

PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS A BASE DESECHOS DE MADERA Y HDPE RECICLADO: EFECTO DE LA COMPOSICIÓN, EL TAMAÑO DE PARTÍCULA Y EL USO DE UN AGENTE ACOPLANTE

G.E. Martínez-Tapia, O. Martínez-Domínguez, C.R. Molina-Ávila, R.H. Cruz-Estrada, P.I. González-Chí, C. Martín-Barrera, G. Canché-Escamilla, S. Duarte-Aranda

*Centro de Investigación Científica de Yucatán, Unidad de Materiales
Calle 43, No. 130, Colonia Chuburná de Hidalgo, C.P. 97200, Mérida, Yucatán, México.
rhcruze@cicy.mx*

Abstract - Se reportan resultados relacionados con el aprovechamiento de desechos de madera (DM) y polietileno reciclado (HDPE-REC) para la preparación de materiales con aplicaciones potenciales como materiales estructurales. Se evaluó el efecto de la composición, del tamaño de partícula de DM y del uso de un agente acoplante sobre las propiedades mecánicas de los materiales obtenidos. Para fines comparativos, los desechos de madera utilizados provienen tanto de una mezcla de distintas especies de árboles (DMEZC), como de una especie conocida (Flamboyán). Además, se prepararon materiales utilizando una resina comercial de polietileno sin hacer uso del agente acoplante. Todos los materiales se formularon utilizando aceite mineral al 10 % en peso respecto al % de DM. Específicamente, se evalúan las propiedades mecánicas de materiales compuestos DM/HDPE-REC en función de los siguientes factores: (a) Composición: 50 y 60 % en peso de DM; (b) Tamaño de partícula de DM: Tres tamaños de partícula (I_f): fibras cuyas longitudes máximas no fueron mayores a 2 mm (Malla 10), fibras con longitudes menores a 0.25 pero mayores a 0.15 mm (Malla 60/100), y fibras con longitudes menores a 0.15 mm (Malla 100); y (c) Uso de un agente acoplante: 5 % en peso respecto a DM.

Introducción

Información del ayuntamiento de Mérida, Yucatán; indica que se genera al día alrededor de 60 m³ de DM triturado, donde las especies de árboles más comunes que se podan son el algarrobo, el Flamboyán, la lluvia de oro y el maculis. En los últimos años se ha incrementado la tendencia al uso de plásticos cargados con rellenos lignocelulósicos debido a los beneficios que aporta al plástico en cuanto a rigidez, resistencia mecánica, baja densidad y costo, entre otros. Además, es bien sabido que los materiales a base de poliolefinas y rellenos vegetales poseen múltiples aplicaciones en la fabricación de muebles, perfiles para ventanas y puertas, cercas, juguetes, etc. El uso de estos materiales, solamente al mes se generan alrededor de 200 ton de desechos plásticos en Mérida, Yucatán; del cual el 60% corresponde al PET y alrededor del 40% restante corresponde en su mayoría a envases de polietileno de alta densidad reciclado (HDPE-REC), por ejemplo: envases, suavizantes de ropa, bebidas, etc. El presente trabajo reporta resultados de un amplio programa de investigación relacionado con el aprovechamiento de DM y HDPE virgen y reciclado, así mismo se estudia una especie de DM tipo flamboyán combinado con los dos polietilenos.

Sección Experimental

Se emplearon los DM tal y como se almacenan en los distintos centros de acopio de la ciudad de Mérida, esto con la intención de implementar un proceso de bajo costo, el cual permita obtener productos con el menor costo posible. Las muestras fueron extraídas en orden aleatorio y se procuró tomar muestras a diferentes profundidades en cada montículo de desechos. De cada montículo se recolectaron aproximadamente 9kg de muestra. Se

utilizó aceite mineral tipo aromático y sus propiedades son: 0.75 % máximo de asfaltenos, 25% máximo de compuestos polares, 20 % máximo de saturados y el resto son parafinas y otros compuestos no identificados. Se utilizó HDPE virgen (Padmex 56035 de PEMEX) y reciclado (recopilado en la planta de separación del municipio de Mérida, Yucatán). El Copolímero Padmex 56035 grado soplado tiene una distribución de peso molecular ancha. Ofrece excelente rigidez, procesabilidad, y resistencia al impacto; así como buena resistencia al agrietamiento por esfuerzo ambiental (ESCR). Contiene aditivo antioxidante y lubricante. El material Padmex 56035 tiene las siguientes propiedades y fue usado tal cual como viene de la planta. Densidad de 0.9560, índice de fluidez de 0.35, resistencia a la tensión de 26.5 Mpa e Impacto Izod de 98J/m. La temperaturas de procesamiento de alrededor de 160°C a 185°C. El material reciclado tiene un índice de fluidez que varía entre 5.7 a 8.4 g/10 min. El agente acoplante (AA), Polybond 3009, proviene de Crompton y con características de índice de fluidez de 5.5 g/10 min, Índice de MAH de 2.4 y humedad de 0.08%. Las maderas se sometieron inicialmente a un proceso de secado en un horno a 80°C aproximadamente, por un periodo de 72 hrs con el fin de eliminar el exceso de humedad. Los desechos de madera fueron triturados en un molino de cuchillas marca Paganí modelo 1520, utilizando una malla de 2 mm (M-10). Posteriormente, una fracción de madera molida se retiene entre 0.25 y 0.15 mm para obtener una fracción de partículas entre mallas 60 y 100 (M-60/100) y partículas con tamaños inferiores a 0.15mm correspondiente a la malla 100 (M-100). Paralelamente, el HDPE virgen y el reciclado, además del agente acoplante son triturados a un tamaño de 2 mm, con el fin de lograr una mejor dispersión de los componentes de la fórmula en el mezclado. Se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) para determinar la temperatura máxima de procesamiento y la temperatura de descomposición de los DM, del HDPE puro y del HDPE reciclado. El análisis se realizó en un equipo PERKIN-ELMER TGA7 a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, en el intervalo de temperaturas de 30 a 700 °C. El tiempo de prueba fue de 1 hora aproximadamente. Las formulaciones que se evaluaron se presentan en las tablas 1 a 4. Los elementos que forman el material compuesto son mezclados en frío en una mezcladora de cinta por un tiempo de 5 min. El aceite mineral es agregado poco a poco en toda la masa del material, para permitir que se distribuya en toda la formulación. Posterior a este paso se mezcla térmicamente en extrusor de doble husillo co-rotante de laboratorio marca Brabender modelo CTSE -V/MARK II, con cuatro zonas de calentamiento. La temperatura se mantuvo por debajo de la temperatura de degradación de los materiales, de acuerdo con las figuras 1 y 2. La velocidad del doble husillo es de 50 rpm. En seguida el material obtenido es triturado en el molino Paganí con una criba de 6 mm y tamizado para obtener hojuelas del material con un tamaño de partícula de 5 mm. Las muestras para las pruebas mecánicas bajo tensión fueron elaboradas en una presa de moldeo por compresión CARVER modelo 3891 trabajando a 185°C bajo una carga de 7000 lb durante un periodo de 15 min. Para los especímenes para pruebas de flexión e impacto se elaboran placas en una prensa a las mismas condiciones durante un tiempo de 13 min. Posteriormente las placas son cortadas y rectificadas para obtener las dimensiones estipuladas en la norma. Las pruebas mecánicas se llevaron a cabo de acuerdo a las norma ASTM D-638 para tensión, ASTM D-790 para flexión y para impacto se usó el método ASTM D-256. Para las propiedades mecánicas a tensión se determina el módulo elástico y la resistencia a la tensión, a flexión se determina el módulo, el esfuerzo máximo y la deformación al esfuerzo

máximo. Para las propiedades mecánicas en impacto se determina la resistencia al impacto de los materiales resultantes.

Resultados y Discusión

La temperatura máxima de procesamiento y la temperatura de descomposición de los DM, del HDPE puro y del HDPE reciclado se muestran en las figuras 1 y 2.

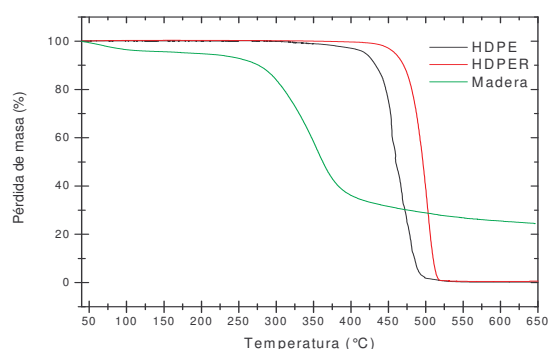


Figura 1. Análisis TGA de los materiales.
Variación de la masa con respecto a la temperatura.

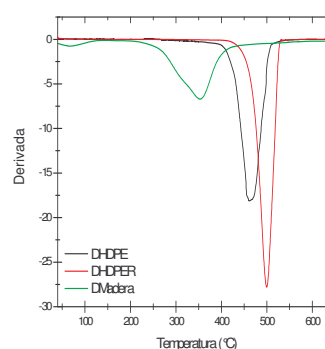


Figura 2. Análisis TGA de los materiales.
Variación de la pendiente

Como se observa en la figura 1, la madera presenta una ligera disminución en su masa en el rango de 30-100 °C que representa la humedad en la madera. En el rango de 100-230 °C no hay variación de masa, hasta después de los 230°C, ver figura 2, el material lignocelulósico empieza a descomponerse hasta alcanzar temperatura aproximada de 380°C. El HDPE empieza a descomponerse a partir de los 425°C. Es importante señalar que primero se descompone el material virgen y después el reciclado. En base a este resultado se fijaron las temperaturas de procesamiento más recomendadas: $T_1=170^{\circ}\text{C}$, $T_2=180^{\circ}\text{C}$ y $T_3=185^{\circ}\text{C}$. Efecto de la concentración de madera: La introducción de madera en altas cantidades tiende a bajar 28% en tensión y 71% en impacto sin el uso de agente acoplante, de acuerdo con la tabla 1 y 2. Mientras que con acoplante, el descenso es de 25 y 70% respectivamente. Considerando que las propiedades del HDPE virgen son de 26.5 Mpa para tensión y 98 J/m para impacto. Efecto del tamaño de partícula (d_p): En las cuatro tablas siguientes puede observarse la tendencia general de incremento de la propiedad mecánica en función de la reducción del tamaño de partícula. Comportamiento que era de esperarse. En el caso de resistencia al impacto el efecto es al contrario. Efecto de Agente Acoplante: Entre la tabla 1 y la tabla 2, el efecto de utilizar agente acoplante a la mezcla mejora las tres propiedades mecánicas, mientras que en el caso de utilizar HDPE virgen mejora comparativamente con el uso de HDPE-reciclado.

Tabla 1. Formulaciones binarias DM/HDPE-virgen sin aditivos.

Tamaño de partícula, Malla	% DM	% HDPE	Clave iden.	Resis. Tensión MPa	Resist. al Impacto J/m	Resist. a la Flexión MPa
10	50	50	DM-1	12.22	33.0	12.72
60/100	50	50	DM-2	20.82	27.2	20.82
100	50	50	DM-3	23.85	23.5	24.02
10	60	40	DM-4	8.19	30.0	16.64
60/100	60	40	DM-5	16.51	23.0	18.0
100	60	40	DM-6	19.51	12.7	19.0

Tabla 2. Formulaciones binarias DM/HDPE-virgen con 5%AA con respecto a DM.

Tamaño De partícula, Malla	% DM	% HDPE	Clave iden.	Resis. Tensión MPa	Resist. al Impacto J/m	Resist. a la Flexión MPa
10	50	50	DM-1A	13.69	34.6	15.33
60/100	50	50	DM-2A	23.01	30.1	23.22
100	50	50	DM-3A	22.80	22.8	26.28
10	60	40	DM-4A	18.09	30.6	16.62
60/100	60	40	DM-5A	19.27	29.0	18.32
100	60	40	DM-6A	26.33	24.7	26.31

Tabla 3. Formulaciones DM/HDPE-reciclado con aditivos.

Tamaño de partícula, Malla	% DM	% HDPE reciclado	Clave de Ident.	% Agente Acoplante *	% Aceite mineral *	Resis. Tensión MPa	Resist. al Impacto J/m	Resist. a la Flexión MPa
10	50	50	DMR-3	5	10	9.2	34.34	12.17
60/100	50	50	DMR-4	5	10	15.93	29.74	13.87
100	50	50	DMR-5	5	10	9.3	22.74	15.13
10	60	40	DMR-6	5	10	18.5	33.43	3.9
60/100	60	40	DMR-7	5	10	13.6	24.34	4.24
100	60	40	DMR-8	5	10	12.15	19.79	7.54

*con respecto a la cantidad DM usada.

Efecto de utilizar madera Flamboyán: En lo que respecta a tamaño de partícula, concentración de madera y agente acoplante se observa el mismo comportamiento que muestra con DM. Comparando las mezclas de Flamboyán con HDPE-REC y virgen, se muestra en la tabla 4 que es mejor utilizar HDPE-REC.

Tabla 4. Formulaciones con madera Flamboyán DM/HDPE(vir-rec).

Tamaño partícula, Malla	% DM Flamboyán	% HDPE virgen	% HDPE reciclado	% Agente Acoplante *	% Aceite mineral *	Clave de Ident.	Resis. Tensión MPa	Resist. al Impacto J/m	Resist. a la Flexión MPa
10	50	50		5	10	F1	12.63	37.00	25.57
10	60	40		5	10	F2	11.71	31.83	19.17
10	50	50		0	10	F3	11.22	44.41	19.03
10	60	40		0	10	F4	8.31	37.16	14.30
10	50		50	5	10	F5	21.63	35.26	23.92
10	60		40	5	10	F6	19.14	29.5	22.95
10	50		50	0	10	F7	19.13	40.6	20.23
10	60		40	0	10	F8	13.8	34.82	17.55
60/100	50	50		5	10	F9	23.58	34.42	24.96
60/100	60	40		5	10	F10	20.67	29.60	24.67
60/100	50		50	5	10	F11	25.00	29.72	31.13
60/100	60		40	5	10	F12	23.4	29.88	28.72
100	50	50		5	10	F13	20.19	25.6	26.23
100	60	40		5	10	F14	17.17	23.1	22.20
100	50		50	5	10	F15	22.29	25	31.07
100	60		40	5	10	F16	19.18	24.16	27.07

Conclusiones

Los resultados indican que las propiedades bajo tensión y flexión disminuyen al incrementar el contenido de DMEZC, Flamboyán y I_f . El agente acoplante mejoró en todos los casos las propiedades mecánicas del material. En general, se observó que las propiedades mecánicas de todos los materiales a base de Flamboyán superan las propiedades de todos los materiales a base de DMEZC. Por otra parte las propiedades mecánicas fueron mejores para los materiales con el menor contenido de DM.

Respecto a la experimentación con desechos de madera del árbol Flamboyán se observó que hubo un aumento en las propiedades a tensión y flexión al usar el AA. Para impacto ocurre un descenso en los valores; esto ocurre tanto en materiales al 50% y 60% de DM. Respecto al tamaño de partícula los valores correspondientes a tensión y flexión tuvieron un máximo en M-60/100 y un mínimo en M-10. La resistencia al impacto disminuyó conforme el tamaño de la fibra se fue reduciendo. Cabe aclarar que no se logró establecer un patrón que pudiera tener el tamaño de partícula en la deformación al esfuerzo máximo. Al cambiar la matriz polimérica por HDPE reciclado se notó que tanto para tensión como para flexión los valores correspondientes resultaron en un aumento con respecto a los materiales que contenían HDPE virgen en materiales al 50% y 60% madera. En impacto el uso de HDPE reciclado ocasionó una disminución en la resistencia tanto en materiales con 50% y 60% desechos de madera. Por último, los materiales que contenían un 50% madera tuvieron una mayor resistencia a la tracción que materiales al 60%, aunque se obtuvo un módulo superior con los materiales al 60%. En el caso de flexión conforme se aumentó la cantidad de desechos de madera las propiedades disminuyeron, lo mismo ocurrió con la resistencia al impacto.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero a CONACyT para la realización de este estudio a través del proyecto YUC-2003-C02-021. De igual forma se agradece al Ayuntamiento de Mérida por las facilidades brindadas.

Referencias

1. Standard test methods ASTM D-638-02a, ASTM D-790-02 and ASTM D-256-02, Annual book of ASTM Standards, ASTM Int., Phil., Pa, USA.
2. R.H. Cruz-Estrada, P. Fuentes-Carrillo, O. Martínez-Domínguez, G. Canché-Escamilla, P.I. González-Chí, C. Martín-Barrera, S. Duarte-Aranda, C. García-Gómez, *Memorias XVIII Congreso Nacional de la SPM* 2005, p. 264-268.
3. C.A. Correa, C.N.P. Fonseca *Polímeros: Ciencia e Tecnología* 2003, 13, 154.
4. J.Z. Lu, Q. Wu, I.I. Negulescu *J. Appl. Polym. Sci.* 2005, 96, 93.
5. D.D. Stokke, D.J. Gardner *J. Vinyl and Additive Tech.* 2003, 9, 96.