

ESTUDIO COMPARATIVO DEL EFECTO DE LA BREA NATURAL Y MALEINIZADA COMO AGENTES DE ACOPLAMIENTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y ABSORCIÓN DE HUMEDAD DEL POLIPROPILENO Y FIBRA CELULÓSICA

Héctor Pulido González^{1*}, Martín Rabelero Velasco², Elena Hernández, Reyes Joel Sanjuán Raygoza³, Carlos F. Jasso Gastinel¹

1) Departamento de Química, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Marcelino García Barragán #1421, Guadalajara, Jalisco 44430, (México).

Correo electrónico: hpulidoglez@hotmail.com

2) Departamento de Ingeniería Química, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Marcelino García Barragán #1421, Guadalajara, Jalisco 44430, (México).

3) Departamento de Ciencias Tecnológicas, Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara, Av. Universidad, Núm.1115, Col. Lindavista, Ocotlán, Jalisco 47820, (México).

Recibido: Agosto 2013; Aceptado: Enero 2014

RESUMEN

El efecto de una nueva alternativa de agente de acoplamiento, en materiales reforzados de polipropileno y fibra celulósica a diferentes concentraciones de fibra, fue estudiado usando brea natural de pino y brea maleinizada (éster de brea gliceromaleico); como referencia se comparan resultados usando un agente de acoplamiento comercial (*Epolene E-43*). Las propiedades mecánicas estáticas (tracción y flexión) y la absorción de humedad muestran a la brea maleinizada como un agente acoplante con propiedades comparables a las obtenidas con el agente de acoplamiento comercial. Además, mediante el uso de espectroscopía FTIR se estudia la evidencia de la compatibilidad de la fibra con la matriz polimérica lograda a partir de la adición del agente de acoplamiento.

Palabras claves: agente de acoplamiento, materiales reforzados, brea o colofonia, brea maleinizada.

ABSTRACT

The effect of a new alternative of coupling agent, in polypropylene and cellulosic fiber composites to different concentrations of fiber is presented. Performance of natural pine tar and maleated rosin (maleated rosin glycerol ester), as compatibilizing agents were compared to the performance of a commercially available agent (*Epolene E-43*). The static mechanical properties (tensile and bending) and moisture absorption show that the maleated rosin as a coupling agent with performance comparable to that obtained with commercial coupling agent. Furthermore, evidence of compatibility is verified by FTIR spectroscopy.

Key words: coupling agent, wood plastics composite, tar or rosin, maleated rosin.

INTRODUCCIÓN

Las fibras naturales han sido utilizadas desde la antigüedad; de acuerdo a *Taj et al.* [1], se tienen registros que superan los 3.000 años. Estas fibras se han empleado como alimento, material de construcción, en la fabricación de utensilios, vestimenta, herramientas y muchos otros usos. El aumento en la población mundial genera una gran demanda de nuevos materiales para diversas aplicaciones; según estimaciones de *Rowell et al.* [2], la tasa actual de crecimiento requiere once años para incrementar su cantidad en mil millones de personas. Lo anterior ha impulsado el uso de los materiales reforzados donde las fibras naturales son combinadas con materiales poliméricos, con el objeto de obtener productos con propiedades superiores a aquellas obtenidas con los materiales individuales. *Gurram et al.* [3], establecen la premisa básica de la industria de los materiales reforzados de fibra celulósica y plástico, en los cuales la adición de materiales de bajo costo (cargas y refuerzos) a las resinas de plástico reducirá los costos de manufactura de los materiales e incrementará la rigidez de los mismos. Los materiales reforzados de fibra

celulósica y polímeros presentan propiedades híbridas de la madera y los polímeros, explican *Wolcott* y *Englund* [4], debido a que la adición de fibras celulósicas a la matriz polimérica incrementa las propiedades mecánicas y la estabilidad térmica, cuando se compara con el termoplástico sólido; al mismo tiempo la adición de polímero a la madera presenta barreras a la humedad y reduce la absorción de agua, además de que mejora las propiedades al intemperismo de la madera.

En los últimos años se ha dado un gran impulso al uso de fibras vegetales de origen natural como refuerzos de los materiales reforzados, las cuales son conocidas como fibras celulósicas o lignocelulosicas, cuyas principales ventajas son, de acuerdo a *Georgopoulos et al.* [5], proveer material de fuentes renovables, biodegradables, reciclables, de bajo costo, baja densidad y propiedades superiores comparables con los refuerzos inorgánicos, además de naturaleza menos abrasiva en los equipos de procesamiento que las cargas inorgánicas.

En México, entre otras fibras se han investigado principalmente las que se obtienen del henequén de Yucatán y del agave *tequilana weber* de Jalisco. Las fibras de agave y henequén son reforzados complejos de origen natural, al igual que la madera contienen esencialmente celulosa, hemicelulosa, lignina y extractivos [6]. La absorción de agua en los materiales reforzados de fibra y polímeros está fuertemente influída por la disponibilidad de grupos oxhidrilo en la superficie de la fibra de refuerzo. *Bessadok et al.* [7], establecen que la absorción de agua en las fibras celulósicas puede ser modificada con tratamientos químicos para mejorar su comportamiento ante ambientes higroscópicos, antes de mezclarse con los polímeros para formular materiales reforzados.

Durante décadas, la modificación de la superficie de fibras de celulosa para inducir compatibilidad con los polímeros, principalmente poliolefinas, ha sido uno de los temas más importantes en la ciencia y tecnología de los materiales reforzados. Diversos productos químicos han sido utilizados para lograr cambios en la interfase de los materiales reforzados. Sin embargo, como afirma *Franco-Marqués et al.* [8], los avances más importantes usando fibras celulósicas como refuerzo de los polímeros, fueron alcanzados cuando fueron añadidos agentes de acoplamiento de poliolefinas modificadas, para producir enlaces químicos entre las fibras y la matriz polimérica. Este es el caso de los polímeros polietileno y polipropileno con anhídrido maleico injertado. Además del tipo de agente de acoplamiento que se emplea, otro factor importante es su cantidad o proporción en el material reforzado. Diversos autores como *Botros* [9], *La Mantia y Morreale* [10] y *Mohebby et al.* [11], recomiendan una proporción de agente de acoplamiento entre el 2 y el 8% en peso; determinar la proporción adecuada según el tipo de polímero, fibra celulósica y agente acoplante se obtiene experimentalmente.

En este estudio se formularon materiales reforzados de polipropileno con fibra de agave o fibra de henequén, en los cuales se evaluó el efecto de usar una nueva alternativa de agente de acoplamiento, utilizando brea natural de pino y brea maleinizada (éster de brea gliceromaléico). Con esto se pretende

reemplazar el uso de poliolefinas modificadas con anhídrido maleico (*Epolene E-43*), lo que permitirá impulsar el uso de materiales naturales reciclables de bajo costo (como la brea y las fibras celulósicas) en la producción de bienes que tradicionalmente han empleado a los plásticos puros o a la madera, en diversas aplicaciones, además de evaluar comparativamente su eficacia. Se llevó a cabo un análisis detallado del desempeño mecánico de los materiales formulados mediante pruebas estáticas de tracción y flexión para los cuales, como lo afirma *Tajvidi et al.* [12], estas propiedades dependen del tipo de fibra, longitud de la fibra, contenido de fibra y la adhesión entre la fibra y la matriz polimérica. Además se evalúa la absorción de humedad como un fenómeno asociado a cada acoplante en la interfase y la evidencia de la compatibilización química mediante espectroscopia FTIR.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales

Polipropileno virgen (PPv). El PP 1703 fue suministrado por el *Grupo Quimisor*, con una densidad de $0,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y un índice de fluidez de 3,5 g/10 min (Figura 1).

Fibra de agave (FA), (*tequilana weber*) con un diámetro promedio de 210 μm , sin tratamiento alguno, residuo de la industria tequilera en *Jalisco, México* (Figura 1).

Fibra de henequén (FH), (*agave fourcroydes*) con un diámetro promedio de 210 μm , sin tratamiento alguno y proveniente del estado de *Yucatán, México*.

Brea natural de pino (B), proveniente de la industria forestal de *Jalisco, México*, con un peso molar promedio de 302 g/mol y un índice de acidez entre 145 a 155 (Figura 1).

Brea maleinizada (BM), (ester de brea gliceromaleico), con un peso molar promedio de 1.860 g/mol y un índice de acidez entre 15 a 26, de la empresa *Resinas Sintéticas S.A. Guadalajara, México* (Figura 1).

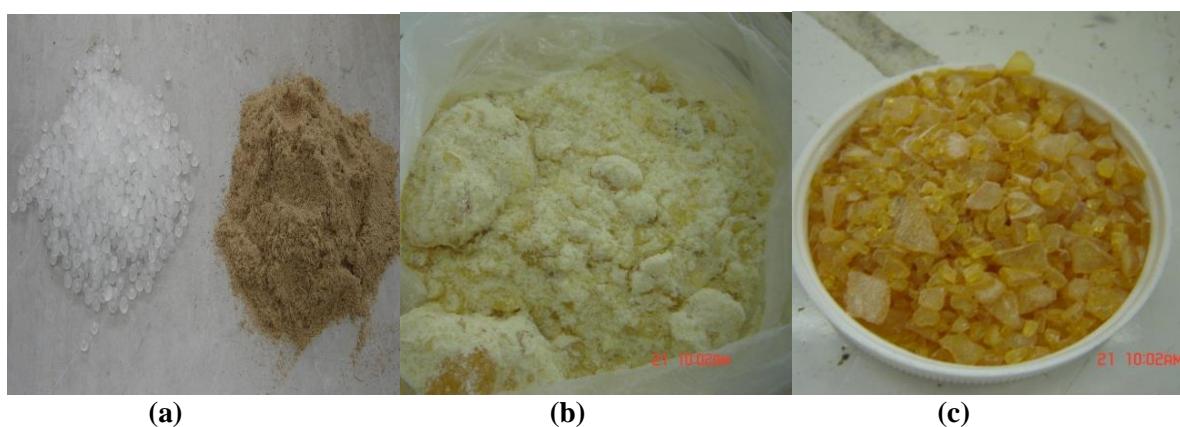


Figura 1. Polipropileno virgen y fibra de agave malla 65 (a), brea natural (b) y brea maleinizada (c).

Polipropileno con anhídrido maleico injertado (E-43) en la cadena principal, *Epolene E-43*, de la empresa *Eastman Chemical Corporation* (peso molecular promedio de $9.100 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, índice de acidez

40 – 55).

Métodos. Para obtener el material compuesto de polipropileno y fibra de agave o henequén de acuerdo a las formulaciones presentadas en la Tabla 1 se procesaron los materiales a través de un extrusor de doble husillo (100 rpm, alimentación a 165°C, salida a 190°C) mediante un procedimiento en dos etapas.

En la primer etapa, se extruyó el polímero con el agente de acoplamiento y después se peletizan. En la segunda etapa se extruyó el producto de la primer etapa con las fibras de refuerzo previamente secadas (48 horas en horno de convección a 65°C) y con partículas tamizadas a malla 65. Con los materiales formulados, se prepararon placas de 3 mm de espesor en una prensa de termocompresión marca *Carver*, a 180°C y 49.000 N de fuerza de cierre.

Tabla 1. Formulaciones de los materiales reforzados (% en peso).

Material	Polipropileno virgen (PPv)	Fibra de agave (FA) ó henequén (FH)	Brea natural (B)	Brea maleinizada (BM)	Epolene E-43 (E43)
PPv	100 %	–	–	–	–
PPv + 3 % B	97%	–	3%	–	–
PPv + 3 % BM	97%	–	–	3%	–
PPv + 3 % E43	97%	–	–	–	3%
PPv + 18% F	82%	18%	–	–	–
PPv + 36% F	64%	36%	–	–	–
PPv + 50% F	50%	50%	–	–	–
PPv + 18% F +3% B	79%	18%	3%	–	–
PPv + 36% F +3% B	61%	36%	3%	–	–
PPv + 50% F +3% B	47%	50%	3%	–	–
PPv + 18% F + 3% BM	79%	18%	–	3%	–
PPv + 36% F + 3% BM	61%	36%	–	3%	–
PPv + 50% F + 3% BM	47%	50%	–	3%	–
PPv + 18% F + 3% E43	79%	18%	–	–	3%
PPv + 36% F + 3% E43	61%	36%	–	–	3%
PPv + 50% F + 3% E43	47%	50%	–	–	3%

Mediciones. A partir de los materiales preparados se obtienen probetas de acuerdo a los estándares de prueba ASTM correspondientes. Se realizaron pruebas mecánicas utilizando una maquina universal de pruebas marca *UNITED* modelo SFM. Las pruebas de tracción (ASTM D-638-03) se hicieron con una velocidad de cruceta de 5 mm/min. Los ensayo de flexión, (ASTM D-790-03) con una velocidad de cruceta de 1,3 mm/min y separación entre soportes de 50 mm. Con la finalidad de medir el efecto del agente acoplante en la interfase se hicieron mediciones de absorción de agua para las diferentes formulaciones. El grado de interacción entre la fibra y el polímero se evaluó mediante espectroscopia FTIR-ATR (*Thermo Scientific* modelo *Nicolet 380*).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades de tracción. En las Tablas 2 y 3 se muestran los resultados de las pruebas de tracción para las formulaciones con FA y FH respectivamente. También se muestran en ambas tablas los resultados para la matriz polimérica sin fibra ya sea PPv puro o con los diversos agentes de acoplamiento. Los resultados indican que para el PPv sin fibra, la presencia de los agentes de acoplamiento cambia su desempeño en pruebas de tracción. El módulo de *Young* (E) para la formulación con B se incrementa respecto al E del PPv puro mientras que para BM y E43, E disminuye ligeramente. La resistencia última (RU) del PPv virgen se incrementa considerablemente cuando se usa B como agente acoplante, se reduce ligeramente con la BM y aumenta levemente con el E43. Esta tendencia se invierte para el caso de la deformación a la rotura (DR). En la Tabla 2 se muestra que para formulaciones con FA, el desempeño que presentan las formulaciones con E43 es superior para todos los contenidos de fibra examinados, seguido por las formulaciones con BM y por último las de B. Para el caso de formulaciones con FH en la Tabla 3 se observan tendencias diferentes en el desempeño comparadas con las tendencias para FA. Por ejemplo, para materiales reforzados con 18% FH, tanto E, como RU y DR disminuyen con B y BM, mejorando sensiblemente con el uso de E43. Sin embargo, al aumentar el contenido de fibra a 36%, la formulación con BM presenta el desempeño más alto. Al aumentar la FH al 50%, el desempeño de las formulaciones con agente de acoplamiento es similar al de la formulación sin agente, con excepción del E para la formulación con BM que resulta incrementado de manera notable.

Tabla 2. Propiedades en tracción de PPv con fibra de agave.

Material	Módulo de <i>Young</i> (E) MPa	Resistencia última (RU) MPa	Deformación a la rotura (DR) (%)
PPv	882,2	< 5,03	> 35,18
PPv + 3 % B	914,7	29,54	9,63
PPv + 3 % BM	852,2	< 4,66	> 28,12
PPv + 3 % E-43	834,7	< 5,78	> 23,82
PPv + 18%FA	637,7	10,49	5,09
PPv + 18%FA + 3%B	672,9	9,70	2,61
PPv + 18%FA + 3%BM	659,8	9,42	2,40
PPv + 18%FA + 3%E43	790,9	14,12	3,52
PPv + 36%FA	793,2	8,17	2,12
PPv + 36%FA + 3%B	782,1	9,05	1,74
PPv + 36%FA + 3%BM	798,4	8,32	1,87
PPv + 36%FA + 3%E43	828,9	12,72	2,29
PPv + 50%FA	809,8	6,87	1,58
PPv + 50%FA + 3%B	805,9	7,91	1,47
PPv + 50%FA + 3%BM	985,2	7,11	1,08
PPv + 50%FA + 3%E43	983,8	11,25	1,76

Podemos observar que el módulo de *Young* ofrece valores más altos con la fibra de henequén como refuerzo que la fibra de agave cuando se utiliza cualquiera de los agentes de acoplamiento, esto puede ser debido a la mayor cantidad de grupos oxhidrilo disponibles en la holocelulosa de la fibra de henequén con respecto a la fibra de agave, como lo menciona *Sanjuán y Jasso* [13], lo cual se detalla a continuación en la Tabla 4.

Propiedades de flexión. En las Figuras 4 a 6, se observa que el módulo de flexión se ve disminuido al utilizar la B con ambos tipos de fibra, pero al emplear la BM y el E43 presenta valores superiores al PPv, solo con valores de fibra del 50% se recupera, con los tres agentes de acoplamiento.

Tabla 3. Propiedades en tracción de PPv con fibra de henequén.

Material	Módulo de <i>Young</i> (E) MPa	Resistencia última (RU) MPa	Deformación a la rotura (DR) %
PPv	882,2	< 5,03	> 35,18
PPv + 3 % B	914,7	29,54	9,63
PPv + 3 % BM	852,2	< 4,66	> 28.12
PPv + 3 % E-43	834,7	< 5,78	> 23,82
PPv + 18%FH	672,4	11,66	3,51
PPv + 18%FH + 3% B	604,7	9,53	2,52
PPv + 18%FH + 3% BM	607,8	12,2	3,13
PPv + 18%FH + 3% E43	760,6	15,42	3,21
PPv + 36%FH	700,6	11,17	3,42
PPv + 36%FH + 3% B	953,1	9,41	2,00
PPv + 36%FH + 3% BM	1.045,0	11,33	2,03
PPv + 36%FH + 3% E43	959,1	14,97	2,69
PPv + 50%FH	1.058,0	7,78	1,71
PPv + 50%FH + 3% B	1.247,0	7,98	1,07
PPv + 50%FH + 3% BM	1.067,9	9,55	1,45
PPv + 50%FH + 3% E43	1.077,7	13,87	1,58

Tabla 4. Características y propiedades de fibras a) agave b) henequén. Los porcentajes son en peso (excepto donde se indique otro concepto).

<i>Propiedades de las fibras</i>	<i>a) Fibra de agave</i>	<i>b) Fibra de henequén</i>
Material soluble en benceno–alcohol	3,15%	1,92%
Material soluble en agua	3,94%	2,70 %
Lignina	16,85%	8,04%
Holocelulosa (celulosa + hemicelulosa)	70,5%	87,88%
Celulosa	64,96%	59,75%
Cenizas	1,99%	0,53%
Densidad (g·cm ⁻³)	1,45	1,5
Resistencia a la tracción (MPa)	575,43	500
Deformación a la rotura (%)	3,98%	4,8%
Módulo a tracción (MPa)	149,9	13.200

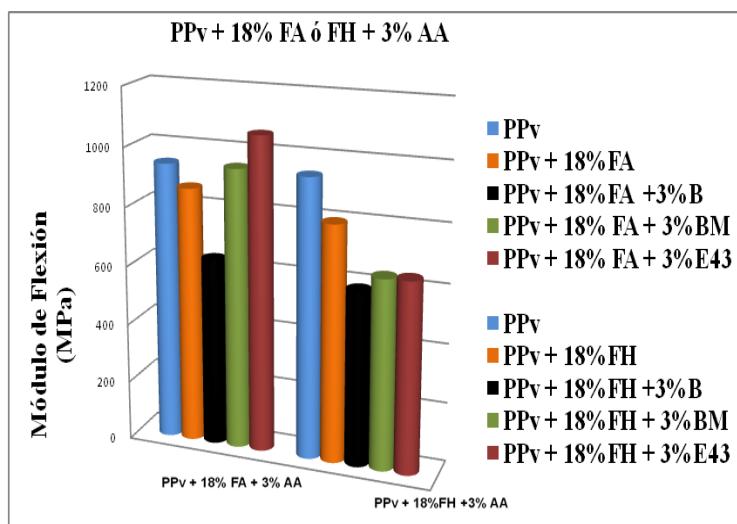


Figura 4. Módulo de flexión de PP virgen con 18% de fibra de agave o henequén y agentes de acoplamiento.

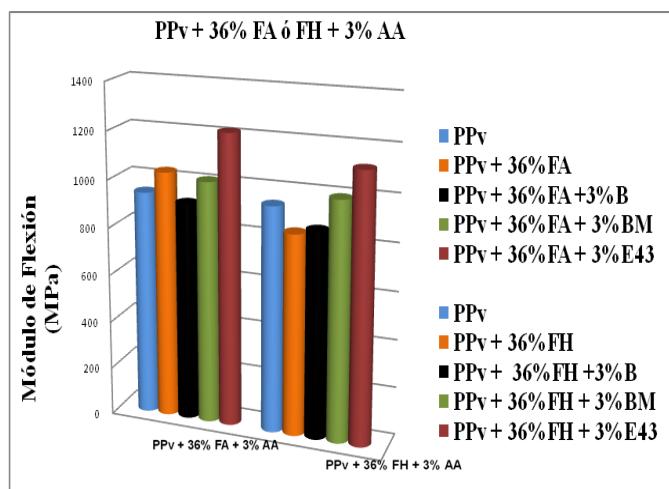


Figura 5. Módulo de flexión de PP virgen con 36% de fibra de agave o henequén y agentes de acoplamiento.

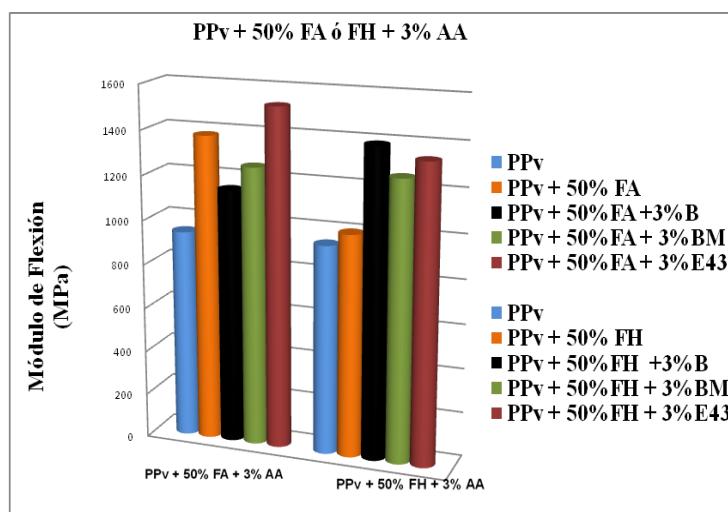


Figura 6. Módulo de flexión de PP virgen con 50% de fibra de agave o henequén y agentes de acoplamiento.

Comparativamente las pruebas de flexión (ASTM D-790-03), nos permiten establecer que la

rigidez de los materiales con FH se ve reflejado en el menor valor del módulo comparado con los materiales obtenidos con la FA. La relación entre las propiedades a la tracción y a la flexión, muestran como a valores mayores de módulo de *Young* (E) en el material compuesto, la resistencia a la flexión y en consecuencia el módulo de flexión será menor, es por ello que los materiales formulados con FH presentan valores menores que los obtenidos con FA, los cuales exhiben el comportamiento mecánico de los materiales duros, rígidos y quebradizos, los cuales tendrán módulo alto y elongación baja en el punto de ruptura, pudiendo ser que el material no cede antes de romperse.

Absorción de humedad. La interacción en la interfase se mide a través de la absorción de humedad, con la cual encontramos que con ambas fibras al utilizar la B y la BM la cantidad de agua absorbida disminuye al 18 y al 36% de fibra (Figuras 7a, 7b, 8a y 8b), comparada con el polipropileno con fibra sin agente de acoplamiento y salvo el caso de la FA al 50% (Figuras 9a y 9b), los tres agentes de acoplamiento reducen la cantidad de humedad que las fibras son capaces de absorber, encontrando en esos casos que la BM presenta resultados comparativos con el E43.

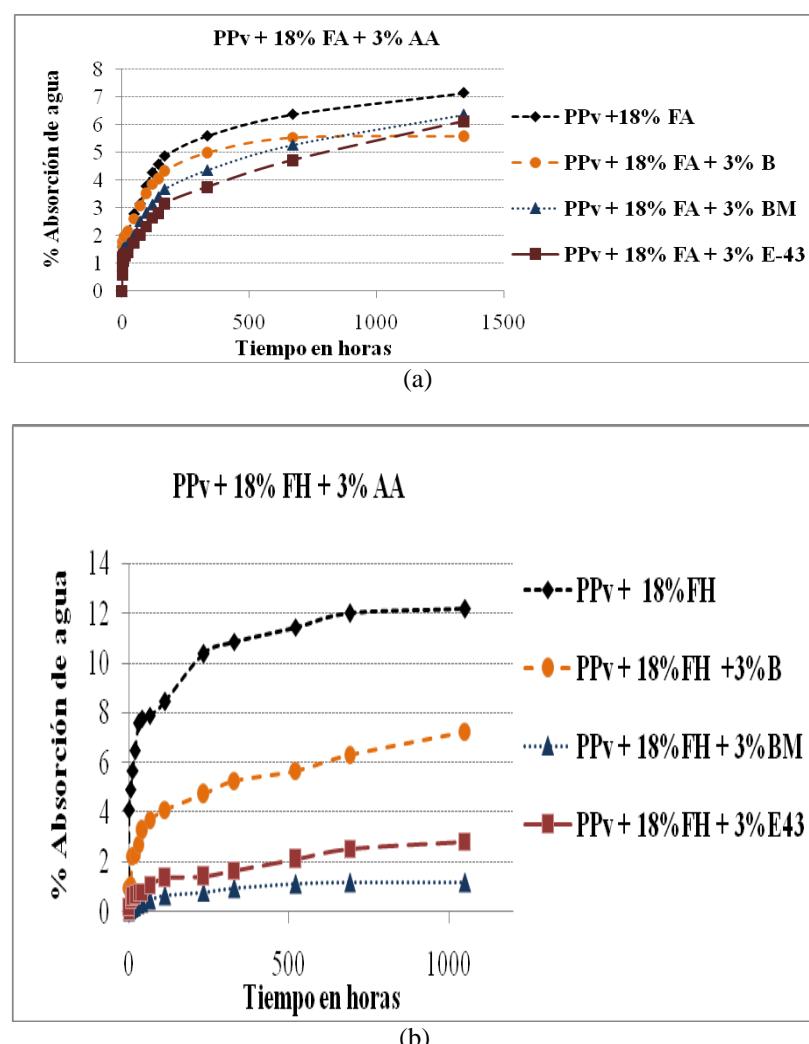


Figura 7. Absorción de agua de a) PPv con 18% FA ó b) PPv con 18% FH, más 3% de acoplantes.

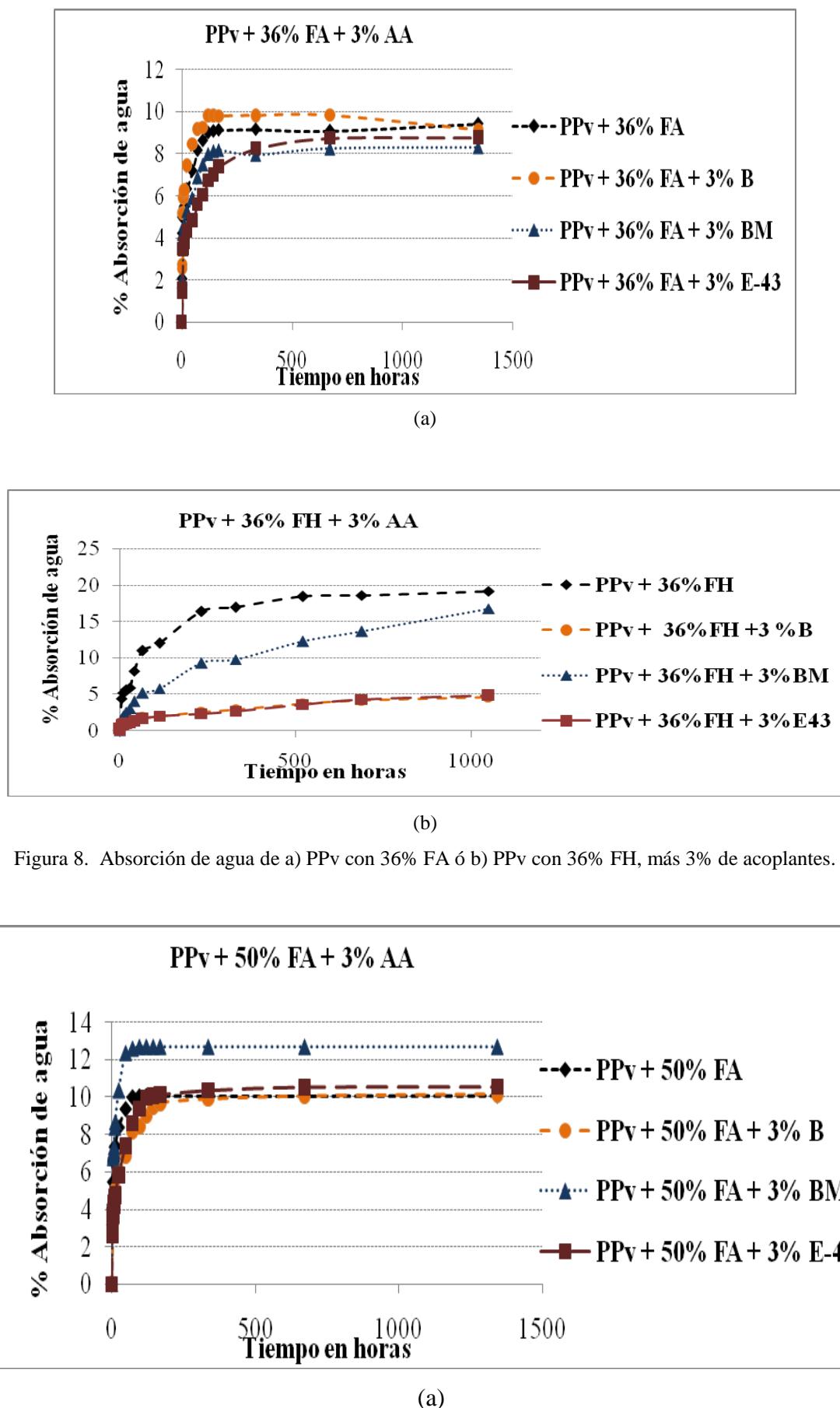
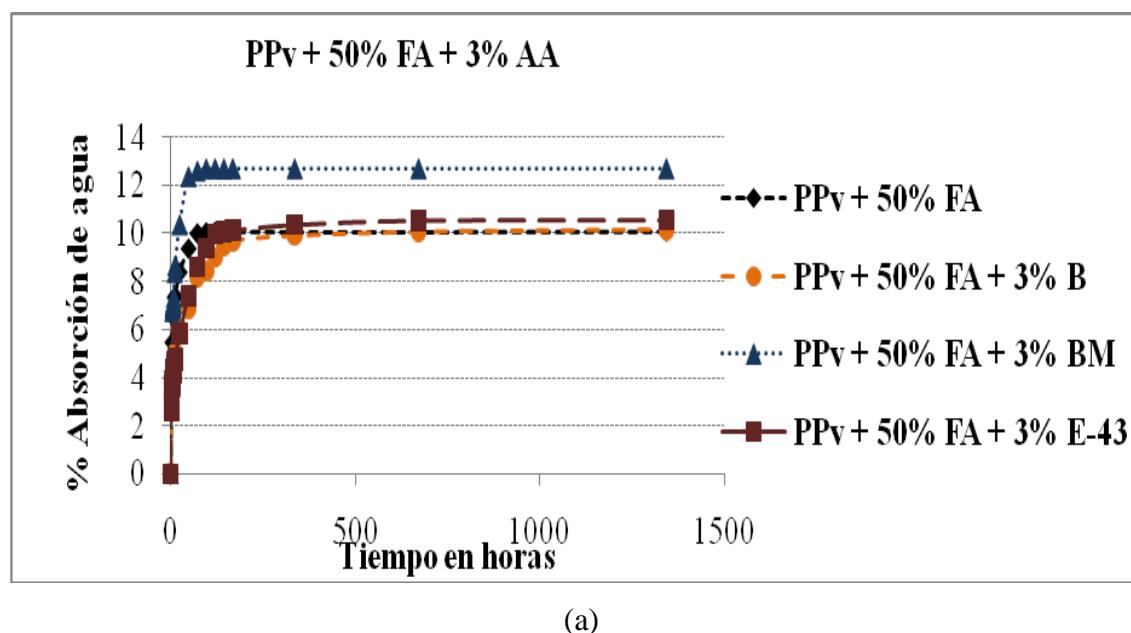
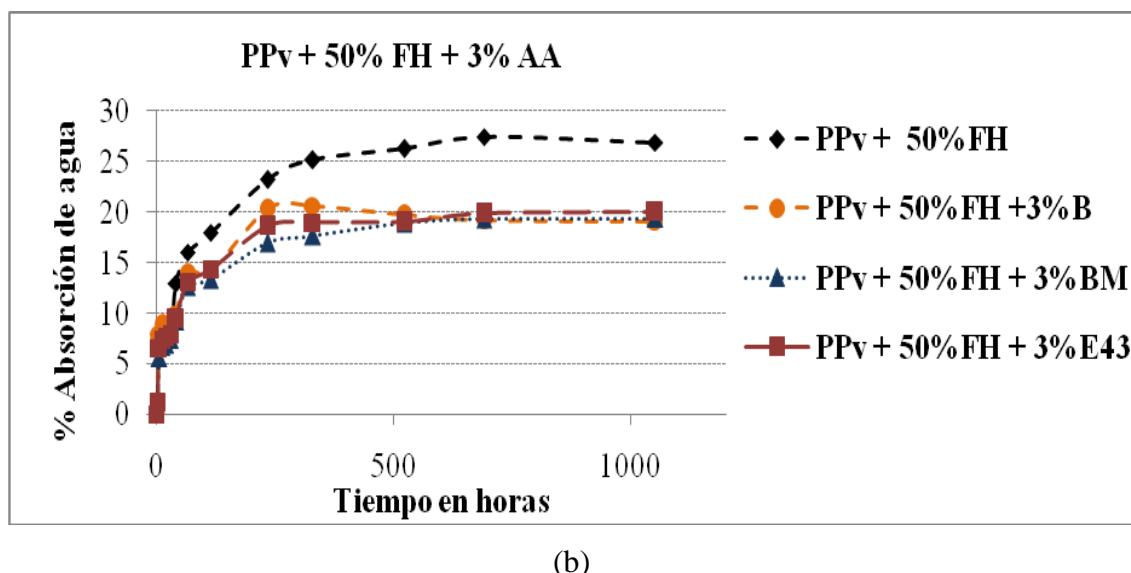


Figura 8. Absorción de agua de a) PPv con 36% FA ó b) PPv con 36% FH, más 3% de acoplantes.

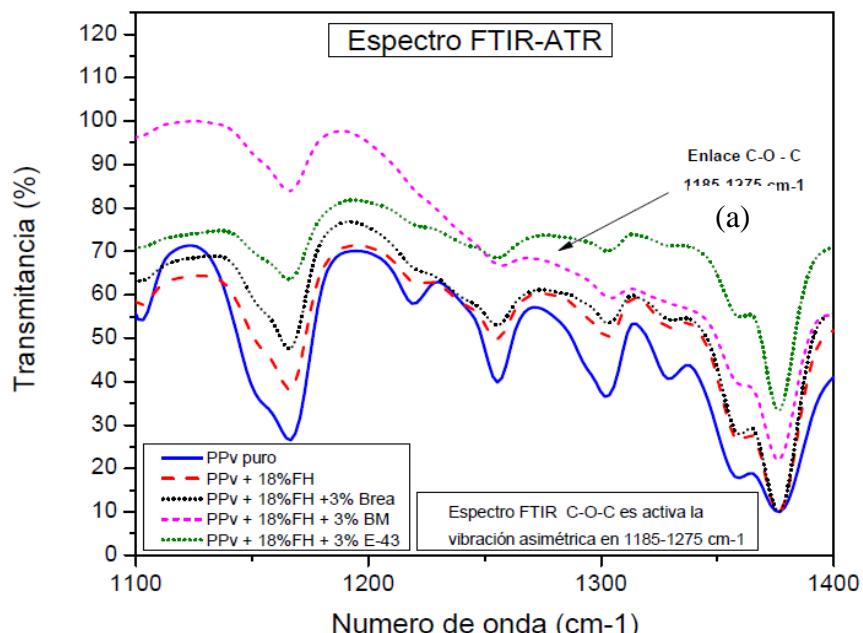




(b)

Figura 9. Absorción de agua de a) PPv con 50% FA ó b) PPv con 50% FH, más 3% de acoplantes.

Espectroscopia FTIR. Uno de los métodos más empleados para evaluar el grado de interacción entre el agente de acoplamiento y la fibra celulósica es a través de pruebas de espectroscopia FTIR para las diversas muestras de materiales reforzados. En los espectros FTIR (Figuras 10 a 12) del polipropileno virgen (PPv) y los materiales reforzados con 18, 36, y 50% de fibra de henequén (FH) y agave (FA) con el 3% de agentes de acoplamiento se puede apreciar en los espectros FTIR la presencia de grupos funcionales por la vibración asimétrica en el pico de $1.185 - 1.275 \text{ cm}^{-1}$ de los enlaces C–O–C de la esterificación, producto de la reacción de los nuevos materiales propuestos como agentes de acoplamiento con la celulosa, lo cual se puede interpretar como una modificación o interacción entre ellos, que está influyendo en los resultados de las propiedades mecánicas evaluadas.



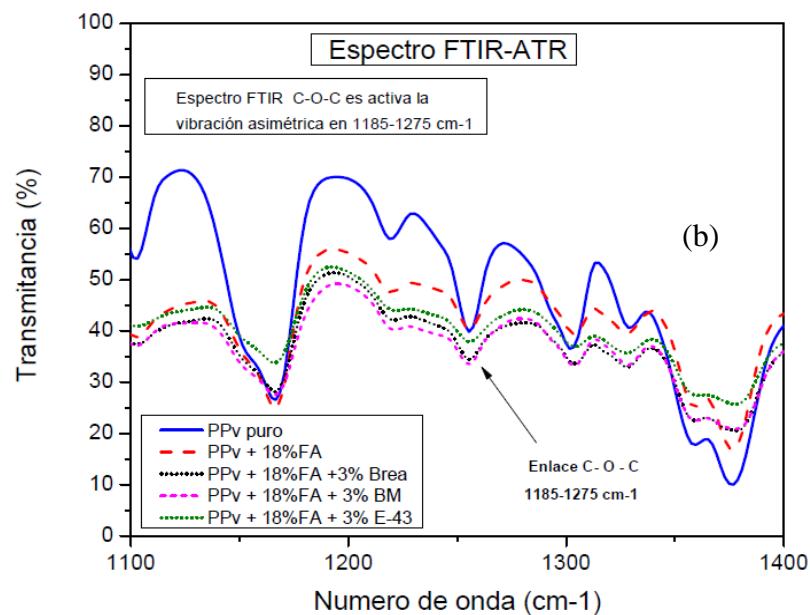
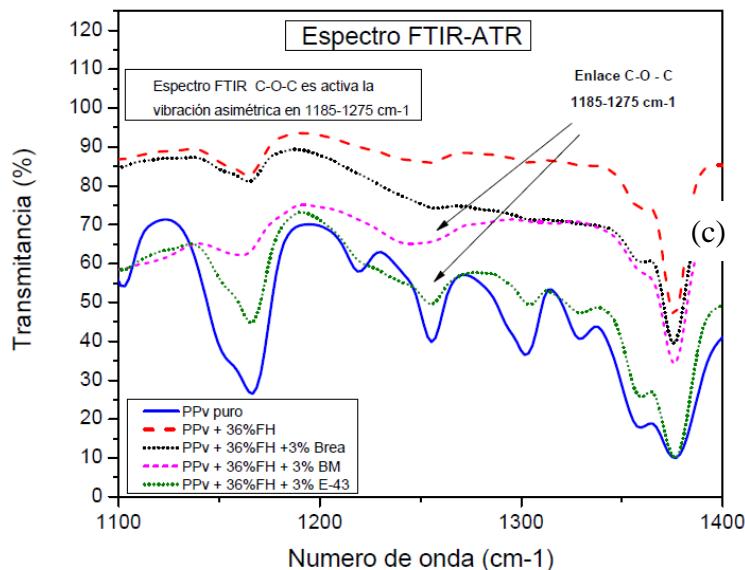


Figura 10. Espectro FTIR de a) PPv con 18% FH, y b) PPv con 18% de FA más 3% de acoplantes.



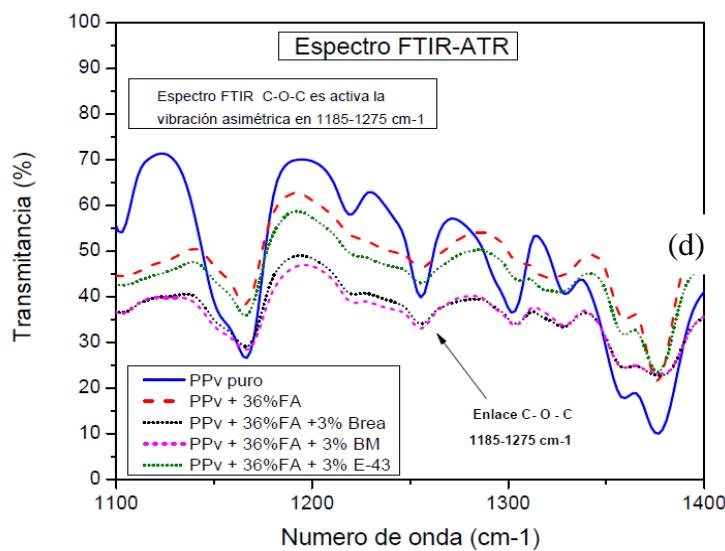


Figura 11. Espectro FTIR de c) PPV con 36% FH, y d) PPV con 36% de FA más 3% de acoplantes.

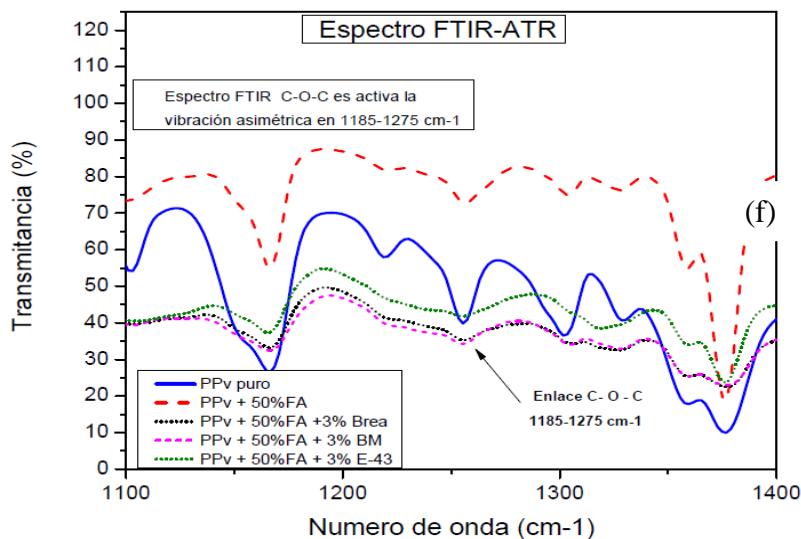
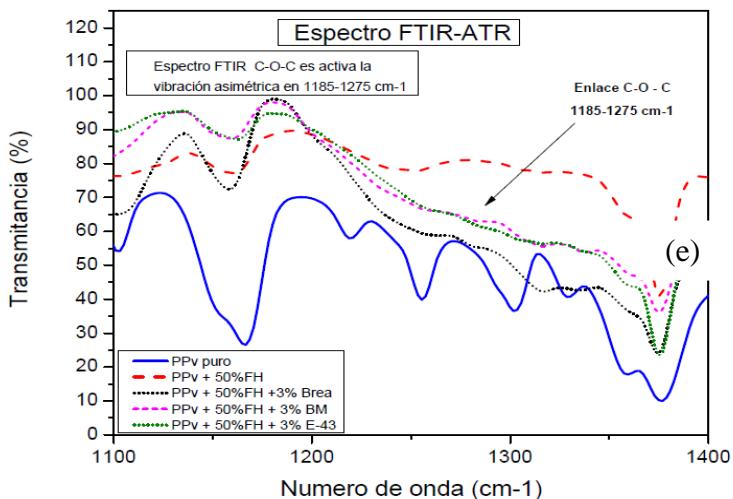


Figura 12. Espectro FTIR de e) PPV con 50% FH, y f) PPV con 50% de FA más 3% de acoplantes.

CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos en las propiedades mecánicas se puede proponer que el uso de la brea maleinizada está influyendo positivamente en la recuperación del módulo de *Young* (E) y del módulo de flexión de los materiales reforzados para contenidos de fibra de 36 y 50%, obteniendo resultados comparables con el agente comercial.

Para algunas formulaciones se obtienen mejores desempeños con la brea maleinizada (BM) que con la brea natural (B), debido principalmente a su mayor peso molecular y a la presencia de los grupos maleico de la misma ya que promueven una interacción con grupos de la fibra mediante enlaces tipo éster. Las propiedades mecánico estáticas reflejan mayor rigidez en los materiales formulados con fibra de henequén (FH) debido a la mayor disponibilidad de grupos funcionales oxhidrilo que en la fibra de agave (FA), lo cual producirá mayor proporción de enlaces tipo éster con los grupos funcionales de los agentes de acoplamiento.

Por lo que para obtener propiedades mecánicas aceptables, el uso de la brea maleinizada (BM), aun por encima de la brea natural (B), como agente de acoplamiento parece ser una buena alternativa para sustituir a los agentes de acoplamiento comerciales de alto costo basados en materiales poliméricos con anhídrido maleico injertado.

Agradecimientos. Se agradece el apoyo recibido de CONACYT por la beca otorgada a *Héctor Pulido González* para realizar sus estudios de *Doctorado en Ciencia de Materiales*.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Taj S, Munawar M, Khan S “Natural fiber reinforced polymer composites”, *J. Proc. Pakistan Acad. Sci.*, **44(2)**, 129 (2007)
- [2] Rowell R, Sanadi AR et al. “Utilization of Natural Fibers in Plastic Composites: Problems and Opportunities”, *Lignocellulosic–Plastics Composites*, 23 (1997)
- [3] Gurram S, Julson JL, Muthukumarappan K et al. “Application of Biorenewable Fibers in Composites”, *Paper Number: MBSK 02–210 An ASAE Meeting Presentation*; Canada; (300), **2**; 1–20 (2002)
- [4] Wolcott M, Englund PK “A technology review of Wood–Plastic Composites”, *Proceedings of 33rd International Particleboard/Composite Materials Symposium*, 103–111 (2005)
- [5] Georgopoulos S, Tarantili PA, Avgerinos E et al. “Thermoplastic polymers reinforced with fibrous agricultural residues”, *J. Polymer Degradation and Stability*, **90(2)**, 303 (2005)
- [6] Ashori A, Nourbakhsh A “Reinforced polypropylene composites: effects of chemical compositions and particle size”, *J. Bioresource technology*, **101(7)**, 2515 (2010)
- [7] Bessadok A, Langevin D, Gouanve F et al. “Study of water sorption on modified Agave fibres”, *J. Carbohydrate Polymers*, **76(1)**, 74 (2009)
- [8] Franco–Marqués E, Méndez JA et al. “Influence of coupling agents in the preparation of polypropylene composites reinforced with recycled fiber”, *Chemical Engineering J.*, **166(3)**, 1170 (2011)
- [9] Botros M “Development of new generation coupling agents for wood–plastic composites”, *Proceedings of Intertech Conference The Global Outlook for Natural and Wood Fiber Composites*; USA; pp 1–15 (2003)
- [10] La Mantia FP, Morreale M “Green composites: A brief review”, *Composites Part A*; **42(6)**, 579 (2011)
- [11] Mohebby B, Ghotbifar A, Kazemi S “Influence of Maleic–Anhydride–Polypropylene (MAPP) on Wettability of Polypropylene/Wood Flour/Glass Fiber Hybrid Composites”, *J. Agr. Sci. Tech.*, **13**, 877 (2011)
- [12] Tajvidi M, Falk RH, Hermanson JC “Effect of Natural Fibers on Thermal and Mechanical Properties of Natural Fiber Polypropylene Composites Studied by Dynamic Mechanical Analysis”, *J. Appl. Polym. Sci.*, **101**, 4341 (2006)
- [13] Sanjuán–Raygoza RJ, Jasso Gstinel CF “Effect of waste agave fiber on the reinforcing of virgin or recycled polypropylene”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, **8(3)**, 319 (2009)