la bibliografía se observa que otros autores han logrado aumentos de más de 40% en la resistencia del material al mezclarlo con polvo de madera, mientras que los de esta investigación bordean el 30% de incremento, sin embargo el efecto del refuerzo y las tendencias observadas son muy similares.

Los materiales compuestos presentaron valores de tenacidad de aproximadamente la mitad que los de la matriz polipropileno. Se observó que a mayor contenido de madera menor es la tenacidad, sin embargo, un compuesto con 25% de madera y uno con 40% de madera tienen valores de resistencia similares.

Al comparar el módulo de tracción obtenido con el de las tablas consultadas se aprecia que son del mismo orden, también se observan tendencias iguales a las obtenidas en la investigación.

Los efectos en las capacidades mecánicas del material producidos por el tamaño de la partícula son muy inferiores en comparación a los observados en las tablas de la bibliografía, pero las tendencias son similares.

Las probetas que se fabricaron con diferentes tamaños de partículas (180, 300 y 450 μm) pero con el mismo contenido de madera (25%) mostraron mucha similitud en los resultados de los ensayos de tracción.

En el ensayo de impacto Izod se determinó que el tamaño del polvo de madera sí influye en la resistencia del material, así, el material que contenía el polvo más fino (0,18 mm)

tuvo una tenacidad mayor en 12% al compuesto reforzado con partículas de 0,3 mm que a su vez superó al material de partículas más grandes (0,45 mm) en un 6.6%.

El tamaño de partícula del polvo de madera no tuvo influencia alguna en la dureza de los materiales compuestos.

Los materiales reforzados con madera de amarillo mostraron propiedades menores a los reforzados con la mezcla de maderas. Los valores de resistencia a la flexión y a la tracción son comparables con los que se obtuvo en el compuesto PP70MM30 -0,45.

La madera plástica busca reemplazar en muchas aplicaciones a la madera natural, principalmente en usos exteriores. Es así que actualmente se puede encontrar una amplia gama de productos como bancos para parques, juegos infantiles, encofrados para construcción, mobiliario urbano, decks, muelles, entre otros. Dado que estas aplicaciones soportan en su mayoría cargas de flexión es de gran importancia el uso de compatibilizante durante el procesamiento del material.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENES-CYT) 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".

REFERENCIAS

- [1] BCC Research 2011 (Online). <http://www.bccresearch.com/report/wood-plastic-composites-tech-markets-pls034b.html>
- [2] I. Daniel, "Engineering mechanics of composite materials"; Oxford University Press; Estados Unidos; 1994.
- [3] K. Harutun, "Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites"; New York; 1999.
- [4] X. Huang et al, "Study on Mechanical Properties of Wood Plastic Composites"; Journal of Applied Mechanics and Materials, Junio 2012. (Online) <http://www.scientific.net/AMM.182-183.307>
- [5] D. Hull, "Materiales Compuestos"; Reverté; España; 1987.
- [6] J. Kim y K. Pal, "Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites"; Springer; Berlin; 2010.
- [7] A. Klyosov, "Wood Plastic Composites; Wiley- interscience"; Estados Unidos; 2007.
- [8] R. Limongi, "Amarillo de Guayaquil"; INIAP, MAGAP, SENESCYT, 2011
- [9] A. Menéndez, "Una Revolución en Miniatura"; Valencia; 2010.